

УДК 631.452:631.445.24.001.57

## РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ И ПЛОДОРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СРЕДНЕСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

А. И. ПУПОНИН, И. П. ВАСИЛЬЕВ, В. П. МАНЖОСОВ

(Кафедра земледелия и методики опытного дела)

Представлена предварительная агрофизическая модель окультуренности и плодородия пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с оптимальными для яровых зерновых культур (на примере ячменя) агрофизическими показателями плодородия, разработанная и обоснованная с помощью методов математического планирования и моделирования на базе полученных экспериментальных данных.

В современных условиях, когда значительно возросло техническое оснащение земледелия, усилился процесс его интенсификации, повысилась квалификация кадров и их профессиональное мастерство, все более активным и решающим фактором развития отрасли, экономного использования трудовых и материальных ресурсов становятся интенсивные технологии выращивания полевых культур, которые, однако, могут быть эффективными только при обеспечении достаточно высокого уровня плодородия почвы.

Весьма перспективным методологическим подходом в познании процессов антропогенного почвообразования и определения путей управ-

ления почвенным плодородием является разработка концепции моделей плодородия агроэкосистем, так как это направление агрономических исследований формируется на основе теории оптимальных параметров, становясь ее интегральным обобщением и развитием [3]. В связи с этим представляют интерес разработка и обоснование агрофизической модели окультуренности и плодородия пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с оптимальными параметрами, что позволит усовершенствовать известные или разработать новые приемы, способы и системы обработки почвы, которые обеспечат максимальную продуктив-

ность агроценозов с заданными показателями качества получаемой продукции и экологически стабильное расширенное воспроизводство почвенного плодородия.

Цель нашей работы — создание предварительного варианта такой модели для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, используемой под посевы яровых зерновых.

### Методика

Исследования проводились в 1983—1985 гг. в 3-факторном вегетационно-полевом опыте  $3 \times 3 \times 4$ , посвященном определению оптимальных для яровых зерновых культур (на примере ячменя) агрофизических показателей плодородия пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, на опытном поле научно-исследовательского отдела разработки систем земледелия и животноводства в учхозе Тимирязевской академии «Михайловское».

Схема опыта следующая:

Фактор  $X_1$  — плотность почвы ниже расположения семян, в слое 4—20 см, —  $1,05 \pm 0,05$ ;  $1,20 \pm 0,05$ ;  $1,35 \pm 0,05$  г/см<sup>3</sup>.

Фактор  $X_2$  — содержание глыб размером 10—30 мм в слое 0—20 см — 0; 25; 50 % к массе.

Фактор  $X_3$  — содержание пыли и агрегатов диаметром менее 0,25 мм в слое 0—20 см — 0; 15; 30; 45 % к массе.

Все исследуемые варианты опыта закладывали в сосудах без дна диаметром 22 и высотой 20 см, которые размещались методом рендомизированных повторений. Повторность опыта 4-кратная.

В опыте использовали дерново-подзолистую среднесуглинистую почву, характеризующуюся следующими показателями:  $pH_{\text{сол}}$  — 5,93,

гидролитическая кислотность — 1,57 мг·экв на 100 г, содержание гумуса — 2,2 %, подвижного фосфора — 31,5 мг, обменного калия — 28,2 мг на 100 г, сумма обменных оснований — 8,0 мг·экв на 100 г, степень насыщенности основаниями — 83,6 %.

Однородную почвенную массу разделяли с помощью решет на 3 фракции: 1 — агрегаты диаметром 0,25—10 мм; 2 — глыбы диаметром 10—30 мм, 3 — агрегаты и пыль диаметром менее 0,25 мм. Указанные фракции равномерно размещали в соответствующих сосудах согласно схеме опыта. Масса абсолютно сухой почвы в сосудах была одинаковой (7980 г), в том числе над семенами — 1600 г, ниже семян (слой 4—20 см) — 6380 г.

Высевали яровой ячмень сорта Надя. Глубина заделки семян 4 см. В каждом сосуде было по 23 растения. Всходы сорняков удаляли вручную. При образовании почвенной корки проводили рыхление на 1—2 см.

