

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕВООБОРОТОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Меденников В.И.

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
Москва, Россия
dommed@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается формализованное описание системы автоматизированного проектирования севооборотов в сельском хозяйстве на основе математической модели оптимизации их структуры, которая реализуется в создаваемой цифровой платформе управления (ЦПУ) отраслью, онтологически и функционально интегрирующей задачи аграрного производства с единых научно-обоснованных позиций.

Ключевые слова: сельское хозяйство, точное земледелие, система автоматизированного проектирования, севооборот, математическая модель.

Введение

Возросшие возможности ИКТ и связанных с ними механизмов, оборудования, математического обеспечения привели к проявлению некоторых принципов цифровизации общественного развития, один из основных формулируется так – создание системы управления информацией на базе интеграционных процессов онтологически, физически и логически разрозненных данных в единую облачную структурированную среду. Это диктуется требованиями цифровой экономики (ЦЭ) сбора и использования огромного объема данных в целях ее эффективности. Указанные принципы явились толчком возникновения нового направления в проектировании изделий – систем автоматизированного проектирования (САПР), успехи в реализации которых в виде САД-систем были названы Национальным научным фондом США величайшим событием, сравнимым по последствиям с появлением электричества [1].

САПР совершают в настоящее время революцию в промышленности, сокращая время проектирования систем и ручной труд, повышая точность этого процесса, качество проектов и производительность проектировщиков с одновременным уменьшением величины ошибок. Появление САПР вместе со стандартизацией интеграционных технологий привело к переходу рынка от коробочных программных продуктов к комплексным решениям по разработке информационных систем с поддержкой проектов на всех стадиях – от идеи до эксплуатации, воплощением чего стало создание цифровых двойников (ЦД). Данное понятие было озвучено в 2002г. Майклом Гривсом в работе «Происхождение цифровых двойников», в которой под ЦД он определил единство трех следующих элементов: реальный физический продукт, его виртуальный продукт, данные и алгоритмы, объединяющие виртуальный и физический продукты.

В работе [2] рассматривается необходимость формирования единого цифрового двойника сельскохозяйственного предприятия в России, поскольку цифровизация отрасли требует интеграции большого количества структурированной информации и алгоритмов их обработки, значительного увеличения функциональных задач, что проявляется в лидирующей роли точного земледелия (ТЗ) среди всех технологий ЦЭ. Самое главное – ЦД позволяет разработать САПР севооборотов (СО), которые являются основой всего аграрного производства. СО в земледелии определяют все технологические операции в сельском хозяйстве. От используемых СО зависят технологии обработки почвы, ухода за культурами, внесения удобрений и средств защиты растений, выбор защитных мероприятий от эрозии почвы, выбор механизмов и оборудования, организационная и производственная структура предприятий и т.д.

В настоящее время снижение контроля регулирующих органов за соблюдением норм сохранения плодородия почв, основой которых опять же являются СО, значительно возросшая неопределенность в мире в механизмах ценообразования на продукцию сельского хозяйства в силу известных причин привела в России к ситуации почти полного несоблюдению СО. Еще одним плачевным результатом несоблюдения СО явилась ликвидация специализированных проектных организаций, которые в ручном режиме на основании большого опыта индивидуально для каждой организации разрабатывали СО. Поэтому в работе дается формализованное описание САПР СО на основе математической модели оптимизации структуры СО, которая реализуется в создаваемой цифровой платформе управления (ЦПУ) сельскохозяйственным производством, онтологически и функционально интегрирующей задачи аграрного производства с единых научно-обоснованных позиций.

1. Роль севооборотов в сельскохозяйственном производстве

Как уже отмечалось, СО влияют на эффективность всего сельскохозяйственного производства, позволяя эффективнее использовать основной ресурс – землю. А это в свою очередь приводит к снижению финансовых затрат, улучшает биоклиматические показатели, качество средств питания и защиты растений, повышает эффективность использования сельскохозяйственной техники.

