

**ТАЙМИНГ-ЭФФЕКТ ВНЕСЕНИЯ АЗОТНЫХ ПОДКОРМОК  
«ПО ЛИСТУ» ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ПОСЕВОВ ЗЛАКОВ.  
РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

*П. Д. Гурин, Е. Т. Захарова  
ГНУ АФИ Россельхозакадемии*

В рамках работ по теме «Разработать алгоритм подбора оптимальных сроков внесения и уровня доз азотных удобрений и подкормок в рамках имитационной модели AGROTOOL» сотрудниками лаборатории математического моделирования агроэкоосистем Агрофизического НИИ был выполнен ряд компьютерных экспериментов с моделью продукционного процесса сельскохозяйственных растений. В ходе данных исследований были поставлены следующие задачи:

1. Модифицировать существующую версию имитационной модели AGROTOOL третьего уровня продуктивности для повышения точности прогнозов урожайности для посевов злаковых растений в вариантах с различными дозами азотных удобрений;
2. Разработать блок, позволяющий в рамках модели учитывать оперативные некорневые азотные подкормки, осуществляемые в течение вегетационного сезона.

В основу описания азотного режима растения в системе AGROTOOL положена двухпоточная модель углеродно-азотного взаимодействия с запасами, детально описанная в [1]. Она базируется на адаптивном механизме распределения первичных ассимилятов (общего ресурса роста) между вегетативными органами растения (побегом и корнем). В качестве основной гипотезы выбрано предположение, о том, что в растении реализуется оптимальное управление данным распределением, при котором скорость интегрального роста растения оказывается наивысшей. Последнее достигается в случае, когда темпы роста побега и корня оказываются сбалансированными, то есть поступление в растение азота, поглощаемого корнями, согласовано с темпом накопления продуктов фотосинтеза (сахаров) в побеге. При этом вовлечение углеродных и азотных ассимилятов в образование новой структурной биомассы производится «с колес» и пополнения углеродного и азотного запасных пулов (крахмала и нитратов) не происходит. Положенные в основу данного алгоритма соображения вполне согласуются с результатами полевых и лабораторных исследований [2]: при повышении уровня азотных удобрений происходило снижение скорости роста корневой системы на фоне ускорения роста листовой поверхности.

Детальное описание реализованной в соответствующем блоке Agrotool модели транспорта и трансформации азотсодержащих соединений в почве приведено в [3]. В эту модель включены алгоритмы, имитирующие процессы распада органического вещества и минерализации гумуса, динамики микробной биомассы, нитрификации и денитрификации, а также транспорта аммонийных и нитратных соединений в пределах почвенного профиля и их поглощения корневой системой растений.

В ходе осуществления компьютерных экспериментов по выявлению функции отклика продуктивности злаковых растений на концентрацию доступных соединений азота в почве была осознана необходимость и проведена достаточно существенная модификация блока текущей версии AGROTOOL, отвечающего за моделирование развития и функционирования корневой системы. Среди наиболее существенных изменений следует отметить разработку алгоритма, позволяющего учитывать два типа систем поглощения минеральных форм азота. Для описания селективной (HATS) и неселективной (LATS) систем использовались два уравнения Михаэлиса – Ментен. Константы для каждого уравнения были взяты из литературных источников [4–5]. В результате внесенных изменений установлено значительное повышение точности прогноза урожайности исследуемых культур, а также таких показателей как индекс листовой поверхности, глубина проникновения корней, соотношение надземной и подземной биомасс. Повышение точности может быть объяснено более естественным описанием динамики поглощения азота корнями растений, что в свою очередь положительно влияет на моделирование роста корневой системы, адаптивного распределения первичных ассимилятов между побегом и корнем и динамики накопления надземной зеленой массы.

