

УДК 633.31/.37

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА У ЗЕРНОВЫХ БОБОВЫХ КУЛЬТУР

Г.Г. ГАТАУЛИНА, С.С. СОКОЛОВА, М.Е. БЕЛЫШКИНА

(РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

*В опытах по изучению формирования урожая белого люпина в условиях Центрально-черноземного региона и ряда зерновых бобовых культур в условиях Центрального Нечерноземья определены динамические характеристики продукционного процесса, их вариабельность и связь с урожайностью семян. Выделены четыре периода (I — всходы — начало цветения; II— цветение и образование плодов; III—рост плодов; IV— налив семян), границы которых определены и увязаны с фазами развития. С помощью корреляционного и регрессионного анализа определены связи между динамическими характеристиками посева предшествующего и последующих периодов развития, а также их связь с конечными показателями фотосинтезирующей системы — урожаем семян и сбором протеина с гектара. Величина фотосинтетического потенциала (ФП), сухой массы (СМ) и скорость роста посева (СРП) в критический период цветения и образования плодов (период II) в значительной мере определяют число плодов и семян на 1 м<sup>2</sup> и могут служить прогностическими показателями потенциальной урожайности семян.*

*Ключевые слова:* зерновые бобовые культуры, рост и развитие, периоды формирования урожая, фотосинтетическая деятельность, урожайность семян.

В семенах зернобобовых культур содержится в 2-4 раза больше белка по сравнению с зерновыми культурами. Необходимость дальнейшего увеличения производства растительного белка связана не только с ростом населения на земном шаре. Экономические прогнозы свидетельствуют о том, что продолжается рост потребления мяса и других продуктов животноводства на душу населения не только в развитых, но и в развивающихся странах. Развитие современного животноводства и инновации в пищевой промышленности определяют возросший спрос на растительный белок.

Зернобобовые культуры, как и другие растения семейства *Fabaceae*, способны усваивать азот атмосферы благодаря симбиозу с клубеньковыми бактериями рода *Rhizobium*. Азотфиксация способствует сохранению и более экономному использованию энергетических ресурсов, так как обеспечивается биологическим путем благодаря использованию в качестве источника энергии продуктов фотосинтеза растений, создаваемых за счет энергии солнца. Кроме того, в отличие от минерального, биологический азот безопасен в экологическом отношении. Поэтому зерновые бобовые

культуры — необходимый компонент биологического земледелия. В то же время урожайность семян у зернобобовых культур обычно ниже, чем у зерновых хлебов [8, 9].

Для управления формированием урожая необходимо учитывать особенности продукционного процесса у этих культур на разных этапах развития растений. Большинство сортов зернобобовых культур относится к растениям с индетерминантным типом роста. Фазы репродуктивного развития на разных ярусах растения не совпадают. Когда на верхнем ярусе раскрываются цветки, в среднем отмечается завязывание плодов (бобов), а в нижнем в это время плоды достигают уже определенных размеров. С началом цветения, когда растения вступают в период репродуктивного развития, одновременно усиливается вегетативный рост [7, 12, 17].

Формирование конечного урожая зависит от баланса между вегетативным ростом и репродуктивным развитием. Этот совместный период вегетативного и репродуктивного роста очень важен, так как в это время определяется число плодов и семян на 1 м<sup>2</sup> [13, 15].

В связи с указанными особенностями вегетативного роста, растянутого генеративного развития, а также необходимостью соблюдать специальные условия для эффективной азотфиксации, зерновые бобовые культуры очень чувствительны к стрессовым факторам среды, особенно в определенные, критические периоды онтогенеза [7, 12].

Во многих работах, посвященных исследованиям формирования урожая у зернобобовых культур, приводятся определенные динамические характеристики продукционного процесса. Однако весьма затруднительно сравнивать динамические показатели, полученные в разные годы испытания, в разных местах, а также привлекать для обсуждения литературные источники, если эти динамические характеристики (например, нарастание биомассы, ассимиляционная поверхность) представлены на дату или на определенный день после появления всходов, так как состояние посева (микрофаза) у разных культур и сортов на одну и ту же календарную дату или день от всходов будет разным.

Если на момент биометрических измерений указываются такие фазы, как фаза цветения, фаза выполненных бобов без уточнения микрофазы, то полученные данные трудно интерпретировать и сравнивать с результатами исследований других авторов. Американские ученые, изучающие формирование урожая у сои, придерживаются разработанной для сои шкалы микрофаз, обозначающих этапы вегетативного роста (VI - V6) и генеративного развития (R1 - R8) [17].

*Системный подход в исследованиях.* Урожайность культуры определяется фотосинтетической деятельностью посева как целостной, динамической, саморегулирующейся *системы*, меняющей свои параметры во времени [3]. Отдельные биологически обоснованные последовательные периоды в развитии этой системы можно рассматривать как подсистемы, отображающие качественно новое состояние системы. При рассмотрении посева как системы, постепенно, поэтапно формирующей урожай семян (конечная цель развития системы) через ростовые процессы, развитие и фотосинтез, целесообразно выделить в этом временном ходе формирования урожая биологически обоснованные периоды, каждый из которых при завершении можно охарактеризовать важными с точки зрения формирования урожая одной или несколькими выходными величинами.

