ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ И ВЫБОР ПЛАНИРУЕМОГО УРОЖАЯ ПО ФАКТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Ю.Г. Захарян, к.т.н., А.О. Усков, АФИ

Изменчивость фактора продуктивности (X) может быть представлена функцией распределения g(x), описывающей фактор как случайную величину. Исследуется возможность определения планируемой урожайности и выделения контуров по продуктивности.

Ключевые слова: *точное земледелие, планирование урожая, дифференциация.*

В основу исследования положен анализ эмпирико-статистических моделей, которые в количественной форме выражают связь между варьирующим по территории фактором продуктивности и регулируемым технологическим воздействием, с одной стороны, и потерями урожая или экономического эффекта, получаемых при выбранной стратегии планирования агрономических мероприятий, с другой стороны.

Продуктивность рассматривается как функция предикторов двух видов: природно-почвенно-климатического и антропогенно-технологического. Изменчивость фактора продуктивности (X) по выделенной для анализа территории может быть описана двояким образом: 1) детально путем задания факторов для всех точек территории; при этом вся территория делится на контура, в пределах каждого из которых фактор усредняется и полагается постоянным; 2) обобщенно путем задания некоторой функции распределения g(x), описывающей фактор как случайную величину, которая изменяется статистически непрерывно в пределах всей исследуемой территории.

В зависимости от степени пространственной дифференциации и объема исходной информации о факторах все варианты планируемых технологий на неоднородной территории делим на три основных класса: недифференцированные стратегии (NDS); детально дифференцированные стратегии (DDS); частично дифференцированные стратегии (PDS). NDS ориентирована на среднее по территории значение некоторого варьирующего фактора. DDS предполагает пространственное варьирование принимаемых агротехнических решений с учетом конкретных условий на каждой элементарной площадке осреднения измеренного фактора. Для DDS необходимо иметь подробные сведения о пространственной изменчивости влияющего фактора.

В практике земледелия всегда используется стратегия частично дифференцированная (PDS). Для реализации агротехнологии “точного земледелия” границы контуров выделяются по каждому управляемому фактору. В качестве критерия целесообразности выделения контуров принимается хозяйственно-экономический показатель в виде потерь или экономического выигрыша. Минимизация потерь по каждому из факторов продуктивности и наименьшие затраты на реализацию всего цикла технологического процесса в системах точного земледелия определяется затратами на механическую обработку почвы, предпосевное внесение удобрений, дробное внесение удобрений в вегетационный период, химическую обработку посевов по защите растений от болезней и вредителей. Каждый из перечисленных выше приемов и факторов продуктивности нуждается в собственном технологическом оконтуривании. Во многих из известных систем точного земледелия технологическую дифференциацию контуров принято оценивать либо по данным агрохимического обследования, либо по пространственной неоднородности продуктивности в пределах поля [1].

Максималистская с точки зрения учета неоднородности ситуация состоит в том, что в каждой точке рассматриваемой территории средний на единицу всей площади выигрыш можно вычислить по формуле:

$U_d = \sum_{i=1}^{N} q_i u_i[x_i; d(x_i)]$, где i – номер зоны (контура, поля), $q_i = \frac{S_i}{S}$ относительная площадь i-ой зоны, S_i – площадь i-ой зоны в абсолютных единицах (га, km^2), S – общая площадь рассматриваемой территории.

Другой крайний случай состоит в том, что планирование осуществляется в целом для всей территории без учета пространственной изменчивости X. При этом простейший случай, когда общее для всей территории решение принимается в расчете на средние условия, то есть в рассматриваемой задаче – на среднее значение X. Обозначим последнее через $\overline{X}$, а соответствующий выигрыш через U_{nd}. Тогда, если предположить, что территория разделена на N однородных по x_i частей со значениями $X = x_1, x_2, ..., x_n$, получим:

$U_{nd} = \sum_{i=1}^{N} q_i u[x_i; d_i(\bar{x})]$, здесь $\bar{x} = \sum_{i=1}^{N} q_i x_i$. Разность $\Delta U_1 = U_d - U_{nd}[d(\overline{x})]$ характеризует средний (в статистическом смысле) абсолютный выигрыш на единицу площади, который достигается за счет перехода к дифференцированному планированию.

