

УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

Кульба В. В., Шульц В. Л., Шелков А. Б., Микрин В. Е. —

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗЕРВОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА В УПРАВЛЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

***Аннотация.** Работа посвящена рассмотрению комплекса проблем повышения эффективности планирования и управления сельскохозяйственным производством. С использованием аппарата теории графов формально определен структурно-технологический резерв для технологической операции и технологической схемы как совокупности технологических операций. Приведены результаты анализа основных характеристик структурно-технологического резерва, включая стоимость, эффективность и гибкость. Рассмотрены два типа природно-климатического резерва в сельскохозяйственном производстве. Введено понятие эколого-физиологического резерва двух типов для различных чрезвычайных ситуаций в сельскохозяйственном производстве, а также аномальных гидрометеорологических явлений и процессов, таких как засухи и суховеи, переувлажнение, воздействие пониженных температур, вымерзание, водная и ветровая эрозия, вредители и болезни и т.п. Детально рассмотрены факторы, влияющие на данный тип резерва, формально определенного в матричном виде. На основе использования полученных характеристик разработаны рекомендации по использованию различных типов резервов для целей репланирования в условиях чрезвычайных ситуаций.*

***Ключевые слова:** управление, сельскохозяйственное производство, планирование, репланирование, структурно-технологический резерв, природно-климатический резерв, эколого-физиологический резерв, чрезвычайная ситуация, теория графов, мониторинг.*

Введение

В Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года¹ осо-

бо подчеркивается ключевая роль сельскохозяйственного производства в развитии экономики России. В частности, в документе отмечается, что «агропромышленный комплекс и его базовая отрасль — сельское хозяйство являются ведущими системообразующими сферами экономики страны, формирующими агропродовольственный рынок, продовольственную и экономическую безопасность, трудовой и поселенческий потенциал сельских территорий».

¹ Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 года N 1662-р. — <http://docs.cntd.ru/document/902130343>.

Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы¹ определены цели, задачи и основные направления устойчивого развития сельского хозяйства, пищевой и перерабатывающей промышленности, механизмы финансового обеспечения и реализации предусмотренных программой комплексов мероприятий, а также показатели их результативности.

В соответствии с упомянутой выше Концепцией, основными целями государственной аграрной политики в долгосрочной перспективе являются: обеспечение потребностей населения сельскохозяйственной продукцией и продовольствием российского производства; устойчивое развитие сельских территорий, повышение конкурентоспособности российского аграрного комплекса; эффективное импортозамещение на рынке животноводческой продукции и создание развитого экспортного потенциала (особенно в растениеводстве), позволяющего в перспективе занять устойчивые позиции на мировом рынке аграрной продукции; улучшение и повышение продуктивности используемых в сельскохозяйственном производстве земельных и других природных ресурсов.

В последнее десятилетие проблема эффективного управления сельскохозяйственным производством существенно усложняется, что связано не только с колебаниями мировых рынков, изменениями внутренних условий функционирования сельхозпредприятий и фермерских хозяйств, недостаточностью предпринимаемых мер господдержки и т. п.

¹ Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы. Утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. N 717. — <http://www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/342.htm>.

(что, безусловно, является серьезной и требующей отдельного рассмотрения проблемой), но и с глобальными климатическими изменениями. Данные изменения приводят к практически ежегодному росту числа и интенсивности аномальных гидрометеорологических явлений и климатических катастроф (засух, суховеев, ураганов, наводнений, лесных пожаров, заморозков, массового распространения вредителей и др.). В результате размер ежегодного ущерба, наносимого экономике России, исчисляется миллиардами рублей и имеет тенденцию постоянного роста. Что касается долгосрочной перспективы, то по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных наций (FAO)², наблюдаемые в настоящее время климатические изменения приведут в 2080–2100 гг. к снижению валового объема сельскохозяйственной продукции мировой экономики в среднем на 15–30 процентов.

В этих условиях при решении задач планирования, репланирования и оперативного управления сельскохозяйственным производством возрастает роль и значение различных типов резервов, от традиционных (временной и ресурсный) и до специальных (структурно-технологический, природно-климатический и эколого-физиологический)³.

Как известно, в условиях современного земледелия многие факторы жизнедеятельности растений поддаются управлению и контролю, что позволяет применять на практике метод программирования урожаев сельскохозяйственных культур, то есть эффективно управлять процессами формирования требуе-

² Задачи, стоящие перед продовольствием и сельским хозяйством в связи с изменением климата и биоэнергией. // Материалы экспертного форума «Как прокормить население мира в 2050». — Рим, 12–13 октября 2009 г. — <http://www.fao.org/>.

³ Архипова Н. И., Кульба В. В. Управление в чрезвычайных ситуациях. — М.: РГГУ, 1998.

мого (запланированного) уровня урожайности по заранее сформированной производственной программе.

Резервы различного типа в сельскохозяйственном производстве целесообразно рассматривать с точки зрения поддающегося статистической оценке влияния различных факторов на конечный результат производства, то есть влияния на отклонение получаемой урожайности ($U^Ф$) культур от планируемой ($U^{ПЛ}$).

Резервом (времени, операции, ресурса, технологии) при отклонении Δ от планируемого урожая (R_Δ) назовем возможность системы обеспечить фактическую урожайность в интервале $U^{ПЛ} - U^Ф \leq \Delta$ при нарушении (изменении) планируемой технологии возделываемой культуры либо неблагоприятных природных условиях. При $\Delta=0$ резерв назовем абсолютным $R^{аб}=R_\Delta$.

Целью настоящей работы является исследование вопросов классификации, формального определения и описания характеристик структурно-технологического, природно-климатического и эколого-физиологического резервов применительно к сельскохозяйственному производству в условиях возможных чрезвычайных ситуаций природного характера.

1. Структурно-технологический резерв

Введем понятие структурно-технологического резерва в сельскохозяйственном производстве. Технологической системой сельскохозяйственного производства назовем совокупность объектов: земельных участков, периодов развития растений, в течение которых выполняются агротехнические работы с использованием имеющейся сельскохозяйственной техники (структура). Элементы системы взаимодействуют между собой в определенные сроки и в заданной последовательности (технология).

Структура технологической схемы сельскохозяйственного производства отражает размещение сельскохозяйственных культур по имеющимся участкам и определяет развитие процессов органогенеза в пространственно-временных координатах. Под технологией системы сельскохозяйственного производства будем понимать совокупность агротехнических мероприятий (технологических операций), способов их реализации, последовательность и временные интервалы их выполнения. Так как технологический процесс в пределах годовой программы нециклический, в нем можно выделить определенное количество входов и выходов. При этом технология процесса сельскохозяйственного производства определяет конкретное использование и преобразование потока ресурсов на входах в поток товарной продукции на выходах.

Определение 1.1. *Технологической операцией*, выполняемой в некотором производственном звене, назовем отдельную операцию в цепочке сельскохозяйственного производства, когда результат деятельности одной технологической операции служит входом для другой. Таким образом, технологический процесс задается набором взаимосвязанных по входам и выходам технологических операций.

На практике у каждой технологической операции обычно существует несколько технологических схем, для каждой из которых может быть задан вектор характеристик, таких как время выполнения технологической операции, стоимость операции и т. д.

Определение 1.2. *Структурно-технологическим резервом технологической схемы операции* назовем множество технологических операций и их технологических схем (оборудования и технологии его использования), которые могут заменить данную технологическую схему операции при выходе ее из строя, не нарушая работу системы (технологический процесс) в целом.

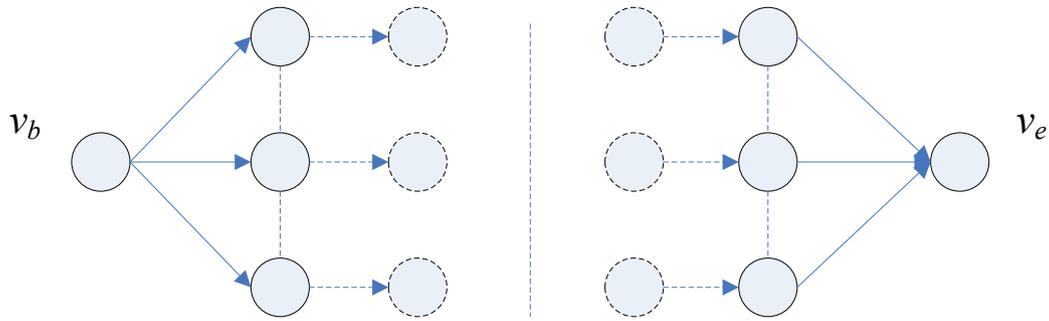


Рис. 1.1. Структура технологического процесса

Определение 1.3. Структурно-технологическим резервом системы назовем набор технологических операций и их технологических схем, без которых система в целом может продолжать функционирование, возможно, с меньшей эффективностью. Структурно-технологический резерв производственной системы — это множество ресурсов различных видов, за счет которых достигается ее технологическая гибкость, т.е. способность компенсировать различные возмущения такие, как отказы и повреждения технологических звеньев, разрыв транспортных и иных типов связей и т.д.

