УДК 004.942 DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.07

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СЕРВИСА УДАЛЁННЫХ АНСАМБЛЕВЫХ РАСЧЁТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ

С. А. Медведев, А. С. Черяев

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,
E-mail: glorguin@yandex.ru

Поступила в редакцию 17 августа 2020 г., принята к печати 26 августа 2020 г.

Одним из современных трендов в практике моделирования продукционного процесса культурных растений являются ансамблевые расчёты, позволяющие рассматривать один расчёт модели продукционного процесса как повторность в вычислительном компьютерном эксперименте. При этом часто одни и те же вычислительные компьютерные эксперименты проводятся с разными моделями продукционного процесса, однако в настоящее время это происходит децентрализовано, т.е. каждый разработчик модели продукционного процесса должен использовать для организации и проведения расчётов собственную инфраструктуру. Разработанная в лаборатории математического моделирования АФИ система поливариантного расчёта APEX позволяет проводить вычислительные компьютерные эксперименты с различными моделями продукционного процесса, однако именно для ансамблевых расчётов она приспособлена не в полной мере. Для адаптации данной разработки к современным требованиям необходимо преобразовать её в Web-сервис, к которому могут подключаться разработчики моделей продукционного процесса со всего мира. В работе описана архитектура такого программного продукта, а также общая методика работы с ним: как разработчикам конкретных моделей продукционного процесса необходимо адаптировать их для работы с новой версией системы APEX, какие соглашения предполагается соблюдать и какие потенциальные возможности это открывает. На настоящий момент ряд задач, возникающих при разработке такой системы нового поколения, уже решён. В частности, уже реализована поддержка формата AgMIP, который является международным стандартом входных и выходных данных для моделей продукционного процесса. Также рассмотрены условия, в которых данный проект мог бы оказаться применимым на практике.

Ключевые слова: моделирование, продукционный процесс, ансамблевые расчеты.

PROSPECTS FOR CREATING UNIVERSAL SERVICE FOR REMOTE ENSEMBLE CALCULATIONS OF DYNAMIC MODELS OF CULTIVATED PLANT PRODUCTION PROCESS

S. A. Medvedev, A. S. Cherayev

Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdansky pr., St. Petersburg, 195220,
E-mail: glorguin@yandex.ru

One of the modern trends in the practice of modeling the production process of cultivated plants is ensemble calculations. They allow considering one calculation of the production process model as a repetition in a computational computer experiment. Often the same computational computer experiments are carried out with several models of the production process, but they are not automated: each crop simulation model developer has to use its own infrastructure to support his model for the polyvariant calculations. Polyvariant calculation system developed in crop simulation laboratory of the Agrophysical Research Institute allows carrying out the computer experiments with several models, however, it is not fully adapted for ensemble calculations. The aim of the current work was to develop the new version of APEX with special architecture for ensemble calculations, which allows model users from all over the world to connect to APEX server and perform their research. The paper describes this architecture and also discusses several conventions for the use of the new APEX version and potential abilities for problem solutions. Currently, several tasks to create such a universal product have already been solved. For example, AgMIP format support has already been implemented. This is the international standard format for input and output data for crop simulation models. The conditions in which this development could be applied in practice are also considered.