В вегетационные периоды 1983 и 1985 гг. количество осадков и сумма эффективных температур существенно не отличались от средних многолетних. Вегетационный период 1984 г. был прохладным и дождливым.

### Результаты

В итоге математической обработки 3-летних данных по программе множественного регрессионного анализа [2] получена следующая квадратичная модель:

$$Y = 23,58 - 1,75X_1 + 0,38X_2 - 8,57X_3 - 0,01X_2^2 + 1,94X_3^2 - 0,16X_1 \cdot X_2 - 0,65X_1 \cdot X_3, \quad (1)$$

где  $Y$  — урожайность ячменя, г/сосуд;  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  — параметры соответствующих агрофизических пока-

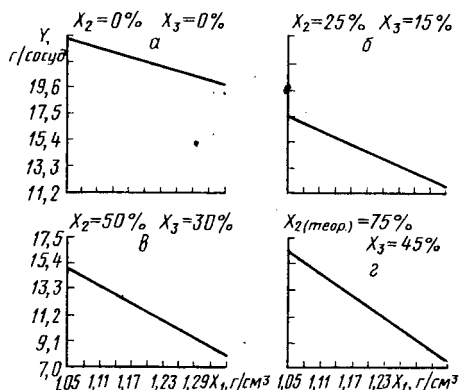


Рис. 1. Зависимость урожайности ячменя от плотности почвы (фактор  $X_1$ ) при заданных значениях факторов  $X_2$  и  $X_3$ . а —  $X_2=0\%$ ,  $X_3=0\%$ ; б —  $X_2=25\%$ ,  $X_3=15\%$ ; в —  $X_2=50\%$ ,  $X_3=30\%$ ; г —  $X_2$  (теор.) =  $75\%$ ,  $X_3=45\%$ .

зателей плодородия пахотного слоя почвы, указанные в схеме опыта.

На основании полученного корреляционного отношения  $R_v$ , равного  $0,83 \pm 0,05$ , было установлено, что  $68,9\%$  изменчивости урожайности обусловлено варьированием агрофизических показателей плодородия. Значимость корреляционной связи подтверждается при проверке по критерию Фишера:  $F_v=6,99$ , что превышает табличное значение  $F_{0,01}=1,87$ . Уравнение регрессии в целом значимо, поскольку  $F_y=23,17$ , что больше  $F_{0,01}=2,82$ . Математическая модель адекватна, квадратичная связь имеет место.

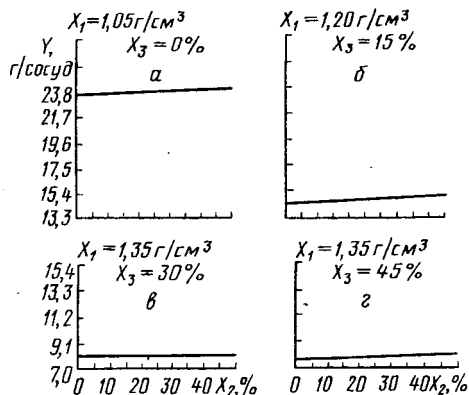
Уравнение содержит несколько незначимых по критерию Стьюдента членов: линейный эффект факторов  $X_1$  и  $X_2$  (соответственно  $-1,75X_1$  и  $0,38X_2$ ), квадратичный эффект фактора  $X_2$  ( $-0,01X_2^2$ ), взаимодействие факторов  $X_1$  и  $X_2$ ,  $X_1$  и  $X_3$  (соответственно  $-0,16X_1 \times X_2$  и  $-0,65X_1 \times X_3$ ). Сохранение в уравнении незначимых членов не

меняет существа окончательного вывода [2].

