

Проведен аналитический обзор литературных сведений о возможности прогноза эффективности минеральных удобрений в зависимости от агрохимических свойств почвы по моделям продуктивности. Сравнительная оценка выявила преимущество концептуальной модели. Достоинством концептуальной модели являются относительная простота, возможность аналитического решения задачи по оценке влияния комплекса факторов на продукционные процессы. При этом системный характер концептуальных представлений, исходно заложенных в модель, позволяет эффективно представить комплексную картину динамики количественных изменений прибавок урожайности в зависимости от вариации значений агрохимических показателей и доз элементов минерального питания.

Ключевые слова: моделирование, детерминационные, стохастические модели, аппроксимационная формула, верификация модели.

В современном земледелии при незначительном применении удобрений формирование урожая сельскохозяйственных культур в значительной мере определяется запасами элементов питания в почве. В связи с этим безусловный интерес представляет оценка влияния агрохимических свойств почвы на продуктивность культур и эффективность удобрений.

Исследования, оценивающие связь между количеством внесенных удобрений, уровнем плодородия почвы и другими факторами роста, прямо или косвенно влияющими на величину урожая, широко проводятся в нашей стране и рубежом. Аналитический обзор литературных сведений по указанному вопросу свидетельствует, что в этом случае анализ результатов исследований по применению удобрений сопровождается количественной оценкой экспериментальных данных с помощью методов математической статистики. Для прогнозирования значений результативного признака используют эмпирические и полумэмпирические зависимости, параметры которых на основании экспериментальных данных приводят в соответствие с описываемой реальной системой. Такой подход позволяет выполнить структурную и логическую организацию полученных данных в виде моделей различных классов [1-8], учитывающих роль основных факторов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур [18-23]. Использование моделей обеспечивает решение задач, связанных с оптимизацией питания растений, выбором оптимальных доз питательных веществ, повышением плодородия почв, улучшением качества сельскохозяйственной продукции, изучением круговорота биогенных элементов в земледелии, охраной окружающей среды.

Вместе с тем следует отметить, что спектр подходов к использованию информационной базы, математического аппарата, выборе структуры модели довольно значителен. В свою очередь это привело к созданию моделей заметно различающихся по эмпирической сущности и практической ценности. Поэтому остано-

вимся на характеристике наиболее распространенных классов моделей и попытаемся дать оценку возможности использования их для прогноза эффективности минеральных удобрений.

Экспертно-описательные модели служат для определения зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от агрохимических, биологических и агрофизических свойств почвы. Однако необходимо правильно оценить место экспертных систем в агрохимических исследованиях и возможность их использования в практике. Экспертные системы претендуют только на воспроизводство функций практического мышления [9]. Эти модели существенно различаются по целевым функциям, информационной базе, степени формализации, математическому аппарату. Их конструктивность можно оценивать лишь применительно к решаемым задачам, определяющим ареалы экстраполяции. При изменении характеристик факторов изучаемой системы возможность экстраполяции резко осложняется, что является следствием несовместимости моделей с новой информацией о характеристике объекта [19, 52]. Поэтому удовлетворительного совпадения результатов моделирования и фактических изменений объекта не наблюдается. Отмеченная особенность экспертно-описательных моделей ограничивает возможность их использования для моделирования.

Математические модели делят на два класса в соответствии с оптимизационным или имитационным режимом использования [9]. В первом случае для заданной функции находят оптимальную стратегию, во втором – предсказывают последствия от выбора различной стратегии при заданных значениях выходных переменных [40].

Математические принципы моделирования и в том и другом случае основываются на определении структурных и функциональных зависимостей между компонентами изучаемой системы, выявлении характера внутрисистемных связей. Для описания связи факторальных признаков и результативного признака нередко используют эмпирические модели различной сложности [10]. На основании экспериментальных данных находят аналитические выражения интересующего показателя как функции от почвенных условий (агрохимических свойств почвы), от доз удобрений, а при необходимости и других факторов. Обычно эти модели представляют собой регрессионные уравнения различного типа. Чаще всего для анализа связи факторального и результативного признаков применяют линейную множественную функцию: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$ или полином: $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + a_{11}X_1X_2 + a_{12}X_1X_3 + \dots + a_{21}X_1^2 + a_{22}X_2^2$.