Key words: modelling, plant production process, ensemble calculations

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внимание множества исследователей в области естественных наук привлекает проблема глобальных климатических изменений (Менжулин и др., 2012), в результате чего одним из вызовов, стоящих перед учёными-аграриями, является разработка агротехнологий, применимых в условиях климата будущего (Менжулин, Павловский, 2009). Однако даже без учёта климатического фактора очевидно, что интенсификация сельского хозяйства предполагает внедрение современных прогрессивных методик, обеспечивающих продовольственную безопасность в течение длительного времени (Schils et al., 2018; Trnka et al., 2011). Для решения подобных задач необходимы количественные прогнозы, позволяющие определить, как будет протекать продукционный процесс сельскохозяйственных культур в условиях изменяющегося климата или при применении агротехнологий, которые в настоящее время не существуют и станут актуальными лишь в возможном будущем. Одним из основных методов решения таких задач являются массовые расчёты с использованием динамических моделей продукционного процесса (Медведев, 2015). Каждая такая модель представляет собой программный продукт, который позволяет по данным о погоде, местности, технологиях возделывания и т. д. спрогнозировать поведение агроэкосистемы и, прежде всего, произрастающих в ней культурных растений (Passioura, 1996). Однако при разработке моделей продукционного процесса невозможно учесть все факторы, влияющие на рост и развитие растений, поэтому, как правило, масштабные исследования проводятся с использованием большого количества моделей, с каждой из которой проводятся одни и те же вычислительные компьютерные эксперименты (Salo et al., 2016). Подобная методология называется ансамблевыми расчётами. При таком подходе набор конкретных моделей продукционного процесса рассматривается как повторность при проведении вычислительных компьютерных экспериментов. Различные аппроксимации одних и тех же процессов, происходящих в агроэкосистеме, позволяют получить более точную картину. Кроме того, ансамблевые расчёты позволяют более надёжно отследить критические падения урожаев в отдельных ситуациях, которые могут быть смоделированы только отдельными моделями. Таким образом, ансамбль моделей гораздо эффективнее одиночной модели при оценке рисков, возникающих в условиях изменяющегося климата.

До настоящего времени подобные исследования с использованием различных моделей продукционного процесса проводятся, как правило, изолированно. В частности, организаторы исследований предоставляют всем разработчикам моделей продукционного процесса входные данные в определённом формате, а выходные данные разработчики моделей продукционного процесса должны также привести к требуемому организаторами научного проекта формату (Yin et al., 2018). При этом не все разработчики моделей обладают достаточными ресурсами для проведения масштабных вычислений, необходимых для ансамблевых расчётов. Поэтому весьма целесообразными являются разработка продукта, который позволил бы организовать ансамблевые расчёты централизованно, и размещение его на суперкомпьютере с достаточной вычислительной мощностью с предоставлением потенциальным участникам проекта удалённого доступа к его функционалу.

СУЩЕСТВУЮЩЕЕ РЕШЕНИЕ

В лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ разработана система поливариантного расчёта APEX, которая позволяет через специальные адаптеры подключать к ней произвольные модели продукционного процесса, соответствующие определённым естественным требованиям (Медведев, 2018). Основная функция данной программы – автоматический многократный запуск выбранной модели продукционного процесса с различными входными данными с последующим сравнением полученных результатов. В системе присутствуют инструменты как для факторного, так и для регрессионного анализа полученных результатов. В данную схему укладывается практически любой вычислительный компьютерный эксперимент, в котором используется модель продукционного процесса для решения научных или прикладных задач. Помимо собственно расчётов и отображения сводных таблиц по результатам расчётов, система APEX позволяет решать ряд более специфических задач:

1. Генерация исходных данных для модельных расчётов.
   - 1.1. Стохастический генератор суточных погодных метеоданных, который идентифицируется по данным многолетних погодных наблюдений (Топаж, 1992).
   - 1.2. Получение множества наборов входных данных из одного путём варьирования одного или более параметров в указанных данных.
   - 1.3. Импорт данных из внешних источников.
2. Вычисление невязок в модельных расчётах по данным полевых опытов.
3. Поддержка севооборотов (если модель сама не поддерживает севооборот, система APEX может его эмулировать, перенося указанную часть результатов одного запуска модели во входные данные для следующего запуска модели).
4. Поддержка географической привязки точек, для которых моделируется продукционный процесс, с последующим построением по результатам расчётов тематических карт любой сложности в системе ГИС (Баденко и др., 2011).

