

УДК 631.95

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗАУРАЛЬЯ)

В.И. КИРЮШИН, И. Л. ФРУМИН*

(Кафедра почвоведения)

Рассмотрены цели, алгоритм и основные процедуры математического моделирования адаптивно-ландшафтного земледелия сельскохозяйственных предприятий. Математическая модель адаптивно-ландшафтного земледелия основывается на учете разнокачественности земель на уровне их агроэкологических типов. Предложенная модель будет совершенствоваться путем замены линейного детерминированного алгоритма стохастическим.

Роль математических методов в моделировании земледелия

В 1980-е гг. во всех регионах страны были обоснованы зональные системы земледелия, более или менее полно учитывавшие местную региональную природно-климатическую специфику и уровень развития производительных сил. Однако попытки разработки систем земледелия для отдельных хозяйств на основе зональных эталонов оказались не столь плодотворными. Не останавливаясь на анализе всего комплекса причин, обусловивших это, укажем, все же, одну. Несмотря на то, что методы математического моделирования сельскохозяйственных объектов и процессов к этому времени достигли довольно высокого уровня совершенства, при обосновании систем земледелия предприятий они практически не использовались. Господствовавший тогда расчетно-кон-

структивный метод и не предполагал многовариантности при выработке стратегических агрономических решений. В результате даже лучшие, научно обоснованные зональные модели земледелия при переносе в условия колхозов и совхозов зачастую превращались в шаблонные безжизненные схемы.

Особенно важно использование математических методов при проектировании адаптивно-ландшафтного земледелия. Системы адаптивно-ландшафтного земледелия (АЛЗ), в отличие от зональных (адаптированных к условиям конкретного хозяйства), требуют значительно более детального учета экологических условий. Использование для этого лишь вербальных (словесных) методов создает предпосылки для неопределенности и субъективизма. Математическое моделирование может стать эффективным инструментом формализации агроэкологических объектов.

* Институт агроэкологии — филиал Челябинского аграрного университета.

Одним из ключевых положений проектирования АЛЗ является детализация технологий на уровне агроэкологических типов земель. Это положение предопределяет необходимость разработки целого спектра технологий. Обоснование отдельных технологий — посильная задача для квалифицированного агронома. Для этого вполне достаточно знания научных рекомендаций, скорректированных на основе собственного опыта специалиста и сведений о ресурсном потенциале хозяйства. Иное дело — взаимная увязка всех технологических элементов в рамках единой системы земледелия предприятия. Традиционный вербальный подход и расчетно-конструктивный метод для этого непригодны, необходимо привлечение приемов математического моделирования.

Принцип адаптивности должен распространяться не только на агроэкологические составляющие системы земледелия, но и на их экономические компоненты. Вербальные модели обладают ограниченными прогностическими возможностями. С того момента, как модель системы земледелия, изложенная на бумаге в виде свода рекомендаций, передается заказчику, она начинает устаревать. Резкие колебания экономической ситуации неизбежны на этапе становления рыночных отношений, который переживает сейчас экономика страны. Это еще более обеспечивает вербальные модели, т. к. в них практически невозможно предусмотреть все возможные комбинации цен на продукцию и материально-технические ресурсы. В математической модели возможно применение интерфейса, позволяющего учитывать широкий спектр внешних условий, настраивать модель на новые ситуации.

Таким образом, использование методов математического моделиро-

вания при обосновании АЛЗ полезно и необходимо.

Системный характер земледелия

Важнейшей предпосылкой для математической формализации земледелия является его системный характер. Он давно уже является общепризнанным. В качестве подтверждения этого положения обычно рассматривается членение систем земледелия на компоненты — так называемые «комплексы мероприятий». Возможность четкой декомпозиции на элементы является, безусловно, важным, но далеко не исчерпывающим признаком системного характера объекта. Еще большее значение имеет выявление прямых и обратных связей между элементами.

