

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ

Ю. Г. Захарян

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

Поступила в редакцию 18 марта 2016 г., принята к публикации 31 августа 2016 г.

Предложены математические модели и методика их использования для оценки влияния изменчивости структуры и пространственной неоднородности на эффективность технологических воздействий. Выполнен анализ эффективности пространственной дифференциации технологий для трех стратегических моделей: недифференцированной (НДС), частично дифференцированной (ЧДС) и детально дифференцированной (ДДС). Продемонстрирована необходимость установления оптимальной по эффективности степени дифференциации в зависимости от плотности распределения неоднородностей, уровня продуктивности и стоимостных показателей затрат и прибыли. Разработан математический аппарат, позволяющий оценивать теоретически достижимый эффект, который может быть получен за счет пространственной дифференциации технологических решений. Установлено, что относительный показатель ω характеризует потенциальную эффективность оптимальной недифференцированной стратегии U_{nd}^0 или, что то же самое, определяет потенциальный (теоретически достижимый) эффект от учета статистической информации в рамках среднего значения варьирующегося агрометеорологического фактора x . При помощи математических моделей было определено, что в случаях, когда безразмерная величина ω существенно меньше единицы, дифференциация может быть целесообразной, поскольку она является при этом единственным средством устранения отрицательного влияния пространственной неоднородности территории. Наоборот, когда значение ω близко к единице, дифференциация, по всей видимости, не имеет смысла.

Ключевые слова: пространственная неоднородность, структура изменчивости, технологические воздействия, дифференцированная стратегия, эффективность.

MODELING AND EVALUATION OF SPATIAL FLUCTUATIONS OF TECHNOLOGICAL IMPACT INTENSITY ON YIELDS

Y. G. Zakharyan

Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdansky prospect, Saint Petersburg, 195220
E-mail: dzhem.m@yandex.ru

Mathematical models and methods to be used to evaluate the impact of variability in field structure and spatial heterogeneity on the effectiveness of technological operations are proposed. The paper analyzes the efficiency of the spatial differentiation of technologies for the three strategic models: undifferentiated (VAT), partially differentiated (NPV) and differentiated (DDS). The necessity to establish the optimal level of differentiation depending on the inhomogeneities distribution density, on the level of productivity and on several cost indicators is shown. The mathematical tool allows to evaluate theoretically attainable effect that can be achieved by spatial differentiation of technological solutions. It is found that the relative rate ω characterizes the potential effectiveness of the optimal undifferentiated strategy U_{nd}^0 or, equivalently, identifies potential (theoretically attainable) effect of accounting statistical information within the average value of the varying agro meteorological factor x . It was determined by means of mathematical models that in cases where the dimensionless ω substantially less than 1, the differentiation may be appropriate because in this case it is the only way to eliminate the negative influence of the spatial homogeneity of the territory. Conversely, when the value of ω is close to 1, differentiation apparently has no reason.

Keywords: spatial fluctuations, intensity, technological impact, anthropogenic heterogeneity, efficiency, undifferentiated heterogeneity.

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении вопросов пространственной дифференциации решений на неоднородной сельскохозяйственной территории до настоящего времени принималось во внимание только естественное, т.е. природно обусловленное, варьирование агрометеорологических факторов, влияющих на урожайность. При этом любая дифференциация технологии оказывалась экономически выгодной (по крайней мере теоретически) до определенного предела детализации. Анализ подобных моделей представляется важным, поскольку он позволяет установить потенциальные преимущества дифференцированного планирования и количественно оценить максимальную пользу, которая может быть получена за счет рационального использования территориально детализированной информации при переходе к реальным задачам, касающимся пространственной дифференциации агротехники внутри поля (по отдельным паспортизированным контурам). Вопрос становится существенно более сложным в связи с тем, что количество контуров может превышать экономическую целесообразность детализации.

Различная интенсивность технологического воздействия, возникающая вследствие небезукоризненной работы сельскохозяйственной техники, является источником дополнительной неоднородности (Романова, Пучкарева, Никитина, 1983).

Структура неоднородности агротехнического воздействия в некоторой точке (ξ, η) рассматриваемой сельскохозяйственной территории может быть представлена в виде суммы:

$$\tilde{d} = (\xi, \eta) + \delta_d(\xi, \eta), \quad (1)$$

где $\tilde{d}(\xi, \eta)$ – заданное значение технологического воздействия в указанной точке; $\delta_d(\xi, \eta)$ – случайное отклонение при реализации технологии.

Что касается первого слагаемого, то данная величина зависит от выбранной стратегии планирования. Например, для

любой недифференцированной стратегии НДС $d(\xi, \eta)$ от точки к точке не меняется, т.е. для всей территории оно является одинаковым.

