

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

В.П. Якушев, В.В. Якушев, С.Ю. Блохина*

Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

* *ответственный за переписку, e-mail: sblokhina@agrophys.ru*

В работе представлен подход, обеспечивающий построение базы знаний и создание на ее основе интеллектуальной системы поддержки плановых технологических решений, а также генерацию производственно-технологического спектра оперативных возможностей и оптимальных предложений по прецизионному управлению урожайностью с учётом складывающихся в заданном хозяйстве почвенно-климатических и хозяйственно-экономических условий. При реализации подхода используется логико-лингвистический аппарат для представления и обработки агротехнологических знаний. Формализация предметной области, определение основных сущностей и взаимосвязей между понятиями осуществляются с помощью специализированных конструкций модели описания технологических операций и производственных правил. В результате агротехнологические знания представляются в единообразной структурированной форме, пригодной для хранения и компьютерной обработки. Созданный в Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) прототип интеллектуальной системы апробирован в ходе полевых сравнительных исследований, в рамках которых изучались технологии различной интенсивности, в том числе технология точного земледелия. Отличительной особенностью точного земледелия является дифференцированный подход к расчету и внесению средств химизации в зависимости от показателей плодородия полей и состояния посевов. Анализ полученных результатов показал, что использование интеллектуальной системы при выработке оперативных технологических приемов привело к существенному повышению качества яровой пшеницы, снижению агрохимической нагрузки на окружающую среду на 35–60%, а также увеличению окупаемости удобрений и средств защиты растений в 1.5–1.7 раза на фоне значительного роста урожайности. Апробация интеллектуальной системы осуществлялась на основе интеграции с отечественным бортовым оборудованием (ООО «Системы точного земледелия», г. Новосибирск) и робототехническими агрегатами на базе машин РМУ-8000 (Щучинский ремонтный завод, Беларусь) и Amazone (Евротехника, г. Самара). Данный отечественный комплекс продемонстрирован АФИ на агропромышленной выставке «Всероссийский День поля-2019», прошедшей в Ленинградской области.

Ключевые слова: точное земледелие, интеллектуальные системы, базы данных, базы знаний, математические модели, электронные карты-задания, данные дистанционного зондирования Земли, оптические характеристики посевов

Поступила в редакцию: 04.12.2019

Принята к печати: 21.01.2020

Современное состояние и проблемы внедрения точного земледелия

Необходимость внедрения цифровых технологий точного земледелия (ТЗ) в производство растениеводческой продукции в настоящее время не вызывает сомнений (Walter et al., 2017). В то же время даже в странах с развитым сельским хозяйством масштабное внедрение технологий ТЗ сдерживается из-за отсутствия на рынке интеллектуальных систем (ИС) поддержки выработки и реализации агротехнологических решений, созданных на основе разнородных данных и проблемно-ориентированных знаний. Реализация инновационной стратегии развития России должна изменить роль науки и технологий в экономической политике государства и, в частности, обеспечить переход к высокопродуктивному, ресурсосберегающему и экологически чистому производству в сельском хозяйстве. Инновационный вариант производства сельскохозяйственной продукции должен базироваться на внедрении цифровых технологий и платформенных решений «умного сельского хозяйства». Наиболее соответствующей принципам «умного сельского хозяйства» является цифровая технология точного земледелия, в основе научной концепции которой лежит представление о практически повсеместном существовании в пределах

каждого сельскохозяйственного поля природной и (или) антропогенной пространственно-временной неоднородности, которую необходимо количественно учитывать при планировании и выполнении различных агроприёмов. Как показывает международный и отечественный опыт, применение ТЗ без создания интеллектуальных систем (ИС) поддержки принятия агротехнологических решений не позволяет эффективно использовать весь потенциал данного инновационного направления аграрной науки (Reichardt, Jurgens, 2009; Aker, 2011; Fountas et al., 2015; Якушев, 2016; Kuehne et al., 2017; Scherer et al., 2018). Производители, как правило, затрудняются с принятием решений по причине недостаточного осознания экономического эффекта от использования методов ТЗ (Long et al., 2016; Paustian, Theuvsen, 2017; Bramley, Ouzman 2019; Kernecker et al., 2020) сложности их адаптации к условиям конкретного хозяйства (Grifn et al., 2017; Miller et al., 2019), а также значительного количества разнородной информации и сложности выбора на её основе оптимального агротехнологического мероприятия (Tey, Brindal, 2012; Wolfert et al., 2017). Отсутствие ИС, отечественной роботизированной сельскохозяйственной техники и надежных

измерительных и вычислительных комплексов информационного обеспечения системы поддержки принятия оптимальных решений (включая недорогостоящие методы распознавания и выделения границ пространственной и временной неоднородности посевов и среды их обитания) является одной из основных причин, сдерживающих развитие ТЗ в России.

Для построения ИС необходимо создать электронную базу агротехнологических знаний (БЗ) и обеспечить надлежащее наполнение базы данных (БД) достоверной пространственно-атрибутивной информацией о хозяйствующем субъекте. В компьютер должны быть внесены базовые агрономические сведения и алгоритмы выработки технологических решений применительно к почвенно-климатическим и экономическим условиям конкретного сельскохозяйственного предприятия. Традиционная практика получения, обработки и представления пространственно-распределенной информации, а также ее полнота и достоверность не соответствуют требуемому уровню технологий ТЗ. Необходимы мобильные и стационарные средства сопряженного наземного и дистанционного мониторинга почвенно-климатических условий, новые методы планирования и проведения прецизионных полевых опытов, а также надёжный инструментарий оценки агроэкологического состояния посевов и среды их обитания. Перспективным масштабируемым

ресурсом информационного обеспечения систем ТЗ являются аэрокосмические данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Данные ДЗЗ уже сегодня позволяют существенно повысить качество и увеличить масштабы информационного обеспечения сельского хозяйства. Указанные вопросы в настоящее время активно обсуждаются на различных научных мероприятиях и конференциях, а также в публикациях (Лупян и др., 2011, 2018; Павлюшин, Лысов, 2019; Шпанёв, 2019). При этом отмечается, что следует развивать методы и технологии использования информации, получаемой на основе данных дистанционного зондирования, для оценки различных характеристик сельскохозяйственных земель и посевов, необходимых для выработки и принятия решений с помощью ИС. Необходимо также создание новых технологий и информационных систем, обеспечивающих возможность работы с данными дистанционного мониторинга на различных уровнях. Всё отмеченное выше в совокупности составляет основу научно-технической платформы, обеспечивающей международную конкурентоспособность разработок в области построения и реализации ИС для сельского хозяйства, а также генерацию научно обоснованных технологий прецизионного управления производством растениеводческой продукции с учетом сложившихся на заданном сельскохозяйственном предприятии и прогнозируемых погодных, почвенных и экономических условий.

Методологические аспекты построения интеллектуальных систем и задача автоматизации процесса выработки агротехнологических решений в земледелии

Как правило, при решении задач с помощью компьютера используются традиционный подход и так называемые новые информационные технологии. В рамках традиционного подхода разработчик должен сформулировать задачу, составить алгоритм решения, соответствующую программу для ЭВМ и решить её. Такой подход целесообразен в случаях, когда проблема уже исследована математически и существуют надежные сходящиеся алгоритмы её решения. Наличие четкого алгоритма является обязательным условием для использования традиционного подхода при решении задачи с помощью ЭВМ. В то же время существует необходимость решения большого количества плохо формализуемых задач. Алгоритмов решения таких задач либо не существует, либо их можно найти только, например, в результате человеко-машинного взаимодействия или при помощи методов машинного обучения. Использование человеко-машинной системы для решения плохо формализуемых задач более перспективно, так как существует множество неформальных задач, которые человек способен решить. Необходимо, чтобы компьютер оказывал помощь человеку в решении таких задач. Компьютерное решение задач основывается на новых информационных технологиях, теоретической базой которых являются разработки в области искусственного интеллекта (Гаврилова, Муромцев, 2008; Аллайдин, 2017; Kang, Wang, 2017; Eli-Chukwu, 2019).