Дадим ряд необходимых формальных определений на языке аппарата теории графов.

Рассмотрим нециклический технологический процесс, который задан как набор взаимосвязанных технологических операций V_i .

Построим ориентированный граф $G(V, A)$, реализующий данный технологический процесс, при этом вершинам $v_k \in V$ будут соответствовать некоторые производственные операции $v_i, i = \overline{1, V}$, а дуги $a_i \in A$ будут отображать связи между этими операциями.

Определение 1.4. Совокупность различных технологических операций образует технологический процесс (рис. 1.1).

Определение 1.5. Технологической схемой L_N процесса назовем такой подграф (набор технологических операций), при котором начальная вершина v_b связана с конечной v_e

Пронумеруем технологические схемы, которые могут быть применены при выполнении

каждой из операций процесса. Будем считать, что в случае, если операция не может быть выполнена, то она реализуется технологической схемой 0.

Пусть $k_i, i = \overline{1, V}$ — номер технологической схемы, применяемой для выполнения операции v_i . С использованием множества дуг L_N может быть построено множество L комбинаций технологических схем операций, которое будем называть множеством процессов. Данное множество строится следующим образом. Каждому элементу $(v_1, \dots, v_n) \in L_N$ ставится в соответствие элемент $(k_1, \dots, k_s) \in L$, где $k_i = v_1, \dots, k_n = v_n$, а для операций, которые не были использованы в рассматриваемой схеме технологического процесса, положим $k_j = 0$. При невозможности выполнения операции v_i все дуги, которые содержат вершину v_i , исключаются из множества дуг L_N , а из множества L — все элементы, которые связаны с v_i .

При невозможности выполнения операции v_i в целом все вершины, соответствующие технологическим схемам этой операции, исключаются из L_N . Если при этом полученное множество L_N является непустым, то входящие в него вершины v_i представляют собой резервные технологические схемы процесса, которые могут быть реализованы при невозможности выполнения операции v_i .

Определение 1.6. Будем считать, что операция v_i структурно и технологически следует за операцией v_j при использовании технологических схем A , если дуга a_i инцидентна вершинам v_i и v_j .

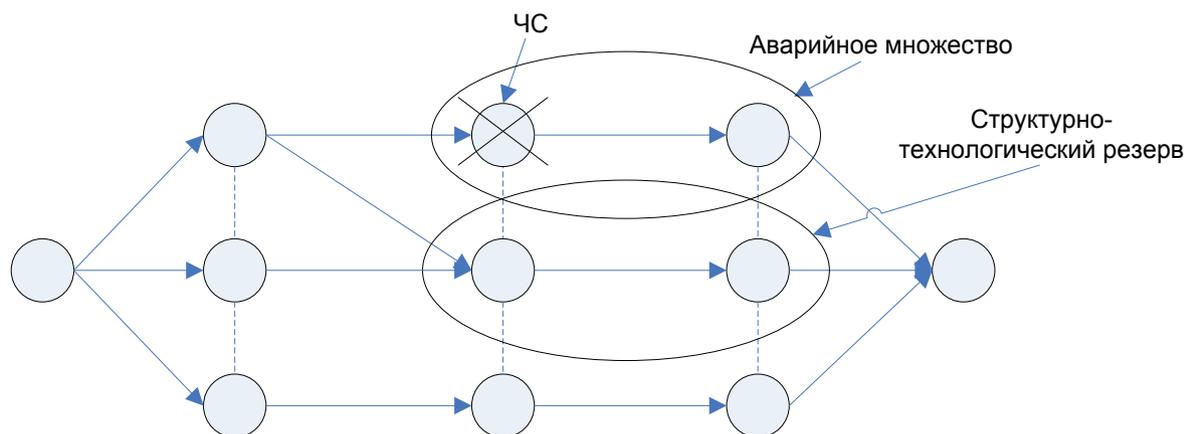


Рис.1.2. Структура технологического процесса с резервом

По различным причинам может сложиться ситуация, в которой станет невозможным полностью или частично выполнять одну или несколько операций. Как следствие, выполнение части других операций производственного процесса становится невозможным или нецелесообразным. Множество таких операций и их технологических схем будем называть *аварийным множеством*. Множество операций, дублирующих выполнение вышедших из строя звеньев, будем называть *структурно-технологическим резервом* или *резервным множеством*.

Опишем последовательность шагов для построения аварийного множества и структурно-технологического резерва.

Определение 1.7. *Аварийным множеством для операции v_i при использовании технологической схемы A_i назовем множество вершин $R_{отк}(v_i, A_i) = \{a_k\}$, определяемое следующим образом: если $v_i \in R_{отк}(v_i, A_i)$, то все связанные с ним вершины v_j также принадлежат $R_{отк}(v_i, A_i)$.*

На основании этого сформулируем понятие структурно-технологического резерва операции для заданной технологической схемы и для операции в целом.

Определение 1.8. *Структурно-технологическим резервом для операции v_i при использовании технологической схемы A_i назовем множество $R_p^C(v_i, A_i) = A \setminus R_{отк}(v_i, A_i)$.*

Определение 1.9. *Структурно-технологическим резервом для операции v_i назовем множество $R_p^C(v_i) = A \setminus R_{отк}(v_i)$ (рис. 1.2).*

В это множество войдут все дуги, при которых начальная вершина v_b связана с конечной v_e .

Формально нахождение структурно-технологического резерва представляет собой поиск альтернативных путей на общем графе. В качестве примера использования структурно-технологического резерва рассмотрим процесс уборки пшеницы. Работа (агротехническая операция) «уборка прямым комбайнированием» может быть заменена набором работ (соответственно с использованием других сельскохозяйственных агрегатов), таких, как, например, «скашивание в валки», «сушка валков», «подбор и обмолот валков».

Для определения характеристик структурно-технологического резерва обратимся к его структуре. Определим стоимостные характеристики структурно-технологического резерва. При выполнении технологического процесса и его частей (технологических операций) обычно руководствуются показателями рентабельности процесса, то есть стоимость ресурсов на входе должна уменьшаться, а стоимость ресурсов на выходе должна расти (таким образом происходит создание наибольшей добавленной стоимости).

Введем характеристику стоимости P_i для каждой технологической операции. Выполнение каждой операции v_i влечет за собой расходы $C(v_i) \geq 0$. Они состоят из переменных ($C_V(v_i)$) и постоянных ($C_C(v_i)$) затрат на организацию операции:

$$C(v_i) = C_C(v_i) + C_V(v_i)$$

Постоянные затраты включают в себя обслуживание техники, зарплату рабочим и прочие постоянные расходы, не зависящие от объемов производства. Переменные затраты включают в себя стоимость ресурсов на входе операции и прочие расходы, которые зависят от объемов производства.

Определение 1.10. *Стоимостью операции или добавленной стоимостью, создаваемой операцией v_i при использовании технологической схемы A_i , будем называть величину, вычисляемую следующим образом:*

$$P_i = S(v_i) - [C_C(v_i) + C_V(v_i)],$$

где $S(v_i)$ — стоимость ресурсов на выходе данной операции. Таким образом, добавленная стоимость определяется на основе стоимости ресурсов на выходе операции минус переменные и постоянные расходы на выполнение операции.

Определение 1.11. *Суммарной стоимостью технологического процесса назовем сумму стоимостей всех операций, выполненных в процессе достижения конечного результата:*

$$P = \sum P_i(v_i).$$

Поскольку при невозможности выполнения той или иной технологической схемы может потребоваться перестроение части технологии процесса, то представляется целесообразным ввести понятие *стоимости смены технологической схемы*, которая используется для выполнения операции. При этом рентабельность производства должна либо уменьшаться, либо оставаться прежней, иначе исходный технологический процесс не являлся бы рациональным, и его следовало бы заменить. Однако, даже если новая стоимость технологической

схемы при использовании структурно-технологического резерва является отрицательной, то стоимость всего технологического процесса может быть положительной.

Обозначим затраты на переход с исходной технологической схемы на схему, определяемую структурно-технологическим резервом, через $\rho(v_i, A_i^1, A_i^2)$. Данная величина будет определяться затратами на работы, связанные со сменой технологической цепочки. Например, для приведенного выше примера процесса уборки пшеницы, это будут затраты на зарплату дополнительно привлеченному персоналу, его транспортировку к месту уборки и т.д.

Определение 1.12. *Функцией стоимости смены технологической схемы A_i^1 на технологическую схему A_i^2 для операции v_i назовем следующую величину:*

$$C(v_i, A_i^1, A_i^2) = C(v_i, A_i^1) + \rho(v_i, A_i^1, A_i^2) - C(v_i, A_i^2)$$

Таким образом, общая стоимость смены схемы складывается из стоимости исходной технологической схемы операции, плюс затраты на ее смену и минус стоимость конечной технологической схемы. При этом стоимость смены будет тем больше, чем больше разность между стоимостью исходной и конечной технологических схем, а также чем больше затраты на переход. При выборе схемы, на которую осуществляется переход, следует минимизировать рассматриваемую стоимость.