Посев (агроценоз) как растительная система приобретает свойства эмерджентности, целостности (свойства, характерные только для ценоза, а не для отдельных

растений). Так, площадь листовой поверхности, урожайность биомассы и семян, накопление протеина и другие показатели, максимальные или оптимальные для посева (т.е. в расчете на единицу площади), не будут таковыми для отдельных растений, входящих в ценоз. Обычно это хорошо иллюстрируется во всех опытах, где изучались разные нормы высева и соответственно густота стояния растений.

Возможность и точность определения начала и конца каждого периода по морфологическим признакам, аналогичным у всех зернобобовых культур, позволяют изучать и сравнивать разные виды, сорта при разных условиях произрастания не только по конечной величине развития системы — урожайности семян, но и по всем динамическим показателям, характеризующим посев в конце каждого периода. Например, можно сравнить разные сорта гороха или определенные сорта гороха и сои по показателям второго периода (цветения и образования бобов) — по его продолжительности, фото синтетическому потенциалу, чистой продуктивности фотосинтеза, площади листьев, накоплению биомассы, азота и т.д., а также по интенсивности определенных физиологических процессов в течение каждого периода.

#### *Цели данной работы:*

1. Обосновать целесообразность рассмотрения агроценоза зернобобовых культур как сложной динамической фотосинтезирующей системы с выделением в ее пределах одинаковых для всех зернобобовых биологически обоснованных периодов онтогенеза как подсистем с определенными входными и выходными показателями в их взаимосвязях.

2. Выявить закономерности фотосинтетической деятельности и продукционного процесса, общие для зернобобовых культур, а также особенности, связанные с генотипом и метеорологическими факторами.

3. Определить с использованием корреляционного и регрессионного анализа связи между динамическими характеристиками продукционного процесса предшествующего и последующих периодов, установить степень их влияния на компоненты урожайности и конечные показатели развития системы — урожайность семян и сбор протеина с гектара.

#### **Место, условия, объекты и методика проведения исследований**

Изучение динамических показателей формирования урожая у белого люпина (*Liipimis albiis* L.) проводилось в течение многих лет в условиях северной части Центрально-Черноземного региона. Результаты исследований были опубликованы и обобщены в монографии [7]. В данной статье приведены некоторые результаты этих исследований в соответствии с целью данной работы. Опыты с белым люпином проводились на экспериментальной базе учхоза имени Калинина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (северная часть Центрально-Черноземного региона, Тамбовская обл.). Почвы — выщелоченный чернозем средней мощности, рН 6,2-6,7. В пахотном горизонте содержалось 80-100 мг  $P_2O_5$  и 120-130 мг  $K_2O$  на 1 кг почвы.

Опыты по изучению формирования урожая люпина узколистного (*Liipimis angustifolius* L.), кормовых бобов (*Vicia faba* L.) и раннеспелых сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr) проводились в 2007-2010 гг. на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, расположенной в центральной части Среднерусской равнины. Почва — дерново-подзолистая, по механическому составу средний пылеватый суглинок; глубина пахотного слоя 22-25 см; рН солевой вытяжки 5,6-5,8; содержание гумуса по Тюрину 2,5%. В пахотном горизонте содержалось 165-170 мг  $P_2O_5$  (по Кирсанову) и 90-95 мг  $K_2O$  (по Масловой) на 1 кг почвы.

### *Характеристика климатических условий в местах проведения опытов*

При интродукции белого люпина в новые районы важно учитывать тепловые ресурсы. В Тамбовской области, где проводились исследования, сумма температур выше 10°C — 2300-2400°C, причем обеспеченность 2300°C — 70% лет, 2200°C — 80%, 2100°C — 90%, 2000°C — 95% лет. Для ежегодного созревания семян белого люпина в этой зоне необходимы сорта, требующие за период от посева до созревания суммы активных температур 2000-2200°C.

В данной зоне среднесуточная температура в мае 13,6, июне — 17,8, июле — 20,0, августе — 17,5°C. В сентябре температура значительно ниже: в I декаде — 14,0, во II — 11,8, в III — 9,5°C. Такая температура может замедлять развитие растений сои и белого люпина на последних этапах онтогенеза. В III декаде температура становится ниже биологического минимума для налива семян и их созревания. Следовательно, вегетационный период сортов от посева до созревания при посеве в конце апреля не должен превышать 130-135 дней.

Область относится к зоне недостаточного увлажнения. Средняя величина гидротермического коэффициента составляет 0,95-1,10. В агроклиматическом районе, где проводились опыты, сумма осадков в среднем за период активной вегетации (май — сентябрь) составляет 230-250 мм, причем изменчивость ГТК по годам большая: от 0,5 в сухие годы до 2,0 — во влажные.