Исторически теоретические разработки в области искусственного интеллекта ведутся в двух основных направлениях. Первое направление ориентировано на разработку интеллектуальных машин и программ без вхождения в специфику предметной области, путем моделирования их биологического прототипа – человеческого интеллекта.

Основные усилия направлены на решения, позволяющие имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении тех или иных задач результаты, сопоставимые как минимум с результатами интеллектуальной деятельности человека. Данное направление включает в себя IT-инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе с использованием методов машинного обучения), а также сервисы по обработке данных и поиску решений.

Второе направление связано с разработкой методов и приёмов решения плохо формализуемых задач на ЭВМ, ориентированных на специфику той или иной предметной области. Создаваемые при этом специализированные методы, способы и системы предназначены для работы с частью сложных математических и логических функций, позволяющих частично автоматизировать интеллектуальную деятельность человека при решении им конкретных задач, возникающих в данной предметной области. Наибольший интерес в рамках данного направления представляют экспертные системы, которые основаны на знаниях, используемых в конкретной предметной области для решения различных задач, в том числе плохо формализуемых. Основным достоинством экспертных систем является возможность накопления знаний и сохранения их в течение длительного времени. В отличие от человека, экспертные системы объективно подходят к любой информации, что улучшает качество проводимой экспертизы, а при решении задач, требующих обработки большого количества данных, вероятность возникновения ошибки при переборе крайне мала. Структура типовой экспертной системы состоит из базы данных (БД), базы знаний (БЗ), подсистемы вывода (множества правил и алгоритмов, по которым

осуществляется решение конкретных задач), подсистемы приобретения знаний и диалогового интерфейса.

Центральным блоком экспертной ИС выработки решений в определенной предметной области является БЗ, на которой основаны её «интеллектуальные способности». Новые информационные технологии, базирующиеся на применении методологии искусственного интеллекта, позволяют создавать прикладные системы, обеспечивающие формализованное описание, накопление и использование знаний для решения практических задач. Однако применение новых технологий для создания баз знаний в различных предметных областях является сугубо индивидуальным процессом, а эффективных универсальных подходов на сегодняшний день не существует. Поэтому для автоматизации процесса выработки агротехнических решений в земледелии необходимо разработать методы представления, формализации и хранения знаний, а также алгоритмы управления процессом их обработки в соответствии с определенными правилами, которые ЭВМ может автономно использовать в механизмах логического вывода (Якушев, Якушев, 2007; Полуэктов, 1991).

Система представления знаний является одним из ключевых понятий в экспертных ИС. При определении разработчиками правил представления знаний необходимо, чтобы они подходили для описания связей между понятиями, объектами и их характеристиками, которые в совокупности формируют структуру той или иной предметной области и определяют эффективность ИС. Построению правил предшествует этап всестороннего анализа знаний и определения возможных методов их системного применения в конкретной предметной области. В данном случае к предметной области относятся технологические операции, сельскохозяйственные культуры и сорта, сельскохозяйственные поля, сроки возделывания на них культур, агропотребования и различные характеристики технологических операций (типы машин, количество и виды агрохимических средств, применяемых в земледелии). В то же время для рассматриваемых понятий и объектов характерны многочисленные количественные и качественные параметры, совокупность которых в конечном счете и определяет данное понятие и объект. Формирование технологии возделывания сельскохозяйственной культуры на конкретном поле подразумевает необходимость учета значительного количества разнородных данных: агрохимических, агрофизических, технологических, биологических, агрометеорологических, экономических и других. Процесс возделывания сельскохозяйственных культур заключается в некоторой последовательности выполнения отдельных технологических операций. К ним относятся различные виды обработки почвы, внесение удобрений, сев (посадка), защита посевов от вредителей, уборка урожая. Каждая операция проводится в определенный календарный период, а её выполнение (или отказ от нее) зависит от конкретных условий. Первый тип условий определяется климатической зоной, видом полевой культуры, особенностями сорта, типом почвы и её разновидностью по агрофизическим и агрохимическим свойствам, второй – ситуацией, сложившейся в конкретный год и период вегетации (погодные условия, влагозапас, наличие вредных организмов, состояние посевов и т.д.). От

перечисленных условий в значительной степени зависят нормы технологического воздействия при выполнении операции на заданном сельскохозяйственном поле. Это особенно важно при использовании технологии точного земледелия, в рамках которой указанные нормы могут корректироваться в ходе выполнения тех или иных технологических операций в зависимости от внутривидовой неоднородности. Создаваемые в Агрофизическом институте математические динамические модели продукционного процесса, текущей и прогнозной оценки состояния посевов и среды их обитания позволяют в ряде случаев расчетным путем определить условия, необходимые для установления сроков и интенсивности технологических операций. Такой подход имеет очевидное преимущество, так как при помощи математических моделей можно не только осуществить расчет необходимых ресурсов и показателей, характеризующих текущее состояние посевов и (или) почвы, но и спрогнозировать его на две-три недели вперед, что позволяет своевременно подготовиться к изменениям в управлении продукционным процессом возделывания сельскохозяйственных культур (подготовка необходимой техники, удобрений, средств защиты растений и т.п.) (Баденко и др., 2017; Якушев, 2010).

Из изложенного выше следует, что специфика предметной области ИС для поддержки агротехнологических решений заключается, с одной стороны, в большом количестве описательных (декларативных) знаний, основанных на многолетнем опыте, закреплённом в законах и традициях практического земледелия и обобщенном в многочисленных инструкциях, методических и технологических указаниях. С другой стороны, наряду с декларативными знаниями предметная область ИС для генерации агротехнологических решений может включать в себя процедурные знания, для получения которых используются математические модели. Процедурные знания представляются в виде компьютерных моделей различной сложности и назначения, оформленных в виде отдельных программных модулей. В связи с этим наибольшие трудности при разработке ИС поддержки агротехнологических решений вызывает процесс их компьютерной реализации, эффективность которого зависит от структуры представления знаний для электронной обработки.

Таким образом, с учетом специфики предметной области необходимо разработать гибридную модель сопряженного описания и представления декларативных и процедурных знаний для последующей компьютерной обработки и создать инструментальные средства автоматизации данного процесса. Далее будет рассмотрен предложенный авторами подход к описанию предметной области ИС для земледелия, основанный на достижениях новых информационных технологий. Это аппарат искусственного интеллекта, который включает не только традиционные математические, но также логические и логико-лингвистические модели, для создания которых может использоваться естественный язык предметного специалиста. Это позволяет значительно расширить круг задач, которые могут быть формализованы. Информация, необходимая для их решения, будет структурирована, что потенциально обеспечит возможность развития инструментария генерации агротехнологий как продукта научных знаний.

Система представления и обработки агротехнологических знаний

Для представления знаний, необходимых для синтеза агротехнологических решений, предлагается использовать следующие простые конструкции и их логические комбинации:

$$\langle \text{Атрибут} \rangle [\langle \text{Атрибут} \rangle] \dots [\langle \text{Атрибут} \rangle]; \quad (1)$$

$$\langle \text{Атрибут} \rangle (\text{Условия}) [\langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})]] \dots [\langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})]]; \quad (2)$$

$$\langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \dots \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})]]; \quad (3)$$

$$\langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \vee \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \vee \dots \vee \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})]]; \quad (4)$$

$$\{ \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \dots \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \} \vee \dots \vee \{ \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \wedge \dots \wedge \langle \text{Атрибут} \rangle [(\text{Условия})] \}; \quad (5)$$

Введенные в (1)–(5) обозначения имеют следующий смысл: «Атрибут» – наименование поля из базы данных или значение поля в базе данных. В каждой из конструкций (1)–(5) для описания могут быть использованы любые атрибуты базы данных, в общем случае ограничений нет.