На основании понятия стоимости смены технологической схемы операции, введем функцию стоимости смены технологического процесса.

Определение 1.13. *Функцией стоимости смены технологического процесса назовем сумму стоимостей смены технологических операций процесса:*

$$C(K', K'') = \sum_{i=1}^V C(v_i, A_i^1, A_i^2),$$

где $K' = (k_1', \dots, k_V')$ — исходная схема технологического процесса, а $K'' = (k_1'', \dots, k_V'')$ — схема, на которую осуществляется переход.

Введем отношение предпочтения для технологических схем A_i^1 и A_i^2 для операции v_i .

Определение 1. Будем говорить, что технологическая схема A_i^1 операции v_i предпочтительнее технологической схемы A_i^2 ($A_i^1 \succ A_i^2$), если $C(A_i^1) > C(A_i^2)$.

Это означает, что предпочтение отдается технологическим схемам, имеющим большую добавленную стоимость.

Определение 1.15. Любую функцию на множестве технологических операций $\{v_i^n\}$, сохраняющую отношение предпочтения, назовем функцией эффективности операции v_i при использовании технологии A_i^n , где n — количество технологических схем в технологическом процессе.

Тогда $F(v_i, A_i^n)$ — функция эффективности операции v_i при использовании технологии A_i^n , если для любых двух технологий A_i^1 и A_i^2 при $A_i^1 \succ A_i^2$, будет справедливо неравенство $F(v_i, A_i^1) \geq F(v_i, A_i^2)$. В частности, функцией эффективности может служить функция стоимости технологической схемы операции $C(v_i, A_i^n)$.

Функция эффективности может рассматриваться в простейшем случае при возникновении чрезвычайной ситуации в результате аномальных гидрометеорологических явлений, когда наиболее важной целью является ликвидация ее последствий в кратчайшие сроки вне зависимости от стоимости ресурсов. Данная функция эффективности является величиной, обратной времени выполнения операции v_i .

На общем графе $G(V, A)$ технологического процесса может быть не единственный альтернативный путь, то есть множество $R_p^C(v_i)$ содержит более одного элемента. Соответственно, если это условие выполняется, то можно говорить о гибкости структурно-технологического резерва для данного технологического процесса. Рассмотрим данную характеристику подробнее.

После выхода из строя звена v_i , входящего в схему процесса A^0 , потребуется переход на другую схему производства. В качестве заменяющей схемы может быть выбрана допустимая, переход на которую потребует наименьших затрат:

$$\min_{A: k_j=0} C(K^0, K).$$

В этом выражении требование $k_j = 0$ означает невозможность использования вышедшего из строя звена v_i .

Недостатком такого метода выбора резервной схемы технологического процесса является то, что при его использовании не учитывается возможность повторного возникновения чрезвычайной ситуации на других звеньях производственной системы.

Рассмотрим лишенный этого недостатка алгоритм выбора резервной схемы, состоящий из следующих процедур.

1. Расчет условных вероятностей отказов схем технологических процессов $P(B_i)$

Значение $P(B_i)$ определяется на основании условных вероятностей $P_j^k(B_i)$ отказов производственных звеньев v_i ($i = 1, \overline{V}$) в результате возникновения поражающего фактора x_a на звене v_j . Событием B_i в данном случае является наличие совокупности элементарных исходов $\{\omega_a = (\theta_1, \dots, \theta_s)\} \subseteq \Omega$, в которых $\theta_i = 1$. Это событие отражает выход из строя звена v_j при возникновении на нем первичных и вторичных негативно воздействующих факторов. Очевидно, что вероятность события B_i равна сумме вероятностей составляющих его элементарных исходов:

$$P(B_i) = \sum_{\omega \in B_i} P(\omega).$$

Условные вероятности $P_j^a(B_i)$ вычисляются следующим образом:

$$P_j^k(K) = 1 - \prod_{\substack{i=1 \\ k_i \neq 0}}^V (1 - P_j^k(B_i))$$

где $K = (k_1, \dots, k_V)$ — технологическая схема процесса, на которую возможен переход.

2. Выбор схемы процесса.

Среди возможных схем процесса, на которые может быть осуществлен переход, целесообразно выбрать схему, удовлетворяющую условию:

$$\min_{K:k_j=0} P_j^k(K)C(K^0, K).$$

Схема процесса, для которой достигается минимум, будет являться компромиссной с точки зрения максимизации надежности, с одной стороны, и минимизации затрат на перенастройку производства и потерь в эффективности — с другой.

Если не важны затраты на перенастройку технологических звеньев, или они пренебрежимо малы, а также в случае, если время, затрачиваемое на перенастройку, мало, то в качестве критерия выбора схемы процесса можно использовать:

$$\min_{K:k_j=0} P_j^k(K)(C(K^0) - C(K)).$$

На основании значений условных вероятностей $P_j^k(K)$ отказов для схем технологических процессов рассчитывается вероятность $P(K)$ отказа схемы технологического процесса:

$$P(K) = \sum_{j=1}^V \sum_{k=1}^X P(v_j, x_k) \cdot P_j^k(K),$$

где $P(v_j, x_k)$ — вероятность возникновения поражающего фактора (ПФ) x_k на производственном звене v_j из-за возникновения чрезвычайной ситуации.

Возможны различные варианты последствий для производственной системы при удалении из нее одной из операций — от понижения эффективности до полной остановки. Введем количественные характеристики этого реагирования.

Определение 1.16. Гибкостью производственной системы $G(v_i)$ относительно

операции v_i назовем отношение числа возможных технологических цепочек $L_p(v_i)$, достижимых при «повреждении» под воздействием ПФ v_i , к общему числу цепочек L , достижимых при нормальном функционировании системы:

$$G(v_i) = \frac{|L_p(v_i)|}{|L|}.$$

Как видно из определения, значением гибкости будет неотрицательное число, не превосходящее 1. Если гибкость $G(v_i) = 0$, то при невозможности выполнения операции v_i вся система выходит из строя (жесткая система). Если гибкость $G(v_i) = 1$, то это значит, что операция v_i не используется ни в одной технологической цепочке и может быть без всякого ущерба удалена из производственной системы. Чем больше значение гибкости, тем меньше потери из-за невозможности выполнения операции v_i .

Для изучения гибкости системы в целом может быть использовано значение средней гибкости, которое получается следующим образом:

$$G_{cp} = \sum_{i=1}^V P(B_i)G(v_i),$$

где $P(B_i)$ — вероятность отказа звена v_i .

По аналогии с гибкостью относительно невозможности выполнения одной операции можно утверждать, что чем больше значение средней гибкости системы, тем меньше возникает потерь из-за невозможности выполнения какой-либо операции.

Недостатком данного определения гибкости является то, что в нем не учитываются стоимостные характеристики потерь в результате чрезвычайной ситуации. При расчете гибкости системы указанным выше способом учитывается, сколько схем технологического процесса не сможет выполняться, но не учитывается их стоимость.

Для производственных звеньев могут быть рассчитаны потери, вызванные выходом из строя технологического звена v_i . Предположим, что с использованием одного из методов, описанных выше, была выбрана схема процесса K_i , на которую будет осуществляться переход.

Определение 1.17. *Затратами производственной системы $\bar{C}(v_i)$ относительно невозможности выполнения операции v_i назовем стоимость перехода на выбранную схему технологического процесса:*

$$\bar{C}(v_i) = C(K^0, K_i).$$

Чем выше эта величина, тем большие потери вызовет невозможность выполнения операции v_i .

Определение 1.18. *Долей сохраняемой стоимости системы, относительно невозможности выполнения операции v_i назовем отношение стоимости замещающей схемы процесса K_i к стоимости исходной схемы процесса K^0 :*

$$\Phi(v_i) = \frac{C(K_i)}{C(K^0)}$$

Величина $\Phi(v_i)$ может быть отрицательной в случае, если после возникновения аварии система работает с убытками.

На основе понятий отказов звеньев и долей сохраняемой стоимости введем понятие гибкости производственной системы в целом.

Определение 1.19. *Гибкостью производственной системы, заданной графом $G(V, A)$, назовем величину:*

$$G_N = \sum_{i=1}^V P(B_i) \Phi(v_i).$$

Эта величина характеризует способность производственной системы сохранять эффективную работу в случае возникновения чрезвычайной ситуации на одном из ее участков. Чем она больше, тем большим структурно-технологическим резервом обладает произ-

водственная система и, как следствие, тем она устойчивее в целом.

Естественно, что при использовании данного вида резерва существуют ограничения на стоимость смены операции, эффективность операции, на значение функции гибкости для операции и т.п. Сформулируем следующие ограничения для задачи оптимизации структурно-технологического резерва:

1. $C(v_i, A_i^1, A_i^2) \leq \rho_i'$ — ограничение на стоимость смены операции имеющимися на сельскохозяйственном предприятии ресурсами;

2. $\forall A_i^1, A_i^2 \quad F(v_i, A_i^1) \geq F(v_i, A_i^2)$ — замещающая операция должна быть наиболее эффективной из всех возможных;

3. $G(v_i) < 1$ — ограничение на гибкость — операция v_i используется в данной технологической цепочке и не может быть без ущерба удалена из производственной системы.