Для учета некорневых азотных подкормок был разработан дополнительный новый блок имитационной модели AGROTOOL. Входными данными для расчета в нем выступают дата внесения подкормки, количество распыляемой воды и доза (концентрация) азотного удобрения. При моделировании подкормки учитывается доля питательного вещества, которая оседает на листовой поверхности (данный показатель рассчитывается на основании листового индекса и количества распыляемой воды), и доля, попадающая на поверхность почвы. Для описания динамики поглощения азота с поверхности листьев используется уравнение Михаэлиса – Ментен с видоспецифическими константами для данного процесса. Поглощенный листьями азот в дальнейшем учитывается в качестве аддитивной внешней добавки к пулу запасного минерального азота в растительной биомассе.

В ходе проведения исследований с построенной моделью был получен ряд интересных и, в какой-то мере, неожиданных результатов. Так, вычислительные эксперименты продемонстрировали в ряде случаев необычайно высокую чувствительность модели к срокам вноса некорневых подкормок. В частности, оказалось, что при определенных условиях, задержка на 5 дней от опорной даты подкормки способна привести к снижению урожайности до 60% от максимально возможного уровня. И, наоборот, при условии «угадывания» срока подкормки наблюдалось резкое повышение модельной урожайности по сравнению с контрольным вариантом даже при сравнительно незначительных («гомеопатических») дозах действующего вещества. Подобные результаты можно было бы списать на несовершенство модели. Однако данное поведение вполне согласуется с достаточно широко известными и опубликованными в литературе данными реальных полевых опытов. Эффекты значительного влияния срока подкормок на конечный урожай и возможности существенно влиять на

его величину подкормками малой интенсивности действительно существуют и носят названия тайминга и микродозинга соответственно.

Наличие модели, то есть возможность проследить за ростом и развитием модельного растения «в режиме отладки» предоставляет шанс разобраться в причинах соответствующих явлений на алгоритмическом уровне. Проведенные нами исследования позволяют сделать вывод о том, что проявление эффекта тайминга (например, резкое падение конечной продуктивности при выборе «неудачной» даты подкормки) может быть объяснено следующими факторами:

- 1) Незначительный, но обязательный дефицит содержания азота в почве в течение всей стадии вегетативного роста растения
- 2) Наличие «критического» периода роста растения, характеризующегося ускоренной (близкой к экспоненциальной) динамикой накопления биомассы вегетативных органов (как правило, этот период приходится на несколько дней, предшествующих цветению).
- 3) Практически полное прекращение роста корневой системы после цветения (перехода на стадию генеративного роста).
- 4) Слабо выраженная интенсивность процессов реутилизации.

Сочетание перечисленных факторов (а большинство из них, по крайней мере – последние три, носят генетически обусловленный характер и наблюдаются независимо от условий среды) может приводить к следующему эффекту. Подкормка, внесенная за несколько дней до цветения, вызывает локальный временной эффект видимости азотного насыщения. Последнее, согласно принятой гипотезе адаптивного механизма распределения оказывает тормозящее влияние на темпы развития корневой системы – все вновь образующиеся ассимиляты направляются в побег. При этом корень перестает расти в самый «ответственный» период, и биомасса корневой системы, накопленная к моменту цветения, оказывается недостаточной. Поскольку рост корня после перехода к генеративной стадии развития уже невозможен, ресурс доступного за счет подкормки азота достаточно быстро исчерпывается, а реутилизация азота из листьев незначительна, то обеспечить адекватное поступление азота из почвы «естественным путем» на оставшемся участке вегетационного периода недоразвитая корневая система оказывается не в состоянии. Это и приводит, в конечном итоге, к значительному снижению урожая. Можно сказать, что выработанные растением в ходе естественного эволюционного отбора механизмы адаптации в данном случае оказываются «обмануты» неестественной и неожиданной антропогенной интервенцией, что, в конечном итоге, оказывает только негативное влияние.