Рассмотрим теперь роль и факторы, влияющие на СО в ЦЭ. Ещё на заре становления земледелия была замечена закономерность, что многие растения при ежегодном севе на одном и том же участке значительно теряют в урожайности. Чередование же их в определенной, не хаотичной последовательности, напротив, ведет к росту их урожайности. Такое чередование зависит от биологических особенностей культурных растений и агротехники их выращивания, которые в свою очередь проявляется в способности растений приспосабливаться к почвенным, климатическим и погодным условиям, а также в адаптации к неблагоприятным физическим, химическим и биологическим факторам [3].

Таким образом, СО – это научно обоснованное чередование культурных растений во временном и пространственном размещении на сельскохозяйственных полях. Поле СО – это земельный участок и, имеющий определённую площадь с естественными или искусственными границами. Как правило, все поля в СО имеют равные площади. Размер же поля зависит от структуры посевных площадей, естественных границ, почвенных разностей и принятого типа севооборота.

Под оптимизацией системы СО понимается ее оптимизация по количеству и размеру занимаемой ими площади и полей в зависимости от структуры землепользования, специализации предприятия, трудовых, финансовых и материально-технических ресурсов, целевых установок ее формирования. Такие выделенные особенности объединяются в следующие группы: природно-географические, организационно-экономические, социально-демографические, технологические и экологические [4].

Природно-географические условия определяются географическим местоположением предприятия, рельефом местности, почвенным покровом, гидрологическим режимом, уровнем неоднородности всего ландшафта, в том числе, земельного, наличием и конфигурацией склоновых земель с учетом степени их эродированности, особенностями климата, обеспеченностью теплом и осадками с учетом распределения их по летним и зимним периодам и рисков неблагоприятных погодных аномалий.

Организационно-экономические условия определяются специализацией и стратегическими задачами по производству и переработке продукции с учетом указанных выше особенностей и ресурсов предприятия.

Социально-демографические условия определяются численностью и составом жителей на территории предприятия, степенью обеспеченности и качеством его рабочей силы, удаленностью работников и населенных пунктов от производственных объектов, развитием социально-бытовой сферы, состоянием дорожной сети, средств связи, логистическими характеристиками рынков сбыта, наличием промышленных и административных центров, железнодорожных магистралей и т. д.

Технологические условия определяются спецификой технологических операций возделывания культур, потребностями в кормах отрасли животноводства, состоянием и перспективами их обновления основных средств производства, уровнем инновационной деятельности в соответствии с современными веяниями и научными достижениями.

Экологические условия определяются степенью загрязнения почвы и продукции, страдающих от неправильного применения удобрений, химических средств защиты растений, от неграмотного использования систем осушения или орошения полей.

Если до сих пор все эти условия носили рекомендательный характер без их формализации, то в настоящее время ЦЭ требует формализации с поиском многофакторных зависимостей друг от друга. Так, ТЗ, лидирующее в технологиях цифровизации сельского хозяйства, использует данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), технологии геоинформационных систем (ГИС) и прецизионного производства, для которых требуется интеграция большого количества структурированной, достоверной информации и алгоритмов их обработки, значительного увеличения числа функциональных задач. При этом тенденции совершенствования ТЗ таковы, что подобно животноводству, где каждому животному подбираются свои рационы кормления, нормы ухода за счет мониторинга состояния здоровья, кормов, температуры, характеристик помещения, в растениеводстве разрабатываются технологии внесения удобрений, средств защиты растений, обработки почвы практически для каждого растения. Пока же в промышленных масштабах внедряется оборудование Yara N-Sensor, позволяющее вносить азотные удобрения на конкретных участках 20м×20м с учетом рельефа местности, физико-химических свойств почвы и т. д. с использованием спутниковых данных и информации из национальной системы IACS [5]. Неоднородность возделываемого поля, как

следствие этого и урожаев культур, зависит от труднодиагностируемых взаимоотношений и взаимовлияния свойств почвы и растений. В результате в рамках ЦЭ активно ведутся исследования в этом направлении, например, по адаптационной пахоте земли в зависимости от вышеперечисленных факторов на некоторых однородных площадях подобно внедряемому оборудованию Yara N-Sensor, поскольку установлено, что разница глубины вспашки даже в 5 см может увеличить/уменьшить затраты на топливо до 30 % [6].

