

12. Мальцев В. Ф. Ячмень и овес в Сибири. М.: Колос, 1984. 128 с.
13. Митрофанов А. С., Митрофанова Н. С. Овес. М.: Колос, 1972. 269 с.
14. Вавилов Н. И. Ботанико-географические основы селекции // Избр. труды. М.-Л.: АН СССР. 1960. Т. 2. С. 9-70.
15. Мордвинкина А. Н. Архангельская К. М. Овес // Зерновые культуры. М.-Л.: Сельхозиздат, 1954. С. 335-388.
16. Бурлака В. В. Растениеводство Северного Зауралья // Труды НИИСХ Северного Зауралья. Тюмень. 1975. Вып. 11. С. 3-90.
17. Шевелуха В. С., Дроздова Л. М. Особенности роста и формирования урожая сортов овса различной продуктивности // Устойчивость зерновых культур к факторам среды. Минск: Урожай. 1978. С. 145-160.

**Н. В. АБРАМОВ,
Е. В. САЛОВА**

УДК 631.4:51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЛОДОРОДИЯ
ЧЕРНОЗЕМА
ВЫЩЕЛОЧЕННОГО**

АННОТАЦИЯ. Построена модель плодородия чернозема выщелоченного. Установлены оптимальные значения отдельных факторов плодородия почвы в агроландшафтах северной лесостепи Тюменской области. Определены интенсивность роста (снижения) урожайности яровой пшеницы и эластичность чернозема выщелоченного.

Fertility model of leached black-earth soil is constructed. The optimal importance of some soil fertility factors in northern forest-steppe zone agricultural landscapes of Tyumen Region is established. The intensive growth of spring wheat yield and elasticity of leached black soil are determined.

В отрасли сельского хозяйства за последние годы произошли изменения, которые характеризуются образованием товаропроизводителей с различной формой собственности. Это требует новых подходов к технологии возде-

лывания культур, которые обеспечивали бы экономическое и природоохранное благополучие. Повышение плодородия почв в этих условиях является одной из важнейших проблем сельскохозяйственных предприятий. При решении данного вопроса необходимо прежде всего определить влияние на урожайность факторов плодородия почвы в конкретных природно-климатических условиях.

Для определения влияния факторов плодородия почвы на урожайность сельскохозяйственных культур в последние годы стали применять метод математического моделирования [8,9, 11], который наиболее эффективен при решении этих задач.

Первым этапом моделирования плодородия почвы является выбор типа модели и определение ее сложности. В северной лесостепи Тюменской области на черноземах, занимающих наибольшую территорию пахотных земель (302,6 тыс. га), в больших объемах выращивается яровая пшеница. Как показали исследования, для изучения зависимости урожайности яровой пшеницы от параметров плодородия чернозема выщелоченного в наибольшей степени подходит полуэмпирическая математическая модель. По способности находить оптимальные решения аналитическими методами модель должна быть оптимизационной, по принципу определенности — детерминистической, а по способу отражать процесс развития системы — статической.

Одними из основных показателей физических свойств почвы являются плотность и водопрочная структура, которые определяют водный, воздушный, тепловой, питательный режимы почвы и ее микробиологическую деятельность. Большую роль в жизни растений играет также продуктивная влага. Из агрохимических факторов плодородия чернозема выщелоченного наибольшее влияние на формирование урожайности пшеницы оказывают нитратный азот, подвижный фосфор и обменный калий. В значительной степени сбор урожая пшеницы обуславливается биологическими факторами, такими как засоренность посевов и пораженность растений корневой гнилью. Важными показателями плодородия почвы являются также гумус, реакция почвенного раствора и др., однако в результате исследований было выявлено, что изменение этих показателей влечет незначительное изменение урожайности, поэтому при изучении плодородия чернозема выщелоченного эти факторы не учитывались.

При разработке модели были использованы данные многолетнего полевого опыта (1977–1990 гг.), проведенного в Тюменском СХИ [1]. В этот период в черноземе выщелоченном содержалось 50–220 мм продуктивной влаги, 48–75% водопрочных агрегатов, 0,7–10 мг/кг нитратного азота, 2,6–25 мг/100 г подвижного фосфора, 8–26 мг/100 г обменного калия. Плотность почвы изменялась в пределах от 1,14 до 1,31 г/см³, сухая масса сорняков от 0 до 300 г/м², распространение корневых гнилей от 2 до 80%. Данные были получены с опытных полей на черноземе выщелоченном в различных севооборотах.

