

=====  
УДК 631.152+519.6

**Оперативно уточняющийся прогноз урожайности пшеницы в  
сельскохозяйственных зонах на всей территории России  
на базе имитационной модели продуктивности**

*Баденко В.Л., Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т.*

*Агрофизический научно-исследовательский институт*

**Аннотация**

*В работе представлены результаты разработки информационно-аналитической системы для анализа и оценки потенциальной урожайности основных сельскохозяйственных культур на всей территории Российской Федерации на базе динамического (оперативно уточняющегося) прогноза продуктивности в рамках одного вегетационного сезона с представлением результатов в среде ГИС. В работе представлено описание используемого метода и его апробация в течение вегетационного сезона 2017 года, а в качестве отслеживаемой культуры выбрана яровая пшеница. Прогнозирование урожайности проводилось на основе компьютерных экспериментов по моделированию продукционного процесса в среде специально разработанной информационно-аналитической системы, соединенной с ГИС.*

**Ключевые слова:** ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА, ОПЕРАТИВНО УТОЧНЯЮЩИЙСЯ ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, БАЗЫ ДАННЫХ, ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

**1. Введение**

В настоящее время многие страны усиливают приоритет решения проблемы обеспечения продовольственной безопасности [1], причем эта серьезная задача формулируется и исследуется как в масштабе отдельных государств [2-5], так и для регионов, континентов [6-8] и в целом по миру [9-11]. Кроме того, любое правительство стремится превратить свою страну в импортера продовольствия и экспортировать как можно меньше [12]. Поэтому своевременная и упреждающая оценка продуктивности, в первую очередь, для стратегических зерновых культур, на территории суверенной страны оказывается актуальной задачей со многих точек зрения, в том числе и с геополитической

=====

[13-15]. При этом важно рассмотреть адекватный комплекс прогнозных сценариев для предсказания урожая в текущем вегетационном сезоне в зависимости от меняющихся погодных условий [16-18]. Как показывает практика, для этого следует также учитывать наличие множества сценариев изменения климата [19-21]. В такой постановке необходимо создавать и использовать современные информационно-аналитические системы совместно с прогнозными моделями роста и развития основных сельскохозяйственных культур [22-24]. Кроме того, современные подходы к обеспечению устойчивого развития обуславливают необходимость комплексного обоснования новых адаптивно-ландшафтных систем земледелия, что требует перехода от широко используемых в настоящее время регрессионных (статистически обоснованных) моделей к более точным и адекватным (физически обоснованным) имитационным моделям продуктивности агроэкосистем [25]. Именно комплексная динамическая модель продукционного процесса и прогноза урожая сельскохозяйственных культур должна стать интеллектуальным ядром нового поколения информационно-аналитических систем поддержки решений в земледелии для обширных территорий [26].

Другой проблемой, с которой сталкиваются исследователи при решении проблем, связанных с оценкой урожайности, например, зерновых культур, на территории всей страны, является то, что большинство прогнозных моделей являются «точечными», т.е. дают прогноз для совершенно конкретных значений параметров [27, 28], хотя очевидно, что эти значения меняются даже в пределах одного сельскохозяйственного поля. Поэтому для построения прогнозов по урожайности на территории страны требуется использовать специальные методы пространственного анализа в среде географических информационных систем (ГИС) для трансформации полученных в моделях значений в отдельных точках на пространственные (площадные) объекты [29, 30].

Итак, обзор литературы показывает, что оценка потенциальной урожайности основных сельскохозяйственных культур на всей территории Российской Федерации на базе динамического, т.е. оперативно уточняющегося, прогноза продуктивности, в рамках одного вегетационного сезона с представлением результатов в среде ГИС для анализа является актуальной задачей. В работе представлено описание используемого метода и его апробация в течение вегетационного сезона 2017 года, а в качестве отслеживаемой культуры выбрана яровая пшеница. Прогнозирование урожайности проводилось на

=====

основе компьютерных экспериментов по моделированию продукционного процесса в среде специально разработанной информационно-аналитической системы, соединенной с ГИС.

## **2. Материалы и методы**

### **2.1. Инструментарий исследовательского проекта**

В качестве основного инструмента проведенных компьютерных экспериментов использовался вычислительный комплекс «APEX-AGROTOOL-ГИС». Он представляет собой синтез трех независимых программных продуктов. Два из них представляют собой результат многолетних разработок коллектива лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ [31]. Это динамическая имитационная модель продукционного процесса «AGROTOOL» и платформа автоматизации многофакторных экспериментов и поливариантного расчета произвольных моделей агроэкологических процессов «APEX» [32]. Геостатистическая обработка и визуализация получаемых результатов осуществлялась в программном обеспечении ГИС общего назначения MapInfo, что давало возможность получать оценки для площадных объектов на основе полученных при моделировании значений в точках [33].

Компьютерная динамическая модель продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL, v.3.5, описывает комплекс процессов и явлений в системе «почва – сельскохозяйственный посев – атмосфера» и представляет собой модель третьего уровня продуктивности по классификации де Вита [34]. Последнее означает, что в качестве факторов, лимитирующих потенциальную продуктивность растений, в ней рассматриваются температурный, радиационный и водный режимы, а также уровень азотного питания. С алгоритмической точки зрения динамическая модель AGROTOOL представляет собой алгоритм рекуррентного пересчета многомерного вектора состояния агроэкосистемы, компонентами которого выступают абиотические и биометрические характеристики (температура и влажность почвы по слоям, биомассы органов растения, содержание основных питательных элементов в почве и растительных тканях и т.д.). В качестве базового временного шага модели (частота пересчета вектора состояния) приняты одни календарные сутки, хотя для ряда процессов (например, для фотосинтеза) используются более мелкие шаги. Модель включает в себя следующие

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====  
блоки и алгоритмы, представляющие биофизическое описание основных процессов в агроэкосистеме [26, 31]:

- Агрометеорологический блок. Получение суточных метеоданных из базы данных информационной поддержки модели и вычисление текущих характеристик фитоклимата в загущенном посеве.
- Перехват радиации посевом, фотосинтез, дыхание и метаболизм растений в темное время суток.
- Динамика влаги в слое почвы. Перетоки воды между почвенными слоями, транспирация и физическое испарение, поглощение воды корневой системой растений.
- Подмодель фенологического развития растений, основанная на модифицированной концепции физиологического и биологического времени.
- Модель роста, органогенеза и формирования урожая растений с учетом физиологических стрессов по влаге, температуре и азоту.
- Алгоритм расчета транспорта и трансформации азотных соединений в почве и углеродно-азотного баланса в растении.
- Модули учета основных агротехнологий (сев, предпосевное внесение удобрений, азотные подкормки, полив, уборка урожая).

Многолетний опыт адаптации модели AGROTOOL к широкому спектру почвенно-климатических условий различных регионов России, бывшего СССР и ряда зарубежных стран демонстрирует высокую степень адекватности данной модели и ее потенциальную востребованность как в теоретических исследованиях [18, 20], так и в качестве интеллектуального ядра компьютеризированных систем поддержки принятия технологических решений в практическом растениеводстве [22, 26].