В начале вегетации почва содержит в метровом слое 175-200 мм продуктивной влаги, что близко к наименьшей полевой влагоемкости. В течение лета запасы влаги постепенно убывают, доходя до минимума под культурами в июне — 50-90 мм.

Оценка агроклиматических ресурсов Тамбовской области свидетельствует о возможности выращивания здесь скороспелых сортов люпина белого. Недостаточная влагообеспеченность в отдельные годы может лимитировать получение высокого урожая семян.

В условиях Московской области почва полностью оттаивает 20-25 апреля. Среднемесячная температура воздуха самого теплого месяца — июля +18°C, среднесуточные температуры в течение вегетации по месяцам и декадам в этой зоне меньше, чем в Центрально-Черноземной, а количество осадков больше (табл. 1).

Таблица 1

**Среднеголетние данные среднесуточной температуры и осадков по декадам**  
(Обсерватория имени Михельсона, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

Месяц	Среднесуточная температура, °С			Осадки, мм		
	декада			декада		
	I	II	III	I	II	III
Апрель	-0,9	4,3	7,9	12	13	15
Май	10,3	12,2	14	17	18	20
Июнь	15,2	16,5	17,5	22	23	25
Июль	18,4	18,7	18,4	27	28	28
Август	17,5	16,5	15,2	26	27	25
Сентябрь	12,8	10,6	8,7	21	20	20

Область относится к зоне достаточного увлажнения. Годовая сумма осадков в среднем составляет 550-660 мм. Две трети осадков в году выпадают в виде дождя.

### *Методика проведения исследований*

Опыты по изучению продукционного процесса у зернобобовых культур закладывались по схемам, указанным в таблицах при изложении результатов исследований. Площадь учетной делянки от 15 до 50 м<sup>2</sup> в зависимости от опыта, размещение вариантов рендомизированное, повторность 4-кратная. Срок посева люпина белого, кормовых бобов и люпина узколистного — ранний, одновременно или сразу после посева ранних яровых зерновых культур, сою высевали при достаточном прогревании почвы в конце первой — начале второй декады мая. Способ посева широко-рядный с шириной междурядий 45 см. Норма посева устанавливалась из расчета получения густоты всходов 50 растений на 1 м<sup>2</sup>.

В период вегетации определяли густоту стояния растений, проводили фенологические наблюдения. Высоту растений, накопление сырой и сухой массы растений и отдельных органов определяли через каждые 15 дней в течение вегетации. Площадь листьев определяли весовым методом путем взвешивания листьев и определения площади 1 г листьев на фото планиметре, фотосинтетический потенциал (ФП) рассчитывали графическим методом, чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) находили путем деления прироста сухой биомассы за период на ФП этого периода. КПД ФАР определяли как отношение содержания энергии в сухой биомассе растений к приходу ФАР на единице площади, выраженное в процентах. Элементы структуры урожая определяли по пробным снопам из 25 растений с каждой делянки опыта. Учет урожая производили методом сплошной уборки с приведением урожая семян к стандартной 14%-й влажности и 100%-й чистоте. Статистический анализ результатов проводили с использованием приложения Microsoft Excel и статистического пакета IBM SPSS Statistics.

### **Результаты исследований и обсуждение**

#### *Обоснование выделения периодов развития растений и формирования урожая в онтогенезе зернобобовых культур как подсистем динамической фотосинтезирующей системы*

В основе примененного нами методологического подхода лежит рассмотрение посева (ценоза) как фотосинтезирующей системы, постепенно, поэтапно формирующей урожай семян (конечная цель развития системы) через рост, фотосинтез и другие физиологические процессы, интенсивность и направленность которых изменяется в процессе развития. Биологически обоснованные периоды в развитии растений выделяются как подсистемы, каждый из которых завершается одной или несколькими выходными величинами, важными с точки зрения формирования урожая. Это позволяет изучать изменения в системе по изменениям в его звеньях, изучать специфические системные качества [3].

#### *Выделение биологически обоснованных периодов-подсистем*

Первоначально такой подход был разработан после многолетних опытов с люпином белым, когда детально были изучены особенности роста и развития биотипов этого вида [5, 7]. Структурное построение системы с выделением периодов-подсистем дает возможность выявить характер взаимосвязей, а затем выразить их

численно с помощью корреляционного анализа и системой уравнений на основе регрессионного анализа. Исследования были посвящены последовательному выявлению тех особенностей фотосинтеза посева и формирования элементов продуктивности в предшествующий период, которые обуславливают существенное изменение состояния посева в последующий период и в конечном счете изменение урожайности и накопление протеина. Кроме того, было выявлено влияние изменения метеорологических условий в каждый из периодов на вариабельность параметров продукционного процесса в динамике [7].

Подобное структурное построение динамической системы оказалось вполне обоснованным и для других зернобобовых культур [5, 6, 7, 9, 18]. Для всех культур характерны два периода в развитии, когда фотосинтез отсутствует: это начальный — *от посева до появления всходов* и конечный — *созревания*, когда на растениях отсутствуют листья и другие зеленые части растений.