Таким образом, некоторые задачи, связанные с моделированием, можно вынести из модели (рис. 1). Однако в существующей версии APEX не поддерживается работа с вычислительными компьютерными экспериментами, одновременно использующими разные модели продукционного процесса. Каждый вычислительный компьютерный эксперимент в APEX жёстко привязан к определённой модели продукционного процесса. Это связано с тем, что хотя входные данные моделей продукционного

процесса при интеграции каждой модели с APEX разбиваются в соответствии с предопределёнными информационными доменами («Почва», «Погода», «Культура», «Технологии возделывания», «Исходное состояние», «Местность»), что позволяет проводить семантически насыщенный анализ входных и выходных данных, структура данных внутри каждого информационного домена для конкретной модели может быть произвольной. Возможность задать семантику каждого из параметров модели продукционного процесса поддерживается только для предопределённого фактора «Погода», поскольку это необходимо для работы стохастического генератора суточных погодных метеоданных. Кроме того, программа APEX представляет собой толстый клиент СУБД Microsoft SQL Server, в котором реализована содержательная часть его функциональности. Таким образом, на настоящий момент система APEX не предназначена для работы распределённой по всему миру команды, занятой одним крупным исследованием.

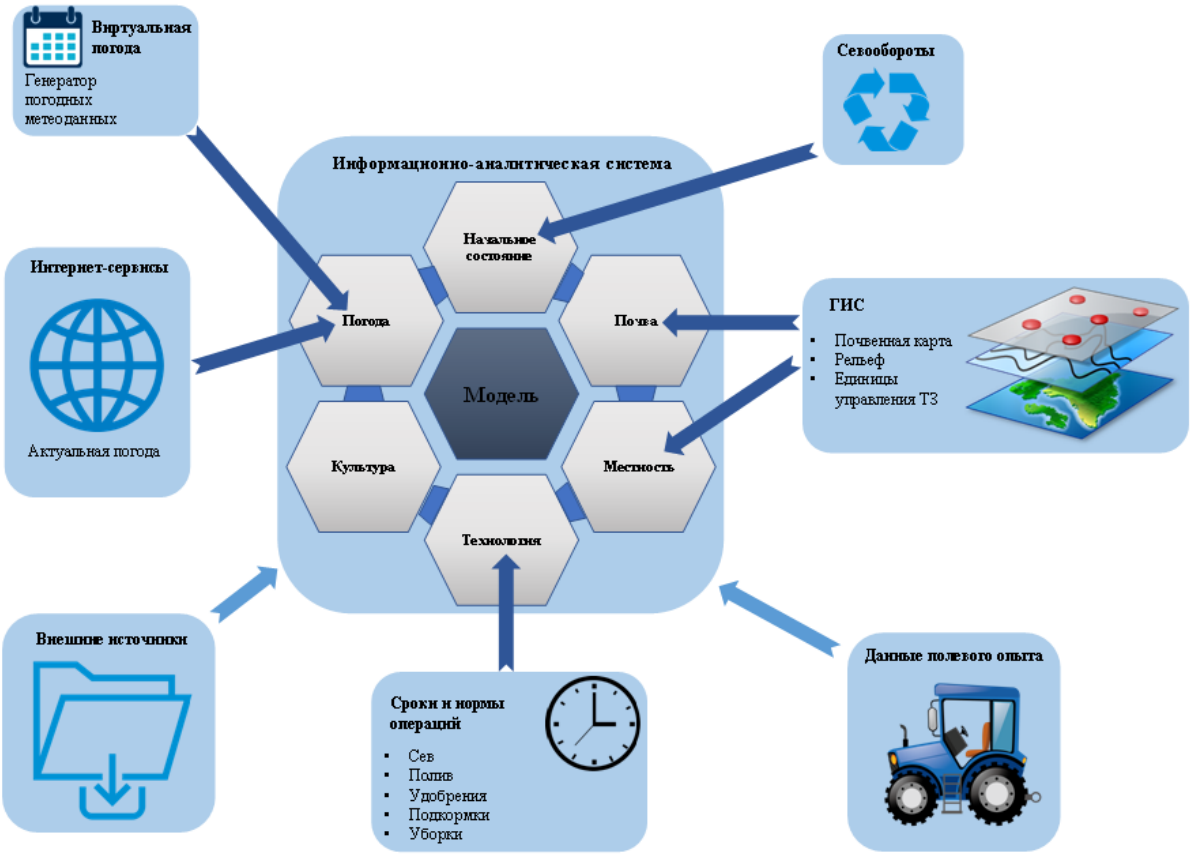

Рис. 1. Принципиальная схема работы существующей версии системы поливариантного расчёта APEX