Серия графиков (рис. 1) показывает, что между урожайностью ячменя и плотностью почвы имеется обратная линейная зависимость. Максимальная урожайность ( $23,4$  г/сосуд) достигалась при плотности почвы  $1,05$  г/см<sup>3</sup> и фиксированных значениях факторов  $X_2$  и  $X_3$ , равных  $0\%$ . При увеличении значений  $X_3$  повышение плотности почвы вызывало более резкое снижение урожайности ячменя. Это отрицательное взаимодействие факторов отражено в уравнении в виде члена  $-0,65X_1 \times X_3$ .

Зависимость урожайности ячменя от содержания глыб размером  $10-30$  мм в слое почвы  $0-20$  см ( $X_2$ ) при фиксированных значениях факторов  $X_1$  и  $X_3$  обусловлена незначимыми по критерию Стьюдента членами уравнения (1) — линейным эффектом  $0,38X_2$  и квадратичным эффектом  $0,01X_2^2$ . Ввиду этого

Рис. 2. Зависимость урожайности ячменя от содержания глыб размером  $10-30$  мм (фактор  $X_2$ ) при заданных значениях факторов  $X_1$  и  $X_3$ . а —  $X_1=1,05$  г/см<sup>3</sup>,  $X_3=0\%$ ; б —  $X_1=1,20$  г/см<sup>3</sup>,  $X_3=15\%$ ; в —  $X_1=1,35$  г/см<sup>3</sup>,  $X_3=30\%$ ; г —  $X_1=1,35$  г/см<sup>3</sup>,  $X_3=45\%$ .



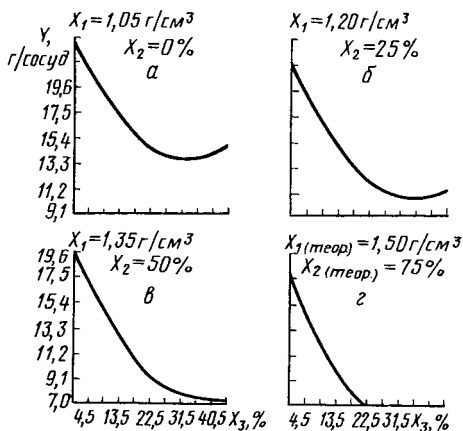


Рис. 3. Зависимость урожайности ячменя от содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $X_3$ ) при заданных значениях факторов  $X_1$  и  $X_2$ .

а —  $X_1 = 1,05 \text{ г/см}^3$ ,  $X_2 = 0\%$ ; б —  $X_1 = 1,20 \text{ г/см}^3$ ,  $X_2 = 25\%$ ; в —  $X_1 = 1,35 \text{ г/см}^3$ ,  $X_2 = 50\%$ ; г —  $X_1(\text{теор.}) = 1,50 \text{ г/см}^3$ ,  $X_2(\text{теор.}) = 75\%$ .

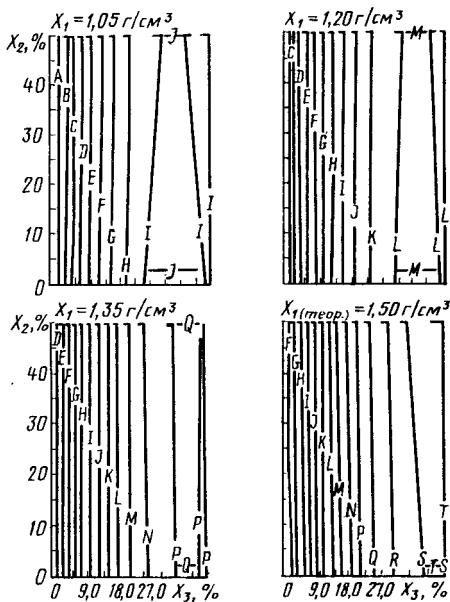
отмечалась лишь тенденция к повышению урожайности при увеличении содержания глыб 10–30 мм на фоне всех трех градаций фиксированных значений  $X_1$  и  $X_3$  (рис. 2).