В течение вегетации от всходов до начала созревания, когда посев функционирует как фотосинтезирующая система, выделяются четыре периода, общие для всех зернобобовых культур: *I — от всходов до начала цветения* (до раскрытия первого цветка на растении); *II — цветение и образование плодов* (от раскрытия первого цветка до полного окончания цветения); *III—рост плодов* (в конце периода плоды на боковых побегах или верхних ярусах растения достигают максимальных размеров, створки плодов максимальной массы, отмечается фаза выполненных или блестящих бобов); *IV— наливание семян* (ассимиляты и питательные вещества из створок плодов и других органов оттекают в семена; в конце периода сухая масса семян максимальная, влажность семян высокая). *Созревание семян* — завершающий период их развития. В этот период семена и створки плодов теряют влагу. Скорость созревания, характеризующаяся интенсивностью снижения влажности семян и створок плодов, зависит от погодных условий. При пониженной температуре и осадках созревание замедляется (рисунок, табл. 2).

Такой подход к определению и характеристике значимых периодов отмечается в работах американских исследователей, посвященных изучению формирования уро-

Периоды развития и формирования урожая

Посев - всходы	I	II	III	IV	Созре- вание
	Вегетативный рост	Цветение и образование плодов	Рост плодов	Налив семян	
	Вегетативное развитие	Репродуктивный период развития			
	Период вегетативного роста				
		Цветение и образование плодов	Формирование и рост плодов		
			Рост плодов		
			Медленный налив семян	Быстрый налив семян	
	Фазы развития сои [по 17]				
	Ve V1 V2..... V5	R1 R3 R4	R5	R6	R7 R8

Схема вегетативного и генеративного развития у зерновых бобовых культур

Периоды развития посева и их характеристика (по Гатаулиной)

Период	Фаза в начале и конце периода	Фаза у сои по классификации в США [17]	Основные процессы формирования урожая	Основные выходные показатели периода
Посев — всходы (А)	Посев семенами — всходы	—	Набухание и прорастание семян	Густота всходов
1. Всходы — начало цветения	Всходы — раскрытие нижнего цветка	$V_1 — V_5$	Рост главного побега, листьев и формирование бутонов	Величина ассимиляционной поверхности
II. Цветение и образование плодов	Раскрытие нижнего цветка — образование завязей бобов на верхних ярусах	$R_1 — R_2$ и $R_3 — R_4$	Цветение и образование плодов, продолжение роста побегов	Максимальная площадь листьев, число плодов на 1 м <sup>2</sup>
III. Рост плодов	Сизые бобы — блестящие бобы	$R_5 — R_6$	Рост плодов и развитие семян. В конце периода максимальные размер плодов и масса их створок	Число семян на 1 м <sup>2</sup> , накопление биомассы, накопление протеина, площадь листьев, масса плодов
IV. Налив семян	Блестящие бобы — пожелтение (побурение) бобов	$R_6 — R_7$	Налив семян. К концу периода сухая масса семян максимальная, пожелтение и опадение листьев	Сухая масса семян (урожай), сбор протеина, урожай биомассы
Созревание	Пожелтение бобов — бурые сухие бобы	$R_7 R_8$	Созревание, потеря влаги створками плодов и семенами	Урожай созревших семян, сбор протеина с урожаем семян

жая у сои в связи с ее фенологией. Выделяются микрофазы и определенные периоды в этом процессе. Показано, что элементы структуры урожая формируются поэтапно и тесно связаны с фотосинтетическими характеристиками агроценоза: индексом листовой поверхности, эффективностью работы листьев (ЧПФ), скоростью нарастания сухой биомассы на определенном этапе [11, 15]. Урожайность семян прямо связана с первичными компонентами урожая — числом семян, сформировавшихся в расчете на 1 м<sup>2</sup>, а также массой 1000 семян. Эти компоненты урожая формируются на более поздних этапах продукционного процесса и, в свою очередь, определяются предшествующим состоянием посева, когда формируется число плодов на 1 м<sup>2</sup>, а также число семян в плоде. Авторы утверждают, что формирование компонентов урожая



может быть организовано в последовательную серию причинных взаимозависимостей. Эффективность каждого этапа, в свою очередь, связана с величиной нарастания сухой массы. Кроме того, на эти показатели продукционного процесса очень большое влияние оказывают стрессовые факторы среды, такие как температура, дефицит влаги [12].

Выделение последовательных периодов формирования урожая с определенными характеристиками продукционного процесса позволяет устанавливать причинно-следственные связи между этапами формирования урожая, показывать, как предшествующее состояние посева оказывает влияние на последующее развитие и формирование элементов продуктивности.

*Изменения элементов фотосинтетической деятельности посева по периодам-подсистемам и их влияние на формирование урожая белого люпина*

1. Продолжительность периодов у сортов белого люпина, влияние метеорологических факторов.