В то же самое время, подкормка, внесенная в «нужную» дату может оказать существенное позитивное влияние на продуктивность рассматриваемой культуры. Надо только угадать со сроком и дозой внесения. Критерием здесь может служить достаточная развитость листового индекса с одной стороны и наличие достаточного временного запаса до цветения с другой. При соблюдении этих условий даже в условиях дефицита почвенного азота произведенная подкормка может вызвать эффект локального перерегулирования адаптивного механизма распределения в сторону преимущественного роста побега. Однако

по исчерпанию ресурса запасного азота этот эффект успеет сгладиться и встроенные механизмы естественной адаптации вернут растение к моменту цветения в условия сбалансированного роста. Но при этом биомассы вегетативных органов могут достичь более значительных величин, что благотворно скажется на конечном урожае зерна.

Наконец, с точки зрения рассмотренных механизмов, подкормки «по листу», вносимые после цветения, не должны давать неожиданного отрицательного эффекта, но и их положительное влияние достаточно ограничено. Действительно, в этом случае уже нельзя говорить о тонких эффектах и «регуляторном» характере подкормки, а она может рассматриваться скорее как прямая грубая «перекачка» вносимого азота в биомассу хозяйственного органа. Резюмируя, можно заключить, что подкормки до цветения эффективны, но рискованны, в то время как после цветения – безопасны, но гораздо менее эффективны.

Следует заметить, что прямая проверка высказанных гипотез о причине наблюдаемого в комплексной модели продукционного процесса достаточно затруднена. Так как наряду с описанными феноменами в модель заложена реализация множества дополнительных «зашумляющих» процессов и явлений, большое влияние оказывают фактические погодные условия в конкретном сезоне вегетации и т.д. Поэтому для целей проверки выдвинутых объяснений эффектов тайминга и микродозинга на качественном уровне, нами была построена упрощенная тестовая модель в среде имитационного моделирования AnyLogic. Она включала в себя «дистиллированное» описание процесса адаптивного распределения первичных ассимилятов в двухпоточной модели углеродно-азотного взаимодействия с запасами, упрощенные алгоритмы корневого поглощения и фотосинтеза и позволяла учесть эффект азотной подкормки «по листу» в виде дискретно-событийного триггера, повышающего текущий уровень пула запасного азота. Структурная схема полученной модели в терминах диаграмм Форрестера приведена на рис. 1.

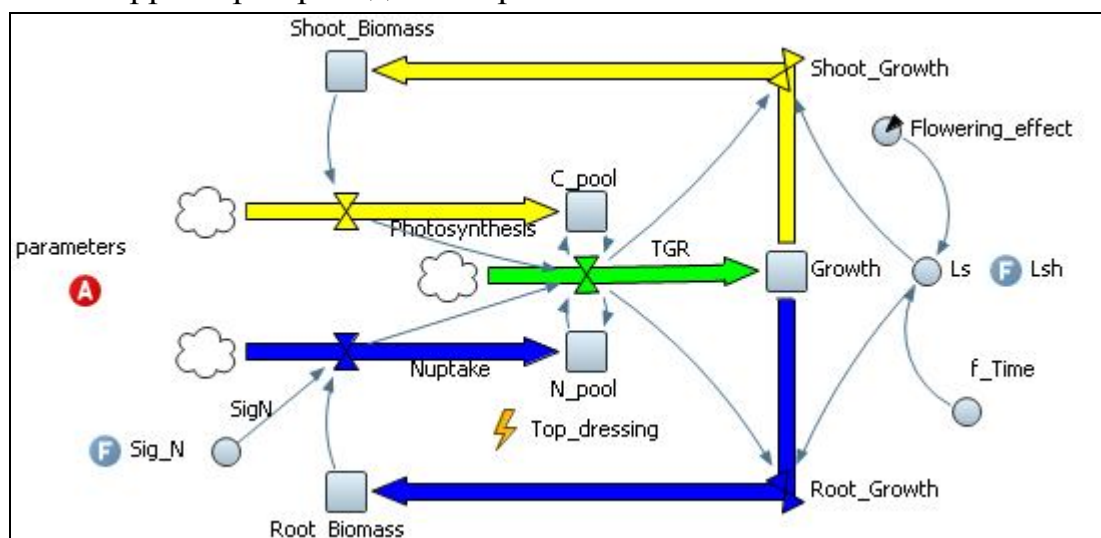


Рис. 1. Структурная схема двухпоточной модели роста растения с запасами в нотации системы AnyLogic