Зависимость урожайности ячменя от содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $X_3$ ) при постоянных значениях  $X_1$  и  $X_2$  носит криволинейный характер (рис. 3), что в уравнении (1) отражено квадратичным членом  $1,94X_3^2$ . Из рис. 3 следует, что максимум урожайности ячменя достигался при плотности слоя почвы 4–20 см перед посевом  $1,05 \text{ г/см}^3$ , содержании глыб 10–30 мм, а также пыли и агрегатов менее 0,25 мм — 0%. При фиксированных значениях  $X_1 = 1,05 \text{ г/см}^3$  и  $X_2 = 0\%$  наблюдалось существенное снижение урожайности ячменя с увеличением значений  $X_3$  от 0 до 27–30%. Оно достигло 9,7 г/сосуд, что превысило среднеквадратичную

ошибку (1,1 г/сосуд) в 8,8 раза. Дальнейшее увеличение содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм от 27–30 до 45% при тех же фиксированных факторах  $X_1$  и  $X_2$  способствовало лишь некоторому росту урожайности (на 1,3 г/сосуд при средней квадратической ошибке 1,0 г). Максимум ее был равен 15,0 г/сосуд при  $X_3 = 45\%$ .

При экстраполяции значений  $X_1$  до  $1,50 \text{ г/см}^3$  и  $X_2$  до 75% получено очень резкое снижение урожайности. Оно обусловлено, видимо, влиянием фактора  $X_1$ , уровень которого соответствует равновесной плотности дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, а также усилением отрицательного эффекта от взаимодействия плотности поч-

Рис. 4. Изокванты урожайности ячменя в зависимости от содержания глыб размером 10–30 мм ( $X_2$ ) и содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $X_3$ ) при постоянных значениях плотности почвы ( $X_1$ )



вы и содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $-0,65X_1 \cdot X_3$ ).

Чтобы полностью извлечь информацию, заключенную в полученной математической модели, и представить ее в наглядной и доступной форме, программа регрессионного анализа УНИИПА дополнена выдачей на печать изоквант или линий уровня урожайности по каждой паре факторов. Это позволяет сделать более конкретные выводы по результатам опыта. Кроме того, изокванты наглядно показывают наличие или отсутствие, конкретное положение и размеры зоны оптимума, обозначенной на рис. 4—6 буквенным символом А.

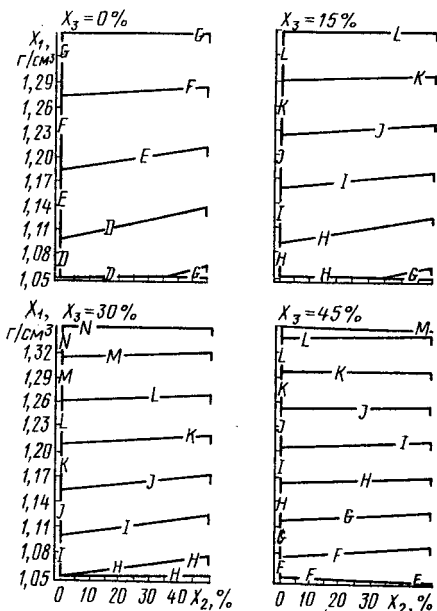
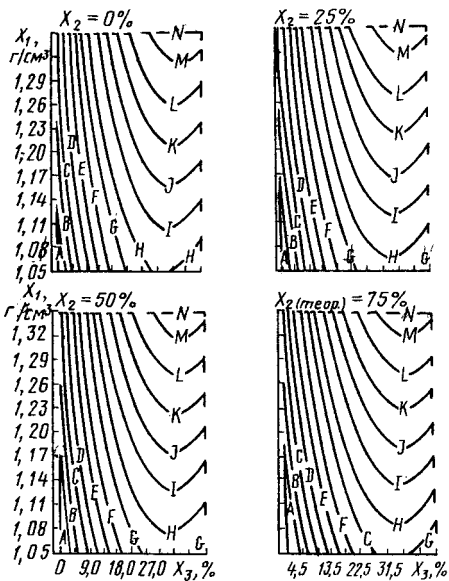
Изокванты на этих рисунках соответствуют следующим значениям урожайности ячменя (г/сосуд), по-

лученным в среднем за 3 года:  $A=22,7$ ;  $B=21,5$ ;  $C=20,3$ ;  $D=19,1$ ;  $E=17,9$ ;  $F=16,7$ ;  $G=15,5$ ;  $H=14,3$ ;  $I=13,1$ ;  $J=11,9$ ;  $K=10,7$ ;  $L=9,6$ ;  $M=8,4$ ;  $N=7,2$ ;  $P=6,0$ ;  $Q=4,8$ ;  $R=3,6$ ;  $S=2,4$ ;  $T=1,2$ .