Критерий оптимизации представлен в виде:

$$\text{opt} \left(R_p^C(v_i, A_i), x_{ij} \right) = \text{opt} \left(A \setminus R_{\text{отк}}(v_i, A_i) \right)_{v_{\text{опт}}}$$

Отыскание оптимального множества $R_p^C(v_i, A_i)$ при данных ограничениях и является решением задачи оптимизации структурно-технологического резерва.

Будем решать задачу оптимизации структурно-технологического резерва эвристическим методом. В случае, если в структурно-технологический резерв входит только одна операция v_i при заданной технологической схеме A_i , то решение задачи оптимизации является элементарным — эта операция и будет оптимальной.

Если же таких операций, являющихся структурно-технологическим резервом друг друга, несколько, то будем искать множество операций, являющихся оптимальными, путем вычеркивания дуг, не соответствующих ограничениям (1) — (3). Данная задача может быть решена простым методом перебора, который легко реализуется программно: сначала

все операции v_i проверяются на выполнение условия (1) и удаляются все не соответствующие ему дуги. Затем проверяется условие (2): соответствующие условию (1) операции v_i сортируются по возрастанию значения оценки эффективности (2), и на последнем этапе проверяется условие (3). В итоге выбирается наиболее эффективная операция, удовлетворяющая введенным ограничениям¹².

2. Природно-климатический и эколого-физиологический резервы

Природно-климатический резерв подразделяется на два основных типа. Природно-климатический резерв первого типа дает возможность существования сельскохозяйственного предприятия в условиях невозможности выполнения им основных функций за счет реализации некоторого множества других функций (детерминированного или недетерминированного). Обычно эффективность от их реализации для данного предприятия ниже, чем от реализации основных функций.

Примером использования природно-климатического резерва первого типа является довольно обычная для сельскохозяйственных предприятий ситуация, когда из-за заморозков погибают посевы ряда теплолюбивых культур. При наличии необходимых ресурсов предприятие повторно обрабатывает почву и производит посадку на этих площадях культур, которые, хотя и не являются профильными для данного хозяйства, однако могут быть выращены в сложившихся условиях. Необходимым условием существования резерва такого типа

является превышение дохода от реализации новых культур над затратами на их производство.

Природно-климатический резерв второго типа позволяет предприятию снижать затраты на реализацию некоторого множества функций в течение определенного периода времени благодаря обеспечению в этот период удовлетворительных условий их реализации в конкретных природно-климатических условиях.

Введем понятие природно-климатического резерва в сельскохозяйственном производстве. Известно, что одним из наиболее общих показателей, определяющих процесс развития растений, является уровень поступления фотосинтетической активной радиации (ФАР).

Понятие природно-климатического резерва определяется интегральным уровнем ФАР. Пусть $\varphi(x)$ — некоторая функция поступления ФАР в данной природно-климатической зоне. Она может быть вычислена как математическое ожидание прихода ФАР по интервалу времени за предыдущие годы. В данном случае

$$\sum \Phi_{AP} = \int_{T_1}^{T_2} \varphi(x) dx$$

где $[T_1, T_2]$ — временной интервал безрискового земледелия, оцениваемый суммарным поступлением ФАР за период $[T_1, T_2]$. Тогда природно-климатическим резервом $R_{k_i}^{n-k}$ для k_i культуры назовем разность между суммарной ФАР данной природно-климатической зоны и количеством ФАР, требуемым для созревания сельскохозяйственной культуры:

$$R_{k_i}^{n-k} = \sum \Phi_{AP} - k_i \Phi_{AP}.$$

Если для культуры k_i выполняется условие $R_{k_i}^{n-k} < 0$, то ее возделывание в данных природно-климатических условиях невозможно. При $R_{k_i}^{n-k} > 0$, решая дифференциальное уравнение

$$\int_Y^{T_2} \varphi(x) dx = k_i \Phi_{AP}$$

¹ Бурков В. Н., Заложнев А. Ю., Новиков Д. А. Теория графов в управлении организационными системами. — М.: Синтез, 2001.

² Копнин М. Ю., Кульба В. В., Микрин Е. А. Структурно-технологический резерв и его использование для повышения устойчивости производственных систем. // «Проблемы управления», № 4, 2005.

относительно переменной (срок сева k_i -ой культуры), получим наиболее поздний срок сева сельскохозяйственных культур.

Учет природно-климатического резерва крайне полезен при формировании производственной программы сельскохозяйственного предприятия. Наличие резерва рассматриваемого типа позволяет рассредоточить во времени использование имеющейся сельскохозяйственной техники, а также облегчить решение задач репланирования при возникновении чрезвычайной ситуации (ЧС) в производстве (гибели урожая), поскольку появляется возможность определения набора культур, которыми возможно занять пострадавшие участки земли, обеспечив тем самым возможность получения урожая.

Следует принять во внимание, что, например, озимые культуры имеют два периода активной вегетации: осенний (45–50 суток) и весенне-летний (75–100 суток). Следовательно, при возникновении ЧС зимой и вымерзании посевов периода весенне-летней вегетации может не хватить для вызревания озимых культур, поэтому для их замещения необходимо увеличивать посеvy соответствующих яровых культур¹.

Эколого-физиологический резерв бывает двух типов. Первый тип данного резерва — это способность любого живого организма противостоять изменениям условий среды обитания без ощутимых негативных последствий. Под эколого-физиологическим резервом второго типа понимается возможность стабилизации ситуации и приведения ее к нормальным условиям без вмешательства человека за счет использования только природных факторов. Величины резервов первого типа могут быть

установлены с помощью соответствующих биологических исследований возможностей сельскохозяйственных культур и определения нормативов их возделывания. Резервы второго типа определяются при изучении возможностей восстановления плодородия почв, самоочистки рек, атмосферы и т. д.

Наиболее наглядно эколого-физиологический резерв первого типа в сельском хозяйстве можно определить для птицы и скота. Как известно, факторы, влияющие на организм, — это, прежде всего, температура окружающего воздуха, влажность, а также различные условия среды, такие как размер помещения, в котором содержится животное (загон, клетка и т. д.), и содержание в воздухе различных веществ (повышенная пыльность, задымленность и т. д.). Кроме абсолютных значений температуры и влажности имеет значение и скорость их изменения, так как организм легче выдерживает плавное изменение, чем резкие перепады. Условия содержания сельскохозяйственных животных и птиц известны, также известны и условия их гибели. Поэтому под эколого-физиологическим резервом в данном случае понимаются установленные эмпирическим путем возможные допустимые отклонения вышеупомянутых факторов без вреда для здоровья. Введем матрицу-столбец факторов эколого-физиологического резерва первого типа:

$$R_{эф1} = \begin{pmatrix} T \\ \frac{\partial T}{\partial t} \\ H \\ \frac{\partial H}{\partial t} \\ \vdots \end{pmatrix},$$

где T — температура окружающего воздуха, H — влажность, $\frac{\partial T}{\partial t}$ — скорость изменения температуры, $\frac{\partial H}{\partial t}$ — скорость изменения влажности. Остальные параметры и скорость их изменения определяются в зависимости от конкретного вида животного или птицы.

¹ Пасечнюк Л. Е., Пасов В. М., Матвеева, Н. С. Агроклиматические ресурсы и условия произрастания зерновых и зернобобовых культур в США: Справочное пособие. — Л.: Гидрометеиздат, 1989.

В растениеводстве эколого-физиологический резерв первого типа можно косвенно оценивать с помощью показателей биоклиматического потенциала (БКП)¹. Данный показатель характеризует сельскохозяйственную продуктивность культур в определенных климатических условиях. Здесь под продуктивностью понимается суммарная биомасса, полученная за вегетационный период. Биоклиматический потенциал рассчитывается следующим образом:

$$БКП = K_p \frac{\sum_{T > 10^{\circ}C} T_{>10^{\circ}C}}{\sum_{T > 10^{\circ}C} T_{Базовая}},$$

где T — среднесуточная (базовая) температура воздуха за календарный год (учитываются только сутки, в течение которых она превышает $10^{\circ}C$), K_p — коэффициент биологической продуктивности климата (зависит от влагообеспеченности). На практике применяют значение $\sum_{T > 10^{\circ}C} T_{Базовая} = 1000$, что соответствует северной границе земледелия. Коэффициент биологической продуктивности рассчитывается как отношение годовых осадков к испаряемости за тот же период.

Эколого-физиологический резерв второго типа в сельском хозяйстве определяется в основном для сельскохозяйственных растений. Так же как и в случае резерва первого типа, величину резерва второго типа определяют чаще всего экспертным, статистическим и эмпирическим путем, однако некоторые его параметры поддаются формальному определению. Рассмотрим различные виды чрезвычайных ситуаций, связанных с экстремальными агрометеорологическими условиями, возника-

ющие в различные периоды жизни растений, и определим для них эколого-физиологический резерв второго типа.