Если в пределах рассматриваемой территории параметр X достаточно плавно меняется в некотором диапазоне значений, то он может интерпретироваться как непрерывная варьирующая величина X и описываться при этом непрерывным законом (плотностью) распределения g(x). В этом случае $U_{nd} = \int_{(x)} u[x, d(\bar{x})] g(x) dx$. Анализируя величину $U_{nd}[d(x)]$ можно найти такое $x = a_0$, обычно отличающееся от $\overline{X}$, которое обеспечивает максимум среднего выигрыша. Таким образом, даже не производя дифференциации агротехнических решений по неоднородной территории, можно найти такую неоднородную недифференцированную стратегию, при которой эффект будет выше, чем при ориентации на средние условия. Естественно, что для этого нужно знать пространственную статистику X в виде закона распределения его значений g(x).

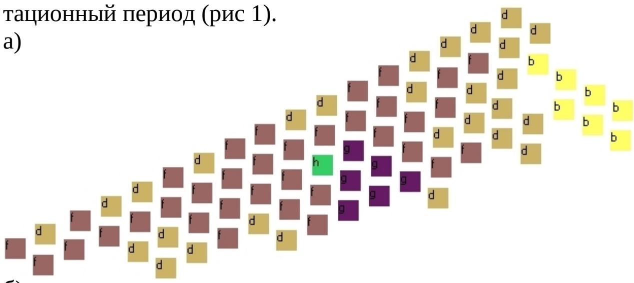
По аналогии с ΔU_1 целесообразно ввести величину $\Delta U_2 = U_{nd}[d(a_0)] - U_{nd}[d(\bar{x})]$, характеризующую выигрыш, который теоретически может быть получен за счет перехода от ориентации на средние условия к оптимальной недифференцированной стратегии, выбираемой с учетом статистических закономерностей пространственного варьирования параметра X. Из сказанного ясно, что вопрос о том, имеет ли смысл проводить дифференциацию решений или не имеет, в первую очередь, требует сопоставления величин ΔU_1 и ΔU_2. Очевидно, что в тех случаях, когда отношение $\gamma = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$ меньше единицы, дифференциация может быть целесообразной, поскольку она является при этом единственным средством устранения отрицательного влияния пространственной неоднородности территории. И наоборот, когда значение γ близко к единице, то есть если ΔU_2 несущественно меньше, чем ΔU_1, дифференциация вряд ли имеет смысл, так как все резервы от учета пространственной неоднородности территории практически полностью перекрываются переходом от ориентации на средние условия к оптимальной недифференцированной стратегии. Общий подход к такому анализу PDS остается тем же. Например, можно предположить, что область возможных значений варьирующего фактора X разделена на градации $\Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, ..., \Omega^{(n)}$ и что по этим градациям осуществляется районирование территории.

Для каждой планируемой технологической операции следует назначить число градаций по максимальной разрешающей "способности" агроприёма, как фактора управления продуктивностью. Ограничителями также являются критерий затратности исполнения технологической программы при перенастраивании рабочих органов перед каждым переходом на следующий контур уровень продуктивности, на который нужно рассчитывать параметры технологий. Совокупность трех отмеченных условий определит поверхность границы целесообразной степени дифференциации по контурам в пределах каждого поля.

До сих пор задача оценки эффективности пространственной дифференциации решений формулировалась без учета дополнительных затрат на проведение соответствующих корректировок агротехники или, в более общем плане, без учета фактора возрастания трудности реализации дифференцированной агротехнологии. Если попытаться учесть, что такие дополнительные потери существуют, то можно поставить вопрос о наличии оптимальной степени дифференциации. Введём величину C_g – затраты на проведенные корректировки технологического режима, и будем считать известной зависимость $q^{(n)}$, показывающую, какое число однородных зон q в среднем выделяется на единицу площади территории при ее районировании по N градациям X. Тогда задача выбора оптимального N сводится к отысканию максимума функции $w^{(N)} = u_g^{(N)} - c_g q(N)$, характеризующей "чистый" выигрыш на единицу площади. Будет существовать такое N_0, которое удовлетворяет условию $w^{(N_0)} = \max w^{(N)}$

Исследуем возможность выделения контуров по продуктивности, определяемой количеством биомассы, собранной с каждой единичной площадки территории за прошедший вегетационный период (рис 1).