«[]» – содержимое в квадратных скобках является обязательной конструкцией для описания знаний; «V» – логическое «или»; «^» – логическое «и»; «>» – данный знак ставится в конце той или иной конструкции; «()»; «{ }» – соответственно простые и фигурные скобки, которые в сочетании с «^» и «V» используются для записи «сложных» конструкций, составленных из комбинации простых, например (5).

«Условия» – производные правила. В общем случае они представляют собой арифметические, логические условия, выражения или их комбинации. Данная конструкция также может использоваться для обращения к математической модели, оформленной в виде отдельного программного модуля, или к встроенной непосредственно в описание знаний специальной процедуре для простых вычислений.

При описании агротехнологических знаний предусмотрены три формы записи «Условия»:

$$\text{ЕСЛИ}(\text{Выр.1}) \quad (6)$$

$$\text{ЕСЛИ}(\text{Выр.1}) \text{ ТО Выр.2, ..., [Выр.2]} \quad (7)$$

$$\text{Выр.2, ..., [Выр.2];} \quad (8)$$

Выр. 1 = «Ариф.» V «Лог.» V «Вн. прог.»

Выр. 2 = («Атрибут» = «Ариф.») V «Вн. прог.»

«Ариф.» – арифметическое выражение – функция $R(A_{ij})$ значений атрибутов из БД, где $R=R_1+\dots+R_n$ – схема БД; A_{ij} – названия атрибутов в БД; ij – пары чисел, определяющие адрес атрибута из БД; i – номер таблицы (файла) в схеме БД; j – порядковый номер столбца в таблице; при составлении арифметических выражений используются числовые константы, а также арифметические операторы сравнения: «=», «>», «<», «<=», «>=»;

«Лог.» – логическое выражение; для его составления в общем случае используются комбинации из

арифметических выражений, логических операторов «и», «или», «не», логических констант «истинно», «ложно», а также буквенно-цифровых констант;

«Вн. прог.» – обращение к подпрограмме, которое имеет вид – «имя программы» (A_{ij}); «Атрибут» = «Ариф.», ..., «Атрибут» = «Ариф.»/ A_{ij} – адреса атрибутов в БД, куда будут помещены результаты счета той или иной модели;

Рассмотрим подробнее применение в структурах (2)–(5) конструкции описания знаний – «(Условия)». Как определено выше, структура «(Условия)» в общем случае имеет три типа записи (6), (7) и (8).

Если при описании какого-либо факта, объекта или значения из БД применяется запись типа (6), то это значит, что рассматриваемое правило будет включено в БЗ только при обязательном выполнении условия, содержащегося в выражении «Выр.1». В качестве примера рассмотрим конструкцию «Известкование» (Если «РН» ≤ 4.5). Приведенная запись означает, что агротехнологическая операция «Известкование» будет включена в перечень планируемых на заданном поле операций при величине кислотности (РН), не превышающей 4.5.

При применении в описании конструкции типа (7) включение в БЗ агротехнологических знаний в виде правил происходит аналогично предыдущему случаю, однако в то же время в БЗ включается дополнительный расчетный параметр (параметры), который представлен выражением типа «Выр. 2», например: «Известкование» (Если «РН» ≤ 4.5), то «Норма внесения известки» = «8 тонн/га».

В случае, если при описании знаний используется запись типа (8), соответствующие правила включаются в БЗ безусловно. Кроме того, включается один или несколько расчетных параметров, например:

$$\begin{aligned} \langle \text{Внесение мин. удобрений} \rangle (\langle \text{Потребность в азоте} \rangle &= 75 - 4 * \langle \text{Пру} \rangle + 0.1 * \langle \text{Пру} \rangle * \langle \text{Пру} \rangle); \\ \langle \text{Потребность в фосфоре} \rangle &= 3 * \langle \text{Пру} \rangle - 30; \\ \langle \text{Потребность в калии} \rangle &= 2 * \langle \text{Пру} \rangle - 16); \end{aligned}$$

Здесь «Пру» – программируемый урожай (в ц/га), а приведенные зависимости для расчета доз удобрений получены в результате обобщения результатов большого количества полевых опытов, проведенных в Гатчинском районе. Их использование возможно при определенных условиях, поэтому можно воспользоваться конструкцией (7) и таким образом более строго описать применение данных зависимостей:

$$\begin{aligned} \langle \text{Внесение мин. удобрений} \rangle (\text{ЕСЛИ} \langle \text{Адрес поля} \rangle &= \langle \text{Гатчинский район} \rangle \wedge \langle \text{Культура} \rangle = \langle \text{Ячмень} \rangle \wedge \\ \langle P_2O_5 \rangle \geq 15 \wedge \langle K_2O \rangle \geq 15 \text{ ТО} \langle \text{Потребность в азоте} \rangle &= 75 - 4 * \langle \text{Пру} \rangle + 0.1 * \langle \text{Пру} \rangle * \langle \text{Пру} \rangle; \\ \langle \text{Потребность в фосфоре} \rangle = 3 * \langle \text{Пру} \rangle - 30; \langle \text{Потребность в калии} \rangle &= 2 * \langle \text{Пру} \rangle - 16); \end{aligned}$$

В данном случае агротехнологическая операция «Внесение мин. удобрений» будет включена в перечень планируемых на заданном поле операций, если только поле расположено в Гатчинском районе, на нем возделывается ячмень, а содержание фосфора и калия в почве составляет не менее 15 мг/100 г почвы. Кроме того, будет рассчитана потребность в минеральных удобрениях для указанных

условий в соответствии с вычислительной процедурой, встроенной в описание данного правила.

Обычно расчет параметра, характеризующего ту или иную компоненту агротехнологии, оформляется в виде специального программного модуля (математической модели). В данном случае при описании рассматриваемой компоненты агротехнологии используется вариант «**Вн. прог.**». Приведем пример. Пусть имеется универсальная подпрограмма расчета доз минеральных удобрений, которая называется «**Расчет удобрений**». Положим, что расчеты доз азотных, фосфорных и калийных удобрений будут помещены в БД с именами атрибутов «**N**», «**P**», «**K**» соответственно. Тогда соответствующая запись будет иметь вид:

«Внесение мин. удобрений» («Расчет удобрений» (N, P, K); «Потребность в азоте» = «N»; «Потребность в фосфоре» = «P»; «Потребность в калии» = «K»).

Приведенные примеры представления знаний с использованием различных типов записей («**Условия**») и структура самих конструкций (1) – (5) показывают, что существует достаточно широкий набор средств, позволяющих описывать декларативные и процедурные знания одновременно. При этом соответствующее описание может быть «привязано» к технологическим операциям, их характеристикам, а через них непосредственно к конкретному полю, культуре, сорту. Данное обстоятельство является чрезвычайно важным, так как предлагаемая система представления знаний позволяет описывать любые компоненты технологических операций и, следовательно, агротехнологии в целом. Под моделью агротехнологии здесь понимается описание последовательности технологических операций, каждой из которых в общем случае соответствуют условия выполнения и выбора операций, сроки проведения, те или иные агротребования и используемые сельскохозяйственные машины.

Технологическую схему возделывания сельскохозяйственной культуры на конкретном поле можно рассматривать как многошаговый процесс управления, осуществляемого в течение определённого промежутка времени, например вегетационного периода. Поэтому для планирования агротехнологических мероприятий, например на предстоящий вегетационный сезон, можно использовать следующую модель описания агротехнологических операций:

**: «Наименование операции» [(Условия)];
 [«Агротребования» [(Условия)]]; «Сроки
 проведения» [(Условия)]; {«Тип машины»
 [(Условия)] A «Тип агрегата» [(Условия)]
 V ... V («Тип машины» [(Условия)] A «Тип
 агрегата» [(Условия)]]};;** (9)

где символом « : » начинается и заканчивается описание агротехнологической операции.