Вместе с тем следует отметить, что математические модели характеризуются рядом недостатков. Так, при использовании этих моделей отсутствует возможность экстраполяции результатов за пределы условий, наблюдавшихся в опытах. Следовательно, регрессионные

Признавая актуальность и своевременность разработки этих моделей, следует отметить и их недостатки. Одним из которых является их громоздкость, необходимость введения большого количества информации о погодных условиях, свойствах почвы, необходимости задействования больших объемов компьютерной памяти и, как следствие, очень большая сложность их верификации.

Кроме того, следует отметить, что вопросам агрохимии в указанных моделях уделяют крайне незначительное внимание. Так, в сводке работ американских исследователей [14] из тридцати представленных моделей формирования урожая только в пяти рассматривали агрохимические вопросы, в том числе только в одной – применение удобрений.

В связи с этим в сложившейся ситуации исключительный интерес представляют исследования Т.Н. Кулаковской по разработке динамических моделей продукционного процесса [10]. В своей работе, анализируя модели превращения органического вещества под влиянием факторов внешней среды, модели влаго- и теплообмена, работы по моделированию круговорота питательных веществ Т.Н. Кулаковская приходит к выводу, что более перспективным в прогрессе развития представлений об имитирующих моделях является учет взаимообусловленности и динамичности всех свойств почвы в единой неразрывно связанной системе.

Такие интегральные модели, отражающие оптимальное сочетание свойств почвы, и указывающие главные пути их достижения разработаны ею для дерново-подзолистых средне- и легкосуглинистых почв. Они включают оптимальные значения показателей, характеризующие состояние плодородия почвы (технологические свойства, морфологические признаки, агрохимические свойства, биологические свойства), перечень приемов, обеспечивающих достижение оптимальных свойств почвы. Несомненное достоинство предлагаемых моделей – возможность прогнозировать во времени изменения исходного состояния почв под воздействием факторов интенсификации и планомерно управлять процессами расширенного воспроизводства плодородия почв.

Существенным недостатком этих моделей является возможность оценки влияния факторов внешней среды на продукционный процесс только при оптимальных значениях.

Один из возможных путей решения этой проблемы – не только использование традиционных приемов, как, например, описание влияния факторов внешней среды, в частности агрохимических свойств почвы, на продукционный процесс в системе почва – растение – удобрение, но и выбор концепции построения модели, совершенствование идентификационного обеспечения экспериментальным материалом разрабатываемых моделей. Таким образом, встает вопрос о разработке (построении) динамической концептуальной модели.

Концептуальные модели. Методические принципы современного концептуального моделирования основываются на последовательном совершенствовании модели в целях более полной характеристики самой модели и на соответствии сложности модели заданной точности опытных данных. Под сложностью понимают

иерархичность структуры объектов. В зависимости от количества вводимых параметров концептуальные модели бывают многокомпонентные и малокомпонентные.

При выборе той или иной формы модели для прогнозирования продукционных процессов в зависимости от агрохимических свойств почвы следует иметь в виду, что в опытах Геосети и агрохимической службы России информация по агрохимической характеристике почв представлена в основном данными по реакции почвенной среды, содержанию в почве подвижных форм фосфора и калия, по дозам элементов минерального питания. По остальным показателям она нередко фрагментарна, что ограничивает возможность ее использования. Поэтому при построении концептуальной модели целесообразно ориентироваться на разработку малокомпонентной модели.

Модель прогноза эффективности минеральных удобрений, по нашим представлениям, должна иметь математическое обоснование (теснота, сопряженность, значимость связи с результативным признаком) для любого параметра системы.