Следует более подробно рассмотреть слагаемое $\delta_d(\xi, \eta)$, с которым связано возникновение случайной составляющей неоднородности. Для описания данной компоненты могут быть предложены различные детерминированные и статистические модели. Простейшее допущение состоит в том, что $\delta_d(\xi, \eta)$ – не зависящая от X и меняющаяся от точки к точке случайная величина с нулевым средним ($\bar{\delta}_d = 0$) и дисперсией σ_δ^2 .

Более сложная модель предусматривает включение в $\delta_d(\xi, \eta)$ наряду со случайной еще и некоторой постоянной составляющей $\bar{\delta}_d$, которая играет роль систематической ошибки реализации расчетного технологического режима. Это может быть одинаковый для всех точек поля перерасход воды или, наоборот, недополив (Захарян, Саноян, Бадалян, 1985), завышение или занижение дозы вносимого минерального удобрения и т.д. Основным источником систематических погрешностей являются конструктивные особенности и несовершенство машин, с помощью которых выполняются те или иные технологические операции. В дальнейшем можно ограничиться рассмотрением только самого простого случая, когда $\bar{\delta}_d = 0$.

Цель данного исследования заключается в том, чтобы продемонстрировать целесообразность установления степени дифференциации агротехнологии с учетом пространственной неоднородности варьирующихся факторов (природной и антропогенной).

Методические аспекты, проблемы и анализ результатов

В процессе соответствующего анализа будем исходить из предположения об экспоненциальном характере функции выигрыша (Захарян, Насонова, 1988). Следует записать:

$$U(x, \tilde{d}) = C_{y, y_{\max}} \left[1 - e^{-y(d + \delta_d + x)} \right] - C_d(d + \delta_d), \quad (2)$$

где $U(x, \tilde{d})$ – выигрыш для конкретных x и $\tilde{d} = d + \delta_d$.

Поскольку технологическая погрешность δ_d является случайной, целесообразно провести по ней статистическое осреднение, и вместо $U(x, \tilde{d})$ рассматривать в дальнейшем величину:

$$\overline{U(x, \tilde{d})} = \int_{(\delta_d)} U(x; d + \delta_d) g(\delta_d) d\delta_d, \quad (3)$$

где $g(\delta_d)$ – плотность распределения δ_d . При аппроксимации $g(\delta_d)$ нормальным законом из общего выражения (3) следует:

$$\overline{U(x, \tilde{d})} = C_y y_{\max} \times \{1 - \exp[-\gamma(x + d) + \varepsilon^2/2]\} - C_d d, \quad (4)$$

где безразмерный показатель $\varepsilon = \gamma\sigma_{\delta}$.

При ориентации на конкретное значение x оптимальное хозяйственное решение $d_0(x)$ целесообразно выбрать согласно условию максимума $\overline{U(x, \tilde{d})}$. Дифференцируя в соответствии с этим выражение (4) по d и приравнявая полученный результат к нулю, можно убедиться, что величина $d_0(x)$ рассчитывается по формуле:

$$d_0(x) = -x - \frac{1}{\gamma} (\ln B - \varepsilon^2/2), \quad (5)$$

где $B = C_d/\gamma C_y y_{\max}$; C_d – стоимость агротехники; C_y – стоимость фактического продукта; y_{\max} – максимальная продуктивность; γ – постоянный коэффициент.

Сравнение данного выражения с равенством $d_0(x) = -x - \frac{1}{\gamma} \ln B$ показывает, что при наличии антропогенной неоднородности необходимо систематическое увеличение интенсивности

технологического воздействия во всех точках рассматриваемой территории на независимую от X величину $\Delta d = \varepsilon^2/2\gamma$. При этом средний на единицу площади выигрыш $U_g^{(\delta)}$, отвечающий детально дифференцированной стратегии, оказывается равным:

$$U_g^{(\delta)} = C_y y_{\max} \{1 - B(1 - \ln B - \gamma\bar{x} + \varepsilon^2/2)\}. \quad (6)$$

Случайные колебания технологического режима приводят в данном случае к экономическим потерям $\Delta U_g^{(\delta)} = U_g - U_g^{(\delta)}$, составляющим величину:

$$\Delta U_g^{(\delta)} = \frac{C_d}{\gamma} \frac{\varepsilon^2}{2}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что при правильном учете антропогенной неоднородности, заключающемся в принятии решений согласно правилу (5), дифференцированное планирование будет давать по сравнению с недифференцированной стратегией такой же положительный эффект, как и при отсутствии антропогенной неоднородности в системе точного земледелия (Точное сельское хозяйство, 2009). Данный результат проиллюстрирован на рис. 1а.