Засухи и суховеи

Засуха (атмосферная, почвенная или общая) возникает при длительном отсутствии осадков в сочетании с высокой испаряемостью, что способствует иссушению корнеобитаемого слоя почвы и нарушению нормального водоснабжения растений. Результатом резкого несоответствия между потребностью растений во влаге и ее недостаточным фактическим поступлением является снижение урожайности культур. При длительных и интенсивных по напряженности засухах растения полностью погибают еще до формирования урожая.

Суховей — это сложное метеорологическое явление, характеризующееся низкой относительной влажностью воздуха (менее 30%) в сочетании с высокой его температурой (выше $25^{\circ}C$) и скоростью ветра не менее 5 м/с. Перечисленный комплекс метеорологических факторов вызывает высокую испаряемость, которая приводит к нарушению водного баланса растений².

Наиболее чувствительными к подобному нарушению водного режима почвы являются процессы испарения воды (транспирация) λE_L и конвективный теплообмен между листом и окружающим воздухом H_L ³. Уже на 3-й день после увлажнения почвы затраты тепла на транспирацию начинают заметно уменьшаться, и к 6-му дню снижаются примерно до половины по сравнению с начальными.

¹ Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. // В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. / Под ред. С. М. Семенова. — М.: Росгидромет, 2012.

² Гушля А. В., Мезенцев В. С. Воднобалансовые исследования. — Киев: Вища шк., 1982.

³ Фрере М. Оперативное агрометеорологическое наблюдение за произрастанием сельскохозяйственных культур для прогнозирования их урожая. — М.: ВНИИТЭИагропром, 1986.

Существенное влияние на изменение во времени водных потенциалов почвы и листа оказывает отношение площади корней S_r к площади листьев S_l растения. Растения со слабо развитой корневой системой ($S_r/S_l = 0,2$) более чувствительны к изменению влажности почвы. Постепенное высыхание почвы влияет на суточный расход влаги E_L и продуктивность растения P_L . Вследствие быстрого истощения запасов влаги, в почве у растения с хорошо

развитой корневой системой величины E_L и P_L уменьшаются быстрее, что приводит к прекращению прироста фитомассы на 10-й день. Таким образом, в качестве одной из мер механизма приспособляемости целесообразно взять соотношение S_r/S_l .

Торможение роста с увеличением водного дефицита листьев определяется зависимостью максимальной скорости роста растений g_m от их водного потенциала ψ :

$$g_m(\psi) = \begin{cases} \frac{16,3(\psi - \psi_m)^2 \exp(-0,1\psi)}{(\psi - \psi_m)^2 + 7,6\psi^2}, & -2,5 \cdot 10^5 > \psi > -15 \cdot 10^5 \\ 16,3, & \psi \geq -2,5 \cdot 10^5 \end{cases},$$

где ψ_m — потенциал устойчивого увядания, принятый равным $-15 \cdot 10^5$ Па¹.

Соответственно, если рассматривать временную шкалу развития событий, можно выделить два интервала времени: нарушение водного баланса почвы (истощение влаги в почве) и так называемый период неопределенности.

Если рассматривать динамику массообмена, то можно выделить три периода: период положительного прироста фитомассы, а также периоды нулевого и отрицательного ее прироста.

В первом интервале происходит истощение влажности почвы и на растение не оказывается существенного негативного влияния. В период неопределенности влажность почвы крайне низка, и если по истечении данного периода не произойдет восстановления водного баланса, то растению грозит гибель. Как правило, период неопределенности составляет максимум 7–10 дней. В течение второго периода начинаются необратимые процессы снижения прироста фитомассы, при этом снижение урожайности начинается с начала первого периода.

Начало засухи рассчитывается следующим образом²:

$$k = \frac{10(H + Q)}{\sum t},$$

где k — показатель засушливости; H — запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см весной; Q — количество осадков, выпавших с весны (с 1 марта) и до наступления засухи; $\sum t$ — сумма температур от даты перехода через 0° С.

Показатель k включает в себя три основных фактора, в значительной мере определяющие условия роста сельскохозяйственных культур. Его значение возрастает при улучшении условий увлажнения и снижается по мере роста температуры. Время установления значения $k=1,5$ принимается за начало засухи, а сумма осадков менее 5 мм за декаду с апреля по декабрь является признаком засушливости³.

¹ Рагкович Д. Я. Гидрологические основы водообеспечения. — М.: Ин-т водных проблем РАН, 1993.

² Белоусов С. Л. Численный анализ и прогноз метеорологических элементов. Сборник статей. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.

³ Полевой А. Н. Сельскохозяйственная метеорология: Учеб. для студентов вузов, обучающихся

Соответственно, при количестве осадков с начала весны (с 1 марта) менее $Q = 1.5 \sum t - H$, можно констатировать начало засухи.

Влияние засухи на урожай во многом зависит от индивидуальной стойкости данного вида и сорта растений к засухе (воздействию пониженного содержания влаги в почве и повышенных температур). Как известно, в значительной степени подвержены воздействию засух яровые зерновые культуры, которые наиболее активно развиваются в весенне-летний засухоопасный период.

Приспособляемость конкретного вида и сорта растения определяется описанным выше показателем S_r/S_l . Пусть

$$f\left(\frac{S_R}{S_L}\right) —$$

функция чувствительности (приспособляемости) растения к запасам влаги в почве. Тогда скорость изменения водного потенциала листьев будет равна

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = f\left(\frac{S_R}{S_L}\right).$$

Соответственно, эколого-физиологический резерв по засухе будет связан с водным потенциалом листьев после наступления засухи (время T_1) и до критического времени T_2 :

$$R_{\psi}^{засуха} = \int_{T_1}^{T_2} f\left(\frac{S_R}{S_L}\right) dt - \psi_m + \int_T^{T_2} \psi(Q) dt,$$

$$\text{где } \int_T^{T_2} \psi(Q) dt —$$

интегральный прогнозируемый водный потенциал листьев, зависящий от интегрального прогнозируемого количества осадков с насто-

ящего момента времени T до критического момента T_2 . Критическим сроком будет время T_2 , соответствующее $R_{\psi}^{засуха} = 0$. Если по прогнозам осадков не ожидается, то урожай неизбежно погибнет.

Переувлажнение

Избыточным увлажнением считают такое состояние почвы, когда среднее содержание в ней влаги за вегетационный период превышает 70–80% полной влагоемкости. Почвы, подверженные постоянному или периодически длительному избыточному увлажнению относятся к заболоченным¹.

Ухудшение аэрации корней при избытке влаги ведет к снижению общего содержания воды в растении. При этом даже кратковременный анаэробноз способствует накоплению нитритов, закиси азота, сульфидов, сероводорода, углекислоты, закисных форм железа и марганца. При избытке влаги снижается микробиологическая активность почвы, что ухудшает использование минеральных веществ растениями. Наблюдается также выделение ранее поглощенных питательных веществ в окружающую среду.

Избыточное увлажнение нарушает водообмен клетки и всего растительного организма, что ведет к угнетению ростовых процессов, нарушению микро- и макроспорогенеза, к различным аномалиям в формировании репродуктивных органов, что в свою очередь обуславливает плохую завязываемость зерна из-за низкой жизнеспособности пыльцы. Наряду с этим нарушается нормальный обмен веществ во всем растении, включая его репродуктивные органы, что неизбежно сказывается на развитии растений и, как следствие, показателях урожайности.

по спец. «Агрометеорология». — Спб.: Гидрометеоиздат, 1992.

¹ Роде А. А., Скрынникова И. Н. Генезис почв и современные процессы почвообразования. М.: Наука, 1984.

Оценка влияния избыточной влаги на продуктивность фотосинтеза растений осуществляется с использованием коэффициента переувлажнения \overline{SW} :

$$\overline{SW} = \frac{\sum_{i=1}^n SW_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}.$$

Здесь $SW_i = \frac{W_i - W_{opt}}{W_i^{ПВ} - W_{opt}}$,

если $W_i > W_{opt}$, иначе $SW_i = 1$,

W_i — влажность i -ого слоя почвы, мм; $W_i^{ПВ}$ — полная влагоемкость; W_{opt} — оптимальная для данной культуры влажность почвы, например, для яровой пшеницы $W_{opt} = 0,7W_i^{i.A.}$; μ_i — доля корней в i -ом слое почвы; n — число почвенных слоев¹².

Установлено, что при воздействии избытка влаги на зерновые культуры, например, ячмень, снижение урожайности происходит в зависимости от фазы развития растений, длительности и степени затопления. При этом снижение накопления общей биомассы происходит в основном за счет репродуктивных органов, корневой системы и несколько в меньшей степени за счет массы стеблей.

Таким образом, в случае вымокания происходит обратный засухе процесс, то есть водный баланс нарушается из-за слишком большого количества влаги, что ведет к гибели корневой системы растения из-за недостатка кислорода. Многое зависит от наличия у растения механизма приспособления, такого как, например,

у злаков, у которых имеется узел кущения — если он не погиб, то растение восстановится. Если вымокание происходит в сочетании с низкой температурой, то на растении появляется грибок, что делает его непригодным для дальнейшего использования. Как и в случае с засухой, имеются два периода развития переувлажнения — период насыщения водного баланса и период неопределенности длительностью максимум 7–10 дней, предшествующий гибели растения. На практике, период неопределенности может меняться в широких пределах в зависимости от наличия механизма приспособления у растений.