Степень изученности взаимодействий между элементами системы земледелия неодинакова. Некоторые из них давно находятся в поле зрения исследователей; другим посвящены лишь отдельные работы или даже единичные наблюдения. Относительная немногочисленность экспериментальных доказательств взаимодействия факторов, определяющих урожай, связана с тем, что их можно получить лишь в довольно сложных многофакторных опытах, которые вошли в практику научных исследований сравнительно недавно. Так, в Зауралье их стали широко использовать в конце 1960-х гг.

Наиболее исследованы влияния предшественников на эффективность удобрений. Неодинаковая способность разных предшественников мобилизовать минеральный азот почвы известна еще из работ Д. Н. Прянишникова. Давно и основательно исследован этот вопрос и на юге Зауралья и Западной Сибири [4, 7]. Способность предшественников обеспечивать культуры минеральным

азотом возрастает в ряду: повторные посевы зерновых, однолетние кормовые, многолетние травы, горох, чистый пар. В этом же направлении растет эффективность вносимого фосфора, тогда как прибавки от азотных удобрений столь же закономерно падают [2, 8].

Анализ взаимодействия между предшественником, с одной стороны, и удобрением и гербицидами — с другой, в Зауралье впервые провел В. И. Овсянников [12]. Он показал, что в экстенсивном земледелии, специализирующемся на производстве зерна, фактором, определяющим общую эффективность системы земледелия, является чистый пар. Депрессия урожайности зерновых после непаровых предшественников в сравнении с чистым паром значительно ослабляется совместным применением азотных удобрений и гербицидов. При этом технологически и экономически предпочтительными становятся не только севообороты, состоящие из зерновых и кормовых культур, но и севообороты со стопроцентным насыщением зерновыми, вплоть до бессеменной культуры. В.И. Овсянников показал, что азотные удобрения и гербициды играют роль системообразующих факторов. Условиями перехода на беспаровое земледелие в лесостепном Зауралье являются внесение на гектар пашни в среднем 30...50 кг азота, 20...30 кг фосфора и обработка гербицидами 30...40% посевов. Высказанные сначала в форме гипотезы эти положения были подтверждены в серии унифицированных длительных многофакторных стационарных опытов по оценке севооборотов при разных уровнях химизации, заложенных в разных агроклиматических зонах Зауралья [13]. На основе данных этих стационаров были построены математические

модели, вскрывшие формальную связь между исследованными факторами [7, 8].

Широко известна связь между севооборотом и обработкой почвы. В степных районах Сибири и Северного Казахстана условием перехода на мульчирующую обработку является высокий (12... 15%) удельный вес чистого пара. Это вывод, сформулированный в работах сотрудников бывшего ВНИИЗХ [1], сейчас представляется аксиоматическим.

Исследования, позволившие оценить связь между средствами химизации земледелия и способами обработки почвы, проведены М.А. Глухих с сотрудниками [10]. Ими было установлено, что в большинстве агроклиматических зон Зауралья при экстенсивном земледелии замена вспашки обработкой плоскорезом или тяжелой дисковой бороной, а тем более отказ от основной обработки приводит к существенному снижению урожайности зерновых. Азотные удобрения и гербициды уменьшают разрыв между способной обработкой и делают возможной минимизацию. Доказательства тесного взаимодействия обработки почвы и химических средств интенсификации получены в СибНИИСХиме в Новосибирском Приобье [5]. Формализация установленных при этом зависимостей была осуществлена в математических моделях системы земледелия [6]. Эти исследования существенно дополнили вывод В.И. Овсянникова о системообразующей роли факторов химизации в земледелии.

Взаимодействие между минеральными удобрениями и средствами защиты растений в Зауралье изучено Л.Ф. Даниловой и А.П. Курловым. По их данным, при сильной засоренности на безгербицидном фоне питательные вещества удоб-

рений расходуются преимущественно сорняками. При дефиците элементов минерального питания гербициды успешно контролируют засоренность, однако прибавки урожая культуры при этом низки, либо отсутствует. Фунгициды на бедном агрофоне также оказались неэффективными. В целом сумма прибавок от раздельного применения 40N30P, гербицида 2,4 ДА и фунгицида тилт в опыте составила 0,31 т/га, тогда как при совместном применении — 0,69 т/га [И].