Система поливариантного расчёта «АРЕХ» представляет собой универсальную оболочку или среду, которая позволяет подключить к ней произвольную динамическую модель продукционного процесса, сформировать множество наборов входных данных для этой модели (сценарии или варианты), произвести расчёты в пакетном режиме, а потом сравнить результаты модельных расчетов в разрезе проварьированных факторов [27, 32]. Логика платформы «АРЕХ» основана на использовании схемы предопределённых факторов. При таком подходе конкретные массивы входной информации, с которыми работает любая подключенная к системе АРЕХ динамическая модель, могут иметь

.....  
*Электронный научно-производственный журнал*  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====  
произвольный формат и структуру, допускающие оформление в виде набора таблиц реляционной базы данных. Однако каждая такая таблица должна быть отнесена к одному из шести заранее определенных факторов, или информационных доменов, характерных для моделируемой предметной области: «почва», «погода», «культура», «технология», «местность» и «исходное состояние» [35]. Подобные соглашения позволяют на уровне логики универсальной системы поливариантного расчёта «АРЕХ» получить функционал и программно реализовать алгоритмы, характерные для того или иного домена предметной области, не привязываясь к структуре данных этого домена, специфичных для конкретной модели. В частности, для проводимых исследований использовались predetermined факторы «почва», «местность» и «погода», общей характеристикой которых в описываемом исследовании выступало наличие общей географической привязки.

Структура данных для любой подключенной к системе АРЕХ модели выглядит следующим образом [35]. Каждый predetermined фактор соответствует одной так называемой корневой таблице. Это таблица градаций факторов, которая содержит только идентификатор и текстовое описание каждой градации соответствующего фактора для каждой модели. Все данные, структура которых специфична для конкретной модели, представлены в виде набора дочерних таблиц, имеющих внешний ключ на корневую таблицу. Кроме того, «моделеспецифичные» корневые таблицы факторов «почва», «местность» и «погода» имеют дополнительные связи со специальными таблицами «общего назначения», в которых хранятся данные о «моделенезависимых» почвенных контурах, реперных точках и опорных погодных сценариях. Так, каждая градация фактора «местность», вне зависимости от конкретной подключенной модели, может быть связана с точкой либо полигоном на поверхности Земли (общая пространственная/географическая привязка). В рамках проведенного исследования эти точки/полигоны представляют собой базовые расчетные точки и административные районы Российской Федерации, соответственно. К каждой градации фактора «почва» привязывается контур используемой почвенной карты, который, в свою очередь, имеет связь с географической привязкой predetermined фактора «местность». Аналогично с базовыми точками географической привязки фактора «местность» связаны сценарии опорной погоды. Всё это позволяет при формировании проекта вычислительного компьютерного эксперимента привязывать исходные данные, специфичные для конкретных моделей продукционного

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

процесса, к неспецифичным пространственным/географическим (картографическим). Принципиальная структура информационной модели системы представлена на рис. 1.

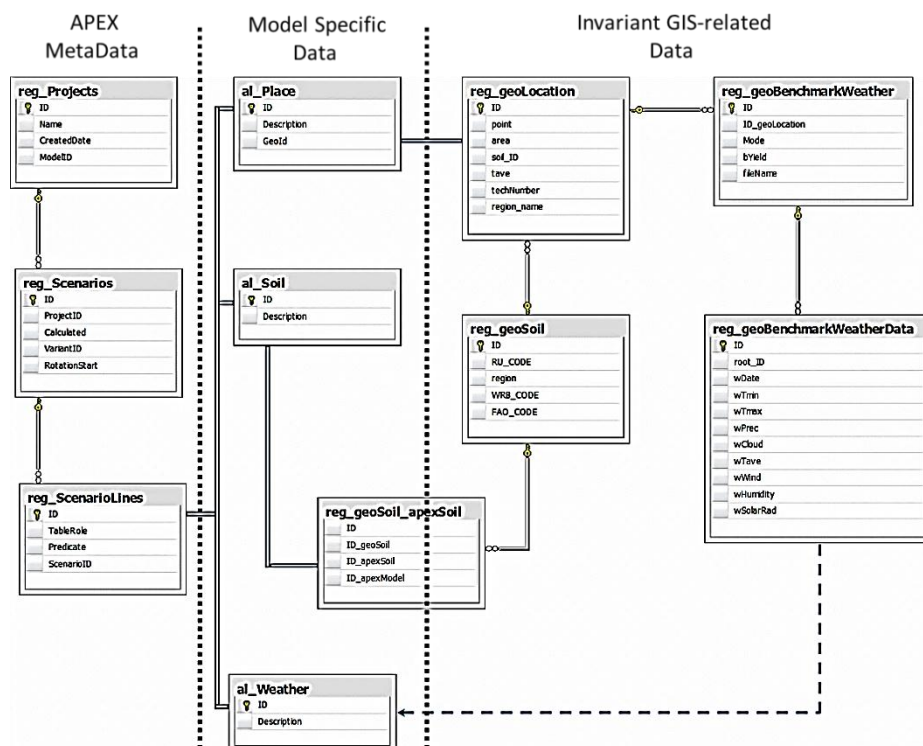


Рис. 1. Зависимости между метаданными, модельными данными и инвариантными данными с геоинформационной привязкой в реляционной базе данных системы «АРЕХ»

Такой подход позволяет после проведения модельных расчётов (с использованием одной или нескольких альтернативных моделей) и сохранения их в базе данных выполнить экспорт интересующих результатов (урожай, сроки наступления фенофаз) в формате базы данных ГИС и представить этот результат в наглядном виде, например, в среде ГИС в виде тематической карты текущей прогнозируемой продуктивности.

Интеграция со средой ГИС обуславливается наличием геопространственной привязки в соответствующих атрибутах базы данных АРЕХ, что позволяет после импорта таблицы в ГИС провести геокодирование, в результате чего создается слой с точечными объектами. У этих объектов местоположение определяется по колонкам «широта», «долгота», а остальные атрибуты – результатами моделирования. Получение непрерывного поля пространственного распределения одного определенного атрибута из точечных объектов реализуется с помощью стандартных функций, входящих в состав программного обеспечения ГИС. Эти функции обычно используют построение

=====  
триангуляции Делоне или полигонов Тиссена, а также интерполяцию на основе построения сетки из квадратных ячеек. В результате нескольких экспериментов наиболее подходящим для данного исследования оказался последний подход [29]. При визуализации пространственного распределения прогнозируемой урожайности в качестве базовых слоев использовались слои административного деления России и гидрографии. Для построения тематических карт прогнозируемой урожайности рекомендуется использовать 10 градаций с переходом от красных оттенков для большого урожая к зеленым оттенкам для малых урожаев.

## **2.2. Формирование наборов исходных данных и методика расчетов**

Географический фактор. Для организации массовых прогнозных расчетов в течение текущего вегетационного сезона для всей территории Российской Федерации был создан набор базовых точек для проведения соответствующих расчетов в пакетном режиме. Изучение статистических данных РОССТАТА по урожайности яровой пшеницы для субъектов Российской Федерации за период с 1998 по 2015 годы позволило выделить 69 зерносеющих регионов России, которые и были выбраны для дальнейшего анализа. Далее с помощью приложения Google Maps было проведено визуальное исследование спутниковых снимков Земли с целью обнаружения и распознавания характерных сельскохозяйственных территорий внутри каждого из этих субъектов РФ. Высокая степень детализации снимков позволяла с достаточной достоверностью отсечь леса, реки, озера, населенные пункты, дороги и выделить отдельные растениеводческие хозяйства и даже конкретные поля. В результате внутри каждого региона (субъекта РФ), в зависимости от его площади, протяженности, рельефа местности и значимости в производстве яровой пшеницы, были отобраны от одной до шести представительных (опорных) точек на возделываемых территориях произвольно выбранных хозяйств и определены их координаты (рис. 2) с целью однозначной географической привязки и связи с сопутствующими тематическими геоинформационными ресурсами, такими как почвенная карта и ближайшая метеостанция сети Всемирной Метеорологической Организации (ВМО).