Природные биотипы белого люпина характеризуются многоярусным ветвлением и позднеспелостью. Считалось, что белый люпин может устойчиво созревать только в субтропической зоне. Возделывание этого вида в Центрально-Черноземном регионе стало возможным после создания сортов с детерминантным типом роста селекции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [5]. Первым из пяти сортов такого типа, устойчиво созревающих в данном регионе и включенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ, был сорт Старт. В данном исследовании он сравнивается с наиболее скороспелым украинским сортом Киевский мутант, требующим для созревания значительно большей суммы активных температур, и с относительно скороспелым сортообразцом Белый 6 из коллекции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Разнотипные сорта белого люпина различались по продолжительности вегетации и отдельных периодов онтогенеза (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

**Продолжительность отдельных периодов и необходимая сумма активных температур (средние по трем годам и трем срокам посева)**

Период вегетации	Старт		Киевский мутант		Белый 6	
	дни	сумма активных температур, °С	дни	сумма активных температур, °С	дни	сумма активных температур, °С
Посев — всходы	14	180	14	180	14	180
I	36	605	37	630	38	650
II	20	415	24	455	30	570
III	18	355	21	390	22	400
IV	22	375	25	405	36	530
Созревание	10	180	13	220	16	260
I—IV	96	1730	107	1880	126	2150
Посев — созревание	120	2090	134	2280	156	2540



По продолжительности периодов от посева до начала цветения разнотипные сорта почти не различались. Цветение и образование плодов (период II) у Киевского мутанта и Белого 6 были продолжительнее, чем у Старта, соответственно на 20 и 50%, что определило различия в продолжительности последующих периодов и необходимой для их прохождения сумме активных температур.

В среднем продолжительность активной фотосинтетической деятельности растений от всходов до начала созревания у позднеспелого сорта Белый 6 составила 126 дней, у Киевского мутанта — на 19 дней, а у Старта — на 30 дней меньше. Метеорологические условия оказывали большое влияние на продолжительность вегетации и отдельных периодов. Различия между сортами становятся максимальными при благоприятных для роста и ветвления условиях. Продолжительность периода от всходов до начала созревания у позднеспелого сорта Белый 6 изменялась от 106 дней в засушливом году до 145 дней и более при обилии осадков, у Киевского мутанта — соответственно от 89 до 122, у Старта — от 81 до 109 дней.

Налив семян и созревание приходились у разных сортов на период с разной среднесуточной температурой. Падение среднесуточной температуры ниже 14°C резко замедляло развитие растений.

Только скороспелый сорт Старт устойчиво созревал во все годы даже при позднем посеве. Продолжительность вегетации этого сорта от посева до созревания составила 120 дней, Киевского мутанта — 134, Белого 6 — 156 дней. Требуемая сумма активных температур у Старта около 2000°C, Киевскому мутанту необходимо на 200°C, а позднеспелому сорту Белый 6 — на 500°C больше.

Для производства желательно сокращение тех периодов в развитии растений в ценозе, когда отсутствует фотосинтез (посев — всходы и созревание). Рассмотрим, как зависит продолжительность этих периодов от температуры воздуха и осадков (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

**Влияние температуры и осадков на продолжительность периодов посев — всходы и созревание (сорт Киевский мутант)**

Продолжительность периода и метеорологические факторы	Средняя за 10 лет, $\bar{x}$	Ошибка средней, $S_x$	Коэффициент вариации, V%	Коэффициент корреляции, $r$
<i>Посев — всходы</i>				
Продолжительность, дни	14	1,39	36,1	1
Осадки, мм	19	4,6	86,3	0,69
Среднесуточная температура, °C	12,7	0,8	22,7	-0,52
Сумма температур, °C	178	13,3	28,2	0,79
<i>Созревание</i>				
Продолжительность, дни	14	1,04	26,1	1
Осадки, мм	34	8,26	87,4	0,50
Среднесуточная температура, °C	16,4	1,07	23,8	-0,90
Сумма температур, °C	230	7,59	12,2	0,49

Коэффициент корреляции продолжительности периода посев — всходы с количеством осадков высокий ( $r = 0,7$ ).

В условиях северной части ЦЧР на выщелоченном черноземе при раннем сроке посева белого люпина и заделке семян на 4 см можно рассчитывать на появление всходов через 12-14 дней после посева. Сумма температур, необходимая для появления всходов вполне стабильна, в среднем она равна  $178^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент вариации составляет 28%.

Для созревания семян данного сорта в среднем необходима сумма температур  $230^{\circ}\text{C}$  ( $V = 12,2\%$ ). Продолжительность периода сильно связана со среднесуточной температурой ( $r = -0,90$ ). Осадки во время созревания удлиняют его. Созревание длится 18-20 дней, если среднесуточная температура не превышает  $14^{\circ}\text{C}$ , при  $16-17^{\circ}\text{C}$  — 14 дней, при  $20-23^{\circ}\text{C}$  — 9-10 дней.