Если представить, что антропогенная неоднородность существует, то нетрудно показать (Захарян, Насонова, 1988; Захарян, Саноян, Бадалян, 1985), что в данном случае при детальной дифференциации стратегии (ДДС) средние потери на единицу площади $\tilde{U}_g^{(\delta)}$ будут рассчитываться как:

$$\tilde{U}_g^{(\delta)} = U_g - \frac{C_d}{\gamma} (e^{\varepsilon^2/2} - 1), \quad (8)$$

или, если принять во внимание условие (6):

$$\tilde{U}_g^{(\delta)} = U_g^{(\delta)} - \frac{C_d}{\gamma} (e^{\varepsilon^2/2} - 1 - \frac{\varepsilon^2}{2}). \quad (9)$$

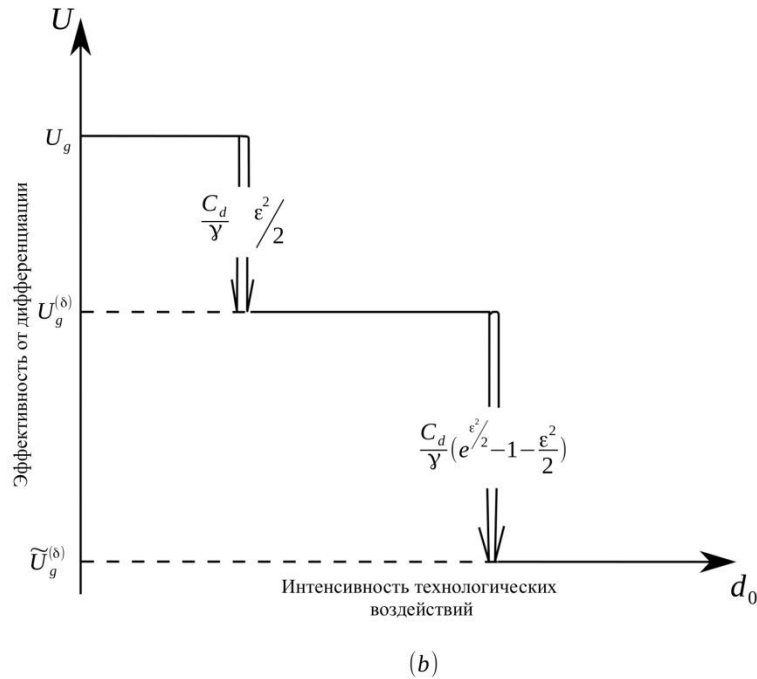
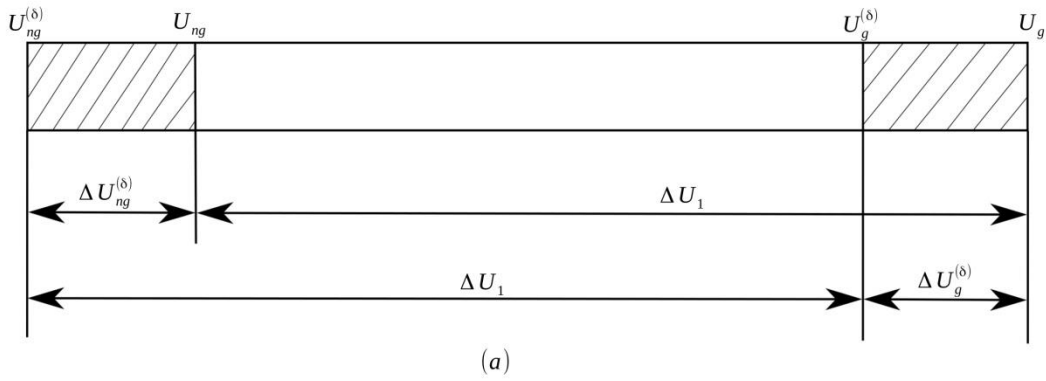


Рис. 1. Влияние антропогенной неоднородности территории на эффективность хозяйственного планирования:
 а – снижение выигрыша на единицу площади для недифференцированной стратегии (НДС) и детально дифференцированной стратегии (ДДС),

$$\Delta U_g^{(\delta)} = \Delta U_{ng}^{(\delta)} = \frac{C_d}{\gamma} \frac{\epsilon^2}{2}; \text{ б – соотношение между величинами } U_g, U_g^{(\delta)} \text{ и } \tilde{U}_g^{(\delta)}.$$