В обоих случаях важную роль играет ситуация в период неопределенности, которая сразу не может быть квалифицирована как чрезвычайная, например, при начале длительных осадков. Только по прошествии определенного периода можно определить, что ситуация приобретает чрезвычайный характер.

Эколого-физиологический резерв по увлажнению определяется с помощью коэффициента переувлажнения почвы. Пусть $\varphi_{SW}(t)$ — некоторая функция изменения коэффициента переувлажнения за некоторый эффективный промежуток времени в прошлом. В качестве эффективного промежутка времени может братья время от начала весны, или же время от начала сезона (периода) дождей с целью обеспечения наиболее объективных исходных данных для анализа. Такая функция зависит от интенсивности и продолжительности осадков, а также влагоемкости почвы. Кроме того, можно попытаться определить данную функцию эмпирически по экспериментальным данным с использованием методов регрессионного анализа:

$$R_{\varphi_2}^{ny} = \int_{T_1}^T \varphi_{SW}(t) dt - \overline{SW}_{крит} + \int_T^{T_2} \varphi_{SW_{прогноз}}(t) dt$$

где T_1 — время превышения коэффициентом переувлажнения значения 1; T — настоящее

¹ Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.

² Пряхина С. И., Скляр Ю. А., Левицкая Н. Г. Основы математического моделирования агробиопроцессов. — Саратов: Саратовский гос. университет, 2004.

время, $\overline{SW}_{крит}$ — критическое значение коэффициента переувлажнения для данного вида и сорта растения;

$$\int_T^{T_2} \varphi_{SW_{прогноз}}(t) dt —$$

интегральный прогнозируемый коэффициент увлажнения с настоящего момента времени T до момента времени T_2 , когда $\overline{SW} = \overline{SW}_{крит}$. Реальные потери посевов можно определить с помощью соответствующих таблиц, содержащих экспериментально определенные зависимости потерь урожая от влажности почвы или коэффициента переувлажнения.

Пониженные температуры

Различные виды растений неодинаковы по устойчивости к понижению температуры. Одни при охлаждении до температуры, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (не вызывающей образование льда), либо гибнут, либо у них наблюдаются видимые повреждения, задерживается рост, снижается продуктивность. Обычно у данной группы растений указанные явления наступают при температуре от 0 до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. У других видов растений при тех же условиях признаки повреждения не проявляются, и, как следствие, продуктивность их не снижается (или снижается незначительно). Таким образом, под холодостойкостью подразумевается способность растений, находящихся в вегетирующем состоянии, переносить охлаждение до температуры, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Например, яровые культуры по их устойчивости к пониженной температуре, близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, обычно подразделяют на две группы: холодостойкие (яровая пшеница, овес, чечевица, нут, горох, рыжик, горчица, подсолнечник, сафлор, лен, конопля, свекла, капуста и др.) и неустойчивые (огурцы, хлопчатник, фасоль,

кукуруза, баклажаны, сорго, просо, кунжут, томаты, гречиха и т. д.).¹

При пониженных температурах наблюдается изменение водного режима и режима минерального питания растений. По мере увеличения продолжительности пребывания растений при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость поглощения воды уменьшается. Температуры, близкие к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2\dots5\text{ }^{\circ}\text{C}$), вызывают не только быстрое обезвоживание растений, но оказывают и прямое повреждающее действие на корневую систему. Повреждающее действие температур, близких к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, удается уменьшить путем предварительной закали — выдерживания проростков ряда растений при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Фотосинтез. При обычных сочетаниях факторов внешней среды растениям, обитающим в умеренном или холодном климате, свойственно фотосинтезировать при пониженных температурах. Температурный оптимум фотосинтеза растений теплого климата лежит при $15\dots30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (иногда выше), для флоры умеренных широт — при $15\dots20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в холодных широтах некоторые растения могут синтезировать при температурном минимуме, близком к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дыхание. Пониженные температуры вызывают резкое снижение интенсивности дыхания. Эта реакция у неодинаковых по холодостойкости видов растений значительно различается. У теплолюбивых культур средняя интенсивность дыхания при $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в $2\text{--}2,5$ раза ниже чем у холодостойких видов. При температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивность дыхания у теплолюбивых и холодостойких видов практически одинакова. В случае понижения температуры в зоне корней, снижение интенсивности дыхания у теплолюбивых культур (кукуруза) выражено сильнее, чем у более холодостойких (пшеница,

¹ Полевой А. Н. Сельскохозяйственная метеорология: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Агрометеорология». — Спб.: Гидрометеиздат, 1992.

картофель)¹. При этом охлаждение теплолюбивых растений подавляет рост листьев и междоузлий, и, соответственно, уменьшается накопление сухого вещества, так как действие ферментов направляется в сторону распада².

Развитие и продуктивность растений. Низкими температурами, оказывающими отрицательное последствие на рост, развитие и урожай растений в начальные периоды развития, являются температуры на 3–4 °С выше биологического нуля, или температуры первоначального роста той или иной культуры³. Принимая за минимальную температуру первоначального роста хлебных злаков 2–3 °С, к неблагоприятным температурам следует отнести температуры ниже 5–7 °С. Влияние пониженной температуры почвы на урожай зерна отрицательно во все периоды онтогенеза, но наиболее сильно — в последние. При пониженных температурах почвы (ниже 10 °С) в течение вегетационного периода интенсивность процессов роста снижается, изменяется и соотношение между зерном, соломой и корнями в сторону снижения урожая зерна и увеличения массы корней.

Заморозки. Под заморозком следует понимать падение минимальной температуры ниже 0 °С на поверхности почвы и травостоя во время вегетационного периода на фоне положительных среднесуточных температур воздуха. По процессам возникновения и условиям погоды различают:

- *адвективные заморозки*, возникающие в результате наступления волны холода и, как правило, наблюдающиеся в течение

нескольких суток подряд в начальный период весны и поздней осенью при общем низком уровне минимальной и среднесуточной температуры, полной облачности и ветре;

- *радиационные заморозки*, возникающие в тихие ясные ночи в результате суточного хода температуры при относительно низких среднесуточных температурах и интенсивном ночном излучении (уровень среднесуточных температур в данном случае зависит от климатических условий);
- *адвективно-радиационные заморозки* образуются в результате вторжения северного холодного воздуха и последующего его выхолаживания за счет ночного излучения (процессы адвекции и радиации дополняют друг друга).

Заморозки нарушают жизненные функции растений и ограничивают распространение вида в зависимости от их интенсивности, продолжительности и периодичности, но прежде всего от состояния закалки растений и степени устойчивости конкретного вида к заморозкам. Стресс — это всегда необычная нагрузка, но не обязательно ведущая к смерти растений, при определенной комбинации факторов времени воздействия и температуры может возникнуть удлинение периода вегетации и потеря урожайности вплоть до 70%⁴.

Эколого-физиологический резерв для пониженных температур определяется экспериментально для каждого вида и сорта растений. Для умеренных широт нарушение нормального течения вегетации происходит при падении температуры почвы ниже 0 °С и удержании ее на данном уровне более полусуток с последующими значительными потерями урожайности (истощение резерва). При температурах выше 0 °С значительную роль играют индивидуаль-

¹ Коровин А. И., Козлов Г. И., Юдина Э. В. Агрометеорологические оценки отношения сортов сельскохозяйственных культур к заморозкам. Методические указания.— Л.: ВНИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, 1982.

² Жолкевич В. Н. Водный обмен растений.— М.: Наука, 1989.

³ Коровин А. И. Растения и экстремальные температуры.— Л.: Гидрометеоиздат, 1984.

⁴ Вопросы агрометеорологии [Сб. статей].— Л.: ВНИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, 1980.

ные механизмы приспособляемости. В данном случае матрицу общего эколого-физиологического резерва вносится значение $R_{y\delta_2}^{i\delta} = 1$, если температура почвы находится в допустимых пределах, и $R_{y\delta_2}^{i\delta} = 0$, если температура выходит за эти пределы.

Водная эрозия, ливни, град, сильные ветры

Водная эрозия — выпадение капель дождя на почву, вызывающее разрушение частиц почвы. Уровнем интенсивности водной эрозии определяется степень ее влияния на хозяйственную деятельность. Перемещение почвы P (т/га) связано с максимальной (в течение дождя) интенсивностью осадков за один час I (мм/ч) соотношением

$$P = 0,33I - 1,8$$

Ветровая эрозия — это процесс разрушения почвы, вызванный ее выдуванием сильным или порывистым ветром. Объем сдуваемой почвы зависит от скорости ветра и шероховатости поверхности почвы. Объем почвы можно оценить следующим образом¹:

$$S_V = (V - V_0)^3 \sqrt{d},$$

где S_V — количество перемещенной почвы; V — скорость ветра; V_0 — минимальная скорость ветра, при которой происходит перемещение частиц данного размера; d — диаметр частиц.