Итак, продолжительность вегетации и отдельных периодов связана с генотипом сорта и нормой реакции генотипа на изменение таких факторов, как тепло и влага. Поздние сорта с индетерминантным типом роста сильнее реагируют на изменение метеорологических факторов.

Создание сортов зернобобовых культур с детерминантным ростом имеет большое значение для получения устойчивых урожаев, особенно в регионах с ограниченными тепловыми ресурсами.

Сорта белого люпина, созданные в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, устойчиво созревают в наиболее северных для этого вида условиях, включая северную часть Центрально-Черноземного региона России. Они характеризуются законченным (детерминантным) типом роста на укороченных побегах II порядка (Дельта, Дега), I порядка (Старт, Гамма), а наиболее скороспелый сорт Детер I не образует боковых побегов [5].

## 2. Динамические параметры формирования урожая.

Агроценоз как динамическая фотосинтезирующая система характеризуется рядом показателей. Эти показатели делятся на две группы. Первая группа отражает *состояние посева на определенный выделенный момент вегетации культуры*. Разные авторы в своих исследованиях этот момент обозначают по-разному: например указывают фазу (бутонизация, цветение, выполненные бобы), не уточняя, на каком ярусе, узле, побеге растения отмечается данная фаза. В других случаях указывается календарная дата или день от всходов. Такие данные трудно сопоставимы при изучении разных генотипов в зависимости от места и года исследований, а также в сравнении с данными других авторов. Американские исследователи сои пользуются разработанной для этой культуры шкалой микрофенологии (табл. 2).

В данной работе, где динамические параметры рассматриваются в разрезе периодов-подсистем, следует четко указать морфологические признаки растений, определяющие границы периодов, общие для всех зернобобовых культур, их биотипов и сортов. Так, период I продолжается от всходов до раскрытия первого цветка на растениях. Это граница, где заканчивается период I и начинается период II — цветение и образование плодов, который заканчивается, когда верхние цветки на растениях опадают или из них образуются завязи плодов. Это граница II и III периода — роста плодов. Период роста плодов заканчивается, и начинается период налива семян, когда плоды на верхних ярусах растений вступают в фазу выполненных (блестящих) бобов, приобретают максимальные линейные размеры, а створки бобов достигают максимальной за вегетацию сырой и сухой массы. К моменту окончания налива семян отмечается пожелтение плодов, семена приобретают характерную для

генотипа окраску, листья становятся желтыми или полностью опадают. Динамические показатели определяются по морфологическим признакам, разграничивающим периоды («на конец периода»).

Параметры формирования урожая, относящиеся к первой группе и отражающие нетто-фотосинтез посева, следующие: 1) нарастание сухой биомассы (в исследованиях обычно наземная сухая биомасса) — общей и (или) отдельных органов в г/м<sup>2</sup> или в кг/га (СМ); 2) нарастание ассимиляционной поверхности (обычно площади листьев) в тыс. м<sup>2</sup>/га {ПЛ} или представленное как индекс листовой поверхности (м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>) — ИЛП.

Вторая группа включает показатели, отражающие результаты функционирования посева за *определенный период* или в целом за период активной фотосинтетической деятельности агроценоза. К ним относятся следующие параметры:

- фотосинтетический потенциал {ФП}, тыс. м<sup>2</sup> дн. га<sup>-1</sup>;
- чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) отражает интенсивность создания в процессе фотосинтеза сухой биомассы за сутки 1 м<sup>2</sup> листовой поверхности — г м<sup>-2</sup> дн<sup>-1</sup>;
- прирост сухой массы за период (ПСМ), г м<sup>2</sup> или кг га<sup>-1</sup>;
- скорость роста посева (СРП) — прирост сухой массы на 1 м<sup>2</sup> или на 1 га за сутки, в англоязычной литературе — *Crop growth rate (CGR)*, г м<sup>-2</sup> дн<sup>-1</sup> или кг га<sup>-1</sup> дн<sup>-1</sup>.

Динамические характеристики обсуждаются в связи с их влиянием на формирование плодов, семян, массу 1000 семян и урожайность.

Эти показатели формирования урожая скороспелого биотипа белого люпина отражены в таблицах 5,6.

Т а б л и ц а 5

**Динамические характеристики продукционного процесса у белого люпина**  
(среднее за 12 лет)

Показатель	Период				
	I	II	III	IV	I-IV
Продолжительность периода, дни	36	20	18	20	96
V%	11	13	23	12	10
Индекс листовой поверхности (ИЛП) на конец периода	1,7	4,0	3,2	0	—
V%	30	36	42	—	—
Индекс листовой поверхности (ИЛП) в среднем за период	0,7	3,2	3,5	1,7	2,1
V%	28	31	39	36	30
Фотосинтетический потенциал (ФП), тыс. м <sup>2</sup> дней/га	260	630	705	405	2000
V%	37	31	53	45	38