Мощность гумусового горизонта чернозема выщелоченного 30–35 см, общий запас гумуса около 400 т/га, рН водной вытяжки 6,0, валовое содержание азота в слое 0,30 см 0,40%, фосфора 0,18%. Время полевых опытов охватывало многообразие особенностей погодных условий, характерных для северной лесостепи Тюменской области. Плотность, водопрочную структуру, нитратный азот, подвижный фосфор и обменный калий измеряли в слое почвы 0–30 см, запасы продуктивной влаги — в метровом слое.

Все факторы плодородия чернозема выщелоченного определялись общепринятыми методами [4, 7, 10], при этом агрофизические и агрохимические факторы, а также пораженность растений корневой гнилью определялись во время кущения растений, а влияние сорняков в первой половине вегетации.

При построении модели плодородия чернозема выщелоченного одним из важных этапов является выбор формы связи, характеризующей зависимость урожайности яровой пшеницы от факторов, влияющих на ее уровень. Изучение данных эксперимента показало, что для решения поставленной задачи наиболее эффективен метод многофакторного регрессионного анализа [2, 3, 5, 6].

В результате для условий северной лесостепи Тюменской области была разработана модель плодородия чернозема выщелоченного:

$$y = -2,59 + 0,47x_1^{27,4} \exp(-3,2x_1^4)x_2^{0,75} \exp(-0,005x_2)x_3^{0,16}x_4^{0,07}x_5^{0,05}x_6^{0,06} + 1,48 \exp(-0,003x_7) + 0,82 \exp(-0,01x_8), \quad R^2 = 0,86, \quad s = 0,25,$$

где y — урожайность яровой пшеницы, т/га; x_1 — плотность почвы, г/см³; x_2 — запасы продуктивной влаги в метровом слое, мм; x_3 — водопрочная структура, %; x_4 — нитратный азот, мг/кг; x_5 — подвижный фосфор, мг/100 г; x_6 — обменный калий, мг/100 г; x_7 — воздушно-сухая масса сорняков, г/м²; x_8 — корневые гнили, %, R^2 — коэффициент детерминации; s — среднеквадратическое отклонение модели.

По данной модели, для определения влияния свойств чернозема выщелоченного на урожайность, находили значения факторов, в которых урожайность пшеницы принимает наибольшее и наименьшее значения. Определение данных значений факторов проводилось с использованием методов дифференциального исчисления и элементов математического анализа. В результате установили, что наибольшая урожайность пшеницы достигается в посевах, свободных от сорняков, при минимальном количестве корневых гнилей и максимальном содержании в почве водопрочных агрегатов, нитратного азота, подвижного фосфора, обменного калия, когда плотность почвы и запасы продуктивной влаги соответственно равны 1,21 г/см³ и 150 мм. Наименьшее свое значение урожайность принимает, когда плотность почвы, сухая масса сорняков и распространение корневых гнилей равны своим максимальным значениям, другие факторы плодородия чернозема выщелоченного — минимальным значениям (табл. 1).

Анализ таблицы 1 показал также, что при изменении объемной массы от оптимального значения (1,21 г/см³) до величины, при которой урожайность наименьшая (1,31 г/см³), когда другие факторы плодородия находятся на оптимальном уровне, наблюдается снижение урожайности яровой пшеницы на 34,2%. При аналогичном изменении запасов продуктивной влаги (от 150 до 50 мм) урожайность уменьшается на 29,2%, при изменении нитратного азота от 10 до 0,7 мг/кг — на 18,0%. Повышение засоренности посевов от 0 до 300 г/м² влечет изменение урожайности на 14,6%.

Изменение урожайности при изменении водопрочной структуры, подвижного фосфора, обменного калия и корневых гнилей во всем интервале значений равно соответственно 7,0%, 11,1%, 6,9% и 7,4%. Таким образом, наибольшее изменение урожайности наблюдается при изменении плотности почвы, несколько меньше изменяется урожайность при изменении продуктивной влаги, нитратного азота и сухой массы сорняков. Другие

факторы оказывают менее значительное влияние на урожайность яровой пшеницы.