Взаимодействия между удобрениями, сроками посева пшеницы, длиной вегетационного периода сортов и предшественниками в северной лесостепи предгорий Южного Урала исследовал Ю.Д. Кушниренко [9]. Он установил, что после чистого пара, имеющего невысокую засоренность, хорошо обеспеченного влагой и нитратным азотом, наибольший урожай дают ранние посевы позднеспелых сортов пшеницы. При повторных посевах зерновых лучшие результаты дает поздний посев скороспелых сортов. Если повторные посевы зерновых в ранние сроки все же необходимы, то на них целесообразно применять азотные удобрения. При этом достигается наивысшая окупаемость удобрений.

В.И. Овсянников, Ю.Г. Холмов и Р.И. Токарева исследовали связь между сроками посева пшеницы, севооборотом и нормами удобрений в северной лесостепи левобережья р. Тобола. Урожайность пшеницы после всех предшественников (пар, однолетние травы, овес), а также в повторных посевах была выше при поздних сроках посева; однако при последовательном увеличении дозы азота (0, 40N, 80N, 120N) разница между сроками посева несколько уменьшалась. Более тесной оказалась связь между сроками посева и

противоовсюжным гербицидом триаллат. Применение этого гербицида смещает оптимальный срок посева пшеницы и ячменя с третьей декады мая на первую. При этом роль предшественника и сорта элиминируется [3, 10].

Таким образом, изменение любого значимого элемента системы земледелия делает необходимым изменение других элементов, а заданной характеристике одного элемента соответствуют определенные качественные и количественные параметры других. Например, высокая доза азотных удобрений на повторных посевах пшеницы должна дополняться внесением фосфорных удобрений и применением гербицидов, а часто и фунгицидов. Такой уровень химизации создает возможности для минимальной обработки почвы и раннего срока посева позднеспелого сорта. Приведенное описание является, по сути, вербальной моделью интенсивного земледелия. Можно определить и его количественные характеристики. Итак, *система земледелия из набора относительно самостоятельных и независимых элементов (мероприятий) превращается в целостность, которая может быть идентифицирована.*

Место агротехнологий в моделировании АЛЗ

По поводу соотношения систем земледелия и агротехнологий существует две точки зрения. Одна из них, традиционная для отечественной аграрной науки, признает системы земледелия самодостаточными; технологиям возделывания культур при этом отводится подчиненная роль. Вторая, основывающаяся на зарубежных научных и производственных достижениях, отдает безусловный приоритет агротехнологиям, не-

обходимость систем земледелия при этом фактически отрицается.

Каждый из этих подходов имеет большие недостатки. Так, первый плохо согласуется с принципами адаптивно-ландшафтного земледелия, согласно которым объектом планирования в агрономии рассматриваются не земли сельскохозяйственного предприятия в целом, а их отдельные агроэкологические типы. Попытка детализировать систему земледелия, сформированную из отдельных «звеньев-мероприятий», приводит к тому, что она распадается на множество подсистем, которые трудно идентифицировать как нечто целостное. Фактически это означает возврат от системного принципа к устаревшему теоретико-множественному [18].

Второй подход представляется допустимым для небольших сельскохозяйственных предприятий, в которых не велико разнообразие природных условий и ограничен набор возделываемых культур. При попытке его реализации в крупных хозяйствах вновь неизбежно возникают проблемы экологической и экономической взаимоувязки элементов системы.

На наш взгляд, рациональное разрешение этой дилеммы существует. Оно заключается в определении места агротехнологий как элементов системы земледелия. При этом относительно самостоятельные «мероприятия» (обработка почвы, удобрение и т. д.) объединяются в технологию конкретной культуры; на уровне севооборота, включающего эти культуры, технологии итерируются в технологический комплекс севооборота. Севообороты с соответствующими им технологическими комплексами и становятся теми элементарными блоками, из которых формируется *система* земледелия. Такой подход вполне вписывается

в хорошо разработанные алгоритмы математического программирования.

Особенности математической модели АЛЗ

На основании изложенных подходов была построена математическая модель АЛСЗ сельскохозяйственного предприятия. Общая схема разработки модели приведена на схеме. При этом был использован надежный и широко апробированный модифицированный симплекс-алгоритм линейного программирования.