Концептуально схема такой модели прогноза сводится к следующему:

- все члены аппроксимационной формулы, характеризующие отдельные факторы системы, вводятся в алгоритм с обязательным учетом уровня, достоверности и характера связи с результативным признаком: линия, парабола, гипербола, показательная функция, степенная функция;
- под воздействием совокупного влияния изучаемых факторов и в случае, когда все эти факторы количественно находятся в благоприятном сочетании для проявления максимального эффекта от минеральных удобрений, прибавка урожайности может достигать наибольшей величины;
- если какой-либо из ведущих факторов находится в минимуме, то его нельзя компенсировать даже максимальными значениями других факторов;
- результирующее воздействие факторов системы пропорционально сумме влияния всех функций влияния, содержащих лимитирующие факторы;
- модель обеспечивает возможность достоверно прогнозировать изменчивость прибавки урожайности от минеральных удобрений при вариации агрохимической ситуации.

Сама модель может быть представлена в различной форме: графически – рисунок, алгебраически – аппроксимационной формулой. Выходную информацию целесообразнее представить в форме табличной интерпретации, показывающей изменчивость прибавки урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от вариации агрохимических свойств почвы и доз удобрений.

При разработке адекватной аппроксимационной формулы вклад факторов в формирование прибавки урожайности оценивают в относительном выражении (в виде коэффициентов) [10]. С учетом корреляционных связей системы и вклада ее факторов устанавливают последовательность расчета в виде алгоритма.

В качестве примера приведем алгоритмы, выведенные нами для прогноза эффективности фосфорных удобрений при применении под озимую пшеницу при посеве на серых лесных (а) и на каштановых почвах (б) [15]: а) $Y = (A/P_p - B) + (b_1 \cdot P_d - b_2 \cdot P_d^2)$; б) $Y = (A/P_p - B) + (A - B \cdot p_H) + (b_1 \cdot P_d - b_2 \cdot P_d^2)$, где Y – прибавка урожайности, ц/га, A и B – параметры уравнения гипербола, P_p – содержание подвижных фосфатов в почве, мг/кг P_2O_5 , P_d – дозы фосфорных удобрений, кг/га

3.

		<div>< 5,5 (1); > 5,5 (2)</div>											
		<div>, /</div>		<div>, /</div>									
				30		60		90		120		150	
2 5	2			<div>, /</div>									
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	I	7,3	8,1	5,2	6,5	6,0	7,5	6,2	7,6	5,6	6,9	4,4	5,4
	II	9,7	10,2	6,4	7,9	7,3	8,9	7,4	9,1	6,8	8,5	5,6	6,9
	III	12,1	12,9	6,8	8,5	7,6	9,5	7,8	9,7	7,3	8,9	5,9	7,4
II	I	9,3	10,3	7,2	8,9	8,3	10,2	8,6	10,7	8,3	10,2	7,2	8,9
	II	11,2	12,4	8,4	10,3	9,5	11,8	9,8	12,2	9,5	11,8	8,4	10,3
	III	13,6	15,1	8,8	10,9	9,9	12,3	10,2	12,7	9,9	12,2	8,8	10,9
III	I	12,2	13,5	7,4	9,1	8,5	10,6	9,1	11,3	9,4	11,7	9,1	11,3
	II	14,1	15,7	8,6	10,7	9,7	12,0	10,3	12,9	10,6	13,1	10,3	12,9
	III	16,5	18,4	9,0	11,2	10,1	12,5	10,8	13,4	11,0	13,6	10,8	13,4
I	I	10,2	11,3	4,7	5,9	5,5	6,8	5,6	6,9	5,1	6,3	4,0	4,9
	II	12,9	14,3	5,8	7,2	6,6	8,1	6,7	8,3	6,2	7,7	5,1	6,3
	III	16,2	18,1	6,2	7,7	6,9	8,6	7,1	8,8	6,6	8,1	5,4	6,7
II	I	13,0	14,4	6,5	8,1	7,5	9,3	7,8	9,7	7,5	9,3	6,5	8,1
	II	15,7	17,4	7,6	9,4	8,6	10,7	8,9	11,1	8,6	10,7	7,6	9,4
	III	19,1	21,2	8,0	9,9	9,0	11,2	9,3	11,5	9,0	11,1	8,0	9,9
III	I	17,0	18,9	6,7	8,3	7,7	9,6	8,3	10,3	8,5	10,6	8,3	10,3
	II	19,7	21,9	7,8	9,7	8,8	10,9	9,4	11,7	9,6	11,9	9,4	11,7
	III	23,1	25,7	8,2	10,2	9,2	11,4	9,8	12,2	10,0	12,4	9,8	12,2
I	I	14,6	16,2	3,8	4,8	4,4	5,5	4,5	5,6	4,1	5,1	3,2	4,0
	II	18,4	20,5	4,7	5,8	5,3	6,6	5,4	6,7	5,0	6,2	4,1	5,1
	III	23,2	25,8	5,0	6,2	5,6	7,0	5,8	7,1	5,3	6,6	4,4	5,4
II	I	18,5	20,6	5,3	6,6	6,1	7,5	6,3	7,9	6,1	7,5	5,3	6,6
	II	22,5	24,9	6,2	7,6	7,0	8,7	7,2	9,0	7,0	8,7	6,2	7,6
	III	27,2	30,3	6,5	8,0	7,3	9,0	7,5	9,3	7,3	9,0	6,5	8,0
III	I	24,3	27,1	5,4	6,7	6,2	7,8	6,7	8,3	6,9	8,6	6,7	8,3
	II	28,2	31,3	6,3	7,9	7,1	8,8	7,6	9,5	7,8	9,6	7,6	9,5
	III	33,0	36,7	6,6	8,3	7,5	9,2	7,9	9,9	8,1	10,0	7,9	9,9