При эрозии может происходить сдувание до 1 см пахотной почвы в сутки. Кроме того, у растений повреждаются стебли, листья и узлы кущения, что ведет к снижению урожайности (например, для ржи и пшеницы на 1–3 ц/га).

При градобитии потери урожая зависят от суммарной энергии градин, вида культуры

и фазы ее развития. Критическое значение кинетической энергии градин для различных частей растений не определено. По всей видимости, оно близко к значению $U = 3 \cdot 10^{-3}$ Дж, что соответствует $d \approx 5$ мм. Значение кинетической энергии в Дж/м² совокупности градин определяются из выражения

$$U = 10^{-6} b \sum_{i=1}^N n_i d_i^4,$$

где b — безразмерный параметр, зависящий от плотности градин; n_i — число градин диаметром d_i , выпавших за время одного градобития на площади поверхности 1 м². По данным различных исследований, b может принимать значения от 1 до 100.

Эколого-физиологический резерв для водной и ветровой эрозии определяется количеством перемещаемой почвы:

$$R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} = (P \cdot S_{\text{площадь}} + S_V \cdot \rho_{\text{почвы}}) - m_{\text{крит}}$$

где $\rho_{\text{почвы}}$ — плотность почвы, а $m_{\text{крит}}$ — критическая масса плодородного слоя почвы на площадь посевов, $S_{\text{площадь}}$ — площадь посевов.

Эколого-физиологический резерв для градобития определяется через суммарную кинетическую энергию града экспериментально для каждого вида и сорта растений до потери урожая в 50%. Например, для пшеницы в зрелой фазе развития $U \sim 100$ Дж/м². В матрицу общего эколого-физиологического резерва вносится значение $R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} = 1$, если температура почвы находится в допустимых пределах, и $R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} = 0$, если температура выходит за эти пределы.

Вымерзание

Озимые культуры и плодовые растения сохраняются благодаря процессам закалки, которые подготавливают растения к периоду зимовки. Данный процесс делится на две фазы:

¹ Шваб В. А. Вопросы прикладной аэрогидромеханики и теплообмена. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1983.

1. Условия хорошего освещения, при понижении среднесуточной температуры воздуха до 0...6°C. Наиболее благоприятными условиями для первой фазы является солнечные дни и большая амплитуда суточных температур (днем 5...10°C, ночью -1...2°C). Длительность фазы — 12 дней.

2. Конец осени — начало зимы при среднесуточной температуре воздуха -2...-5°C. Она возможна при отсутствии света, когда на полях уже установился снежный покров. Длительность фазы по разным оценкам может составлять 8-12 дней.

После окончания всего процесса растения могут выдержать понижение температуры до -18°C, а некоторые сорта морозостойкой озимой пшеницы и ниже.

Вымерзание посевов происходит в годы с недостаточным снежным покровом при понижении температуры почв на глубине узла кущения ниже критической температуры, при которой гибнет 50% растений. Основным агрометеорологическим показателем условий вымерзания озимых культур является минимальная температура на глубине залегания узла кущения. Понижение данной температуры до критической даже в течение одного дня, особенно после оттепели, приводит к значительному изреживанию посевов, а более длительное (до трех дней и более) и интенсивное понижение — к полной гибели посевов. Рассматривая критическую температуру как предел морозостойкости данного сорта и сопоставляя ее с фактической минимальной температурой почвы на глубине узла кущения, можно предвидеть результаты перезимовки. Если критическая температура ниже температуры почвы, вымерзания не будет, а при температуре почвы, равной или ниже критической, гибель значительная.

Для оценки эколого-физиологический резерва можно использовать коэффициент морозоопасности K :

$$K = t/T_k,$$

где t — минимальная температура на глубине узла кущения; T_k — критическая температура, т.е. отрицательная температура, вызывающая гибель озимой пшеницы более 50%.

Кроме того, сильные ветра в период покоя озимых могут не только сдувать снежный покров, но и становиться причиной эрозии верхнего слоя почвы, в результате чего происходит оголение корней растений и их последующая гибель. В случае неустойчивой зимы происходит подтаивание снега и образование ледяной корки после подмораживания, что приводит к отрыву растений.

Таким образом, при определенных ЧС, связанных с зимними условиями, можно идентифицировать ситуации, приводящие к безусловной гибели посевов (эколого-физиологический резерв равен нулю), а также ситуации, где данный резерв нулю не равен (состояние посевов зависит от дальнейшего развития ситуации). Если рассматривать только температурный фактор, то эколого-физиологический резерв в данном случае определяется приведенным выше коэффициентом морозоопасности.

Пусть $\varphi_K(t)$ — некоторая функция изменения коэффициента морозоопасности за некоторый эффективный промежуток времени в прошлом. Определим функцию морозостойкости (показатель эколого-физиологического резерва для процессов вымерзания) эмпирически с использованием методологии регрессионного анализа следующим образом:

$$R_{\varphi_2}^{6M} = 1 - e^{\frac{\Delta K}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \varphi_K(t) dt},$$

где $\frac{\Delta K}{\Delta t}$ — скорость изменения коэффициента вымерзания.

Вредители и болезни растений

Вредители. В обычных условиях потери урожая от их действий составляют от 5%

до 20%. Выживаемость растений во многом зависит от культуры земледелия и от жизненного потенциала растений.

Болезни. Основными факторами внешней среды, определяющими появление, распространение и развитие болезней, является тепло и влагосодержание среды. На практике данные факторы достаточно часто действуют в совокупности, и в зависимости от значения одного из них меняется реакция одного патогена на уровень другого. Определенное сочетание температуры и влажности обуславливает сохранность инфекционного начала до наступления вегетационного периода, возможность контакта паразита и хозяина, заражение растений, продолжительность инкубационного периода, плодовитость патогена, скорость рассеивания спор, степень поражения растений и проявление болезни и т. д. Остальные элементы среды (свет, ветер, атмосферное давление и др.) в большинстве случаев лишь корректируют действие основных факторов, играя самостоятельную роль только в определенные периоды жизни растений.

Фотосинтетическая активность листьев больных растений значительно снижается по сравнению со здоровыми и зависит от фазы развития растения-хозяина, степени поражения, состояния растения при заражении. Изменения

интенсивности фотосинтеза, как правило, не проявляются в инкубационный период. Однако с появлением видимых признаков повреждения интенсивность фотосинтеза резко снижается, в ряде случаев — значительно (до 32%), а это, в свою очередь, приводит к снижению урожая. Большинство болезней самостоятельно не лечатся, и заболевания приводят к гибели урожая на территории распространения болезней, которая также зависит от культуры земледелия.

Эколого-физиологический резерв для вредителей и болезней определяется экспертным путем, с учетом вида и распространенности болезни. На основании экспертных оценок рассчитывается математическое ожидание потерь посевов, и при значении математического ожидания потерь более 50% от общей территории посевов, эколого-физиологический резерв считается равным нулю ($R_{\varepsilon\phi_2}^{\bar{}} = 0$), иначе $R_{\varepsilon\phi_2}^{\bar{}} = 1$, аналогично для $R_{\varepsilon\phi_2}^{ep}$

Матрица

эколого-физиологического резерва

На основании рассмотренных факторов можно составить матрицу эколого-физиологического резерва для периода вегетации и для периода покоя зимой:

$$R_{\varepsilon\phi_2} = \begin{pmatrix} R_{\varepsilon\phi_2}^{засуха} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{ny} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{nm} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{6M} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{cp} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{\bar{}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_{T_1}^{T_2} f\left(\frac{S_R}{S_L}\right) dt - \psi_m + \int_T^{T_2} \psi(Q) dt \\ \int_{T_1}^T \varphi_{SW}(t) dt - \overline{SW}_{крит} + \int_T^{T_2} \varphi_{SW_{прогноз}}(t) dt \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{nm} \\ 1 - e^{-\frac{\Delta K}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \varphi_K(t) dt} \\ (P \cdot S_{площадь} + S_V \cdot \rho_{почвы}) - m_{крит} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{град} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{ep} \\ R_{\varepsilon\phi_2}^{\bar{}} \end{pmatrix}.$$

Для расчета критического периода времени, по истечении которого составляющая резерва будет равна нулю, возможно использование как целой матрицы эколого-физиологического резерва, так и ее составляющих. Например, для составляющей

$$R_{\text{эф}_2}^{\text{засуха}} = \int_{T_1}^{T_2} f\left(\frac{S_R}{S_L}\right) dt - \psi_m + \int_T^{T_2} \psi(Q) dt$$

при решении уравнения

$$\int_{T_1}^{T_2} f\left(\frac{S_R}{S_L}\right) dt - \psi_m + \int_T^{T_2} \psi(Q) dt = 0$$

относительно переменной можно определить критический момент времени T_2 .