Предложенная выше модель (9) описания агротехнологической операции является одним из шаблонов, на основе которого в дальнейшем описываются конкретные технологические приемы, которые могут быть выполнены в те или иные сроки при помощи тех или иных сельскохозяйственных машин в зависимости от складывающихся условий. Следует иметь в виду, что, изменяя структуру шаблона и степень детализации представления агротехнологических

знаний, можно управлять процессом наполнения БЗ для решения тех или иных задач. Гибкость конструирования шаблонов и их структуры обеспечивает включение в описание различных комбинаций первичных структур представления знаний (1) – (5). Структура шаблона допускает использование, причем в любой комбинации, атрибутивной информации из БД, отражающей многочисленные компоненты агротехнологической операции, а также возможность реализации вычислительной процедуры, встроенной непосредственно в одну или несколько конструкций шаблона, или вызова по необходимости внешней процедуры в виде отдельно оформленной программы (математической модели). Рассматриваемая возможность представления агротехнологических знаний позволяет включить в БЗ наряду с прикладными моделями базовую модель продуктивности агроэкосистем, разработанную в АФИ (Якушев, 2010). Диапазон применения прикладных моделей может быть очень широким. Например, их целесообразно использовать для выделения однородных единиц управления на сельскохозяйственном поле и расчета норм внесения на них удобрений и средств защиты растений. Сочетание инструментальных (измерительных) и вычислительных средств (прикладных моделей) может обеспечить решение данной наиболее сложной научной и информационной проблемы точного земледелия. Базовая модель может быть адаптирована для определения областей применимости уже разработанных прикладных моделей и оценки входящих в них эмпирических коэффициентов, также она является основой для выработки новых специализированных моделей. В частности, модель позволяет учитывать баланс основных составляющих энерго-массообмена в системе «почва-растение-атмосфера», что дает возможность количественно описать процессы накопления, трансформации и выноса из системы основных элементов питания, а также процесс формирования урожая в онтогенезе от сева до уборки. Это позволяет оценить влияние на процесс производства агротехнических мероприятий, сроков их проведения и складывающейся в текущем сезоне метеорологической обстановки.

Следует подчеркнуть, что использование шаблонов типа (9) для описания БЗ позволяет создать на новых принципах программно-математический аппарат обработки знаний. Это вытекает из того, что структура шаблона определяет функциональные возможности БЗ и направляет процесс вычислений, т.к. в шаблонах описания агротехнологических операций в общем случае алгоритмически прописан механизм их выбора для конкретных условий, указаны те или иные сроки проведения данных мероприятий, сформулированы правила определения соответствующих агротребований, а также может быть задан порядок подбора подходящих и имеющихся в хозяйстве машин, агрегатов и других ресурсов. Таким образом, процесс обработки знаний определяется не жестким алгоритмом, заложенным как обычно в компьютерную программу, а структурой конкретного шаблона, с помощью которого была описана технологическая операция (2).

Важно отметить, что предложенная модель описания технологических операций в соответствии с шаблоном типа (9) напоминает встречающиеся в специальной литературе фреймвые модели (Гаврилова, 2008; Алпайдин, 2017), для которых также характерна жесткая

алгоритмическая структура представления знаний. Фреймы (рамки или шаблоны) по определению – «Имя фрейма» («Имя слота», ..., «Имя слота»). Значениями слота могут быть числа, выражения, условия, ссылки, тексты и т.п. При наполнении фрейма ему и слотам присваиваются конкретные имена и значения. Теория фреймов в настоящее время используется для описания знаний в сложных прикладных системах, таких как теория научных

концепций. Однако универсальные инструкции по применению фреймов в ИС на сегодняшний день отсутствуют. По мере развития данной теории и методов машинного обучения можно ожидать, что соответствующие результаты будут применяться для совершенствования системы представления и обработки агротехнологических знаний в точном земледелии.

Прототип интеллектуальной системы и некоторые результаты его применения в точном земледелии

В АФИ создан и в настоящее время совершенствуется прототип ИС (рис. 1), основой которого являются рассмотренные выше конструкции представления и формализации агротехнологических знаний. Наряду с базами данных и знаний комплекс включает в себя функциональные блоки: интерфейсы экспертного и пользовательского

уровней, интерфейсы приема/передачи данных с/между бортовыми, полевыми и стационарными компьютерами, ГИС-инструменты, подключаемые программные модули (Якушев и др., 2019; Якушев и др., 2018; Конев и др., 2018; Якушев и др., 2017).



Рисунок 1. Прототип интеллектуальной системы поддержки принятия агротехнологических решений

На экспертном уровне формируются базовые агротехнологии, технологические адаптеры, подключаемые к ИС математические модели, оформленные в виде отдельных программных модулей, а также осуществляется наполнение БД нормативной и справочной информацией, используемой для создания БЗ. Пользователи (агрономы или руководители), являющиеся конечными потребителями тех агротехнологических декларативных и процедурных знаний, которые были формализованы на экспертном уровне, получают возможность генерировать адаптивные агроприемы для собственных полей с учётом актуальной информации о хозяйстве. Актуальная информация — это основные массивы данных (паспорта полей, сведения о семенном фонде, технике, агрохимикатах, финансах, метеоусловиях, кадрах и других ресурсах), необходимых для генерации адаптивных агротехнологий.

Пользователю предоставляется возможность не только автоматизации процесса генерации адаптивных агротехнологий для собственных полей, но и корректировки на этапе планирования параметров адаптации агротехнологий (добавления или исключения тех или иных агроприемов, увеличения/снижения норм внесения и т. д.). Интерфейс редактирования агротехнологий позволяет

пользователю моделировать различные варианты агромероприятий на предстоящий период и выбрать в конечном итоге оптимальный пакет агротехнологий для всех полей хозяйства.

Отличительной особенностью рассматриваемого прототипа является поддержка технологий точного земледелия, заключающаяся в создании электронных контуров полей и пространственно-ориентированных картосхем по агрохимическим и агрофизическим показателям, управлению дифференцированным внесением агрохимикатов, работе со спутниковыми и аэрофотоснимками, импорте карт урожайности, картосхем и другой информации при помощи различных протоколов обмена данными с бортовыми компьютерами сельхозтехники и мобильных комплексов. Функционал системы поддерживает возможность использования различных математических моделей и предлагает гибкий инструментарий для формализации знаний, генерации и представления результатов, в том числе с помощью ГИС-технологий. В частности, разработанный в АФИ геоинформационный модуль ГИС-АФИ, интегрированный в систему, позволяет получать, хранить, анализировать и визуализировать пространственно-ориентированные данные, привязанные к координатам с помощью

GPS/ГЛОНАСС-приемников (рис. 2), а также создавать для сельскохозяйственной техники, оснащенной бортовыми компьютерами и GPS/ГЛОНАСС-приемниками, карты-задания на дифференцированное выполнение агротехнических операций с учетом местонахождения техники на поле (рис. 3). Геоинформационная база необходима

для осуществления внесения минеральных удобрений, средств защиты растений и других агрохимикатов по технологии точного земледелия, а программное приложение ГИС-АФИ поддерживает все основные форматы данных, что позволяет импортировать/экспортировать ГИС-данные в/из различных источников.