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНДАРТА AGMIP

Все перечисленные ограничения первой версии программы APEX планируется преодолеть во второй версии, которая будет предназначена именно для ансамблевых расчётов с динамическими моделями продукционного процесса. В программе APEX 2.0 планируется совместить гибкость первой версии, позволяющей подключать к ней разные модели продукционного процесса с различной структурой входных и выходных данных, с возможностью описания семантики каждого параметра, а не только больших наборов данных. Основным инструментом для решения данной задачи должен стать международный стандарт AgMIP, описывающий структуру входных и выходных данных моделей продукционного процесса в виде структур формата JSON (Elliott et al., 2015). В настоящее время структура входных данных для модели продукционного процесса в APEX описывается как набор таблиц, для каждой из которых можно указать, к какому информационному домену она относится. В новой версии будет указано, какому параметру из стандарта AgMIP соответствует каждая колонка из данной таблицы, а домен предметной области будет определяться уже косвенно, т. к. любой параметр из стандарта AgMIP имеет чёткую семантику, относящуюся к конкретному домену предметной области (рис. 2). При этом помимо взаимно однозначного соответствия могут потребоваться более сложные преобразования. Например, в стандарте AgMIP суточная температура задаётся двумя значениями – минимумом и максимумом за сутки, а какая-нибудь конкретная модель может потребовать значение среднесуточной температуры. Для подобного случая должен быть предусмотрен преобразователь, который при преобразовании данных в формате AgMIP будет усреднять минимальное и максимальное значения температуры, выдавая на выходе одно число, а при обратном преобразовании он должен принимать значение среднесуточной температуры и на выходе выдавать два числа – значения минимальной и максимальной температуры, каким-то образом

полученные из значения среднесуточной температуры (например, в параметрах данного преобразователя необходимо указать разницу, используемую для такого преобразования). Ещё один пример, связанный с информационным доменом «Погода», выглядит следующим образом. В AgMIP степень освещённости задаётся как абсолютное значение солнечного сияния, а, например, в модели AGROTOOL, разработанной в лаборатории математического моделирования АФИ, а также в генераторе суточных погодных метеоданных используется условный коэффициент ослабления солнечной радиации (Топаж, 1992). Это позволяет отвязать фиктивные суточные погодные метеоданные от широты. Для преобразований одного в другое помимо самой величины необходимы широта и дата. Поскольку указанные данные присутствуют в стандарте AgMIP, задача по написанию такого преобразователя имеет корректное решение. Ещё более предметно-ориентированные преобразования, которые должны выполняться на стороне системы поливариантного расчёта, необходимы при работе с параметрами почвы. Как правило, различным моделям продукционного процесса требуются разные параметры почвы, в связи с чем необходимо поддерживать полноту данных, доступных для всех моделей продукционного процесса, с помощью педотрансферных функций.

Рис. 2. Использование стандарта AgMIP для взаимодействия данных различных динамических моделей продукционного процесса в ансамблевых расчётах