В результате для отобранных регионов РФ была сформирован набор, состоящий из 151 базовой точки, каждая из которых находилась на сельскохозяйственном поле того или иного сельскохозяйственного предприятия России. Территориальное распределение

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

базовых точек изображено на рис. 3. Именно для этих точек проводились массовые расчеты имитационной модели продуктивности AGROTOOL с целью формирования оперативно уточняющегося прогноза урожайности яровой пшеницы на территории России.

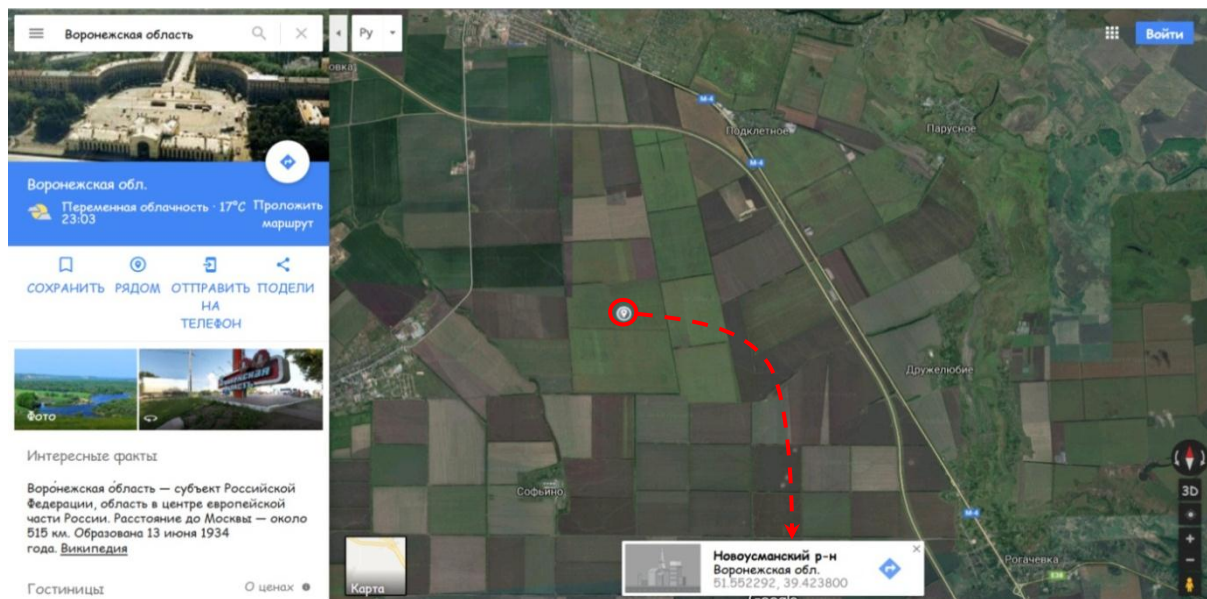


Рис.2. Выбор хозяйств и определение координат базовых точек

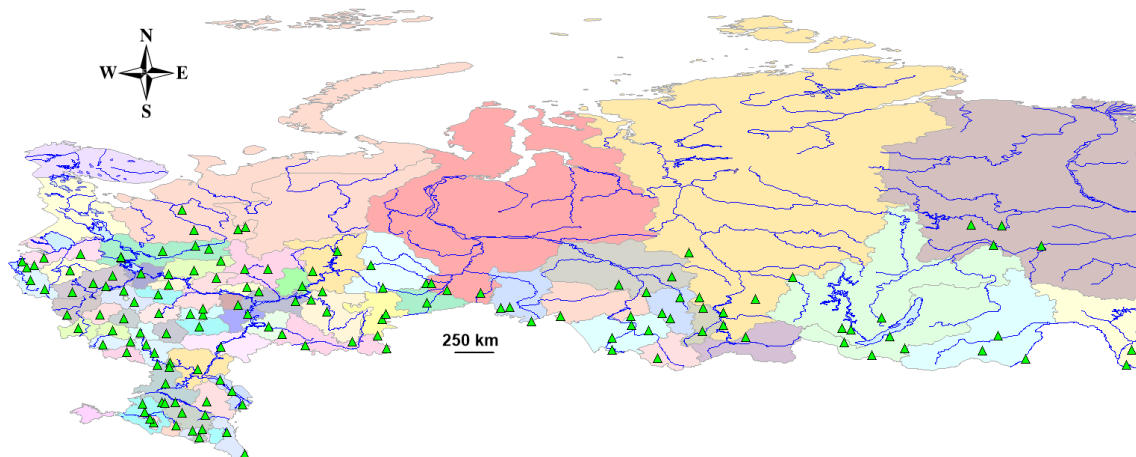


Рис.3. Базовые точки проекта расчета оперативно уточняющегося прогноза урожайности яровой пшеницы по регионам России

Погодный фактор. Одной из принципиальных проблем, которые требовалось разрешить в рамках данного исследования, является информационная поддержка проводимых расчетов входной метеорологической информацией. Действительно, в отличие от простейших агрометеорологических прогнозов, динамическая имитационная



Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

модель агроэкосистемы довольно «капризна» в плане требований к полноте и качеству входных данных о погоде: для получения конечного результата необходимо предоставить полный набор суточных данных о погоде за весь период расчета (даже, если момент уборки урожая находится в будущем). При этом, естественно, реальные сведения о погоде в данной точке если и известны, то только по настоящий момент. Для разрешения этого противоречия и используется методика оперативно уточняющегося прогноза [36]. При этом для каждой базовой географической точки заранее формируются три сценария временной динамики суточных погодных метеоданных на весь период вегетации. Они соответствуют условно «хорошему» (с точки зрения достижимой урожайности) сценарию, условно «плохому» и условно «среднему», или наиболее характерному варианту годового хода погоды. Таким образом, вместо актуальных метеоданных, которые для оперативного прогноза оказываются всегда неполными, используются полностью известные данные из прошлых реализаций. Но эти опорные или реперные сценарии представляют собой лишь основу для оперативно уточняющегося прогноза. Периодически во всех вариантах расчета опорные данные заменяются актуальными суточными погодными метеоданными, становящимися известными с течением физического времени. В результате в каждый момент времени пересчета оперативно уточняющегося прогноза получается, что до настоящего момента используются актуальные погодные метеоданные, а будущие отрезки вегетационного периода имитируются «веером» трех возможных реализаций, отвечающих «хорошему», «плохому» и «среднему» году, соответственно. Схематически процесс пополнения данных в ходе процедуры оперативно уточняющегося прогноза показан на рис. 4.