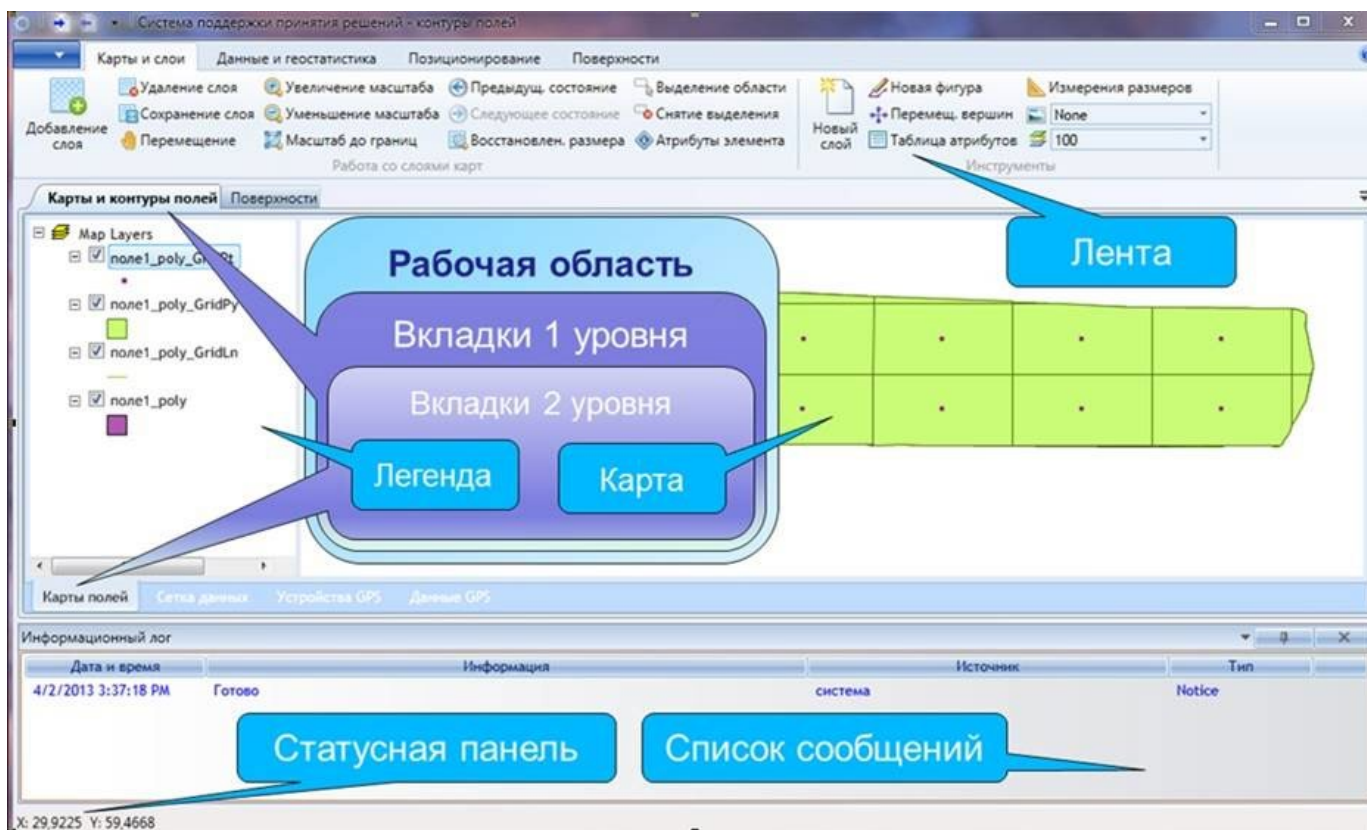


Рисунок 2. Главное окно приложения ГИС-АФИ

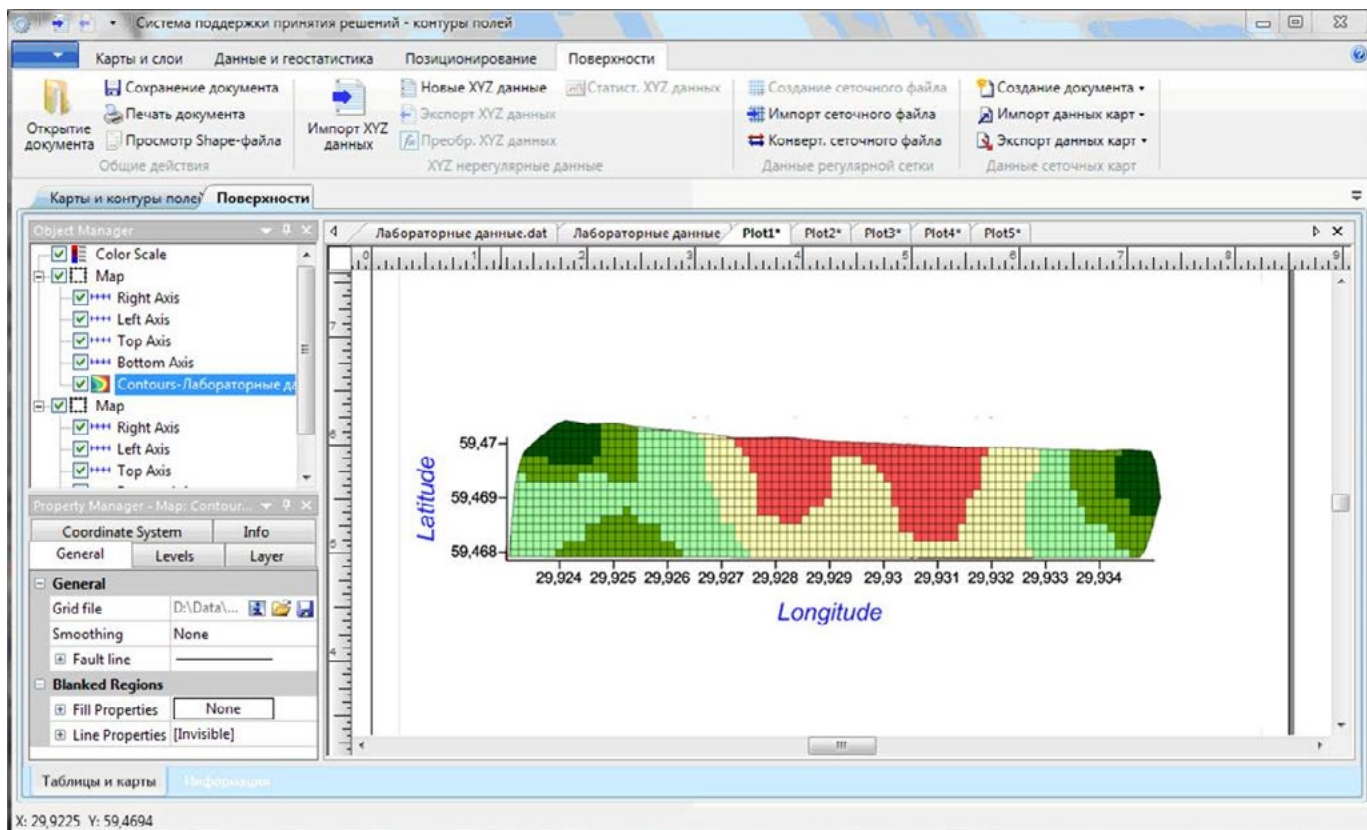


Рисунок 3. Карта-задание, полученная в результате обработки данных по дозам внесения удобрений

Апробация ИС проводилась на полигоне АФИ. Изучалось несколько вариантов технологий различной интенсивности: экстенсивная технология (контрольный вариант), в рамках которой проводятся только основные агротехнические мероприятия без дополнительных затрат; высокоинтенсивная технология, предусматривающая внесение удобрений и средств защиты растений в дозах, полностью удовлетворяющих потребность посева в период вегетации; точное земледелие, отличительной особенностью которого является дифференцированный подход к расчёту и внесению средств химизации в зависимости от показателей плодородия полей и состояния посевов. Сравнительный анализ показал, что применение интеллектуальной системы при выработке оперативных технологических приемов способствовало существенно повышению качества яровой пшеницы, снижению на 35–60% агрохимической нагрузки на окружающую среду, а также увеличению в 1.5–1.7 раза окупаемости удобрений и средств защиты растений на фоне существенного роста урожайности. При этом сокращение объёма применяемых азотных удобрений в варианте «точное земледелие» было достигнуто в основном за счёт проведения дифференцированных подкормок в вегетационный период (Якушев, Якушев, 2018; Матвеев и др., 2019).