2. Математическое моделирование САПР севооборотов

Интеграционные технологии ТЗ как и всей цифровой экономики (ЦЭ), диктующие комплексный подход к разработке ИС в управлении экономикой, ведут к резкому росту автоматизации функций управления, реализация которых требует значительных затрат финансов, времени, качественного человеческого капитала. В силу практической невозможности разработки индивидуальных таких систем для каждого предприятия в любой отрасли из-за чрезвычайной сложности и большой стоимости [1], выход можно искать в проектировании типовых для большого количества предприятий, иначе, цифрового двойника (ЦД), единого для некоторой отрасли. Однако для этого должны быть созданы единые понятийное, информационное и алгоритмическое пространства на основе онтологического моделирования предметных областей не только в одной, но и в ряде смежных отраслей. Это диктуется не только необходимостью межотраслевой интеграции, но и междисциплинарным характером понятийного пространства, объединяющего уже технологические, биологические и экономические формы взаимодействия, которые изначально оперировали своими онтологиями [7].

Для построения наиболее сложной в сельском хозяйстве структурной схемы причинно-следственных связей, единой для всего растениеводства, была разработана экспертная система, в рамках которой силами ведущих экспертов в области почвоведения, удобрений, средств защиты растений, фитопатологии, агрономии, механизации, учета и планирования были определены 946 показателей, онтологически единых, описывающих все растениеводство в товарных предприятиях и позволяющих наглядно представить рассматриваемую систему производства растениеводческой продукции [8, 9]. Также были выделены 240 функций управления (отраслевой базы знаний) отраслью с едиными согласованными алгоритмами для всех сельскохозяйственных предприятий России.

Интернет вещей своим появлением в концепцию ЦД внес существенное дополнение, что виртуальная модель объекта не выбрасывается после материального его создания, а начинает жить далее в единстве с физическим объектом в течении всех этапов жизненного цикла: проектирования, внедрения, эксплуатации и утилизации. Физический объект с помощью датчиков собирает и передает данные о его состоянии в реальном времени в базу данных ЦД, на основе которых уже уточняется цифровая модель. Данная модель в свою очередь готовит рекомендации по оптимизации режима работы уже реального объекта. Сейчас с развитием методов проектирования ЦД начали применять идеи и опыт их к разработке все более сложных изделий и целых предприятий. В качестве полной идентичности ЦД представленных выше базы данных и базы знаний растениеводства нами был разработан цифровой инструмент сбора и хранения первичной учетной информации в единой облачной базе данных или подплатформе (ЕБДПУ), представленный на рис. 1, который универсален для большинства отраслей экономики [2]. Данный цифровой инструмент позволяет записывать в БД ЦД все технологические операции, все данные интернета вещей.