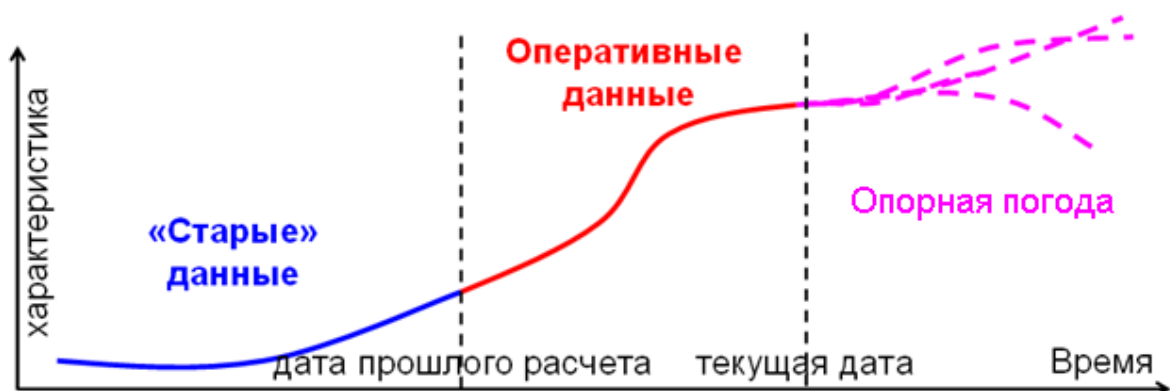


Рис. 4. Процесс пополнения данных в ходе процедуры оперативно уточняющегося прогноза

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

Итак, три опорных сценария развития «будущей погоды»: условно «хороший», «плохой» и «средний» варианты, – выступают в роли статистических повторностей в проводимом вычислительном компьютерном эксперименте. Они позволяют учесть временную неоднородность распределения суточных погодных метеоданных и на основе неё предсказать «вилку» прогнозируемой урожайности в ситуации принципиальной неопределённости входных данных. Таким образом, метеорологическое информационное обеспечение описываемого вычислительного эксперимента предполагало наличие для каждой базовой точки как трех predetermined характерных сценариев развития погоды на весь вегетационный период, так и механизма оперативного получения фактической погоды и, возможно, краткосрочного синоптического прогноза.

Для этих целей были задействованы Интернет-ресурсы и сервисы. Так, процедура формирования predetermined «опорных» сценариев погоды состояла из следующих этапов. Прежде всего на сайте Единого Интернет-портала РОССТАТ была осуществлена выборка данных по урожайности яровой пшеницы (в расчете на убранную площадь) для всех субъектов Российской Федерации за период с 1998 по 2015 годы. Проанализировав полученные данные за этот период, для каждого из 69 анализируемых субъектов Российской Федерации были выбраны по три года с минимальным, средним и максимальным показателями урожайности. Именно эти сезоны были взяты в качестве опорных (реперных) лет для составления «плохого», «среднего» и «хорошего» сценариев развития погоды в соответствующих регионах. Входными метеорологическими характеристиками, используемыми в модели AGROTOOL, являются суточные величины минимальной и максимальной температуры воздуха, осадков и облачности. Для получения фактических архивных массивов данных о погоде в выбранные сезоны нами использовались Интернет-ресурсы открытого доступа Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [37] и ООО «Расписание Погоды» [38]. Для каждого региона по территориальному принципу определялась ближайшая метеостанция сети ВМО. Если сервис ВНИИГМИ-МЦД содержал архивную информацию с этой станции, то формировался запрос на выборку погодных метеоданных за нужные опорные годы. Поскольку сервис ВНИИГМИ-МЦД располагает архивной информацией не по всем метеостанциям, а также предоставленная информация не всегда была исчерпывающей, то

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====

дополнительно был задействован сервис ООО «Расписание Погоды». Специфика этого ресурса заключается в том, что он функционирует, начиная с конца 2004 года и, соответственно, имеет в своем распоряжении архивную информацию по каждой станции не более, чем 15-летней давности. Независимо от источника получения исторических данных о фактической погоде для приведения скачанных файлов метеоданных к формату входных данных AGROTOOL и сериализации этих сценариев в базе данных системы АРЕХ потребовалось написание и применение специальной программной утилиты – парсера и преобразователя форматов метеорологических данных.

Таким образом, для каждого региона, участвующего в проекте, были отобраны от одной до трех метеостанций и с помощью архивов подготовлены 207 файлов с фактическими погодными данными за опорные годы, которые впоследствии были использованы в качестве альтернативных сценариев развития погоды за оставшийся будущий промежуток периода вегетации.

Процедура пополнения данных о фактической погоде и кратковременном синоптическом прогнозе для каждой базовой точки заключалась в обращении к выделенному Интернет-сервису. Нами для этой цели использовался специальный Web-сервис, реализованный в рамках Интернет-проекта «Поля России», разрабатываемого московской компанией jtSoft [39]. Одним из технических составляющих этого проекта (подробнее он будет описан ниже) является база данных текущих погодных реализаций для достаточно частой регулярной сетки географических точек на территории России, периодически пополняемая путем пакетных запросов к платным сервисам портала [www.worldweatheronline.com](http://www.worldweatheronline.com) [40]. Технически процесс «освежения» данных об актуальной погоде заключался в следующем. В инвариантном геоинформационном домене базы данных среды АРЕХ для каждой базовой точки хранится четыре набора погодных сценариев: полные наборы записей суточных метеорологических характеристик для условно «хорошего», «плохого» и «среднего» года, а также актуальная погода до текущей даты расчета. В «моделеспецифичных» таблицах погодного фактора, используемых непосредственно для модельных расчётов, хранится погода, скомбинированная из актуальной погоды, прогноза, который также может быть получен с погодного сервера на несколько дней вперёд, и недостающая погода, взятая из опорных годов-аналогов. Перед выполнением очередного расчета оперативного прогноза (в рамках

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====  
настоящего исследования подобный пересчет выполнялся примерно два раза в неделю) производятся автоматизированные процедуры пополнения погоды (обращение к выделенному информационному сервису и дописывание новой порции актуальной погоды в соответствующие инвариантные таблицы) и переформирования расчетных сценариев (сшивание фактической погоды, полученного прогноза и вариантов будущей погоды из годов-аналогов). При этом с течением времени в данных, используемых для модельных расчётов, суточных погодных метеоданных, взятых из опорных сценариев, становится всё меньше, и разброс получаемых результатов уменьшается.