Главное требование к модели АЛЗ — *учет агроэкологической разнородности земель*. Он реализован в модели на уровне агроэкологических типов. В необходимых случаях выделялись и категории пригодности земли для отдельных культур и технологий. Указанное требование определяет общую компоновку модели АЛЗ предприятия: она имеет блочную структуру. Число блоков соответствует выделенным агроэкологическим типам и категориям земель.

В качестве переменных в модели приняты звенья севооборотов с заданными технологическими, экологическими и экономическими характеристиками, конкретизированными для отдельных агроэкологических типов земель. Число переменных в блоке плакорных земель максимальное, т.к. их перечень разрабатывался по полнофакторной схеме. Параметрами, по которым дифференцируются переменные, приняты звенья севооборотов и технологические комплексы. Последние, в свою очередь, подразделялись по способам основной обработки (отвальная, мульчирующая, нулевая, варианты комбинированной) и категориям интенсификации (экстенсивная, нормальная, интенсивная). Обоснование

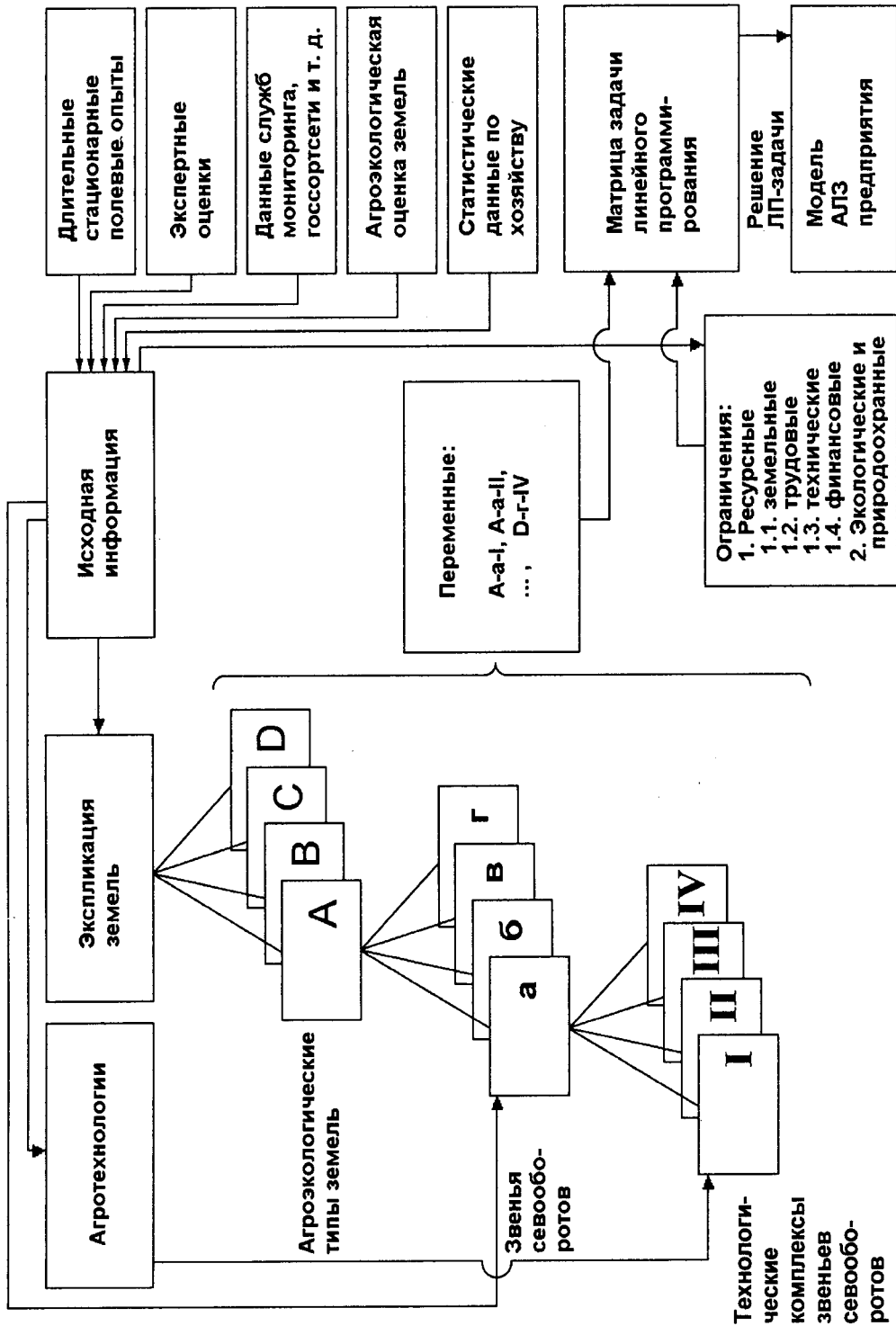


Схема разработки математической модели АЛЗ сельскохозяйственного предприятия

перечня переменных для остальных блоков (агроэкологических типов) сводилось к исключению недопустимых по агроэкологическим и природоохранным критериям культур и технологий из набора, разработанного для плакорных земель. Так, на солонцовых землях исключаются севообороты с соей и кукурузой, на эрозионных и дефляционных — технологические комплексы со вспашкой.

Ограничения по наличию земель введены в модель отдельно для каждого агроэкологического типа:

$$\sum_{i=1}^h \sum_{k=1}^j x_{fik} - S_f \leq 0, \quad (1)$$

где X_{fik} — площадь пашни на землях /-го агроэкологического типа под \dot{r} -м звеном севооборота при использовании κ -го агроэкологического комплекса, га;

Что касается ограничений по прочим видам ресурсов (материально-техническим, трудовым, финансовым), то они приняты общими для всех переменных. Общие ограничения образуют дополнительный (связующий) блок, позволяющий объединить агрокомплексы отдельных агроэкологических типов земель в единую модель АЛЗ предприятия.