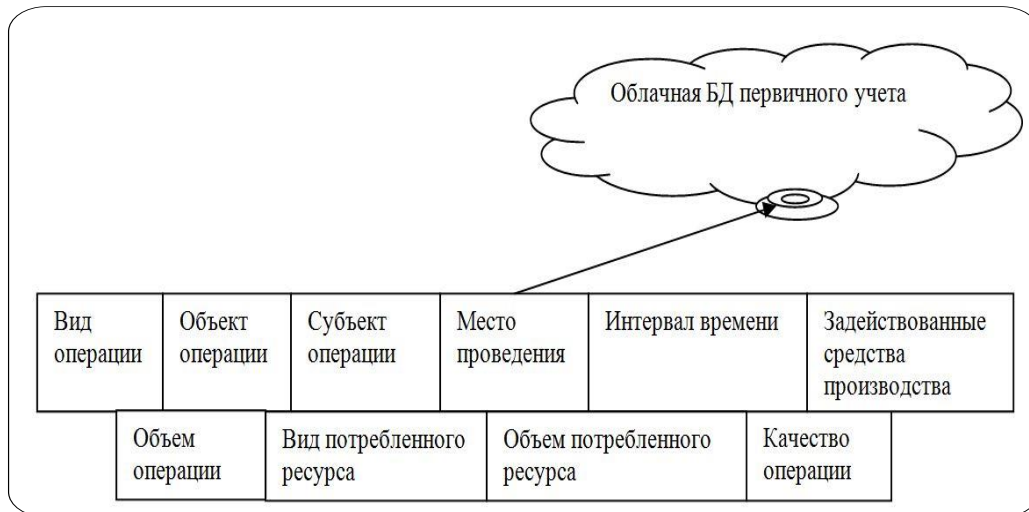


Рис. 1. Облачная подплатформа сбора и хранения первичной учетной информации

В работе [8] рассматривается единая цифровая платформа управления (ЦПУ) сельским хозяйством, которую в свете вышеприведенных аргументов можно рассматривать как прообраз цифровых двойников хозяйств, поскольку перечень задач является полным и типовым для большинства хозяйств с моделями, агрегирующими все знания, применяемые при проектировании севооборотов, разработке технологических карт, годовых планов и анализе их выполнения. ЦПУ также включает единые классификаторы, словари, справочники, размещенные в БД ЦПУ, исходя из описания алгоритмов задач. А цифровая подплатформа первичного учета, как уже отмечалось выше, позволяет записывать в БД ЦД все технологические операции, все данные интернета вещей.

Сравнивая определения САПР, ЦД и ЦПУ, можно сделать вывод об их почти полной идентичности. В данном разделе формализуем САПР СО, как наиболее актуальную в настоящее время разработку в сфере ЦД сельского хозяйства. С учетом вышеизложенного рассмотрим САПР формирования оптимальной структуры севооборотов (СО) хозяйства на основе математического моделирования на некоторую перспективу, которая бы позволила получить максимальную прибыль при формировании эффективной системы интеграции материальных, трудовых, финансовых и информационных ресурсов с учетом технологических особенностей основного производства и обеспечения конкурентоспособности своей продукции. Хотя вопросы учета качества продукции в целевой функции проработаны [10], для этого необходимо, чтобы ЕБДПУ и БД ЦД были заполнены. При этом будем ориентироваться на результаты моделирования оптимальной структуры СО, рассмотренной в работе [11], являющейся наиболее важной частью будущей САПР, результатом которой являются условные СО без географической привязки к земельным угодьям в виде S_{mn} – земли, выделяемые под n_m -й СО, где

m – номер агроэкологической группы земель предприятия, $m \in M$;

n_m – номер севооборота, входящий в m -ю агроэкологическую группу $n_m \in N^m$;

k – номер культуры, $k \in K^{mn}$, где K^{mn} – множество культур в севообороте n_m ;

y_{kmn}^1 – планируемая урожайность k -й культуры, выращиваемой в n_m -м севообороте на пашне m -й агроэкологической группы;

T_{mn} – величина ротации севооборота n_m ;

S_m – площадь пахотных земель m -й агроэкологической группы;

S_m^j – площадь j -го земельного участка m -й агроэкологической группы, $j \in J$, $S_m = \sum_m S_m^j$;

Как правило, до настоящего момента, хотя ИКТ и математические методы достигли значительного совершенства, средний размер поля севооборота устанавливается путем деления площади севооборота на количество полей, исходя из принятой схемы чередования культур. Обозначим через SP_{mn} средний размер поля севооборота, тогда $SP_{mn} = S_{mn}/T_{mn}$. Это объясняется значительной трудностью соблюдения условия

$$y_k^2 = \sum_{nm} y_{knm}^1 S_{mn} / T_{mn}, \quad (1)$$

где y_k^2 – валовой сбор k -й культуры на пашне за год, диктуемого производственной деятельностью всего агропромышленного производства, обеспечивающего стабильность поставки продовольствия и сырья на рынок и внутрихозяйственного потребления. В противном случае при разновеликости полей СО пришлось бы решать сложную математическую задачу, подобную некоторой разновидности задачи об упаковке в контейнеры [12] в комплексе с задачей о кратчайшем пути, являющейся одной из важнейших классических задач теории графов. Постановку этих задач для разработки САПР приведем ниже.

Напомним задачу об упаковке в контейнеры. Пусть дано множество контейнеров размера V и множество предметов размеров a_1, a_2, \dots, a_n . Надо найти целое число контейнеров B и разбиение множества $a_i, i \in (1, 2, \dots, n)$ на B подмножеств $S_1 \cup \dots \cup S_B$ таких, что $\sum_{i \in S_k} a_i \leq V$ для любых $k=1, \dots, B$.