Почвенный фактор. В качестве единственного источника данных о характеристиках почвенного покрова для расчетных точек использовалась геоинформационная база данных (БД) по почвам Российской Федерации, созданная специалистами Почвенного института им. Докучаева и опубликованная Министерством сельского хозяйства России на портале Единого Государственного Реестра Почвенных Ресурсов России (ЕГРПР) [41] в виде интерактивной карты. Эта карта представляет собой набор географических контуров, покрывающих всю территорию РФ, каждый из которых привязан идентификатором к одной из выделенных 205 почвенных разностей согласно исторически сложившейся в России кодификации почв [42, 43]. Кроме того, БД почв ЕГРПР содержит семантическую часть, включающую диагностику и описание почв, которые реализуются через название почв и характеристики объектов: «Горизонт > Профиль», а также сведения о результатах обработки данных многочисленных полевых экспериментов (почвенных разрезов), выполненных в разное время в соответствующих контурах. К сожалению, данные последнего типа, представленные в БД ЕГРПР, обладают слабой структурированностью, неполнотой, внутренней противоречивостью и не были подвергнуты даже самой первичной обработке (в частности, величины одной природы из разных экспериментов даже не приведены к единой размерности). Их непосредственное использование для научных и практических целей не просто затруднено, но фактически невозможно. Поэтому мы были вынуждены в нашем проекте ориентироваться не на данные фактических экспериментов, а на содержащиеся в семантической части БД ЕГРПР сведения о характерных средних показателях каждой почвенной разности, хотя и эти сведения представлены в БД ЕГРПР в крайне неудобном, неструктурированном и разрозненном виде. Их перевод в формат, пригодный для использования в описываемом

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====

вычислительном эксперименте, оказался исключительно трудоемкой процедурой, состоящей из следующих этапов. Сначала данные по всем 205 почвенным разностям были вручную перенесены в единую электронную таблицу, содержащую минимальный набор определяющих характеристик (гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества и т.д.) с привязкой к соответствующей глубине слоя почвы. Для дальнейшей работы с полученной таблицей была разработана специальная программная утилита, в которой последовательно выполнялись следующие операции:

- Исключение из рассмотрения верхних слоев растительного опада (в базе данных ЕГРПР содержатся сведения о природных (лесных, луговых и т.д.) почвах, в то время как для сельскохозяйственных почв слой естественного опада практически отсутствует).
- Перерасчет характеристик гранулометрического состава от процентного содержания частиц по размерам к процентному содержанию песка, глины и ила.
- Перерасчет профиля характеристик (интерполяция значений, введенных для произвольных слоев, к регулярным глубинам с шагом 10 см).
- Обращение к внешней программной утилите Rosetta [44], в которой реализован функционал педотрансферных функций – вычисления основных гидрологических констант почвы (минимальная гигроскопичность, влажность завядания, полевая влагоемкость, общая пористость) по неполным и косвенным данным (гранулометрический состав, тип почвы и т.д.). Мы благодарим создателей программы Rosetta за консультации и предоставленную возможность использовать расширенный программный интерфейс этой свободно распространяемой библиотеки для осуществления соответствующих расчетов в пакетном режиме.
- Вычисление специфических почвенных гидрофизических характеристик (коэффициенты в аппроксимации кривой водоудерживания функцией Хаверкампа и коэффициент гидравлической проводимости), которые используются для описания водного транспорта и режима почвы в модели AGROTOOL.
- Запись полученных сведений в базу данных среды поливариантного анализа APREX как инвариантных таблиц характерных параметров 205 почвенных разностей согласно российской системе классификации.
- Создание для каждой включенной в проект базовой точки уникальной

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====

градации фактора «почва» для модели AGROTOOL и установление ее логической связи с соответствующей «опорной» почвенной разностью посредством специальной «расшивочной» таблицы reg\_geoSoil\_apexSoil (см. рис. 1). Для установления подобной связи использовался факт нахождения точки с данными координатами в том или ином регионе по данным о пространственной привязке из ЕГРПР.

Факторы культуры и технологии. Проект описываемого вычислительного эксперимента предполагает выполнение расчетов для территории всей Российской Федерации. Естественно, при этом наблюдается существенная вариация почвенно-климатических условий возделывания сельскохозяйственных культур, что, в свою очередь, приводит к серьезным различиям в агрономической практике выращивания одной и той же культуры в разных регионах РФ. Таким образом, для адекватности получаемых результатов при расчете продукционного процесса для конкретной базовой точки необходим учет локально-специфических особенностей адекватно районированного сорта и применяемой агротехнологии.

Сортовая адаптация яровой пшеницы к региону выращивания в рамках описываемого исследования учитывалась путем введения в рассмотрение условных разновидностей или псевдо-сортов, которые отличались значениями числовых параметров модельного представления культуры, отвечающих за ее скороспелость и засухоустойчивость. Для каждого фактора было принято решение ограничиться двумя градациями, то есть всего использовалось четыре разновидности:

- Условный интенсивный сорт центральной селекции (слабо резистентная к засухе скороспелая пшеница).
- Условный интенсивный сорт южной селекции (слабо резистентная к засухе позднеспелая пшеница).
- Условный засухоустойчивый сорт центральной селекции (устойчивая к засухе скороспелая пшеница).
- Условный засухоустойчивый сорт южной селекции (устойчивая к засухе позднеспелая пшеница).

Можно заметить, что введение в рассмотрение подобных условных или виртуальных разновидностей представления сельскохозяйственных культур в математической модели полностью отвечает концепции так называемых *идеотипов*,

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

которая в настоящее время активно используется в компьютеризированных системах поддержки решений в селекции [45].

Аналогичным образом были выделены несколько характерных описаний локально адаптированных агротехнологий, характерных для конкретных почвенно-климатических зон. При этом принципиальным отличием одной модельной технологии от другой выступали сроки сева яровой пшеницы. В рамках проекта для задания даты сева были условно выделены 9 технологий, которые позволяют охватить варианты от самого раннего до позднего сева. В нашем проекте эти даты варьируются в интервале от 10 апреля до 1 июня.

Таким образом, структура расчетного проекта для АРЕХ оказалась представлена 151 базовой точкой. Каждая точка имеет географическую привязку и однозначно связана с градациями фактора «почва» (содержит указатель на свою почвенную разность), фактора «культура» (соответствующий идеотип пшеницы) и фактора «технология» (условная дата сева). Соответствие этих «сцепленных» факторов расчета приведено в таблице 1. В качестве повторностей расчета для каждой конкретной точки используются три варианта массива погодных данных, выбранные в качестве опорных сценариев развития метеоусловий. Таким образом, единичный расчет проекта состоит из последовательного прогона модели в АРЕХ по 453 сценариям.

Таблица 1. Перечень расчетных вариантов в компьютерном эксперименте

Номер точки	Широта	Долгота	Регион	Дата сева (норматив)	Идеотип культуры
1	50.826	37.626	Белгородская область	15.04	Пшеница_засухоустойчивая_южная
2	52.996	33.262	Брянская область	15.04	Пшеница_засухоустойчивая_северная
3	56.045	40.498	Владимирская область	1.05	Пшеница_интенсивная_северная
4	50.781	40.144	Воронежская область	15.04	Пшеница_засухоустойчивая_южная
5	51.552	39.423	Воронежская область	15.04	Пшеница_засухоустойчивая_южная
6	49.674	40.461	Воронежская область	15.04	Пшеница_засухоустойчивая_южная
7	56.932	41.453	Ивановская область	1.05	Пшеница_интенсивная_северная
8	54.272	35.238	Калужская область	1.05	Пшеница_интенсивная_северная
...	...	...	...	...	...