В модели АЛЗ предусмотрена и оптимизация пропорций между основными отраслями (растениеводством и животноводством). При этом исходили из представления о том, что соотношение между видами угодий, нагрузка животных на единицу площади угодий и другие показатели, отражающие отраслевую структуру, относятся к основным экологическим характеристикам аграрного природопользования. Связь между отраслями формализуется, с одной стороны, через ограничения по производству — использование кормов (2) и навоза (3), с другой —

через стоимостные и натуральные показатели, характеризующие технологии. Это позволяет учесть взаимное влияние отраслей, конкуренцию за денежные, трудовые и технические производственные ресурсы предприятия.

$$\sum_{f=1}^g \sum_{i=1}^h \sum_{k=1}^j \sum_{n=1}^p a_{fikn} x_{fik} - \sum_{q=1}^r d_{qn} x_q \leq 0, \quad n \in N^{(1)}. \quad (2)$$

$$\sum_{f=1}^g \sum_{i=1}^h \sum_{k=1}^j d_{fik} x_{fik} - \sum_{q=1}^r a_{q3} x_q \leq 0, \quad (3)$$

Здесь a_{fikn} — производство на пахотных землях /-го агроэкологического типа p -го вида продукции в \dot{r} -м звене севооборота при κ -м технологическом комплексе (в данном виде — определенного вида корма), т/га; d_{qn} — расход n -го вида продукции растениеводства на g -ю половозрастную группу КРС, т/(гол.хгод), d_{fik} — внесение навоза на землях /-го агроэкологического типа в \dot{r} -м звене севооборота при использовании κ -го технологического комплекса, т/га, x_q — численность КРС q -й половозрастной группы, голов;

В качестве целевой функции в модели принят максимальный чистый доход, определяемый как сумма чистого дохода, полученного от отдельных видов хозяйственной деятельности, включая и животноводство:

$$F = \sum_{f=1}^g \sum_{i=1}^h \sum_{k=1}^j c_{fik} x_{fik} + \sum_{f''=1}^{g''} c_{f''} x_{f''} + \sum_{q=1}^r c_q x_q \rightarrow \max, \quad (4)$$

где c/ac — чистый доход на землях /-го агроэкологического типа в \dot{r} -м звене севооборота при использовании κ -го технологического комплекса, руб./га, Cf — чистый доход на

естественных кормовых угодьях, расположенных землях /-го агроэкологического типа, руб./га; с,— чистый доход от q -й половозрастной группы КРС, руб. / (гол.хгод). Чистый доход от естественных угодий и кормовых культур на пашне определяется с использованием цены, учитывающей затраты и маржинальный доход, средний для товарных культур [17].