Показатель	Период				
	I	II	III	IV	I-IV
Чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ), г/м <sup>2</sup> сут.	6,5	4,1	4,2	—	4,5
V%	11	15	22	—	9
Сухая масса (СМ) на конец периода, т/га	1,40	4,39	6,90	8,0	—
V%	36	30	37	35	—
Прирост сухой массы за период (ПСМ), т/га	1,70	2,50	3,00	0,3	7,50
V%	36	36	52	50	35
Скорость роста посева (СРП), кг/га сут.	47	125	167	20	78

Таблица 6

## Урожайность семян, сбор протеина и компоненты урожая

Выходные данные	Ед. измерения	Средняя за 12 лет	Благоприятные годы	Сухие годы (6 лет)
Урожайность семян	т/га V, %	3.08 41.8	4,44 12,4	1,82 19,2
Сбор протеина с урожаем семян	кг/га V, %	1190 40,3	1710 12,3	720 18,4
Число плодов	шт./м <sup>2</sup> V, %	246 40	360 20	160 9
Число семян	шт./м <sup>2</sup> V, %	800 45	1120 34	455 14
Масса 1000 семян	г V, %	390 9	375 9	400 9

Из таблицы 5 следует, что посев люпина как фотосинтезирующая система наиболее эффективно функционирует в течение II и III периодов. За это время, составляющее 40% от общего за вегетацию, синтезировалось 73% сухой наземной биомассы. Коэффициент использования ФАР во II и III периоды в 2,8-3,0 раза больше, чем во время цветения и в период налива семян. Аналогичные особенности формирования урожая по периодам развития отмечены в отношении различных сортов белого люпина при разных условиях выращивания, а также и для других зернобобовых культур [5, 7].

*Регрессионный анализ вариабельности элементов структуры урожая, урожайности семян и других конечных выходных показателей ценоза белого люпина как динамической системы в связи с вариабельностью динамических показателей продукционного процесса*

Вариабельность показателей, представленных в таблицах 5, 6, довольно большая, о чем свидетельствуют коэффициенты вариации. ЧПФ — наиболее стабильный показатель. Отмечается высокая вариабельность ИЛП, ФП и приростов сухой массы, особенно в течение периода роста плодов, когда определяются такие решающие для уровня конечной урожайности семян компоненты, как число плодов и семян на 1 м<sup>2</sup>.

Рассмотрим, как связаны между собой число плодов на 1 м<sup>2</sup> (y) и ФП посева за I (x<sub>1</sub>) и II (x<sub>2</sub>) периоды. Эта зависимость выражается уравнением регрессии:

$$y = 0,296x_1 + 0,294x_2 - 38, \quad (1)$$

$$\begin{array}{lll} D = 0,712, & d_1 = 0,149, & d_2 = 0,564, \\ R = 0,837, & r_1 = 0,334, & r_2 = 0,720, \\ F = 3,3, & t_1 = 2,5, & t_2 = 7,3. \end{array}$$

Из общей дисперсии переменной 71% обеспечивается действием аргументов, причем наибольшее влияние оказывает изменение ФП II периода (d<sub>2</sub> = 0,564). Коэффициенты регрессии одинаковы, однако доля ФП II периода в изменчивости y в 3,5 раза больше, чем ФП I периода, за счет увеличения площади листьев.

Рассмотрим зависимость числа семян y от ФП I (x<sub>1</sub>), II (x<sub>2</sub>) и III (x<sub>3</sub>) периодов.

$$y = 1,32x_1 + 1,11x_2 - 0,04x_3 - 285, \quad (2)$$

$$\begin{array}{llll} D = 0,749, & d_j = 0,189, & d_2 = 0,590, & d_3 = -0,030, \\ R = 0,856, & r_1 = 0,360, & r_2 = 0,654, & r_3 = -0,043, \\ F = 3,8, & t_1 = 2,7, & t_2 = 6,0, & t_3 = -0,3. \end{array}$$

Уравнение надежно. Очень низкое значение частного коэффициента корреляции (r<sub>3</sub> = -0,043) говорит об отсутствии связи между переменной и ФП III периода. Основную роль в изменчивости количества семян играет ФП II периода — 59% из общей дисперсии переменной 75%, обусловленной включенными в уравнение факторами.

Подтверждается также существенная зависимость урожайности семян Y от максимальной площади листьев x на конец II периода.

$$y = 2,5 + 0,7x, \quad (3)$$

$$D = 0,640, \quad R = 0,795, \quad t = 9,4.$$

64% общей дисперсии переменной можно объяснить влиянием данного аргумента. Уравнение удобно использовать для прогноза урожайности семян по максимальной площади листьев для сортов скороспелого биотипа.

Очевидно, неблагоприятные условия в отдельные периоды вегетации, такие как водный стресс, являются причиной вариабельности динамических характеристик фотосинтетической деятельности растений и урожайности. Кроме того, с позиций системного подхода показано, что предшествующее состояние системы оказывает влияние на последующее развитие и формирование компонентов урожая.

Таким образом, рассмотрение выделенных периодов как подсистем динамической фотосинтезирующей системы позволяет с помощью корреляционного и регрессионного анализов установить подобные связи и выразить их численно.