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

Номер точки	Широта	Долгота	Регион	Дата сева (норматив)	Идеотип культуры
44	46.41	44.872	Республика Калмыкия	10.04	Пшеница_засухоустойчивая_южная
45	45.459	39.248	Краснодарский край	10.04	Пшеница_интенсивная_южная
46	44.825	39.741	Краснодарский край	10.04	Пшеница_интенсивная_южная
47	46.191	39.051	Краснодарский край	10.04	Пшеница_интенсивная_южная
...	...	...	...	...	...
144	47.665	135.133	Хабаровский край	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
145	48.407	135.32	Хабаровский край	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
146	47.305	134.286	Хабаровский край	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
147	46.781	134.225	Хабаровский край	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
148	51.029	128.834	Амурская область	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
149	49.202	130.203	Амурская область	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
150	49.679	128.295	Амурская область	1.05	Пшеница_интенсивная_южная
151	48.675	132.991	Еврейская АО	1.05	Пшеница_интенсивная_южная

### 3. Результаты и обсуждение

Представленный метод был апробирован на примере вегетационного периода 2017 года для яровой пшеницы в среде APEx согласно общей методике, изложенной в [46]. Моделирование проводилось в 151 базовой точке, как описано в предыдущем разделе. В ходе апробации полный пересчет прогнозируемой урожайности в этих точках повторялся каждые 3-4 дня с учетом новой части фактических метеорологических данных и возобновленного краткосрочного прогноза погоды. Входные метеорологические данные до конца вегетационного периода были синтезированы путем подстановки значений из тестовых сценариев погоды, образующих пучок траекторий для будущей динамики посевов, как описано выше. Каждый такой прогноз через операции экспорта/импорта переносился в среду ГИС. При этом к каждой базовой точке добавлялись атрибуты, содержащие дату очередного прогноза и соответствующую урожайность. Далее в среде ГИС по значению атрибута урожайности строилась тематическая карта пространственного распределения урожайности в виде раstra, в каждой ячейке которого урожайность рассчитывалась путем интерполяции значений соседних базовых точек. Т.к. такая процедура повторялась каждые 3-4 дня, то в конце апробации был получен набор тематических карт на каждую дату прогноза. В результате, в частности, появилась



Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

возможность сделать из соответствующих изображений фильм, в котором кадрами являлись тематические карты, построенные в последовательные моменты прогнозов. Такой фильм является очень наглядной демонстрацией динамики изменения прогнозов урожайности.

Избранные результаты апробации представлены на рис. 5.

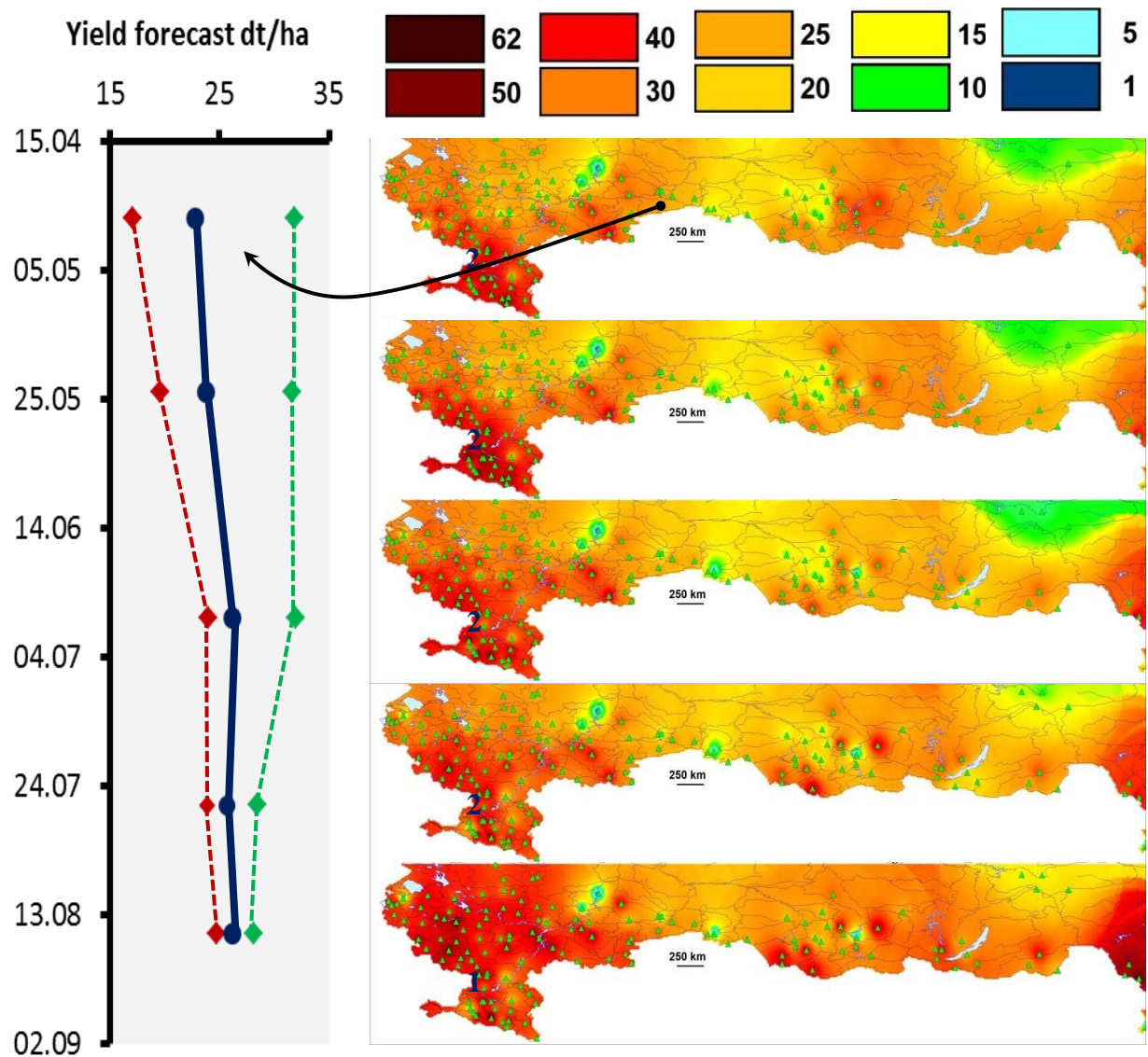


Рис. 5. Динамически скорректированный прогноз урожайности яровой пшеницы в сезоне вегетации в 2017 году для конкретного местоположения (левая часть) и в масштабе России (правая часть, средние значения). Зеленые треугольники – базовые точки

Можно видеть, что предлагаемая методика действительно позволяет оценить перспективы урожая в реальном времени как во временном, так и географическом

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====  
аспектах. Метод позволяет анализировать эволюцию ожиданий относительно будущей доходности в течение вегетационного периода (т. е. для разных дат прогнозирования) для всех базовых точек вместе (тематическая карта среднего урожая в правой части рисунка) или, более подробно, динамику прогнозируемой средней урожайности, доверительный интервал урожайности для любой конкретной базовой точки (в левой части рисунка представлен график для базовой точки в Оренбургской области).

Разумеется, предлагаемая методика динамически скорректированного прогноза продуктивности в рамках долгосрочного численного эксперимента требует временных и вычислительных ресурсов. В то же время применение динамической модели урожая вместо упрощенных регрессионных моделей должно значительно повысить точность и уверенность прогноза. Можно заключить, что описанное исследование полностью лежит в русле наметившейся тенденции по существенному расширению традиционной сферы применения «одноточечных» динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных посевов, а именно – к их использованию в проектах большого временного и пространственного масштаба [22]. Перечислим коротко некоторые вызовы и направления перспективных исследований в этом направлении.