На рис. 4 представлен процесс азотной подкормки яровой пшеницы с помощью N-сенсора, установленного на крыше трактора (режим «on-line»). Существенный недостаток применения N-сенсора заключается в необходимости выполнения большого объёма калибровочных работ. Важным ограничением также является высокая стоимость прибора.

В связи с целесообразностью поиска альтернативы для проведения азотных подкормок на опытных полях были заложены тестовые площадки (Митрофанова и др., 2016). Тестовые площадки представляют собой участки поля с



Рисунок 4. Азотная подкормка посевов на полигоне АФИ с помощью N-Sensor

различными дозами азотных удобрений в диапазоне от нуля до максимальной величины, которые вносятся с целью получения планируемой урожайности. В результате на тестовых площадках складываются различные, но известные условия азотного питания растений и, соответственно, посевы отличаются по оптическим характеристикам. Таким образом, на тестовых площадках моделируется весь спектр условий азотного питания растений: от дефицита до близкого к оптимальному (рис. 5). Дистанционное обследование посевов осуществлялось с помощью беспилотных летательных аппаратов самолётного и вертолётного типов, разработанных инженерами АФИ. На них размещались цифровые камеры для получения аэрофотографий посевов в видимой и инфракрасной областях спектра электромагнитного излучения. На каждой аэрофотографии поля отображались тестовые площадки с известной дозой внесённых азотных удобрений. Средние значения колориметрических (цветовых) характеристик посева на каждой из тестовых площадок являются эталонными. Посредством сравнения с ними характеристик остальных

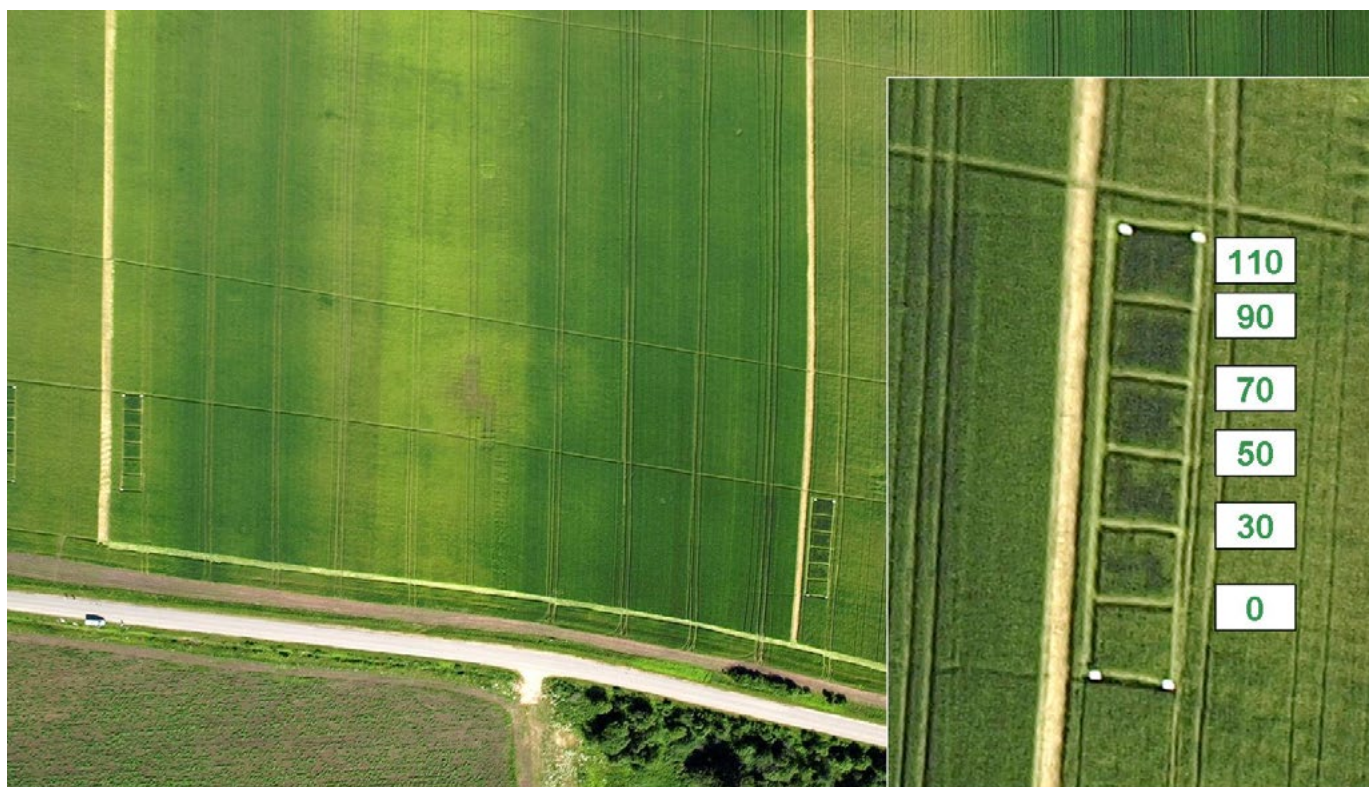


Рисунок 5. Тестовые площадки

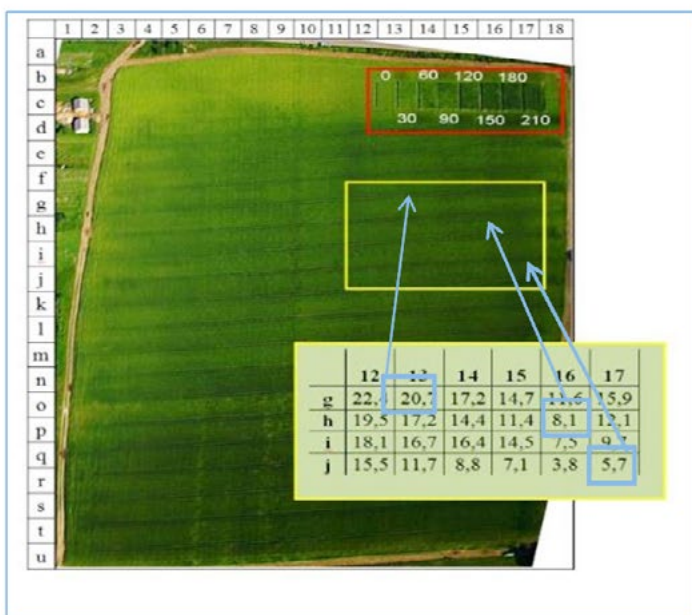
зон поля проводится оценка потребности растений в азоте. Выделение участков поля, на которых необходимо осуществить внесение азотных удобрений, выполнялось с помощью созданного специалистами АФИ автоматизированного метода построения калибровочных кривых по колориметрическим характеристикам аэрофотографий посевов (рис.6) (Буре и др., 2018). Такой подход позволяет провести оценку обеспеченности растений азотом на любом участке поля и составить электронную карту-задание на прецизионное внесение азотных удобрений, которая загружается в бортовой компьютер агрегата (рис. 7). Это доступный, недорогостоящий и достаточно точный метод мониторинга посевов, оценки их потребности в азотном питании и прецизионного внесения удобрений (рис. 8).



Рисунок 8. Азотная подкормка посевов на полигоне АФИ на основе карты-задания без использования N-Sensor

Аэрофотография посева пшеницы

Для выделенного желтым прямоугольником фрагмента поля приведены значения ΔE , характеризующие отличия колориметрических характеристик растительного покрова на эталонной тестовой площадке (доза азота 210 кг/га) и различных участках поля внутри выделенной зоны (g12–j17).



Калибровочная кривая для определения обеспеченности растений азотом по колориметрическим характеристикам посева пшеницы

Оценка обеспеченности растений азотом по величине ΔE для участков поля, выделенных желтой рамкой: J16 – коричневый, h15 – фиолетовый, g12 – синий.