Соотношение между величинами $U_g, U_g^{(\delta)}$ и $\tilde{U}_g^{(\delta)}$ схематически показано на рис. 1б. По своему физическому смыслу разность $U_g - U_g^{(\delta)}$ характеризует минимальные потери на единицу площади, обусловленные случайными колебаниями технологического режима от точки к точке. Разность $U_g^{(\delta)} - \tilde{U}_g^{(\delta)}$ определяет дополнительные потери, которые возникают вследствие принятия решений без учета антропогенной неоднородности. Также представляет интерес безразмерный показатель

$$\chi = \frac{U_g^{(\delta)} - \tilde{U}_g^{(\delta)}}{U_g - U_g^{(\delta)}}, \quad (10)$$

по которому можно судить о соотношении между дополнительными потерями вследствие игнорирования антропогенной неоднородности и потерями, которые вызывает данная неоднородность в случае, когда решения принимаются оптимальным образом, с учетом случайных колебаний интенсивности технологического воздействия. Подставляя в (10) равенства (7), (8) и (9) для рассматриваемой модели получим:

$$\chi = \frac{e^{\varepsilon^2/2} - 1}{\varepsilon^2/2} - 1. \quad (11)$$

Анализируя данное выражение, можно найти условие, при котором дополнительные потери, возникающие вследствие игнорирования антропогенной неоднородности территории, совпадают с величиной $\Delta U_g^{(\delta)}$, т.е. оказываются равны некомпенсируемому «антропогенным» потерям при принятии оптимальных решений. Как показывают расчеты, это имеет место, когда $\varepsilon = 1,58$. В данном случае дифференцированное планирование, осуществляемое без учета пространственно варьирующихся погрешностей реализации технологического воздействия, удваивает ущерб; при $\varepsilon > 1,58$ дополнительные потери будут еще выше.

Также следует установить, к чему приводит игнорирование антропогенного фактора при применении недифференцированной стратегии. Вначале можно рассмотреть случай, когда недифференцированное планирование ведется в расчете на средние условия $X = \bar{x}$. Выше отмечалось, что если антропогенная составляющая неоднородности при этом учитывается, т.е. интенсивность технологического воздействия, согласно (5), принимается равной

$$d_0 = -\bar{x} - \frac{1}{\gamma} (\ln B - \varepsilon^2 / 2), \quad (12)$$

то

$$U_{ng}^{(\delta)} = U_{ng} - \frac{C_d \varepsilon^2}{\gamma 2} \quad (13)$$

Средний на единицу площади выигрыш по сравнению с отсутствием технологических ошибок снижается здесь на ту же величину, что и для детально дифференцированной стратегии: $\Delta U = \Delta U_g^{(\delta)} = C_d \varepsilon^2 / 2\gamma$.

Совсем другой результат получается, если недифференцированное планирование осуществляется без учета погрешностей реализации агротехнологии, когда для всей территории принимается решение

$d_0(\bar{x}) = -\bar{x} - \frac{1}{\gamma} \ln B$. Для данного случая оказывается справедливо:

$$\tilde{U}_{ng}^{(\delta)} = U_{ng} - \frac{C_d}{\gamma} e^{\theta^2/2} (e^{\varepsilon^2/2} - 1), \quad (14)$$

или, что то же самое:

$$\tilde{U}_{ng}^{(\delta)} = U_{ng}^{(\delta)} - \frac{C_d}{\gamma} [e^{\theta^2/2} (e^{\varepsilon^2/2} - 1) - \varepsilon^2 / 2]. \quad (15)$$

Основной вывод, который следует из сопоставления указанных равенств с выражениями (8) и (9), заключается в том, что игнорирование антропогенной неоднородности при недифференцированном планировании может иметь существенно более серьезные отрицательные последствия, чем при дифференцировании решений, причем данный эффект выражен тем сильнее, чем больше θ или чем выше естественная изменчивость пространственно варьирующегося фактора X . Указанное различие можно оценить с помощью

безразмерного показателя $\mu = \frac{\Delta \tilde{U}_{ng}^{(\delta)}}{\Delta \tilde{U}_g^{(\delta)}}$,

представляющего собой отношение дополнительных потерь вследствие игнорирования антропогенной неоднородности при применении недифференцированной стратегии к соответствующим дополнительным потерям при детально дифференцированной стратегии. С учетом формул (9), (15) и (11) выражение для μ можно записать в виде:

$$\mu = \frac{(1 + \chi) e^{\theta^2/2} - 1}{\chi}, \quad (16)$$

где показатель экспоненты $\theta = \gamma \sigma_x$.