Данное определение матрицы эколого-физиологического резерва имеет ограничение, налагаемое возможностью взаимовлияния нескольких факторов на состояние растений. При некоторых значениях параметров возможна ситуация истощения эколого-физиологического резерва без истощения отдельных показателей из-за синергетического эффекта при комбинации нескольких факторов. Это хорошо иллюстрирует сочетание высокой влажности, создающих благоприятную среду для развития некоторых болезней или роста популяции вредителей.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы формального определения, а также классификации и описания характеристик резервов различного типа применительно к сельскохозяйственному производству. Приведены их характеристики

и способы использования в процессе планирования и управления сельскохозяйственным производством в условиях природно-климатических чрезвычайных ситуаций, возникающих в результате аномальных гидрометеорологических явлений и процессов.

Рассмотрено и формально определено понятие структурно-технологического резерва для технологической операции и технологической схемы как совокупности технологических операций в сельскохозяйственном производстве. Рассмотрены такие его характеристики как гибкость, стоимость и эффективность. Приведены рекомендации по применению предложенных типов резервов в процессе планирования и оперативного управления для снижения тяжести последствий чрезвычайных ситуаций.

Введены понятия природно-климатического резерва первого и второго типа в сельскохозяйственном производстве. Даны рекомендации по их применению при решении задач оперативного планирования в условиях аномальных гидрометеорологических явлений. На основе анализа различных типов чрезвычайных ситуаций в сельском хозяйстве введено понятие матрицы эколого-физиологического резерва, позволяющей с учетом данных видов резервов решать задачи планирования и репланирования в сельскохозяйственном производстве.

Разработанные методологический подход, модели и методы позволяют существенно повысить эффективность планирования, репланирования и оперативного управления сельскохозяйственным производством за счет использования имеющихся резервов и необходимой информационной поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций.

Библиография

1. Архипова Н. И., Кульба В. В. Управление в чрезвычайных ситуациях.— М.: РГГУ, 1998.
2. Бурков В. Н., Заложнев А. Ю., Новиков Д. А. Теория графов в управлении организационными системами.— М.: Синтег, 2001.

3. Копнин М. Ю., Кульба В. В., Микрин Е. А. Структурно-технологический резерв и его использование для повышения устойчивости производственных систем. // «Проблемы управления», № 4, 2005.
4. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. // В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. / Под ред. С. М. Семенова.— М.: Росгидромет, 2012.
5. Пасечнюк Л. Е., Пасов В. М., Матвеева, Н. С. Агроклиматические ресурсы и условия произрастания зерновых и зернобобовых культур в США: Справочное пособие.— Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
6. Гушля А. В., Мезенцев В. С. Водно-балансовые исследования.— Киев: Вища шк., 1982.
7. Фрере М. Оперативное агрометеорологическое наблюдение за произрастанием сельскохозяйственных культур для прогнозирования их урожаев.— М.: ВНИИТЭИагропром, 1986.
8. Раткович Д. Я. Гидрологические основы водообеспечения.— М.: Ин-т водных проблем РАН, 1993.
9. Белоусов С. Л. Численный анализ и прогноз метеорологических элементов. Сборник статей.— Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
10. Полевой А. Н. Сельскохозяйственная метеорология: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Агрометеорология».— Спб.: Гидрометеоиздат, 1992.
11. Роде А. А., Скрынникова И. Н. Генезис почв и современные процессы почвообразования.— М.: Наука, 1984.
12. Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем.— Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
13. Пряхина С. И., Скляр Ю. А., Левицкая Н. Г. Основы математического моделирования агробиопроцессов.— Саратов: Саратовский гос. университет, 2004.
14. Коровин А. И., Козлов Г. И., Юдина Э. В. Агрометеорологические оценки отношения сортов сельскохозяйственных культур к заморозкам. Методические указания.— Л., ВНИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, 1982.
15. Жолкевич В. Н. Водный обмен растений.— М.: Наука, 1989.
16. Коровин А. И. Растения и экстремальные температуры.— Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
17. Шваб В. А. Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассообмена.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983.
18. Кабанов П. А. Антикоррупционный мониторинг в муниципальном образовании: правовое регулирование, организация и проведение // NB: Административное право и практика администрирования.— 2013.— 6.— С. 44–53. URL: http://www.e-notabene.ru/al/article_9016.html
19. Манойло А. В. Ценностные основы управления межцивилизационными конфликтами: российская модель // NB: Международные отношения.— 2012.— 1.— С. 32–43. DOI: 10.7256/2306-4226.2012.1.279. URL: http://www.e-notabene.ru/wi/article_279.html
20. Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю., Святкина М. Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // NB: Кибернетика и программирование.— 2013.— 3.— С. 9–20. URL: http://www.e-notabene.ru/kp/article_8737.html
21. Гуляихин В. Н. К вопросу о методологии диссертационных работ в юридической науке // NB: Вопросы права и политики.— 2012.— 1.— С. 92–106. DOI: 10.7256/2305-9699.2012.1.10. URL: http://www.e-notabene.ru/lr/article_10.html

References (transliterated)

1. Arkhipova N. I., Kul'ba V. V. Upravlenie v chrezvychainykh situatsiyakh.— M.: RGGU, 1998.
2. Burkov V. N., Zalozhnev A. Yu., Novikov D. A. Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi sistemami.— M.: Sinteg, 2001.
3. Kopnin M. Yu., Kul'ba V.V., Mikrin E. A. Strukturno-tekhnologicheskii rezerv i ego ispol'zovanie dlya povysheniya ustoichivosti proizvodstvennykh sistem. // «Problemy upravleniya», № 4, 2005.
4. Sirotenko O. D., Pavlova V. N. Metody otsenki vliyaniya izmenenii klimata na produktivnost sel'skogo khozyaistva. // V kn.: Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. / Pod red. S. M. Semenova.— M.: Rosgidromet, 2012.
5. Pasechnyuk L. E., Pasov V. M., Matveeva, N. S. Agroklimaticheskie resursy i usloviya proizrastaniya zernovykh i zernobobovykh kul'tur v SShA: Spravochnoe posobie.— L.: Gidrometeoizdat, 1989.
6. Gushlya A. V., Mezentsev V. S. Vodnobalansovye issledovaniya.— Kiev: Vishcha shk., 1982.
7. Frere M. Operativnoe agrometeorologicheskoe nablyudenie za proizrastaniem sel'skokhozyaistvennykh kul'tur dlya prognozirovaniya ikh urozhaev.— M.: VNIITELagroprom, 1986.
8. Ratkovich D. Ya. Gidrologicheskie osnovy vodoobespecheniya.— M.: In-t vodnykh problem RAN, 1993.
9. Belousov S. L. Chislennyi analiz i prognoz meteorologicheskikh elementov. Sbornik statei.— L.: Gidrometeoizdat, 1985.
10. Polevoi A. N. Sel'skokhozyaistvennaya meteorologiya: Ucheb. dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spets.»Agrometeorologiya».— Spb.: Gidrometeoizdat, 1992.
11. Rode A. A., Skrynnikova I. N. Genezis pochv i sovremennye protsessy pochvoobrazovaniya.— M.: Nauka, 1984.
12. Sirotenko O. D. Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem.— L.: Gidrometeoizdat, 1981.
13. Pryakhina S. I., Sklyarov Yu. A., Levitskaya N. G. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya agrobioprotssesov.— Saratov: Saratovskii gos. universitet, 2004.
14. Korovin A. I., Kozlov G. I., Yudina E. V. Agrometeorologicheskie otsenki otnosheniya sortov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur k zamorozkam. Metodicheskie ukazaniya.— L., VNII rastenievodstva im. N. I. Vavilova, 1982.
15. Zholkevich V. N. Vodnyi obmen rastenii.— M.: Nauka, 1989.
16. Korovin A. I. Rasteniya i ekstremal'nye temperatury.— L.: Gidrometeoizdat, 1984.
17. Shvab V. A. Voprosy prikladnoi aerogidromekhaniki i teplomassoobmena.— Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1983.
18. Kabanov P. A. Antikorrupsionnyi monitoring v munitsipal'nom obrazovanii: pravovoe regulirovanie, organizatsiya i provedenie // NB: Administrativnoe pravo i praktika administrirovaniya.— 2013.— 6.— С. 44–53. URL: http://www.e-notabene.ru/al/article_9016.html
19. Manoilo A. V. Tsennostnye osnovy upravleniya mezhtsivilizatsionnymi konfliktami: rossiiskaya model' // NB: Mezhdunarodnye otnosheniya.— 2012.— 1.— С. 32–43. DOI: 10.7256/2306–4226.2012.1.279. URL: http://www.e-notabene.ru/wi/article_279.html
20. Korobeinikov A. G., Grishentsev A. Yu., Svyatkina M. N. Primenenie intellektual'nykh agentov magnitnykh izmerenii dlya monitoringa ob'ektov zheleznodorozhnoi infrastruktury // NB: Kibernetika i programmirovaniye.—

- 2013.— 3.— С. 9–20. URL: http://www.e-notabene.ru/kp/article_8737.html
21. Gulyaikhin V.N. К вопросу о методологии диссертационных работ в юридической науке // NB: Voprosy prava i politiki.— 2012.— 1.— С. 92–106. DOI: 10.7256/2305–9699.2012.1.10. URL: http://www.e-notabene.ru/lr/article_10.html