Данная задача в терминах целочисленного программирования формулируется следующим образом:

$$\min B = \sum_{i=1}^n y_i \text{ при } \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq V y_i \text{ для любых } i \in (1, 2, \dots, n), \text{ где}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \text{ для любых } j \in (1, 2, \dots, n), y_i \in (0, 1), x_{ij} \in (0, 1) \text{ для любых } i \in (1, 2, \dots, n), j \in (1, 2, \dots, n).$$

При этом $y_i = 1$, если i -й контейнер используется, и $x_{ij} = 1$ в случае размещения предмета j в i -й контейнер.

Трансформируем нашу задачу географической привязки к земельным угодьям результатов моделирования оптимальной структуры СО в общем случае, с одной стороны, разновеликости полей СО, с другой стороны, отсутствия равенства количества полей СО величине их ротации T_{mn} .

Таким образом, ставится задача разбить все земельные угодья S_m^j на непересекающиеся множества участков S_{mnl}^j в количестве L_{mn} так, чтобы выполнялось условие $S_m^j = \bigcup_{l \in L_{mn}} S_{mnl}^j$.

Тогда в терминах целочисленного программирования сформулированная задача будет выглядеть:

$$\min L_{mn} = \sum_{j,l} y_{jl} \text{ при ограничениях}$$

$$\left| \sum_{j,l} S_{mnl}^j x_{jmn} - y_{jl} S_{mnl} \right| \leq \varepsilon, \text{ где } \varepsilon - \text{ величина разрешенного отклонения площади СО;}$$

$$\sum_l S_{mnl} = S_{mn} - \text{баланс земель; } S_{mnl}^0 \leq S_{mnl} \leq S_{mnl}^1 - \text{ограничения на площади СО;}$$

$$y_{jl} \in (0, 1) \text{ и } y_{jl} = 1, \text{ если используется в географической привязке участок } S_{mnl}; x_{jmn} \in (0, 1) \text{ и}$$

$$\sum_{j,l} x_{jmn} = 1, \text{ если на земле } S_{mnl}^j \text{ закрепляется участок } S_{mnl}.$$

Технологические особенности обработки земли участков полей СО диктуют необходимость близкого расположения их друг к другу. Это связано с перемещениями техники, оборудования, людей и материалов между ними. Тогда в критерий добавим еще одно слагаемое $r(S_{mnl_1}^{j_1}, S_{mnl_2}^{j_2})$ – расстояние

между двумя участками при условии $j_1 \neq j_2$ и $l_1 \neq l_2$. Теперь общий критерий принимает вид $\min [$

$$\alpha \sum_{j,l} y_{jl} + (1 - \alpha) r(S_{mnl_1}^{j_1}, S_{mnl_2}^{j_2})] \text{ при прежних ограничениях и } 0 \leq \alpha \leq 1. \text{ Величина } \alpha \text{ зависит от}$$

сплошного или разбросного способа размещения полей СО. Сплошной способ применяется, когда пригодные для намеченного СО земли располагают единым однородным массивом и его площади достаточно для того, чтобы все поля севооборота на нем разместились рядом друг с другом. Разбросной способ применяют, когда поля СО, пригодные для возделывания одних и тех же культур, размещают на земельных участках, пространственно изолированных друг от друга. Последний вариант часто используют в хозяйствах лесной зоны с сильной разбросанностью пахотных земель, отличающихся большой пестротой почвенного покрова и чередующихся с лугами и пастбищами, с лесными, закустаренными, каменистыми, завалуненными и заболоченными землями.

Существует множество разновидностей постановки задачи об упаковке в контейнеры в разных областях, например, упаковка по весу, по стоимости и т.п. помимо самих контейнеров, в загрузке грузовиков с ограничением по весу и объему. Обычно для решения подобных задач используют эвристические алгоритмы. Использование же точного переборного метода возможно только при небольших размерностях.