После того, как к описанию структуры данных модели добавляется набор преобразователей, позволяющих указать семантику каждого параметра модели, в системе поливариантного расчёта открываются новые возможности. Прежде всего, формат AgMIP становится своего рода Lingva Franca для обмена данными между любыми моделями продукционного процесса. Наборы данных для одной модели продукционного процесса могут быть преобразованы в формат AgMIP, после чего они, в свою очередь, могут быть преобразованы в набор данных для другой модели. В то время как без единого промежуточного формата для решения данной задачи потребовалось бы количество преобразований, пропорциональное квадрату количества подобных моделей, при наличии такого формата необходим всего лишь один преобразователь на каждую модель (Turing, 1938). Это особенно важно в связи с тем, что объектная модель, описывающая формат AgMIP, в настоящее время уже реализована его разработчиками. Кроме того, это позволяет хранить часть данных, которые не являются специфичными для конкретных моделей продукционного процесса, прямо в базе данных системы поливариантного расчёта, вообще не привязывая их к конкретным моделям (например, суточные погодные метеоданные). В то же время возникает затруднение, связанное с тем, что универсальный интерфейс, автоматически создаваемый при регистрации модели продукционного процесса, как это было в первой версии APEX, может быть неоптимальным для редактирования данных. Кроме того, полностью унифицировать входные данные моделей принципиально невозможно, так как, например, параметры культуры в разных моделях продукционного процесса совершенно разнородны. Поэтому часть входных данных должна быть привязана к конкретным моделям продукционного процесса, редактироваться через универсальный интерфейс и не подлежать обмену с другими моделями.

Ещё одной особенностью параметров культуры как домена предметной области является то, что описание культуры необходимо для того, чтобы модель могла рассчитать динамику продукционного процесса в многолетнем севообороте. Это позволяет использовать одну и ту же модель продукционного процесса для всех культур, участвующих в севообороте. Для моделей, которые рассчитывают динамику продукционного процесса только одной культуры, организовать расчёт, моделирующий севооборот, возможно только при использовании нескольких моделей в одной цепочке расчётов с передачей результатов модельных расчётов от одной модели в исходные данные другой. Очевидно, что для этого перед передачей данных следующей модели необходимо преобразовать результаты в стандартный

промежуточный формат. На настоящий момент такая модель результатов, основанная на AgMIP, не реализована, хотя стандарт позволяет сделать это. После того, как полноценная модель результатов с необходимыми конвертерами будет реализована, появится возможность сравнивать большое количество результатов разных моделей, приведённых к единым критериям и единицам измерения, в разрезе проварьированных факторов (факторный анализ) или количественных показателей, связанных с входными или выходными данными в стандартном формате (регрессионный анализ). Для этого может быть использован стандартный функционал системы APEX, который позволяет не только выбирать факторы и параметры, но и создавать собственные с помощью произвольных формул.

WEB-СЕРВЕР APEX

Второй недостаток существующей версии системы поливариантного расчёта APEX планируется преодолеть посредством использования трёхзвенной архитектуры вместо двухзвенной. Один толстый клиент планируется разделить на три отдельных приложения:

1. Web-сервер, в котором реализована основная логика поливариантных и полимодельных расчётов.
2. Административная утилита, предназначенная для настройки сервера и регистрации моделей.
3. Клиент для конечного пользователя, который подключается к Web-серверу и позволяет проводить вычислительные компьютерные эксперименты.

Веб-сервер развёртывается на удалённом узле сети Интернет, а также, возможно, где-нибудь в локальной сети, если существует такая необходимость. При этом на том же сайте, где размещён Web-сервер, должен быть доступным для скачивания клиент для конечного пользователя. Это позволит широкому кругу пользователей работать с единым реестром моделей продукционного процесса в любой точке мира.

При этом для подключения моделей продукционного процесса к системе поливариантного расчёта в любом случае необходимы специальные программные компоненты – адаптеры (Гамма и др., 2005). В идеале их должны писать сами разработчики моделей продукционного процесса, а разработчики системы поливариантного расчёта – только верифицировать. Поскольку такую систему планируется размещать на суперкомпьютере, необходимо организовать там пул адаптеров (Фаулер, Райс, 2007). Если вычислительная архитектура конкретной прикладной модели не позволяет производить параллельный запуск нескольких копий приложения на одной машине, пул будет включать в себя только один экземпляр модели. В противном случае на сервер устанавливается несколько экземпляров модели продукционного процесса, и в зависимости от нагрузки задействованы будут либо все экземпляры модели, либо только некоторые из них. Как только один из экземпляров освобождается, он может заняться очередным прогоном модели с другим набором входных данных (т.н. пул приложений).