I – , II – , III –

Иллюстрацией принципиальной возможности использования концептуальных моделей для прогноза эффективности минеральных удобрений в зависимости от конкретной агрохимической ситуации является верификация аппроксимационных алгоритмов по прогнозу эффективности азотных, фосфорных удобрений, представленная в наших работах в виде табличной интерпретации выходной информации [16-20]. В качестве примера в таблице 3 приведены данные по прогнозированию эффективности азотных удобрений под озимую пшеницу в зависимости от вариации содержания в почве подвижных форм фосфора, калия, доз азота при различной степени кислотности почвы.

Приведенная информация свидетельствует, что использование концептуальных моделей прогноза эффективности минеральных удобрений позволяет оценить не только степень влияния неоднородности агрохимических свойств почвы, но и их комплекса на формирование прибавки урожайности сельскохозяйственных культур от минеральных удобрений.

Особенностью концептуальной модели и важным отличием ее от моделей других классов является то, что с ее помощью можно представить комплексную картину динамики количественных характеристик прибавок урожайности в зависимости от конкретной вариации агрохимической ситуации, доз элементов минерального питания, т.е. от реальных возможностей хозяйства (холдинга, фермера) В свою очередь это создает предпосылки для воздействия на агрохимическую ситуацию посредством оптимизации факторов, существенно влияющих на формирование прибавки урожайности. Следовательно, появляется возможность разра-

ботки комплекса мероприятий по рациональному применению минеральных удобрений.

Одним из достоинств концептуальной модели являются, прежде всего, ее относительная простота, возможность аналитического решения поставленной задачи (оценка влияния комплекса факторов на производственные процессы, выявление роли отдельных аргументов системы в формировании прибавки урожайности, оценка тесноты связи аргументов системы с результативным признаком).

Закключение. Сравнительная оценка моделей выявила преимущество концептуальной модели. Ее принципиальное отличие от других моделей состоит в обеспечении возможности объективного прогноза эффективности минеральных удобрений в системе почва – удобрение – растение при меняющихся условиях минерального питания, т.е. при динамическом состоянии аргументов системы. При этом концептуальная модель характеризуется относительной простотой, возможностью аналитического решения задачи по оценке влияния комплекса факторов на производственные процессы.

Таким образом, аналитический обзор литературных сведений о возможности прогноза эффективности минеральных удобрений по моделям продуктивности свидетельствует, что методы современного концептуального моделирования позволяют быстро и с достаточной точностью в зависимости от предъявляемых требований решать важные задачи прикладных исследований. Ошибочность получаемых при моделировании результатов связана в основном с неточностью концептуальных представлений, исходно заложенных в модель, со слабым идентификационным обеспечением разрабатываемых моделей.