а)



б)

Рис 1. Распределение площадок учета продуктивности на опытном поле (а). Распределение прибавки урожая картофеля относительно средней по полю (б)

По принятой классификации продуктивностей это действительно реально достигнутая продуктивность. На какой уровень продуктивности нужно ориентировать технологию следующего вегетационного периода? Для этого предложены ниже описываемые процедуры. Вводим условные обозначения: PP – потенциальная продуктивность; KP – климатически обеспеченная продуктивность; EP – ожидаемая продуктивность до уборки урожая; FP – фактически полученная продуктивность; FRP – продуктивность, вычисленная после уборки урожая по сложившимся условиям ; PRP – продуктивность, планируемая на следующий вегетационный период.

На первом шаге вычисляются последовательно три категории продуктивности (потенциальная, климатически обусловленная, действительно возможная) по наблюдавшимся факторам продуктивности прошедшего периода вегетации. Используется информационная база агрометеорологических данных, характеризующих погодные условия, которые складывались на исследуемой территории. Агрометеорологическая база содержит: суммы пришедшей на территорию фотосинтетически активной радиации, количество влаги в метровом слое почвы в предпосевной период и осадков, выпавших в период вегетации, а также сумму суточных температур воздуха, больше 10°С.

Потенциальная продуктивность вычисляется по формуле: $PP = \frac{\sum FAR}{g} \cdot \eta$, где $\sum FAR$ – сумма фотосинтетически активной радиации за вегетационный период; η – коэффициент использования ФАР вегетирующим посевом для синтеза первичного биологического продукта; g – количество радиационной энергии, необходимой для формирования единицы биомассы культуры посева.

Климатически обеспеченная продуктивность определяется по формулам

$KP = \frac{E}{E_0} \cdot PP$ для полуаридной климатической зоны,

$KP = \frac{(W_H - W_K + Q)}{2{,}4 \cdot R} \cdot PP$, для зоны достаточного увлажнения,где Е – испарение; E_0 – испаряемость; W_H – влагозапасы почвы в начале периода вегетации; W_K – влагозапасы в конце периода вегетации; Q – осадки в период вегетации; R – радиационный баланс за период вегетации, пропорциональный сумме активных температур воздуха выше 10°С.

Ожидаемая продуктивность определяется по формуле: $EP = B \cdot KP$, для вычисления которой используются результаты агрохимического и агрофизического анализа почвенных образцов, взятых в узлах координационной сетки исследуемой территории. На основе этой информационной базы по регрессионным зависимостям

($B = a_0 + a_1 \cdot pH + a_2 \cdot H + a_3 \cdot P_2O_5 + a_4 \cdot K_2O$, где pH – кислотность, Н – содержание гумуса, P_2O_5 – содержание доступного фосфора, K_2O – содержание калия) вычисляется бонитет почвы (В) для каждой элементарной площадки по культуре, которую выращивали на этом поле. Ожидаемая продуктивность посева и фактически полученная (FP) сопоставляются между собой: $\Delta P = EP - FP$.

Полагаем, что ΔP характеризует некоторый недобор продуктивности по причине недоучета неравномерности пространственного распределения факторов продуктивности. Таким же образом сравнивается эффективность дифференцированной по элементарным участкам технологии с частично дифференцированной, по которой выращивался полученный урожай, принимая фактически выделенные в период уборки урожая контура за технологические контура действительно реализованной технологии. Выполняется оценка статистических характеристик фактической продуктивности и вычисляется коэффициент технологического лимитирования (ξ). Принимается предположение о том, что статистические характеристики, планируемого на следующий год урожая останутся без изменения, а также не будут изменены границы технологических контуров, по которым планировались технологии.

При сделанных предположениях ожидаемая продуктивность может быть вычислена по формулам:

$EP = FP \quad при \quad FP = FRP$;

$EP = FRP - \xi(FRP - FP) \; при \; FR < FRP$;

$EP = FRP + \xi(FP - FRP) \quad при \quad FP > FRP$. Здесь ξ=1 соответствует отсутствию технологического лимитирования и фактически полученная продуктивность будет равна ожидаемой (ΔP =0); ξ=0 соответствует жесткому технологическому лимитированию, при котором получение продуктивности больше планируемой в предпосевной период невозможно. Лимитирующее влияние агротехнологий выражается как в уменьшении (по сравнению с $\overline{FP}$) среднего значения ожидаемой продуктивности $\overline{EP}$), так и в снижении дисперсии его колебаний (по сравнению с σ_{FP}).