Очевидно, что при любых $\theta > 0$ показатель $\mu > 1$ и, следовательно, величина $\Delta \tilde{U}_{ng}^{(\delta)}$ превышает $\Delta \tilde{U}_g^{(\delta)}$. Таким образом, недифференцированная стратегия, ориентированная на средние условия, более чувствительна к антропогенной неоднородности, чем детально дифференцированная стратегия. При этом, как следует из (16), имеет место характерное усиление влияния антропогенной

компоненты по мере увеличения естественной неоднородности территории. Данное усиление может оказаться весьма значительным, поскольку определяющий его параметр θ входит в выражение (16) в виде показателя экспоненты.

Представляет интерес также соответствующий анализ оптимальной недифференцированной стратегии. Опуская промежуточные преобразования, можно сразу записать окончательное выражение для соответствующего данному случаю оптимального $d_0 = const$, которое будет иметь вид:

$$d_0 = -\bar{x} - \frac{1}{\gamma} \ln B + \frac{\theta^2 + \varepsilon^2}{2\gamma}. \quad (17)$$

Подстановка указанной величины в общее выражение для $\tilde{U}_{ng}^{(\delta)}$, которое здесь не приводится, дает:

$$U_{ng,0}^{(\delta)} = U_{ng,0} - \frac{C_d}{\gamma} \frac{\varepsilon^2}{2}. \quad (18)$$

Точно так же можно показать, что если пространственная изменчивость интенсивности технологического воздействия не учитывается и для всей территории принимается решение d_0 , то средний на единицу площади экономический эффект будет равен:

$$\tilde{U}_{ng,0}^{(\delta)} = U_{ng,0} - \frac{C_d}{\gamma} (e^{\varepsilon^2/2} - 1), \quad (19)$$

или, что то же самое:

$$\tilde{U}_{ng,0}^{(\delta)} = U_{ng}^{(\delta)} - \frac{C_d}{\gamma} (e^{\varepsilon^2/2} - 1 - \varepsilon^2/2). \quad (20)$$

По своей структуре и вторым слагаемым, входящим в правые части, формулы (19) и (20) полностью повторяют соотношения (8) и (9). Это позволяет заключить, что игнорирование антропогенной неоднородности при применении оптимальной недифференцированной стратегии ведет к таким же потерям, как и при детально дифференцированном планировании.

Интересно также сопоставить выражения (8) и (19) с (14). При этом легко убедиться, что если антропогенная составляющая неоднородности не принимается во внимание и планирование производится без учета данного фактора, то

фактические значения выигрыша $\Delta\tilde{U}_1^{(\delta)} = \tilde{U}_g^{(\delta)} - \tilde{U}_{ng}^{(\delta)}$, получаемого при пространственной дифференциации решений, и выигрыша $\Delta\tilde{U}_2^{(\delta)} = \tilde{U}_{ng,0}^{(\delta)} - \tilde{U}_{ng}^{(\delta)}$, полученного в результате перехода от недифференцированной стратегии, ориентированной на средние условия, к оптимальной недифференцированной стратегии, на самом деле будут больше, чем для «идеальной» модели. Соответствующие расчетные зависимости имеют вид:

$$\Delta\tilde{U}_1^{(\delta)} = \Delta U_1 + \frac{C_d}{\gamma} (e^{\theta^2/2} - 1)(e^{\varepsilon^2/2} - 1), \quad (21)$$

$$\Delta\tilde{U}_2^{(\delta)} = \Delta U_2 + \frac{C_d}{\gamma} (e^{\theta^2/2} - 1)(e^{\varepsilon^2/2} - 1), \quad (22)$$

из чего следует, что при любых θ и $\varepsilon > 0$ справедливо:

$$\Delta\tilde{U}_1^{(\delta)} > \Delta U_1; \Delta\tilde{U}_2^{(\delta)} > \Delta U_2.$$

Формулы (21) и (22) могут быть несколько преобразованы. В частности, подставляя в них значения ΔU_1 и ΔU_2 , получим:

$$\Delta\tilde{U}_1^{(\delta)} = \frac{C_d}{\gamma} (e^{\theta^2/2} - 1)e^{\varepsilon^2/2}, \quad (23)$$

$$\Delta\tilde{U}_2^{(\delta)} = \frac{C_d}{\gamma} [(e^{\theta^2/2} - 1)e^{\varepsilon^2/2} - \theta^2/2]. \quad (24)$$

Обе указанные величины повышаются с ростом безразмерного показателя ε , который, в свою очередь, прямо пропорционален среднеквадратической ошибке реализации технологического воздействия на рассматриваемой неоднородной территории.