Рассмотрим вначале использование их в САПР в условиях, когда средний размер поля севооборота SP_{mn} равен S_{mn}/T_{mn} . Введем следующие множества:

J_m^1 – множество земельных участков, для которых выполняется условие $S_m^j \subset (SP_{mn} \pm \varepsilon)$, где ε – величина разрешенного отклонения площади СО;

J_m^2 – множество земельных участков, для которых выполняется условие $S_m^j > (SP_{mn} + \varepsilon)$;

J_m^3 – множество земельных участков, для которых выполняется условие $S_m^j < (SP_{mn} - \varepsilon)$;

L_{mn} – множество, идентифицирующее в дальнейшем в алгоритме количество нераспределенных полей СО;

J_m^{*1} – множество, идентифицирующее в дальнейшем в алгоритме номера географически непривязанных полей СО из множества J_m^1 ;

J_m^{*2} – множество, идентифицирующее в дальнейшем в алгоритме номера географически непривязанных полей СО из множества J_m^2 ;

J_m^{*3} – множество, идентифицирующее в дальнейшем в алгоритме номера географически непривязанных полей СО из множества J_m^3 .

Исходя из введенных определений, опишем алгоритм географической привязки условных полей S_{mn} к земельным участкам S_m^j . Вначале алгоритма дадим первоначальные значения определенного выше множества $L_{mn} = T_{mn}$.

1. $m=0$, $J_m^{*1} = J_m^1$, $J_m^{*2} = J_m^2$, $J_m^{*3} = J_m^3$, $S_m^{*j} = S_m^j$ и к п.2.
2. $m = m + 1$. Если $m=M+1$, то end, иначе к п.3.
3. Рассмотрим случай $S_m^j \subset (SP_{mn} \pm \varepsilon)$, $n=0$ и к п.4.
4. $n = n + 1$. Если $n=N+1$, то к п.2, иначе к п.5.
5. Выбираем очередной j из J_m^{*1} , если $J_m^{*1} = \emptyset$, то к п.7, иначе к п.6.
6. $L_{mn} = L_{mn} - 1$. Если $L_{mn} = 0$, то к п.4, иначе $J_m^{*1} = J_m^{*1} \setminus j$, $S_m^j \subset S_{mn}$ и к п.5.
7. Рассмотрим случай $S_m^j > (SP_{mn} + \varepsilon)$, то есть сплошной метод. Переход к п.8.
8. Выбираем очередной j из J_m^{*2} , если $J_m^{*2} = \emptyset$, то к п.12 (3-й случай), иначе к п.9.
9. Если $L_{mn} = 0$, то к п.10, иначе $S_m^{*j} = S_m^{*j} - SP_{mn}$. Площадь SP_{mn} , принадлежащая S_m^{*j} , включается в S_{mn} . $L_{mn} = L_{mn} - 1$. Если $S_m^j \geq (SP_{mn} - \varepsilon)$, то к п.8, иначе $J_m^{*2} = J_m^{*2} \setminus j$, $j \in J_m^3$ и к п.11.
10. $n = n + 1$. Если $n=N+1$, то к п.11, иначе к п.8.
11. $m = m + 1$. Если $m=M+1$, то end, иначе к п.8.
12. Рассмотрим случай $S_m^j < (SP_{mn} - \varepsilon)$, то есть разбросный метод. В этом случае для формирования географически привязанных СО применим многоэтапную процедуру, основанную на модификации задачи об упаковке. В этом случае необходимо найти разбиение S_m^j при $j \in J_m^3$ на K_{mn} подмножеств, наиболее приближенных по площади к SP_{mn} . Тогда формализация задачи в терминах целочисленного программирования выглядит следующим образом: для любого m

$$\min_{j \in J_m^3} \left| \sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn} \right| \quad (2)$$

при ограничениях $\sum_{j,m,n} x_{jmn} = 1$ для любых m, n и $j \in J_m^3$, $x_{jmn} \in (0, 1)$, $|\sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn}| \leq \varepsilon$.