1. Одной из важных черт современных систем автоматизации компьютерного эксперимента, подобных описанной выше среде APЕХ, выступает возможность интеграции с ними по единой схеме произвольных моделей из рассматриваемой предметной области. Таким образом, наряду с «поливариантностью», они могут поддерживать и «полиmodelность» расчетов. Представляется крайне интересным осуществлять множественные прогнозные расчеты продуктивности для крупных территорий, ориентируясь не на единственную модель продуктивности (которая характеризуется специфическим характером учета или неучета различных факторов), а одновременно на несколько альтернативных моделей от разных коллективов разработчиков. Например, подобные ансамблевые расчеты с комплексированием полученных результатов широко используются в теоретической климатологии [47]. При этом данные реанализа показывают, что точность предсказания «коллективным разумом» в целом почти всегда оказывается выше, чем для самой лучшей отдельной модели.

2. Поддержка принятия технологических решений является даже более значимой целью создания прикладных моделей, нежели прогноз. Таким образом, естественным

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====

расширением описанного проекта является его развитие от прогнозирующей до советующей системы. При этом в модельных расчетах появляется дополнительная «степень свободы». Наряду с естественным варьированием географической привязки и необходимым для получения представительных статистических выводов варьированием будущей погоды необходимо рассматривать альтернативные сценарии текущих и будущих управляющих воздействий на агроэкосистему с целью выбора из них наиболее выгодного варианта. Понятно, что при такой схеме проактивного, то есть основанного на модельных прогнозах (упреждающего) управления производственным процессом на больших площадях, число требующих оперативного расчета вариантов возрастает на несколько порядков. Персональный компьютер в этом случае уже никак не может считаться адекватным инструментом проведения расчетов, и решение следует искать в современных информационных технологиях и возможностях современной вычислительной техники.

3. Для обеспечения эффективности выполнения множественных расчетов необходимо задействовать современные механизмы параллельных и распределенных вычислений. Действительно, сущность вычислительного проекта в данном случае состоит в многократном «прогоне» одной и той же модели с разными наборами входных данных. Количество подобных элементарных прогонов в серьезном проекте может быть очень велико (достигать нескольких миллионов), но, поскольку все они независимы друг от друга, то могут выполняться параллельно. Первым шагом в этом направлении может быть использование многопроцессорной техники и суперкомпьютеров, а еще более продвинутым подходом, не требующим привлечения специализированных аппаратных средств, – организация распределенного вычислительного кластера на базе облачных вычислений на множестве рабочих станций в глобальной сети.

4. Наконец, немаловажным аспектом прикладных научных разработок является методика их представления широкому кругу потенциальных пользователей-практиков. Для описанного проекта оперативного прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур в среде ГИС это означает, что функционал модельных расчетов должен быть в идеале доступен любому заинтересованному пользователю. Естественным способом удовлетворения этого требования будет его оформление не в виде однопользовательского десктопного приложения, а в виде общедоступного

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

=====

Интернет-сервиса. Примером подобного приложения может служить Интернет-портал «Поля России» [39], представляющий собой инициативный проект (стартап) московской компании jtSoft. В текущей версии данного решения любой пользователь имеет возможность выбрать на картах Яндекса произвольную географическую точку расположения, указать суммарную площадь посевных площадей, ввести минимальную информацию об используемой технологии (дату сева) и получить текущий прогноз ожидаемого урожая выбранной из predetermined списка культуры как в весовом, так и в денежном выражении. В качестве информационной поддержки данного проекта используются описанная выше почвенная карта ЕГРПР и данные общедоступных метеорологических web-сервисов, а интеллектуальным ядром модельных прогнозов служит модель AGROTOOL. В перспективах развития данного проекта – реализация хранимых пользовательских профилей (описания виртуальных хозяйств с контурами полей, архивом введенных данных и выданных прогнозов и рекомендаций), расширение возможностей по детальному описанию используемых технологий, подключение альтернативных моделей продуктивности для осуществления ансамблевых расчетов и т.д.

#### **4. Заключение**

1. Предложен общий метод для использования произвольной модели урожая для динамически скорректированного прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур масштабах страны. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод.

2. Основным подходом является интеграция динамических моделей урожая, внешних информационных ресурсов и ГИС на основе ранее разработанных универсальных систем компьютерной автоматизации многомерного компьютерного эксперимента (APEX).

3. Апробация метода проведена на примере компьютерного эксперимента для оценки урожайности яровой пшеницы на территории Российской Федерации для вегетационного периода 2017 года. Апробация показала работоспособность предложенного метода.

4. Полученные результаты вселяют уверенность, что такой же подход будет удобен для задач и других пространственных уровней, т.е. для мезомасштабных расчетов

(модельный анализ и оптимизация сельскохозяйственных технологий в региональном масштабе) или микромасштабных расчетов (анализ эффективности технологий точного земледелия в масштабах конкретного сельхозпредприятия).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Food Security Indicators. Food and Agriculture Organization of United Nation: Rome, Italy (accessed on 06 June 2018) <http://www.fao.org/economic/ess/ess-fs/ess-fadata/en/#.WIoBDU3JCow>.
2. Aragie E., Pauw K., Pernechele V. Achieving food security and industrial development in Malawi: Are export restrictions the solution? // World Development. – 2018. – Т. 108. – С. 1-15. DOI: 10.1016/j.worlddev.2018.03.020.
3. Anderson K., Strutt A. Food security policy options for China: lessons from other countries // Food Policy. – 2014. – Т. 49. – С. 50-58. DOI: 10.1016/j.foodpol.2014.06.008
4. Kerimova, U., Rakhimzhanova, G., Beibit, A., Gulnur, Y. Improving the competitiveness of agricultural products is the basis for food security in Kazakhstan // Asian Social Science. – Т. 11(19), – С. 143-150. DOI: 10.5539/ass.v11n19p143.
5. Kirwan J., Maye D. Food security framings within the UK and the integration of local food systems // Journal of Rural Studies. – 2013. – Т. 29. – С. 91-100.
6. Anderson, K., Jha, S., Nelgen, S., Strutt, A. Re-examining policies for food security in Asia // Food Security. – 2013. – Т. 5. – №. 2. – С. 195-215. DOI: 10.1007/s12571-012-0237-5.
7. Mainali, B., Luukkanen, J., Silveira, S., & Kaivo-oja, J. Evaluating Synergies and Trade-Offs among Sustainable Development Goals (SDGs): Explorative Analyses of Development Paths in South Asia and Sub-Saharan Africa // Sustainability. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – Номер статьи 815. DOI: 10.3390/su10030815.
8. Conceição, P., Levine, S., Lipton, M., Warren-Rodríguez, A. Toward a food secure future: Ensuring food security for sustainable human development in Sub-Saharan Africa // Food Policy. – 2016. – Т. 60, – С. 1-9. DOI: 10.1016/j.foodpol.2016.02.003.
9. Najafi, E., Devineni, N., Khanbilvardi, R. M., & Kogan, F. Understanding the Changes in Global Crop Yields Through Changes in Climate and Technology // Earth's Future. – 2018. – Т. 6. – №. 3. – С. 410-427. DOI: 10.1002/2017EF000690
10. King, T., Cole, M., Farber, J. M., Eisenbrand, G., Zabarar, D., Fox, E. M., & Hill, J. P. Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety // Trends in Food Science & Technology. – 2017. – Т. 68. – С. 160-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.014>.
11. Lal R. Global food security and nexus thinking // Journal of Soil and Water Conservation. – 2016. – Т. 71. – №. 4. – С. 85A-90A. DOI: 10.2489/jswc.71.4.85A.
12. Martin W. A Research Agenda for International Agricultural Trade // Applied

Economic Perspectives and Policy. – 2018. – Т. 40. – №. 1. – С. 155-173.  
<https://doi.org/10.1093/aep/px063>.