Нормативная и информационная база модели

Для разработки математической модели АЛЗ (схема) потребовалась разнообразная информация об агроэкологических условиях, агротехнологиях и других аспектах сельскохозяйственного природопользования. Поэтому и источники информации столь же разнообразны: результаты агроэкологической оценки земли; данные научно-исследовательских учреждений и учебных заведений; материалы административных органов, управленческих структур сельхозпредприятия; информация сортоучастков Госкомиссии по сортоиспытанию, метеостанций Госкомгидромета, служб, осуществляющих мониторинг окружающей среды, организаций, занимающихся землеустройством, мелиоративным и водохозяйственным проектированием, геологическими изысканиями.

В формализованном виде нормативная база модели представлена техническими коэффициентами при переменных и ограничениями.

Идентификация земель по агроэкологическим типам служила исходной позицией для разработки системы переменных. На основании экспликации земель формировались ограничения по земельным ресурсам для каждого блока.

По данным об изменчивости урожайности по полям, а также в связи с применявшимися технологиями проводится идентификация нормативов по агроэкологическим типам земель, предшественникам, системам обработки и категориям интенсификации. Как правило, имеющиеся показатели охватывают не все *возможные* предшественники и технологии, а лишь *имеющиеся* в хозяйстве. Поэтому следующим этапом разработки нормативов была дифференциация их для всех переменных, включенных в модель. Основой для этого послужили материалы длительных многофакторных стационарных опытов, посвященных одновременному изучению основных элементов технологии — предшественников, обработки почвы, удобрений, защите от сорняков, вредителей и болезней. В отличие от многих других регионов, в Зауралье имеются такие стационары. Они охватывают все природно-сельскохозяйственные зоны Курганской области. Заложенные в Курганском НИИ сельского хозяйства в 1968-1970 гг., они прошли по семь полных ротаций севооборотов. Именно благодаря наличию этих уникальных опытов возможна аргументированная формализация прямых и обратных связей между элементами технологий, а также их интеграция в рамках технологических комплексов звеньев севооборотов.

И все же привлечением одной лишь информации, полученной в экспериментах, не удалось охватить весь спектр культур и технологий. Потребовалось использовать метод экспертных оценок. Результаты коллективной экспертизы подвергались статистической обработке (расчет дисперсии, доверительных интервалов, коэффициентов парной ранговой корреляции и конкордации).

Использование результатов моделирования АЛЗ

В ходе оценки разработанной модели была подтверждена хорошая адекватность реальным процессам, существующим в системе. Получаемые решения соответствовали экологическим и природоохранным требованиям и логике квалифицированных управленческих решений. У рассмотренной выше модели есть перспектива стать естественным компонентом проектирования адаптивно-ландшафтного земледелия предприятия. Имеет она и определенную самостоятельную ценность. Варьируя параметрами производственно-ресурсного потенциала, можно оценить современное состояние предприятия, перспективность тех или иных направлений его развития, при этом учесть и экологические последствия предлагаемых управленческих решений.

Хороший интерфейс, по сути, превращает математическую модель АЛЗ в информационно-советующую систему специалиста и руководителя хозяйства.

Опыт свидетельствует и о том, что математическая модель АЛЗ также является весьма ценным средством научных исследований. С одной стороны, численные эксперименты с моделью — важное дополнение полевых экспериментов, метод их обобщения. С другой стороны, потребность совершенствования нормативной базы моделей, в особенности по параметрам агротехнологий, позволяет придать большую практическую направленность и научную содержательность полевым опытам.