Вычислительные эксперименты с использованием численных параметров, характерных для злаковых культур, показали, что сочетания перечисленных выше условий действительно достаточно для проявления эффекта тайминга даже в самой упрощенной модели. Это, в частности, наглядно демонстрируется графиками на рис. 2, где приведена динамика интенсивности производства структурной биомассы (установившееся после цветения значение этой величины может служить значимым индикатором продуктивности) для разных сроков азотной подкормки. Видно, что вариант с внесением подкормки незадолго до цветения действительно может приводить к существенному снижению продуктивности, в то время, как при более раннем внесении эффект подкормки оказывается позитивным.

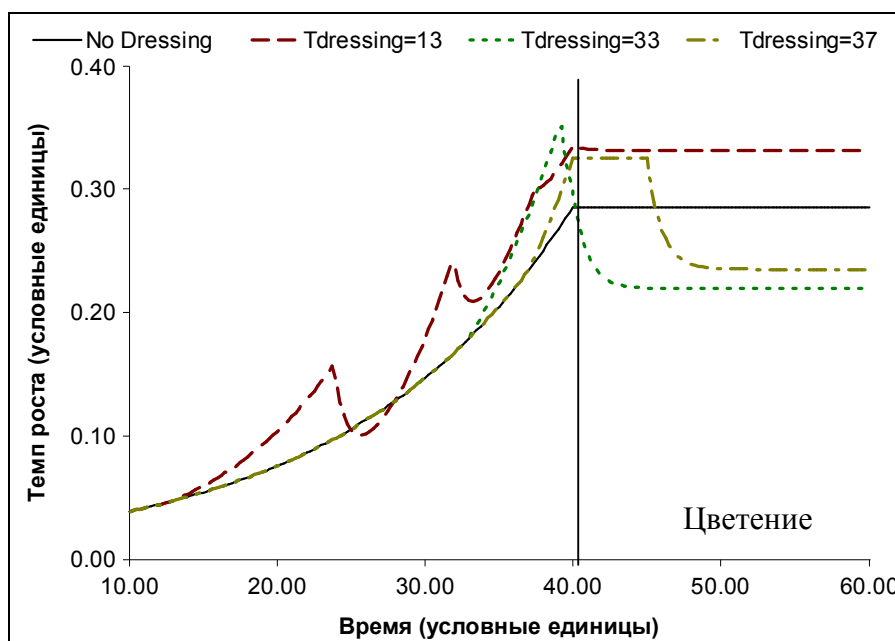


Рис. 2. Динамика интегрального темпа роста для случая отсутствия подкормки (сплошная линия) и разных сроков ее внесения

Таким образом, последние модификации модели AGROTOOL существенно расширяют область ее применения, увеличивают точность и скорость ее потенциальной адаптации к новым почвенно-климатическим условиям и применяемым технологиям химизации. Благодаря отмеченной повышенной чувствительности к срокам и дозам азотных удобрений, модель может стать весьма ценным инструментом, для выбора оптимальной стратегии управления азотным питанием сельскохозяйственных растений.

### Список литературы

1. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г. Расчет отношения root/shoot в моделях органогенеза высших растений // Физиология растений. 2005. Т. 52. № 5, С. 769–775.
2. Z.P. Shangguan
3. Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы // Агрохимия. 2010. № 10. С. 68–74.
4. Terrados J., Williams S.L. Leaf versus root nitrogen uptake by the surfgrass *Phyllospadix torreyi* S. Watson. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 149: 267-277.
5. Roose T., Fowler A.C., Darrah P.R. A mathematical model of plant nutrient uptake // *Journal of Mathematical Biology*, 2001, 42 (4), P. 347–360.