Таблица 1

Урожайность яровой пшеницы (т/га)
при различных значениях факторов плодородия чернозема выщелоченного

Сухая масса сорняков, г/м ²	Запасы продуктивной влаги, мм	Нитратный азот, мг/кг					
		0,7			10		
		Плотность почвы, г/см ³					
		1,14	1,21	1,31	1,14	1,21	1,31
5	50	<u>2,79</u>	<u>3,40</u>	<u>2,20</u>	<u>3,43</u>	<u>4,16</u>	<u>2,71</u>
		1,63	2,10	1,18	2,12	2,69	1,58
	150	<u>3,98</u>	<u>4,82</u>	<u>3,16</u>	<u>4,86</u>	<u>5,88</u>	<u>3,87</u>
		2,55	3,19	1,92	3,23	4,00	2,47
	220	<u>3,72</u>	<u>4,51</u>	<u>2,95</u>	<u>4,55</u>	<u>5,50</u>	<u>3,62</u>
		2,35	2,96	1,76	2,99	3,72	2,27
300	50	<u>1,93</u>	<u>2,54</u>	<u>1,34</u>	<u>2,57</u>	<u>3,30</u>	<u>1,86</u>
		0,78	1,24	0,32	1,27	1,83	0,72
	150	<u>3,13</u>	<u>3,97</u>	<u>2,31</u>	<u>4,01</u>	<u>5,02</u>	<u>3,02</u>
		1,69	2,34	1,06	2,37	3,15	1,61
	220	<u>2,86</u>	<u>3,65</u>	<u>2,10</u>	<u>3,69</u>	<u>4,64</u>	<u>2,77</u>
		1,49	2,10	0,90	2,13	2,86	1,42

Примечание. Над чертой — урожайность при содержании 75% водопрочных агрегатов, 25 мг/100 г подвижного фосфора, 26 мг/100 г обменного калия и 2% корневых гнилей; под чертой — урожайность при содержании этих элементов соответственно 48%, 2,6 мг/100 г, 8 мг/100 г и 80% корневых гнилей.

Построенная модель плодородия чернозема выщелоченного дает основу для установления интенсивности роста (снижения) урожайности, которая характеризует изменение урожая при изменении величины фактора плодородия почвы. Рост урожайности яровой пшеницы (либо ее снижение) при увеличении значений факторов почвенного плодородия происходит неравномерно. Поэтому для более точного определения влияния факторов на урожайность интенсивность роста (снижения) урожайности нами рассматривалась при малом изменении фактора плодородия почвы. Расчеты проводились по формуле:

$$U_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$$

где U_i — интенсивность роста (снижения) урожайности по i -му фактору, x_i — фактор плодородия чернозема выщелоченного, y — урожайность яровой пшеницы.

Важное научное и практическое значение имеет градация влияния факторов на продуктивность растений яровой пшеницы. С целью определения этой градации находили интервалы значений, при которых интенсивность больше либо меньше 0,1 т/га в расчете на величину этого фактора. В результате установили, что в любом состоянии чернозема выщелоченного интенсивность роста урожайности от плотности почвы в интер-

вале $1,14 - 1,16 \text{ г/см}^3$ превышает $0,1 \text{ т/га}/0,01 \text{ г/см}^3$, в интервале $1,19 - 1,21 \text{ г/см}^3$ меньше этой величины. Интенсивность роста урожайности от плотности чернозема выщелоченного в интервале $1,16 - 1,19 \text{ г/см}^3$ может принимать значения как больше, так и меньше $0,1 \text{ т/га}/0,01 \text{ г/см}^3$.

С увеличением плотности почвы от $1,21$ до $1,31 \text{ г/см}^3$ интенсивность снижения урожайности повышается, при этом интенсивность меньше $0,1 \text{ т/га}/0,01 \text{ г/см}^3$ в интервале $1,21 - 1,23 \text{ г/см}^3$, а при плотности почвы $1,26 - 1,31 \text{ г/см}^3$ больше рассматриваемого значения интенсивности. Это истинно при любых значениях факторов плодородия чернозема выщелоченного.

Интенсивность роста урожайности от продуктивной влаги при ее содержании $50 - 82 \text{ мм}$ ($112 - 150 \text{ мм}$) составляет более (менее) $0,1 \text{ т/га}/10 \text{ мм}$. Интенсивность снижения урожайности по этому фактору меньше $0,1 \text{ т/га}/10 \text{ мм}$ в любом режиме чернозема выщелоченного. Наибольшая интенсивность снижения урожайности равна $0,093 \text{ т/га}/10 \text{ мм}$.

Проведенные исследования интенсивности роста урожайности по водопропрочной структуре показали, что с увеличением содержания в почве водопропрочных агрегатов с 48 до 75% интенсивность роста урожайности снижается и при любых значениях факторов интенсивность не превышает $0,019 \text{ т/га}$ в расчете на 1% изменения водопропрочной структуры.