По аналогии с $\omega = \Delta U_2/\Delta U_1$ введем в рассмотрение безразмерную величину:

$$\tilde{\omega} = \frac{\Delta\tilde{U}_2^{(\delta)}}{\Delta\tilde{U}_1^{(\delta)}} = 1 - \frac{\theta^2/2}{e^{\theta^2/2} - 1} e^{-\varepsilon^2/2}, \quad (25)$$

характеризующую экономическую эффективность оптимальной недифференцированной стратегии. Как нетрудно убедиться, в реальных условиях, т.е. при неидеальной агротехнологии,

переход от планирования с ориентацией на средние условия к оптимальной недифференцированной стратегии дает на самом деле лучшие результаты и, следовательно, является более целесообразным, чем это следует из идеальной модели.

Для подтверждения полученного вывода на рис. 2 воспроизведена зависимость $\omega = \omega(\theta)$ в сопоставлении с кривыми $\tilde{\omega} = \tilde{\omega}(\theta, \varepsilon)$, построенными для разных ε . Из приведенных графиков в частности видно, что если $\theta = 0,5$, то переход от планирования с ориентацией на средние агрометеорологические условия к оптимальной недифференцированной

стратегии при отсутствии антропогенной составляющей ($\varepsilon = 0$) компенсирует менее ~6% потерь, вызываемых неоднородностью территории, в то время как при $\varepsilon = 0,5$ и том же θ подобный переход компенсирует уже около 20%, а при $\varepsilon = 1,0$ – более 40% суммарных потерь.

На рис. 3 показано, что с ростом ε уменьшается целесообразность пространственной дифференциации технологического воздействия. Здесь приведены кривые $\nu(\theta) = 1 - \omega(\theta)$ и $\tilde{\nu}(\theta, \varepsilon) = 1 - \tilde{\omega}(\theta, \varepsilon)$. Если ошибки реализации технологического воздействия отсутствуют, то при $\varepsilon = 0$ и $\theta = 0,5$ дифференциация потенциально компенсирует около 94% потерь; при $\varepsilon = 0,5$ и том же θ – несколько больше 80%, а при $\varepsilon = 1,0$ – уже менее 60%.