Как упоминалось выше, технологические особенности обработки земли участков полей СО диктуют необходимость близкого расположения их друг к другу. Тогда в критерий добавим еще один $r(S_m^{j_1}, S_m^{j_2})$ – расстояние между двумя участками при условии $j_1 \neq j_2$ и $(j_1, j_2) \in J_m^3$. В этом случае общий критерий будет представлен в следующем виде:

$$\min_{j \in J_m^3} [\alpha |\sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn}| + (1-\alpha) r(S_m^{j_1}, S_m^{j_2})]. \quad (3)$$

при указанных выше ограничениях и $0 \leq \alpha \leq 1$. Как уже отмечалось, значение α зависит от соотношения площадей сплошного или разбросного способа размещения полей СО.

Как опять же отмечалось выше, для решения подобных задач используют эвристические алгоритмы. Использование точного переборного метода возможно только при небольших размерностях. Дадим оценку этих размерностей. Количество земельных участков во всех трех видах их размеров в среднем в одном предприятии находится в диапазоне от нескольких до 20. Количество агроэкологических групп земель предприятия находится в диапазоне 1-3. Количество полей в СО не превышает 10. В итоге нахождение оптимального варианта путем переборного метода потребует не превышающего 600 решений, что вполне допустимо даже на персональных компьютерах.

В работе [13] приведена математическая модель управления производственно-логистической цепочкой продукции растениеводства. Показано, что логистика существенно влияет на географическую привязку сформированных перспективных севооборотов и позволит существенно снизить затраты предприятий на транспортные расходы. Поэтому в САПР СО включим и данную модель. Исходя из изложенного, математическая модель управления производственно-логистической цепочкой продукции растениеводства должна решаться при каждом эвристическом решении нахождения оптимального варианта СО переборным методом (рис. 2).

3. Заключение

Исходя из триады ЦПУ, ЦД и САПР, удалось формализовать задачу формирования оптимальной структуры севооборотов, которая в настоящее время становится наиболее актуальной в аграрном производстве, поскольку из-за отсутствия контроля регулирующих органов за соблюдением норм сохранения плодородия почв, основой которых опять же являются СО, а также значительно возросшей неопределенности в мире в механизмах ценообразования на продукцию отрасли в силу известных причин российское сельское хозяйство пришло к ситуации почти полного несоблюдению СО. А из-за этого постепенно нарастают огромные экологические проблемы. Например, каждый год в России деградирует 1,5-2 млн. га земель, что отражается в потерях 1,5 млрд. тонн наиболее богатого гумусом почвенного слоя земли.