При любых значениях факторов плодородия почвы интенсивность роста урожайности яровой пшеницы по нитратному азоту составляет более $0,1 \text{ т/га}/4 \text{ мг/кг}$ почвы при ее содержании $0,7 - 6 \text{ мг/кг}$ почвы. В зависимости от величины факторов плодородия почвы интенсивность роста урожайности при содержании в черноземе выщелоченном $6 - 10 \text{ мг/кг}$ нитратного азота принимает значения как больше, так и меньше $0,1 \text{ т/га}/4 \text{ мг/кг}$.

Интенсивность роста урожайности по подвижному фосфору в любом режиме чернозема выщелоченного больше $0,1 \text{ т/га}/6 \text{ мг}/100 \text{ г}$, когда в почве содержится $2,6 \text{ мг}/100 \text{ г}$ подвижного фосфора. С увеличением содержания в почве обменного калия урожайность яровой пшеницы повышается, при этом интенсивность роста урожайности составляет не более $0,0043 \text{ т/га}/\text{мг}/100 \text{ г}$ почвы.

Интенсивность снижения урожайности по сорным растениям уменьшается с повышением засоренности посевов, и при сухой массе сорняков менее 231 г/м^2 интенсивность больше $0,1 \text{ т/га}/50 \text{ г/м}^2$. Дальнейший рост засоренности приводит к менее интенсивному снижению урожайности яровой пшеницы. Интенсивность снижения урожайности от корневых гнилей при их количестве от 2 до 47% превышает $0,1 \text{ т/га}/20\%$.

При разработке методов повышения урожайности яровой пшеницы необходимо в более полном объеме проводить анализ взаимосвязи продуктивности растений с факторами плодородия почвы. Для такого анализа важным является сопоставление темпов роста (снижения) урожайности с темпами увеличения основных факторов. С этой целью нами был введен показатель эластичности плодородия почвы. Эластичность плодородия по i -му фактору (\mathcal{E}_i) определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y}$$

Величина эластичности показывает на сколько процентов изменяется урожайность при увеличении фактора на один процент (при неизменной величине других факторов).

Исследования эластичности плодородия чернозема выщелоченного показали, что сбор зерна в основном увеличивается или уменьшается более быстрыми темпами, чем повышение значения плотности почвы. Повышение (снижение) урожая яровой пшеницы отстает от темпов прироста запасов продуктивной влаги при любых значениях свойств чернозема выщелоченного.

Эластичность плодородия чернозема выщелоченного по водопроходной структуре, нитратному азоту, подвижному фосфору, обменному калию меньше единицы, т. е. сбор зерна возрастает в меньшей степени, чем величина этих факторов плодородия почвы.

Темпы падения урожайности пшеницы отстают от темпов увеличения факторов: как сорных растений, так и корневых гнилей.

Эластичность плодородия почвы в целом определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^8 \mathcal{E}_i.$$

Для чернозема выщелоченного характерно, что эластичность плодородия почвы больше единицы, т. е. урожайность яровой пшеницы возрастает более быстрыми темпами, чем факторы почвенного плодородия.

Таким образом, согласно проведенным исследованиям, состояние чернозема выщелоченного, когда плотность почвы равна 1,21 г/см³, запасы продуктивной влаги 150 мм, водопроходная структура 75%, нитратный азот 10 мг/кг, подвижный фосфор 25 мг/100 г, обменный калий 26 мг/100 г, распространение корневых гнилей 2% и сухая масса сорняков принимает свое минимальное значение, является наиболее благоприятным для получения максимальной урожайности яровой пшеницы в северной лесостепи Тюменской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н. В. Совершенствование основных элементов систем земледелия в лесостепи Западной Сибири: Автореф. дис. ... докт. с. х. наук. Омск, 1992. 32 с.
2. Бард И. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 351 с.
3. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
4. Доспехов Б. А., Васильев И. П., Туликов А. М. Практикум по земледелию. М.: Колос, 1977. 366 с.
5. Дрейпер Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
6. Дрейпер Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн 2. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.
7. Качинский Н. А. Физика почв. Ч. 1. М.: Высш. школа, 1965. 324 с.
8. Образцов А. С. Системный метод: применение в земледелии. М.: Агропромиздат, 1990. 303 с.
9. Прохорова З. А., Фрид А. С. Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта. М.: Наука, 1993. 187 с.
10. Чулкина В. А. Корневые гнили хлебных злаков в Сибири. Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд.-во, 1973. 105 с.
11. Шишов Л. Л., Карманов И. И., Дурманов Д. Н. Критерии и модели плодородия почв. М.: Агропромиздат, 1987. 184 с.