На рис. 4 приведены 4 картины семейств изоквант урожайности в зависимости от  $X_2$  и  $X_3$  при четырех фиксированных уровнях плотности почвы ( $X_1$ ). Они показывают, что урожайность ячменя снижается с повышением плотности почвы от 1,05 до 1,50 г/см<sup>3</sup>. Так, если у семейства изоквант с плотностью почвы 1,05 г/см<sup>3</sup> максимальная урожайность (А) соответствует 22,7 г/сосуд, а минимальная (J) — 11,9 г/сосуд, то у семейства изоквант с плотностью почвы

Рис. 5. Изокванты урожайности ячменя в зависимости от плотности почвы ( $X_1$ ) и содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $X_3$ ) при постоянных значениях содержания глыб размером 10—30 мм ( $X_2$ ).

Рис. 6. Изокванты урожайности ячменя в зависимости от плотности почвы ( $X_1$ ) и содержания глыб размером 10—30 мм ( $X_2$ ) при постоянных значениях содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм ( $X_3$ ).



1,50 г/см<sup>3</sup> — соответственно  $F=16,7$  и  $T=1,2$  г/сосуд.

Картина семейства изоквант при фиксированной плотности почвы 1,05 г/см<sup>3</sup> имеет зону оптимума  $A$  (22,7 г/сосуд), охватывающую все значения фактора  $X_2$  (от 0 до 50 %), что указывает на слабое влияние последнего в интервале от 0 до 50 % на урожайность ячменя. При содержании в пахотном слое глыб размером 10—30 мм в количестве 45—50 % зона оптимума имеет тенденцию к увеличению. Фактор  $X_3$  оказывал сильное отрицательное влияние на урожайность, и оно возрастало с увеличением плотности почвы.

На рис. 5 представлены изокванты урожайности ячменя в зависимости от  $X_1$  и  $X_3$  при четырех фиксированных значениях фактора  $X_2$ . При значении фактора  $X_2=0$  % зона оптимума находилась в интервале плотности почвы от 1,05 до 1,13 г/см<sup>3</sup> и в интервале содержания пыли и агрегатов менее 0,25 мм от 0 до 1,8 %, при  $X_2=25$  % — соответственно в интервалах 1,05—1,16 г/см<sup>3</sup> и 0—1,8 %, при  $X_2=50$  % — 1,05—1,17 г/см<sup>3</sup> и 0—2,7 %, при  $X_2$  (теор.) = 75 % — 1,05—1,18 г/см<sup>3</sup> и 0—3,6 %. В целом по мере увеличения в пахотном слое содержания глыб размером 10—30 мм от 0 до 75 % происходило расширение зоны оптимума как по фактору  $X_1$ , так и по фактору  $X_3$ .

На рис. 6 даны четыре картины семейств изоквант урожайности ячменя в зависимости от факторов  $X_1$  и  $X_2$  при фиксированных значениях  $X_3$ . Общей закономерностью является уменьшение урожайности ячменя при увеличении фактора  $X_3$  от 0 до 30 %.

При фиксированном факторе  $X_3=0$  % максимум урожайности отмечен уровнем  $G$  (20,3 г/сосуд) при

значениях  $X_1=1,05 \div 1,06$  г/см<sup>3</sup> и  $X_2=37 \div 50$  %, а ее минимум — уровнем  $G$  (15,5 г/сосуд) при значениях  $X_1=1,28 \div 1,35$  г/см<sup>3</sup> и всех значениях фактора  $X_2$  (от 0 до 50 %). Снижение урожайности происходило в основном из-за увеличения плотности почвы.