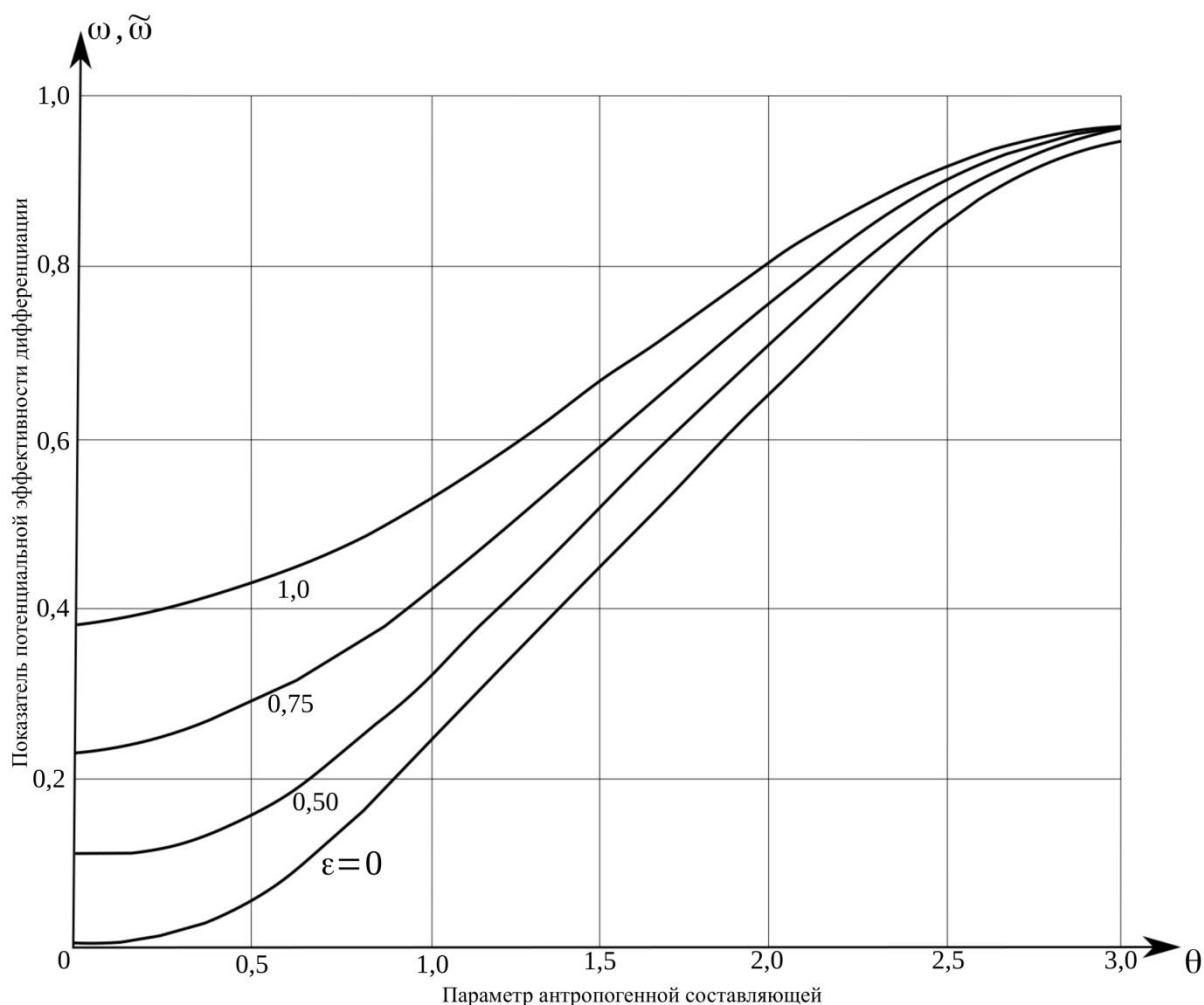


Рис. 2. Зависимость показателя потенциальной эффективности оптимальной недифференцированной стратегии от параметра θ при разных ε ($\varepsilon = 0$ – в идеальных условиях; $\varepsilon > 0$ – при наличии случайных ошибок реализации агротехнологии)

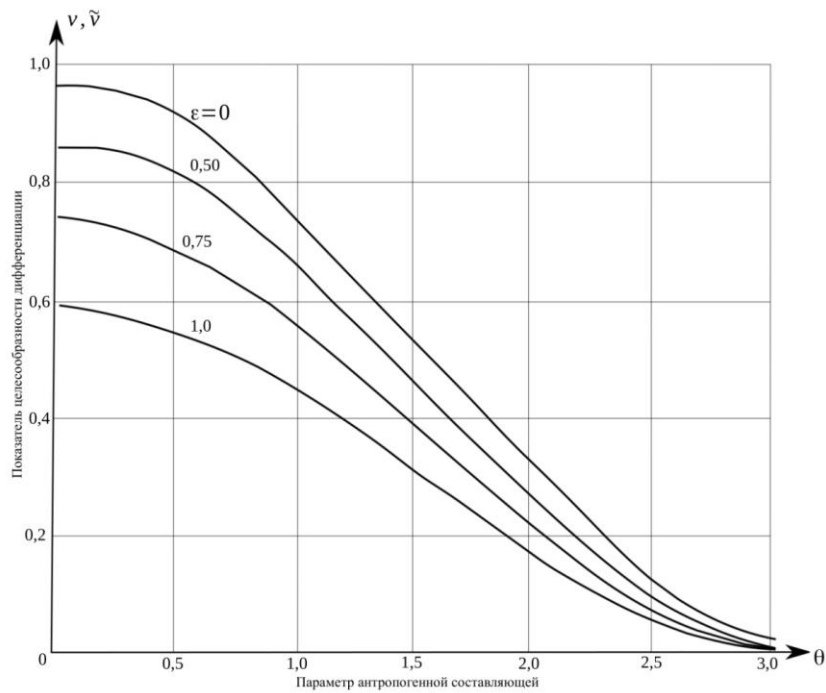


Рис. 3. Уменьшения потерь за счет пространственной дифференциации решений

Преобразуя соотношение (25), можно легко построить изолинии $\tilde{v}(\theta, \varepsilon) = const$. Подобная номограмма приведена на рис. 4. Задав конкретное значение \tilde{v}_0 и полагая, что переход к дифференцированному планированию экономически оправдан,

когда $\tilde{v} > \tilde{v}_0$, нетрудно указать область (θ, ε) , внутри которой переход к дифференциации целесообразен. В качестве примера на рис. 4 выделена такая область для $\tilde{v}_0 = 0,9$.