Для решения задачи определения конкретного уровня планируемой продуктивности(PRP) с учетом хозяйственно-экономических показателей, введем стоимость единицы товарной составляющей продуктивности C_γ, технологических затрат C_T и на выращивание планируемого урожая C_{PRP}. Тогда, если в конкретном случае получена действительная продуктивность FP, то чистый доход от реализации её товарной составляющей может быть рассчитан по зависимости $U = \alpha \cdot C_\gamma \cdot FP - C_T \cdot PRP$, где α – доля товарного продукта.

При любом выборе уровня PRP FP является случайной величиной вследствие погодной изменчивости и неоднородности почвенных условий и поэтому оптимальность выбора PRP следует понимать как ориентир на получение средних статистических результатов. Абсолютными значениями статистик в этом случае следует назначить статистические характеристики фактической продуктивности, например, по данным координатного учета при уборке. Исходя из этого под оптимальной стратегией понимаем выбор такого уровня планируемой продуктивности, который обеспечивает достижение максимальной средней прибыли со всего поля ($\overline{U} = C_\lambda \overline{EP} - C_T \cdot PRP$), а оптимум PRP соответствует равенству $\frac{\partial \overline{EP}}{\partial PRP} = \frac{1}{C_\gamma} \cdot \frac{\partial C_T \cdot PRP}{\partial PRP}$.

В предположении, что фактические технологические затраты увеличиваются пропорционально уровню планируемой продуктивности, можно записать $C_T \cdot PRP = a + b \cdot PRP$, где a и b некоторые коэффициенты. Тогда, например, для случая нормального Гауссовского распределения FP вида $\Phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int \exp(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2})dt$, где μ – математическое ожидание, получим $\Phi_{PRP} = \frac{1}{2} - \frac{b}{C_\gamma \cdot (1-\xi)}$, где Φ_{PRP} – интеграл вероятности. Отсюда следует, что для $\frac{b}{C_\gamma \cdot (1-\xi)} < \frac{1}{2}$ оптимальное значение аргумента функции распределения полученного урожая t_{FP} оказывается положительным, а для $\frac{b}{C_\gamma \cdot (1-\xi)} > \frac{1}{2}$ оптимальное значение t_{FP} отрицательно.

В соответствии с этим оптимальной хозяйственной стратегией в первом случае является выбор планируемой продуктивности на следующий вегетационный период выше фактически полученной, во втором случае – наоборот. Оптимальный уровень планируемой продуктивности, при которой средние потери минимальны, находится из уравнения:

$\Phi(t_{PRP}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1-K}{1+K}$, где $K = \frac{b}{C_\gamma(1-\xi) - b}$, а численные значения оптимального t_{FP} приведены в таблице.

K	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	2	3	4	10	20
t_{FP}	1,67	1,34	0,97	0,63	0,43	0	-0,43	-0,67	-0,97	-1,34	-1,67

Аналогично можно получить решение для иных моделей. Например, при $C_T \cdot PRP = m + l \cdot (PRP)^2$, где m и l – некоторые коэффициенты

$\Phi(t_{PRP}) = \frac{1}{2} - \frac{2l \cdot \sigma_{FP}}{(1-\xi) \cdot C_\gamma}(t_{PRP} + \frac{\overline{FP}}{\sigma_{FP}})$. Это уравнение имеет единственное решение. При этом когда $\frac{l \cdot \sigma_{FP}}{(1-\xi) \cdot C_\gamma} < \frac{1}{4}$, оптимальное значение t_{FP} положительно, когда $\frac{l \cdot \sigma_{FP}}{(1-\xi) \cdot C_\gamma} > \frac{1}{4}$, значение t_{FP} отрицательно. В первом случае, уровень планируемой продуктивности на следующий год целесообразно принять выше среднего значения действительно полученного (FP), во втором – ниже его. Аналогично задача решается и при других типах распределений фактически достигнутой продуктивности, измеренной по территории с дифференциацией по контурам.

Литература

1.Якушев В.П., Якушев В.В. Информационное обеспечение точного земледелия. С.-Петербург, 2007

TECHNOLOGICAL DIFFERENTIATION AND CHOICE OF A PLANNED PRODUCTIVITY LEVEL ON ACTUAL EFFICIENCY IN SYSTEMS OF PRECISE AGRICULTURE

Dr. Zaharian U.G., Uskov A.O., AFI, office@agrophys.ru

Summary. Variability of the factor of efficiency (x) can be presented by distribution function g (x), describing the factor as a random variable. Possibility of definition of planned productivity and allocation of contours on efficiency is being investigated.

Key words: precision agriculture, crop planning, differentiation.