При фиксированном факторе  $X_3=15$  % максимальная урожайность соответствовала уровню  $G$  (15,5 г/сосуд) при значениях фактора  $X_1=1,05 \div 1,06$  г/см<sup>3</sup> и фактора  $X_2=31 \div 50$  %, минимальная — уровню  $L$  (9,6 г/сосуд), а при фиксированном уровне фактора  $X_3=30$  % — максимальная — уровню  $H$  (14,3 г/сосуд) при  $X_1=1,05 \div 1,07$  г/см<sup>3</sup> и  $X_2=2 \div 50$  %, а минимальная — уровню  $N$  (7,2 г/сосуд) при  $X_1=1,32 \div 1,35$  г/см<sup>3</sup> и  $X_2=0 \div 50$  %.

При фиксированном уровне фактора  $X_3=45$  % наибольшая урожайность характеризовалась уровнем  $E$  (17,9 г/сосуд) при  $X_1=1,05 \div 1,06$  г/см<sup>3</sup> и  $X_2=36 \div 50$  %, а наименьшая — уровнем  $M$  (8,4 г/сосуд) при  $X_1=1,34 \div 1,35$  г/см<sup>3</sup> и  $X_2=0 \div 50$  %.

Следует отметить, что снижение урожайности ячменя в зависимости от фактора  $X_3$  происходило до значений последнего 30 %, далее урожайность возрастала по мере увеличения значений  $X_3$  до 45 %, что обусловлено, видимо, явлением обратимости почвенной структуры [1].

## Заключение

Таким образом, согласно трехлетним данным 3-факторного вегетационно-полевого опыта  $3 \times 3 \times 4$ , зависимость урожайности ячменя от плотности и агрегатного состава пахотного слоя (0—25 см) дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы можно описать уравнением

$$Y = 23,58 - 1,75X_1 + 0,38X_2 - 8,57X_3 - 0,01X_2^2 + 1,94X_3^2 - 0,16X_1 \cdot X_2 - 0,65X_1 \cdot X_3,$$

где  $Y$  — урожайность ячменя (г/сосуд);  $X_1$  — плотность слоя почвы ниже расположения семян (4—20 см) перед посевом (г/см<sup>3</sup>);  $X_2$  — содержание в пахотном слое глыб размером 10—30 мм (% к массе);  $X_3$  — содержание пыли и агрегатов менее 0,25 мм (% к массе).

Предварительная модель пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с оптимальными для яровых зерновых культур (на примере ячменя) агрофизическими показателями плодородия при благоприятных условиях увлажнения и минерального питания характеризуется следую-

щими параметрами: плотность слоя 4—20 см перед посевом — 1,05—1,17 г/см<sup>3</sup>, содержание глыб размером 10—30 мм — до 50 % массы пахотного слоя (при  $X_1 = 1,05$  г/см<sup>3</sup>,  $X_3 = 0 \div 1$  %), содержание пыли и агрегатов менее 0,25 мм — 0—3 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Вершинин П. В.* Об обратимости явлений водопрочности почвенной структуры.— В сб.: Тр. по агроном. физике.— М.—Л.: Сельхозгиз, 1953, вып. 6, с. 219—227.— 2. *Дуда Г. Г., Егоршин А. А., Медведев В. В., Быстрик П. С.* Математическая обработка данных многофакторного опыта и рациональная форма представления результатов.— Харьков, 1979.— 3. *Шишов Л. Л., Карманов И. И., Дурманов Д. Н.* Критерии и модели плодородия почв.— М.: Агропромиздат, 1987.

Статья поступила 2 февраля 1992 г.

#### SUMMARY

Preliminary agrophysical model of cultivation and fertility of the arable layer on soddy-podzolic medium loam with optimum agrophysical characters of fertility for spring grain crops (oats taken as an illustration) developed and substantiated by methods of mathematical planning and modelling and by obtained experimental data is presented in the paper.