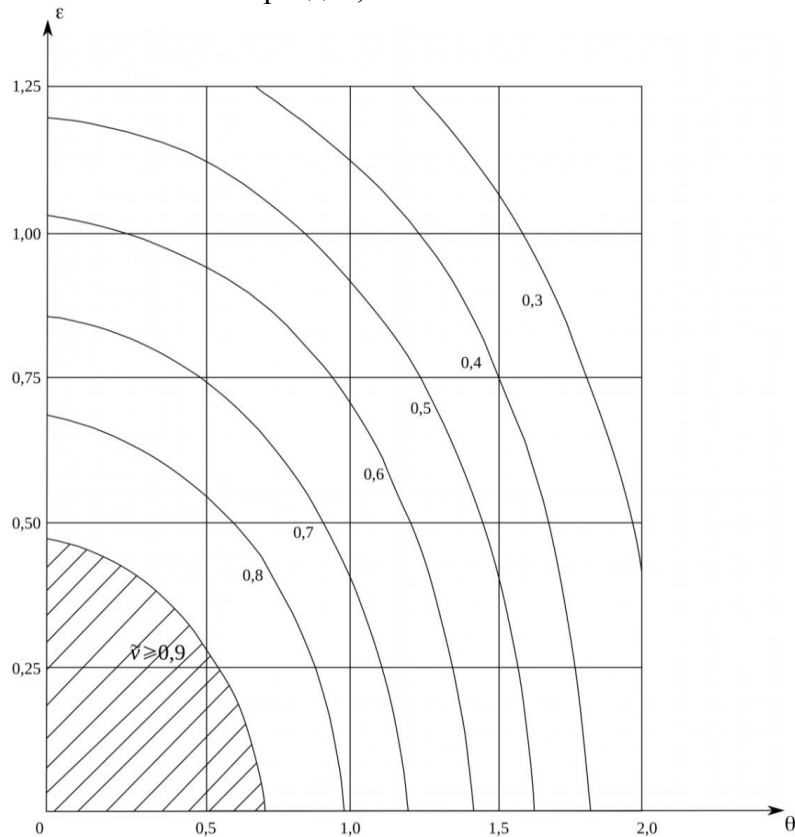


Рис. 4. Изменения антропогенной составляющей ε в функции от θ в пределах зон равной эффективности (\tilde{v}) дифференцированного планирования

В результате проведенного анализа установлено, что неуправляемые колебания расчетного технологического режима от точки к точке могут и, по-видимому, оказывают существенное влияние на эффективность проводимых хозяйственных мероприятий (Върлев, 1997).

ВЫВОДЫ

Итогом проведенных исследований является разработка методических основ и алгоритмов принятия агротехнических решений на неоднородных по почвенно-климатическим условиям сельскохозяйственных территориях.

Основу предложенной схемы составляет учет таких признаков, как уровень пространственной детализации принимаемых решений и объем исходной статистической информации, необходимой для реализации выбранного варианта планирования. При этом выделяются недифференцированные, детально дифференцированные и частично дифференцированные стратегии.

Установлено, что хозяйственное планирование на агрометеорологически

неоднородной территории может рассматриваться с позиций теории геостатистических решений.

Разработан комплекс математических моделей и алгоритмов, позволяющих оценивать потенциальный (теоретически достижимый) эффект, который принципиально может быть достигнут за счет пространственной дифференциации решений.

Выявлено, что при альтернативной дифференциации решений по грациям «ниже среднего – выше среднего» в случае нормально распределенного варьирующегося фактора устраняется более 60% потерь, вызываемых неоднородностью территории, а при оптимальной дифференциации по трем грациям эффективность составляет уже более 80%.

Определены изменения антропогенной составляющей ϵ в функции от θ в пределах зон равной эффективности дифференцированного планирования и уменьшения потерь за счет пространственной дифференциации решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жуковский Е. Е. и др. 1978. Статистический анализ случайных процессов в приложении к агрофизике и агрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат. 408 с.
- Жуковский Е. Е. 1981. Метеорологическая информация и экономические решения. Л.: Гидрометеоиздат. 303 с.
- Захарян Ю. Г., Насонова О. Н. 1988. Об эффективности некоторых вариантов разбиения на градации при районировании территории // Научно-техн. бюл. по агроном. физике. № 70. Л.: АФИ.
- Захарян Ю. Г., Саноян М. Г., Бадалян В. С. 1985. Определение параметров оптимальной влагообеспеченности растений // Изв. с.-х. науки. Ереван. Вып. 9. С. 57–67.
- Романова Т. А., Пучкарева Т. Н., Никитина А. Н. 1983. Учет структуры почвенного покрова при составлении проектов внутрихозяйственного землеустройства в колхозах и госхозах БССР // Структура почвенного покрова и организации территории. М.: Наука. С. 26–30.
- Семенов В. А. 1970. Качественная оценка сельскохозяйственных земель. Л.: Колос. 158 с.
- Точное сельское хозяйство (Precision agriculture) / Под общ. ред. Д. Шпаара, А. В. Захаренко, В. П. Якушева. Санкт-Петербург – Пушкин, 2009. 397 с.
- Върлев Ив. 1977. Методы и средства за оптимизиране на равномерността на навлажняване на почвата при напояването: автореф. на дис. София. 72 с.