Следующим вызовом является то, что исследования, которые проводятся с использованием такой системы поливариантного расчёта, достаточно разнородны, поэтому предусмотреть всю необходимую для них функциональность невозможно. Прежде всего это касается того, как формируются наборы данных для работы моделей. Поэтому необходимо предоставить пользователю инструмент, который это обеспечит. Это должны быть некие макросы, в которые можно записать типичный сценарий действий пользователя, который в рамках конкретных научных проектов позволял бы всем участникам использовать одинаковый функционал. Таким образом, это позволит иначе распределить обязанности между разработчиками конкретных моделей продукционного процесса и организаторами научных проектов, требующих ансамблевых вычислений. Сначала организатор научного проекта разрабатывает набор макросов, которые позволяют автоматизировать его исследования. Часть разработанных макросов он предоставляет разработчикам моделей продукционного процесса. Далее разработчики моделей продукционного процесса должны обеспечить интеграцию своих моделей с APEX, что включает в себя две задачи: описание структуры данных для модели продукционного процесса с указанием семантики параметров и разработку адаптера, обеспечивающего работу модели в системе. Дальнейшие вычисления проводят уже организаторы проекта, используя вычислительные мощности сервера, на котором расположен APEX.

Очевидно, что для централизованного подключения к серверу APEX любой сторонней модели продукционного процесса сама модель и её адаптер должны пройти верификацию на предмет отсутствия критичных для работы сервера ошибок и вредоносного кода. В противном случае это может привести к тому, что весь продукт станет неработоспособным. Кроме того, в процессе разработки адаптера разработчикам модели продукционного процесса может понадобиться развернуть сервер APEX у себя на локальной машине (рис. 3). Для этого следует предусмотреть отдельный дистрибутив. Очевидно, что это будет целесообразным только в том случае, если с использованием предложенной технологии проводятся исследования по методологии ансамблевых расчётов. Исследователи, организующие подобные проекты, могут как использовать в проектах готовые модели, так и предлагать выполнить интеграцию разработчикам моделей, заинтересованным данными проектами. Первый вариант возможен для тех моделей, которые выложены с открытыми исходными кодами. Как правило, это так и есть, модели продукционного процесса выпускаются по лицензии BSD.

Рис. 3. Перспективная схема работы новой версии системы поливариантного расчёта APEX

ВЫВОДЫ

В настоящий момент спроектирована и разрабатывается новая версия системы поливариантного расчёта APEX. Данный программный продукт будет отличаться от первой версии двумя принципиальными нововведениями: использованием стандарта AgMIP для унификации входных и выходных данных различных динамических моделей продукционного процесса и распределённой архитектурой. Первое сделает его приспособленным для проведения ансамблевых расчётов, а второе позволит использовать систему большим командам исследователей, распределённым по разным регионам и странам. Однако для привлечения трудовых инвестиций в проект необходимо проведение реальных исследований, осуществляемых с применением ансамблевых расчётов.

Список литературы

Баденко В. Л., Баденко Г. В., Терлеев В. В., Латышев Н. К. Гис-технологии в информационном обеспечении системы имитационного моделирования Agrotool // Агрофизика. 2011. № 3. С. 1–5.

Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. СПб.: Питер, 2005. 366 с.

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.

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.

Менжулин Г. В., Павловский А. А. Прогностические оценки изменений продуктивности и межгодовой изменчивости урожаев сельскохозяйственных культур при ожидаемом глобальном потеплении // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2009. Т. 166. С. 544–550.

Менжулин Г. В., Павловский А. А., Савватеев С. П. Оценки возможных агроклиматических последствий глобального потепления в сельскохозяйственных регионах северной Европы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2012. № 566. С. 78–93.

Топаж А. Г. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса // Почва и растение – процессы и модели: Сб. статей. СПб.: АФИ, 1992. С. 79–86.