Перспективы совершенствования математических моделей АЛЗ

Опыт математического моделирования АЛЗ пока еще невелик. Но уже сейчас очевидны возможные пути его

совершенствования. Это, прежде всего, замена статического детерминированного алгоритма на стохастический, позволяющий учесть разные погодные исходы; в этом отношении наибольший интерес, на наш взгляд, представляет двухэтапная стохастическая модель, предложенная еще в 1970-е гг. И.Ф. Полуниным [16]. Весьма перспективно использование возможностей быстро прогрессирующих ГИС- и ЗИС-технологий. В конечном итоге успех в практическом использовании математических моделей АЛЗ будет определяться уровнем подготовленности специалистов землеустроительных организаций. Главную роль в решении этой проблемы могут сыграть кафедры экономической кибернетики и информатики ГУЗ, землеустроительных факультетов других сельскохозяйственных вузов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бараев А.И.* Избр. тр. М.: Агропромиздат, 1988. — 2. *Волынкин В.И.* Особенности системы удобрения зерновых культур в севооборотах Курганской области. — Интенсификация степного земледелия в Сибири и Зауралье. Новосибирск, 1984, с. 38-58. — 3. *Глухих М.А.* Влага черноземов Зауралья и пути ее эффективного использования. Челябинск, 2003. — 4. *Ермолов К.В.* Эффективность различных типов севооборотов. Челябинск, 1970, с. 6—16. — 5. *Кирюшин В.И. и др.* Влияние различных способов обработки на плодородие выщелоченных черноземов Приобья. Почвоведение, 1991, № 3, с. 97-105. — 6. *Кирюшин В.И. и др.* Моделирование зональных систем земледелия на основе полевых экспериментов. Вестник с.-х. науки, 1990, № 8, с. 99-105. — 7. *Кочергин А.Е.* Условия питания зерновых культур азотом, фосфором и калием и применение удобрений на черноземах Западной Сибири. — Автореф. докт. дис. М., 1965. — 8. *Кушниренко Ю.Д.* Агрохимические аспекты повышения эффектив-

- ности плодородия южно-уральских черноземов. — Проблемы уральских черноземов. Челябинск, 1993, с. 87-112. — 9. **Кушниренко Ю.Д.** Минеральное питание яровой пшеницы и отзывчивость ее на удобрения при возделывании на выщелоченных черноземах лесостепи предгорий Южного Зауралья. — Автореф. канд. дисс. Челябинск, 1968. — 10. Научные основы систем земледелия Курганской области: рекомендации. Курган, 2001, с. 150-184. — 11. Научные основы систем земледелия Курганской области: рекомендации. Курган, 2001, с. 62-110. — 12. **Овсянников В.И.** Рациональное использование земли — основное условие увеличения производства сельскохозяйственных продуктов. — Земля и рациональное ее использование: Материалы XIX областной науч.-произв. конф. агрономов. Курган, 1971, с. 37-75. — 13. **Овсянников В. И. и др.** Влияние предшественников и удобрений на урожай пшеницы на черноземах Зауралья. — В сб.: Интенсификация степного земледелия в Сибири и Зауралья. Новосибирск, 1984, с. 51-65. — 14. **Овсянников В. И. и др.** Моделирование систем земледелия на основе многолетних полевых экспериментов. — Сиб. вестн. с.-х. науки, 1983, №№ 1, 2, 3. — 15. **Овсянников В. И., Рапопорт Э. О.** О проблеме оптимизации чередования культур. — Сиб. вестн. с.-х. науки, 1994, № 1, с. 86-90. — 16. **Полунин И.Ф.** Математическое программирование в землеустройстве. — Минск: Высшэйша школа, 1972. — 17. **Пономаренко Н.** Профит-центры внутри хозяйства. — Новое сельское хозяйство. 2001, № 4, с. 14-17. — 18. **Шрейдер Ю. А., Шаров А. А.** Системы и модели. М.: Радио и связь, 1982.

*Статья поступила
23 марта 2004 г.*

SUMMARY

Purposes, algorithm and the main procedures of mathematical modeling of adapted landscape systems of farming of agricultural enterprises were investigated. The mathematical model of adapted landscape system of farming is based on taking into account the variety of soils on the level of their agroecological types. The given model will be improved by means of substitution of the linear determinational algorithm for the stochastic one.