Литература 1. *Липкина Г.С.* Связь урожая сельскохозяйственных культур с агрохимическими свойствами почв и удобрениями. Обзорная информация. МСХ СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по сельскому хозяйству. М.:1975.42 с. 2. *Семенов В.А.* Взаимосвязь между содержанием гумуса и другими свойствами почвы – факторами урожая. //Почвоведение, 1992, №11.С.68-80. 3. *Сычев В.Г.* Тенденции изменения агрохимических показателей плодородия почв Европейской части России. Под ред. В.Г. Минеева. М.:ЦИНАО,2000. 187 с. 4. *Налимов Н.Н.* Теория эксперимента. М.: Изд-во Наука, 1976. 207 с. 5. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа М., 1981.491 с. 6. *Фрид А.С.* Система моделей плодородия почв: разработка и использование. Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора с.-х. наук. М., 1990. 35 с. 7. *Фрид А.С.* Методическое руководство по описанию моделей плодородия для автоматизированного банка «ПЛОМОД» М., 1989. 105 с. 8. *Кулаковская Т.Н.* Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев. –Минск.: Ураджай, 1978. 272 с. 9. *Литвак Ш.И.* Системный подход к агрохимическим исследованиям. М.: Агропромиздат. 1990. 220 с. 10. *Кулаковская Т.Н.* Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат. 1990. 219 с. 11. *Стребков И.М., Кирикой Я.Т., Халанская Т.П.* Методическое руководство по использованию принципов системного анализа в агрохимических исследованиях закономерностей действия удобрений. М. ВИУА. 1988. 72 с. 12. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Аникст Д.М., Листова М.П., Прошкин В.А., Романенков В.А.* Основные направления ис-

следований по агрохимии азота в современном земледелии // Бюл. Географической сети опытов с удобрениями. Вып.6. 2009. 76 с. 13. *Попов П.Д., Прошкин В.А.* Использование потенциала почвенного плодородия в определении стоимости земли // Вестник РАСХН. 2003, №6. С.13-15. 14. *Worauf kommt es bei der Dungerplanung im Fruhjah an* // Chemie Fehn in Landwirtsch., 1983. Bd. 34. – N 1. S. 20-21. 15. *Прошкин В.А., Адрианов С.Н., Шаброва Е.В.* Модель прогноза прибавки урожайности озимой пшеницы при применении фосфорных удобрений // Агрохимия. 2011, №6 . С.22-29. 16. *Сычев В.Г., Завалин А.А., Шафран С.А., Прошкин В.А., Духанина Т.М., Чернова Л.С., Листова М.П., Романенков В.А.* Методика разработки нормативов окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая сельскохозяйственных культур. М.: ВНИИ-А, 2009. 48 с. 17. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Адрианов С.Н., Прошкин В.А., Шаброва Е.В.* Эффективность фосфорных удобрений на почвах России и основные направления исследований по агрохимии фосфора. Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. Вып.10. М.: ВНИИА. 2010. 48 с. 18. *Шафран С.А., Прошкин В.А., Ваулина Г.И., Козеичева Е.С.* Влияние агрохимических свойств почв на окупаемость азотных удобрений. // Агрохимия, 2010, №8. С.15-23. 19. *Прошкин В.А., Козеичева Е.С.* Прогнозирование эффективности азотных удобрений под озимую рожь по содержанию фосфора и калия в почве.//Плодородие. 2009, №6. С.9-11. 20. *Прошкин В.А.* Оценка тесноты и достоверности связи прибавки урожайности озимой пшеницы и агрохимических свойств почвы // АгроЭкоИнфо. – №2. 2010. [http:// www.agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2010/2/st12.doc](http://www.agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2010/2/st12.doc).

ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В.А. Прошкин, ВНИИА

Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им.Д.Н.
Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, д. 31а, Россия 2
info @ VNIIA – pr.ru