Фаулер М., Райс Д. Архитектура корпоративных программных приложений. М.: Вильямс, 2007. 544 с.

Elliott J., Foster I., Müller C., Büchner M., Heinke J., Deryng D., Chryssanthacopoulos J., Boote K. J., Glotter M., Iizumi T., Izaurralde R. C., Mueller N. D., Ray D. K., Rosenzweig C., Ruane A. C., Sheffield J. The global gridded crop model intercomparison: data and modeling protocols for phase 1 (v1.0) // Geoscientific Model Development, 2015, v. 8, no. 2, pp. 261–277.

Passioura J. B. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? // Agron. J., 1996, v. 88, pp. 690–694.

Salo T. J., Palosuo T., Rötter R. P., Kersebaum K. C., Nendel C., Angulo C., Ewert F., Bindi M., Ferrise R., Calanca P., Klein T., Moriondo M., Olesen J. E., Patil R. H., Ruget F., Takáč J., Hlavinka P., Trnka M. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization // The Journal of Agricultural Science, 2016, v. 154, no. 7, pp. 1218–1240.

Schils R., Rijk B., Silva J. V., van Bussel L., Wolf J., Zijlstra M., van Loon M. P., van Ittersum M. K., Olesen J. E., Kersebaum K. C., Oberforster M., Kalyada V., Khitrykau M., Gobin A., Kirchev H., Manolova V., Manolov I., Trnka M., Hlavinka P., Paluoso T. Cereal yield gaps across Europe // European Journal of Agronomy, 2018, v. 101, pp. 109–120.

Trnka M., Dubrovský M., Hlavinka P., Balek J., Semerádová D., Žalud Z., Olesen J. E., Kersebaum K. C., Skjelvåg A. O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rötter R., Iglesias A., Orlandini S., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vučetić V. Agroclimatic conditions in Europe under climate change // Global Change Biology, 2011, v. 17, no. 7, pp. 2298–2318.

Turing A. M. Systems of Logic Based on Ordinals. 1938, 228 p.

Yin X., Kersebaum K. Ch., Kollas Ch., Manevski K., Baby S., Beaudoin N., Öztürk I., Gaiser T., Wu L., Hoffmann M., Charfeddine M., Conradt T., Constantin Ju., Ewert F., de Cortazar-Atauri I. G., Giglio L., Hlavinka P., Hoffmann H., Launay M., Louarn G. et al. Mul'timodel'nyy analiz neopredelennosti pri otsenke kolichestva azota v zerne zlakovykh kul'tur, vozdelyvaemykh v sevooborotakh Evropy [Multi-model analysis of uncertainty in assessing the amount of nitrogen in the grain of cereals cultivated in crop rotations in Europe]. Novyye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Yevrope, Tsentral'noy Azii i Sibiri. Monografiya. In 5 volumes / Ed. V. G. Sychev, L. Müller. Moscow, 2018, pp. 278–282.

References

Badenko V. L., Badenko G. V., Terleev V. V., Latyshev N. K. Gis-tekhnologii v informatsionnom obespechenii sistemy imitatsionnogo modelirovaniya Agrotool [GIS-technologies in information support of crop simulation systems]. *Agrofizika,* 2011, no. 3, pp. 1–5.

Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design patterns: elements of reusable object-oriented software. Saint-Petersburg: Piter, 2005, 366 p.

Medvedev S. A. Metodicheskiye osnovy polivariantnogo raschyota dinamicheskikh modeley produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Methodical foundation of polyvariant calculation of crop simulation models]. *AgroEcoInfo,* 2015, no. 4. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/4/st_16.doc.

Medvedev S. A. Tekhnicheskiye aspekty polivariantnogo raschyota dinamicheskikh modeley produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Technical aspects of polyvariant calculation of crop simulation models]. *AgroEcoInfo,* 2018, no. 1. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/1/st_113.doc.