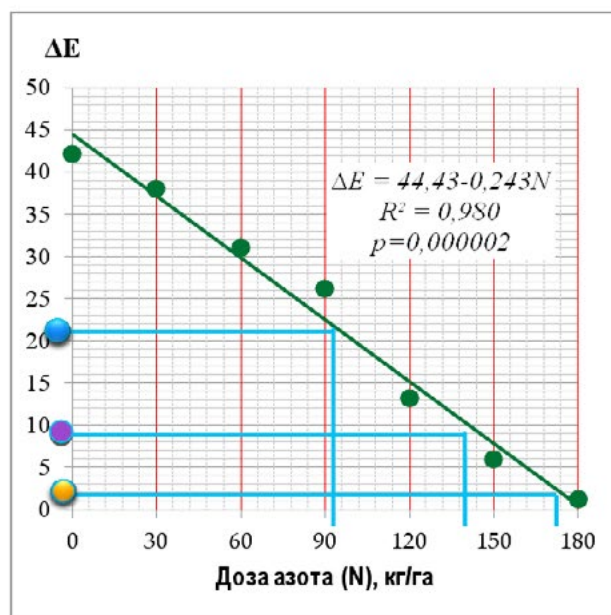


Рисунок 6. Инструменты интерпретации данных дистанционного зондирования (метод АФИ)

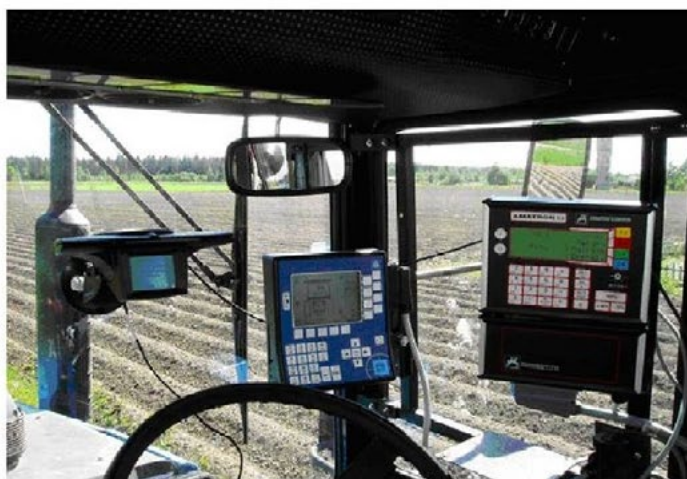
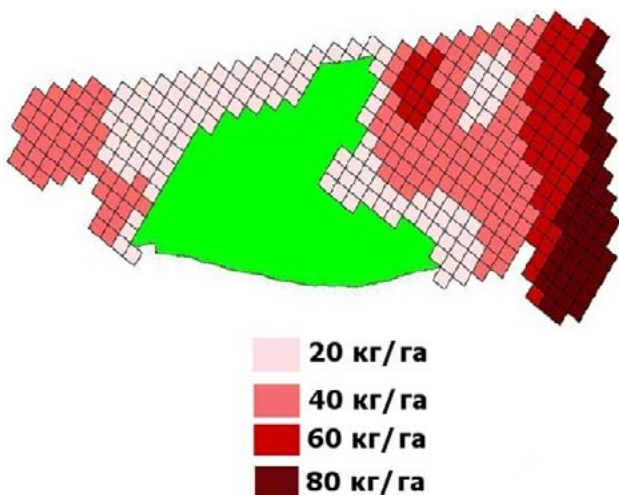


Рисунок 7. Карта-задание и бортовое оборудование агрегата для прецизионной азотной подкормки посевов

Важно отметить, что при апробации ИС использовался навигационный комплекс «Агронавигатор плюс» (разработка ООО «Системы точного земледелия», г. Новосибирск), оснащенный приемником спутниковых навигационных сигналов системы ГЛОНАСС и обеспечивающий субметровую точность вождения техники. В полевом эксперименте были задействованы две машины — РМУ-8000 (Щучинский ремонтный завод, Беларусь) и Amazone

(Евротехника, г. Самара), укомплектованные электронным оборудованием для автоматического управления дозирующими элементами, а в качестве управляющего компьютера также использовался навигационный комплекс «Агронавигатор плюс». Данный комплекс продемонстрирован АФИ на агропромышленной выставке «Всероссийский день поля-2019», прошедшей в Ленинградской области.

Библиографический список (References)

- Алпайдин Э (2017) Машинное обучение: новый искусственный интеллект. Пер. с англ. М.: Издательская группа «Точка». 208 с.
- Баденко ВЛ, Топаж АГ, Якушев ВВ и др. (2017) Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований. *Сельскохозяйственная биология*. 52(3):437–445. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.437rus>
- Буре ВМ, Митрофанов ЕП, Митрофанова ОА и др. (2018) Выделение однородных зон сельскохозяйственного поля для закладки опытов с помощью беспилотного летательного аппарата. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 14(2):145–150
- Гаврилова ТА, Муромцев ДИ (2008) Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы. Санкт-Петербург: Высшая школа менеджмента СПбГУ. 488 с.
- Конев АВ, Ломакин ВС, Матвеев ДА и др. (2018) Структура представления производственных процессов в системе поддержки принятия агротехнологических решений. *Агрофизика*. 1:24–36.
- Лупян ЕА, Бурцев МА, Прошин АА, Кобец ДА (2018) Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 15(3):53–66. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66>
- Лупян ЕА, Мазуров АА, Назиров РР, Прошин АА и др. (2011) Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 8(1):26–43.
- Матвеев ДА, Якушев ВВ, Якушев ВП (2019) Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* 16(3):79–86. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86>
- Митрофанова ОА, Буре ВМ, Канаш ЕВ (2016) Математический модуль для автоматизации колориметрического метода оценки обеспеченности растений азотом. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления* 1:85–91.
- Павлюшин ВА, Лысов АК (2019) Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 16(3):69–78. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78>
- Полуэктов РА (1991) Динамические модели агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат. 312 с.
- Шпанев АМ (2019) Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* 16(3): 61–68. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68>
- Якушев ВВ (2010) Интеллектуальные системы управления для ресурсосберегающих технологий точного земледелия. *Экологические системы и приборы* 7: 26–33.
- Якушев ВВ (2016) Точное земледелие: теория и практика. СПб.: АФИ. 364 с.
- Якушев ВП, Дубенок НН, Лупян ЕА (2019) Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* 16(3):11–23. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23>
- Якушев ВП, Лекомцев ПВ, Воропаев ВВ (2017) Дифференцированное применение средств химизации при выращивании яровой пшеницы. *Вестник Российской сельскохозяйственной науки* 4:13–17.
- Якушев ВП, Якушев ВВ (2007) Информационное обеспечение точного земледелия. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН. 384 с.
- Якушев ВП, Якушев ВВ (2018) Перспективы «умного сельского хозяйства» в России. *Вестник РАН* 88(9):773–784.
- Якушев ВП, Якушев ВВ, Конев АВ и др. (2018) О совершенствовании реализации агротехнологических решений в точном земледелии. *Вестник российской сельскохозяйственной науки* 1:13–17.
- Aker JC (2011) Dial “A” for agriculture: a review of information and communication technologies for agricultural extension in developing countries. *Agric Econ* 42(6):631–647. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00545.x>
- Bramley RGV, Ouzman J (2019) Farmer attitudes to the use of sensors and automation in fertilizer decision-making: nitrogen fertilization in the Australian grains sector. *Precis Agric* 20(1):157–175. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9589-y>
- Eli-Chukwu NC (2019) Applications of Artificial Intelligence in Agriculture: A Review. *Eng Technol Appl Sci Res* 9(4):4377–4383.
- Fountas S, Carli G, Sorensen CG, Tsiropoulos Z et al (2015) Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Comp Electron Agric* 115:40–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
- Grifn TW, Miller NJ, Bergtold J, Shanoyan A et al (2017) Farm’s sequence of adoption of information-intensive