13. Finger R. Evidence of slowing yield growth—the example of Swiss cereal yields //Food Policy. – 2010. – Т. 35. – №. 2. – С. 175-182. DOI: 10.1016/j.foodpol.2009.11.004.

14. Laurila, H., Karjalainen, M., Kleemola, J., & Hyypä, J. Cereal yield modeling in Finland using optical and radar remote sensing //Remote sensing. – 2010. – Т. 2. – №. 9. – С. 2185-2239. DOI: 10.3390/rs2092185.

15. Алтухов А.И., Полутина Т.Н. Производство продовольственного зерна как основа обеспечения продовольственной безопасности // Экономика сельского хозяйства России. – 2014, № 6. – С. 26-36.

16. Pagani V. et al. Improving cereal yield forecasts in Europe—The impact of weather extremes //European Journal of Agronomy. – 2017. – Т. 89. – С. 97-106. DOI: 10.1016/j.eja.2017.06.010.

17. Asseng, S. et al. Rising temperatures reduce global wheat production // Nature Climate Change. – 2015 – Т. 5 (2). – С. 143-147. DOI: 10.1038/nclimate2470.

18. Badenko, V.L., Topaj, A.G., Yakushev, V.V., Mirschel, W., Nendel, C. Crop models as research and interpretative tools // Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya, Volume 52, Issue 3, 2017, Pages 437-445. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.437eng

19. Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures // Environmental Research Letters. – 2014. – Т. 9. – №. 3. Номер статьи 034011 DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/034011.

20. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Якушев В.П., Медведев С.А. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов (теория и реализация) // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2012, т. 2. – С. 7-12.

21. Gouache, D., Bouchon, A. S., Jouanneau, E., & Le Bris, X. Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France //Agricultural and forest meteorology. – 2015. – Т. 209. – С. 1-10. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.04.027.

22. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015, № 1-2. – С. 72-76.

23. Di Paola A., Valentini R., Santini M. An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture //Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2016. – Т. 96. – №. 3. – С. 709-714. DOI: 10.1002/jsfa.7359.

24. Choi, H. S., Schneider, U. A., Rasche, L., Cui, J., Schmid, E., & Held, H. (2015). Potential effects of perfect seasonal climate forecasting on agricultural markets, welfare and land use: A case study of Spain. Agricultural Systems, 133, 177-189. DOI: 10.1016/j.agsy.2014.10.007.

.....  
**Электронный научно-производственный журнал**  
**«АгроЭкоИнфо»**

- =====
25. Badenko, V.; Badenko, G.; Topaj, A.; Medvedev, S.; Zakharova, E.; Terleev, V. Comparative Simulation of Various Agricultural Land Use Practices for Analysis of Impacts on Environments. //Environments. – 2017. – Т. 4. – №. 4. Номер статьи 92. DOI: 10.3390/environments4040092.
26. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture // Applied Mechanics and Materials. 2014. v. 635-637. pp. 1688-1691. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.1688.
27. Medvedev S., Topaj A., Badenko V., Terleev V. Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2015, v. 448. – С. 252-261. DOI: 10.1007/978-3-319-15994-2\_25.
28. Баденко В.Л., Иванов Д.А., Топаж А.Г. Информационное обеспечение агроландшафтных исследований // Информация и космос. – 2014, № 4. – С. 52-54.
29. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Захарова Е.Т., Медведев С.А. Массовые расчеты динамической модели агроэкосистемы в геоинформационной среде для решения задач различного временного и пространственного масштаба // В сборнике: Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ. – 2017. – С. 677-681.
30. Azzari G., Jain M., Lobell D. B. Towards fine resolution global maps of crop yields: Testing multiple methods and satellites in three countries // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Т. 202. – С. 129-141. DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.014.
31. Poluektov R.A., Fintushal S.M., Oparina I.V., Shatskikh D.V., Terleev V.V., Zakharova E.T. AGROTOOL—A system for crop simulation //Archives of Agronomy and Soil Science. – 2002. – Т. 48. – №. 6. – С. 609-635.
32. Medvedev, S.; Topaj, A. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis // IFIP Adv. Inf. Commun. Technol. – 2011. – Т. 359 – С. 295-301. DOI: 10.1007/978-3-642-22285-6\_32.
33. Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия // Информация и космос. – 2009, №. 4. – С. 53-58.
34. Boote, K.J.; Jones, J.W.; White, J.W.; Asseng, S.; Lizaso, J.I. //Plant, cell & environment. – 2013. – Т. 36. – №. 9. – С. 1658-1672. DOI: 1658-1672 10.1111/pce.12119.
35. Медведев С.А. Технические аспекты поливариантного расчёта динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур // АгроЭкоИнфо. – 2018, №1. – [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st\\_113.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_113.doc).
36. Медведев С.А., Топаж А.Г., Белов А.В., Глядченкова Н.А., Лекомцев П.В. Распределенный измерительно-моделирующий комплекс для оперативного сопровождения полевого опыта // АгроЭкоИнфо. – 2015, №2.

Электронный научно-производственный журнал  
«АгроЭкоИнфо»

[http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/2/st\\_08.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/2/st_08.doc).

37. Сайт Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации– Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) – <http://meteo.ru/> – дата обращения 11.07.2018.

38. Сайт ООО «Расписание Погоды» – <https://rp5.ru/>. – дата обращения 11.07.2018.

39. [www.cropmap.ru](http://www.cropmap.ru) (Интернет-ресурс) – дата обращения 07.07.2018.

40. <https://www.worldweatheronline.com> (Интернет-ресурс) – дата обращения 07.07.2018.

41. Столбовой В.С., Молчанов Э.Н. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России как модель пространственной организации почвенного покрова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015, №. 5. – С. 135-143.

42. Фридланд В.М. Классификация структур почвенного покрова и типизация земель // Почвоведение. – 1980, №. 11. – С. 5-17.

43. Лебедева И.И., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России // Почвоведение. – 2012, №. 9. – С. 923-934.

44. Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. Th. ROSETTA: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions, Journal of Hydrology, Vol. 251, No. 3-4, 2001, pp. 163-176. DOI:10.1016/S0022-1694(01)00466-8

45. Rötter R.P., Tao F., Höhn J.G., Palosuo T. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars // Journal of experimental botany. – 2015. – Т. 66. – №. 12. – С. 3463-3476. DOI: 10.1093/jxb/erv098

46. Медведев С.А. Методические основы поливариантного расчёта динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур // АгроЭкоИнфо. – 2015, №4. [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/4/st\\_16.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/4/st_16.doc).

47. Катцов В.М., Мелешко В.П. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, используемых для оценок будущих изменений климата // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2004, т. 40, №. 6. – С. 723-736.

**Цитирование:**

Баденко В.Л., Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т. Оперативно уточняющийся прогноз урожайности пшеницы в сельскохозяйственных зонах на всей территории России на базе имитационной модели продуктивности // АгроЭкоИнфо. – 2018, №3. – [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st\\_345.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_345.doc).