Menzhulin G. V., Pavlovskiy A. A. Prognosticheskiye otsenki izmeneniy produktivnosti i mezhgodovoy izmenchivosti urozhayev sel'skokhozyaystvennykh kul'tur pri ozhidayemom global'nom poteplenii [Predictive assessments of changes in productivity and interannual variability in crop yields under expected global warming]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii,* 2009, v. 166, pp. 544–550.

Menzhulin G.V., Pavlovskiy A.A., Savvateev S.P. Otsenki vozmozhnykh agroklimaticheskikh posledstviy global'nogo potepleniya v sel'skokhozyaystvennykh regionakh severnoy Evropy [Assessments of possible agroclimatic consequences of global warming in agricultural regions of northern Europe]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova*, 2012, no. 566, pp. 78–93.

Topaj A. G. *Modelirovaniye sutochnykh meteodannykh kak vkhodnogo signala modeli produktsionnogo protsessa* [Modeling of daily meteorological data as an input signal of the production process model]. Pochva i rasteniye – protsessy i modeli. Sb. statey. Saint-Peterburg: AFI, 1992, pp. 79–86.

Fowler M., Rice D. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Moscow: Williams, 2007, 544 p.

Elliott J., Foster I., Müller C., Büchner M., Heinke J., Deryng D., Chryssanthacopoulos J., Boote K.J., Glotter M., Elliott J., Foster I., Müller C., Büchner M., Heinke J., Deryng D., Chryssanthacopoulos J., Boote K. J., Glotter M., Iizumi T., Izaurralde R. C., Mueller N. D., Ray D. K., Rosenzweig C., Ruane A. C., Sheffield J. The global gridded crop model intercomparison: data and modeling protocols for phase 1 (v1.0) // Geoscientific Model Development, 2015, v. 8, no. 2, pp. 261–277.

Passioura J. B. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? // Agron. J., 1996, v. 88, pp. 690–694.

Salo T. J., Palosuo T., Rötter R. P., Kersebaum K. C., Nendel C., Angulo C., Ewert F., Bindi M., Ferrise R., Calanca P., Klein T., Moriondo M., Olesen J. E., Patil R. H., Ruget F., Takáč J., Hlavinka P., Trnka M. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization // The Journal of Agricultural Science, 2016, v. 154, no. 7, pp. 1218–1240.

Schils R., Rijk B., Silva J. V., van Bussel L., Wolf J., Zijlstra M., van Loon M. P., van Ittersum M. K., Olesen J. E., Kersebaum K. C., Oberforster M., Kalyada V., Khitrykau M., Gobin A., Kirchev H., Manolova V., Manolov I., Trnka M., Hlavinka P., Paluoso T. Cereal yield gaps across Europe // European Journal of Agronomy, 2018, v. 101, pp. 109–120.

Trnka M., Dubrovský M., Hlavinka P., Balek J., Semerádová D., Žalud Z., Olesen J. E., Kersebaum K. C., Skjelvåg A. O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rötter R., Iglesias A., Orlandini S., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vučetić V. Agroclimatic conditions in Europe under climate change // Global Change Biology, 2011, v. 17, no. 7, pp. 2298–2318.

Turing A. M. Systems of Logic Based on Ordinals. 1938, 228 p.

Yin X., Kersebaum K. Ch., Kollas Ch., Manevski K., Baby S., Beaudoin N., Öztürk I., Gaiser T., Wu L., Hoffmann M., Charfeddine M., Conradt T., Constantin Ju., Ewert F., de Cortazar-Atauri I. G., Giglio L., Hlavinka P., Hoffmann H., Launay M., Louarn G. et al. Mul'timodel'nyy analiz neopredelennosti pri otsenke kolichestva azota v zerne zlakovykh kul'tur, vozdelyvaemykh v sevooborotakh Evropy [Multi-model analysis of uncertainty in assessing the amount of nitrogen in the grain of cereals cultivated in crop rotations in Europe]. Novyye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Yevrope, Tsentral'noy Azii i Sibiri. Monografiya. In 5 volumes / Ed. V. G. Sychev, L. Müller. Moscow, 2018, pp. 278–282.