- precision agricultural technology. *Appl Eng Agr* 33(4):521–527. <https://doi.org/10.13031/aea.12228>
- Kang MZ, Wang FY (2017) From parallel plants to smart plants: intelligent control and management for plant growth. *IEEE-CAA J Automatica Sinica* 4(2):161–166. <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510487>
- Kernecker M, Knierim A, Wurbs A, Kraus T, Borges F et al (2020) Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. *Precis Agric* 21(1):34–50. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>
- Kuehne G, Llewellyn R, Pannell DJ, Wilkinson R et al (2017) Predicting farmer uptake of new agricultural practices: A tool for research, extension and policy. *Agric Syst* 156:115–125. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.007>
- Long TB, Blok V, Coninx I (2016) Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *J Clean Prod* 112:9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>
- Miller NJ, Griffin TW, Ciampitti IA, Sharda A (2019) Farm adoption of embodied knowledge and information intensive precision agriculture technology bundles. *Precis Agric* 20(2):348–361. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9611-4>
- Paustian M, Theuvsen L (2017) Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. *Precis Agric* 18(5):701–716. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9482-5>
- Reichardt M, Jurgens C (2009) Adoption and future perspective of precision farming in Germany: results of several surveys among different agricultural target groups. *Precis Agric* 10(1):73–94. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9101-1>
- Scherer LA, Verburg PH, Schulp CJE (2018) Opportunities for sustainable intensification in European agriculture. *Global Environ Chang* 48:43–55. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.009>
- Tey YS, Brindal M (2012) Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precis Agric* 13(6):713–730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>
- Walter A, Finger R, Huber R, Buchmann N (2017) Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proc Nat Acad Sci USA* 114(24):6148–6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Wolfert S, Ge L, Verdouw C, Bogaardt, M-J (2017) Big data in smart farming: A review. *Agric Syst* 153:69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Translation of Russian References

- Alpaydin E (2017) *Mashinnoye obucheniye: novyye iskusstvennyy intellekt* [Machine learning: new artificial intellect]. Per. s angl. Moskva: Izdatelskaya gruppa «Tochka». 208 p. (In Russian)
- Badenko VL, Topazh AG, Yakushev VV et al. (2017) [Crop models as research and interpretative tools]. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* 52(3):437–445 (In Russian) <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2017.3.437rus>
- Bure VM, Mitrofanov YEP, Mitrofanova OA et al. (2018) [Selection of homogeneous zones of agricultural field for performing experiments using unmanned aerial vehicle]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*. 14(2):145–150 (In Russian) <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2018.206>
- Gavrilova TA, Muromtsev DI (2008) *Intellektualnyye tekhnologii v menedzhmente: instrumenty i sistemy* [Intelligent technologies in management: tools and systems]. St. Petersburg: Vysshaya shkola menedzhmenta SPbGU. 488 p. (In Russian)
- Konev AV, Lomakin VS, Matveyenko DA et al. (2018) [The structure of production processes in the agrotechnical decision support system]. *Agrofizika* 1:24–36 (In Russian) <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.01.04>
- Lupyan YeA, Burtsev MA, Proshin AA, Kobets DA (2018) [Development of the concepts for remote monitoring information systems]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 15(3):53–66 (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66>
- Lupyan YeA, Mazurov AA, Nazirov RR, Proshin AA et al. (2011) [Technologies for building remote monitoring information systems]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 8(1):26–43 (In Russian)
- Matveyenko DA, Yakushev VV, Yakushev VP (2019) [Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 16(3):79–86 (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86>
- Mitrofanova OA, Bure VM, Kanash YeV (2016) [Math module to automate the colorimetric method for estimating nitrogen status of plants]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* 1:85–91 (In Russian)
- Pavlyushin VA, Lysov AK (2019) [Phytosanitary safety of agroecological systems and remote phytosanitary monitoring in plant protection]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 16(3):69–78 (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78>
- Poluektov RA (1991) *Dinamicheskiye modeli agroekosistem* [Dynamic models of agroecosystems]. L.: Gidrometeoizdat. 312 p. (In Russian)
- Shpanev AM (2019) [Experimental basis for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 16(3):61–68. (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68>
- Yakushev VP, Dubenok NN, Lupyan YeA (2019) [Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 16(3):11–23 (In Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23>
- Yakushev VP, Lekomtsev PV, Voropayev VV (2017) [Differentiated rate fertilizer and ameliorant application

- in the cultivation of spring wheat]. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* 4:13–17. (In Russian)
- Yakushev VP, Yakushev VV (2007) Informatsionnoye obespecheniye tochnogo zemledeliya [Information support of precision agriculture]. St. Petersburg: PIYaF RAN. 384 p. (In Russian)
- Yakushev VP, Yakushev VV (2018) Perspektivy «umnogo selskogo khozyaystva» v Rossii [Prospects of “smart agriculture” in Russia]. *Vestnik RAN* 88(9):773–784. (In Russian)
- Yakushev VP, Yakushev VV, Konev AV et al. (2018) [On improving the implementation of agrotechnological solutions in precision agriculture]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* 1:13–17. (In Russian)
- Yakushev VV (2010) [Intelligent management systems for resource-saving technologies of precision agriculture]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory* 7:26–33 (In Russian)
- Yakushev VV (2016) Tochnoye zemledeliye: teoriya i praktika [Precision agriculture: theory and practice]. St. Petersburg: AFI. 364 p. (In Russian)

Plant Protection News, 2020, 103(1), p. 25–36

OECD+WoS: 4.01+AM (Agronomy)

<http://doi.org/10.31993/2308-6459-2020-103-1-25-36>

Full-text article

SCIENTIFIC BACKGROUND OF INTELLECTUAL SYSTEM DEVELOPMENT FOR PRECISION AGRICULTURE

V.P. Yakushev, V.V. Yakushev, S.Yu. Blokhina*

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

**corresponding author, e-mail: e-mail: sblokhina@agrophys.ru*

The paper presents the new approach for the construction of a knowledge background and the developing of the intellectual system on its basis to support the planned technological solutions. The generation of industrial-technological spectrum of operative possibilities and optimal proposals for precision crop yield management have been fulfilled by intellectual support systems with due consideration of weather, soil, ecological and economic conditions of the given agricultural area. The logical-and-linguistic apparatus has been applied to present and process agro-technological knowledge. The formalization of the subject area and determination the main entities and the relationships between the concepts have been carried out with specialized model structures for describing technological operations and production rules. As a result, the agrotechnological knowledge has been presented in an uniform structured form suitable for storage and computer processing. The prototype of the intellectual system has been tested in comparative field experiments aimed at examination of technologies of varied intensity, including precision agriculture technology. Differentiated approach to the calculation and application of chemicals according to indicators of field fertility and crop conditions is the distinctive feature of precision agriculture technology. Long-term field tests have shown economic and ecological efficiency of intellectual support system implementation for application of planned technological solutions. The quality of spring wheat grain has been considerably improved, the agrochemical impact on the environment has been reduced by 35–60%, the sufficiency of fertilizer and crop protection products has increased by 1.5–1.7 times along with the significant increment of crop production. Trials of the intellectual system have been performed on the basis of integration of domestic on-board navigation equipment (Precision Farming Systems Ltd. Novosibirsk), robotic units based on RMU-8000 (Shchuchinsky repair factory, Belarus) and Amazone (Euroengineering, Samara) vehicles. This complex has been presented during the agricultural exhibition “All-Russian Field Day 2019” held in the Leningrad Region.

Keywords: precision agriculture, intellectual systems, knowledge background, mathematical model, electronic task map, remote sensing data, optical crop characteristics

Received: 04.12.2019

Accepted: 21.01.2020