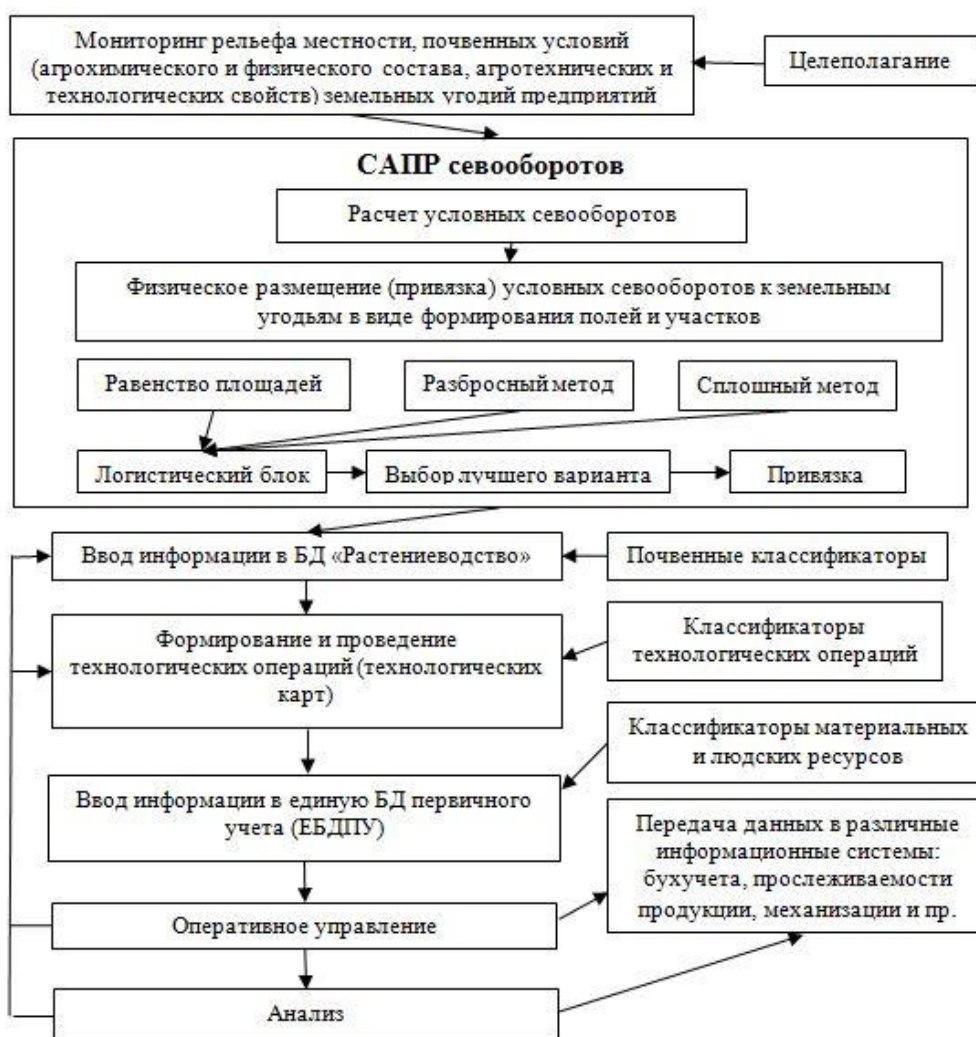


Рис. 2. Место САПР в жизненном цикле разработки, внедрения и эксплуатации севооборотов в рамках ЦПУ

Литература

1. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В., Марусева В.М., Кулемин В.Ю. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. – 2018. – N 1. – С. 6–23.
2. Меденников В.И. Необходимость формирования единого цифрового двойника сельскохозяйственного предприятия // Землеустройство, экономика и управление в агропромышленном комплексе в период глобальных вызовов: Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ижевск, 01 марта 2023 года. – Удмуртский государственный аграрный университет, 2023. – С. 236-243.
3. Баздырев Г.И., Лошаков В.Г., Пупонин А.И. и др. Земледелие. Учебник для вузов. – М.: Издательство «Колос». 2000. – 551 с.
4. Methodology for developing a crop rotation system. <https://www.activestudy.info/metodika-razrabotki-sistemy-sevooborotov/>. (Last accessed 2024/04/19).
5. Atfarm helps you increase yield and quality, <https://www.at.farm>, (last accessed 2024/04/19).
6. Secrets of effective plowing: 16 key steps and recommendations. <https://dzen.ru/a/YAmSuxmBHwwj6-AO>. (Last accessed 2024/04/19).
7. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. The logistics component of the geographic reference of the formed promising crop rotations // BIO Web of Conferences. 2023. 66, 03002.
8. Алексеева Н.А., Осипов А.К., Меденников В.И. [и др.]. Экономические и управленческие проблемы землеустройства и землепользования в регионе. – Ижевск: Шелест, 2022. – 225 с.
9. Vladimir Kulba, Viktor Medennikov. Product Traceability Digital Tool Powered by Mathematical Model for Logistics Digital Platform // IEEE Xplore Digital Library. 15 International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). 2022. Moscow, Russia.
10. Medennikov V. The Impact of Digital Transformation on the Competitiveness of Small and Medium Agro-Industrial Enterprises // Proceedings of the International Conference on Policies and Economics Measures for Agricultural Development (AgroDevEco 2020). Atlantis Press. – 2020 – P. 241-247.

11. Будзко В.И., Меденников В.И. Математическая модель оптимизации структуры севооборотов на основе единой цифровой платформы управления сельскохозяйственным производством // Системы высокой доступности. 2022. N 4 (18). – С. 5-15.
12. Container packing problem, https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0_%D0%BE%D0%B1_%D1%83%D0%BF%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B5_%D0%B2_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%8B. (Last accessed 2024/04/19).
13. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. The logistics component of the geographic reference of the formed promising crop rotations // BIO Web of Conferences. 2023. 66, 03002.