*Особенности формирования урожая у зернобобовых культур  
в условиях Центрального Нечерноземья*

Сравнительное изучение формирования урожая и динамических характеристик продукционного процесса по указанным выше периодам-подсистемам трех зернобобовых культур: узколистного люпина (*Lupinus angustifolius* L.), кормовых бобов (*Vicia faba* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.) — проводилось в 2007-2010 гг. на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

В качестве объектов исследований были взяты современные сорта изучаемых культур, включенные в Государственный реестр селекционных достижений и допущенные к использованию в Центральном регионе: узколистный люпин — сорт Кристалл, кормовые бобы — сорт Мария и сорт сои северного экотипа Магева.

Метеорологические условия вегетационных периодов в годы исследований отличались между собой и от среднеголетних. В 2007 г. вегетационный период с апреля до середины июля, во время вегетативного роста и цветения кормовых бобов и люпина узколистного, был жарким и засушливым. Температурный режим был более благоприятным для сои, чем для остальных изучаемых культур. Гидротермический коэффициент (ГТК) в среднем за вегетацию составил 0,8. 2008 г. характеризовался избыточным увлажнением, что привело к усиленным ростовым процессам, особенно у кормовых бобов. В конце вегетации осадки превышали норму, температура была пониженной, что привело к увеличению продолжительности периода налива семян сои и задерживало ее созревание. ГТК в среднем за вегетацию составил 2,1. Наиболее благоприятные условия для всех изучаемых культур сложились в 2009 г. Температура воздуха была в пределах нормы. Количество осадков в июне и июле было ниже средне многолетних значений на 15-20 мм, в августе превысило норму на 10 мм. ГТК составил 1,3. Первый период вегетации растений 2010 г. до цветения был благоприятным для роста и развития изучаемых культур: количество осадков было близко к норме, температура была выше нормы на 2-3°C. С 20.06 до середины августа отмечалась сильная жара, когда дневная температура была в пределах 30°C и выше, а среднесуточная превышала среднеголетнюю на 6-8°C. Значение ГТК в среднем за вегетацию составило 0,6. Практически полное отсутствие осадков с конца июня до середины августа сопровождалось экстремально высокими температурами воздуха.

*Продолжительность отдельных периодов вегетации.* Культуры и сорта зернобобовых культур обычно различаются между собой по продолжительности периодов, что важно учитывать при их производстве. Поэтому в исследованиях определен этот параметр формирования урожая, его вариабельность и связь с температурным фактором (табл. 7).

Продолжительность вегетации от посева до созревания у сои на 3 нед. больше, чем у люпина узколистного и кормовых бобов. Наибольшая вариабельность продолжительности периода посев — всходы. Здесь отмечается высокая обратная связь со среднесуточной температурой. То же можно отметить для последних этапов формирования урожая — налива семян (IV период) и созревания, причем в большей степени для сои, чем для кормовых бобов и люпина. У сои эти периоды проходят

**Продолжительность периодов вегетации у различных зернобобовых культур,  
связь со среднесуточной температурой и сумма активных температур  
за период (2007-2010 гг.)**

Период	Продолжительность		Сумма активных температур		Среднесуточная температура	
	дни	V, %	°С	V, %	°С	V, %
<i>Кормовые бобы, сорт Мария</i>						
Посев — всходы	14	30,7	160	13,1	13,3	17,9
I	29	4,20	460	11,8	15,2	17,7
II	18	21,7	330	20,3	17,9	8,00
III	16	17,9	330	16,0	20,7	10,9
IV	17	56,1	320	54,6	20,9	17,7
Созревание	8	27,1	130	38,3	20,1	26,0
Всходы — созревание	87	13,1	1570	5,30	—	—
Посев — созревание	101	13,0	1730	4,50	—	—
<i>Люпин узколистный, сорт Кристалл</i>						
Посев — всходы	10	38,3	100	11,0	12,4	35,8
	37	9,60	540	10,7	14,8	14,9
II	13	9,40	230	20,8	17,7	18,6
III	14	30,5	280	22,6	20,1	10,0
IV	18	39,4	350	31,6	19,4	17,6
Созревание	8	28,8	165	49,3	20,9	22,9
Всходы — созревание	89	12,1	1565	3,00	—	—
Посев — созревание	99	13,0	1665	3,10	—	—
<i>Соя, сорт Маггера</i>						
Посев — всходы	18	49,6	235	45,0	14,1	26,4
I	35	6,40	600	7,60	17,4	5,40
II	20	7,40	410	4,00	20,8	9,40
III	23	25,1	450	17,2	20,2	22,2
IV	16	50,5	245	38,9	19,0	38,8
Созревание	10	15,8	115	63,1	13,0	78,5
Всходы — созревание	104	13,6	1820	9,90	—	—
Посев — созревание	121	13,9	2055	5,10	—	—



в конце августа — сентябре, когда среднесуточная температура быстро снижается и иногда оказывается ниже биологического минимума (2008 г.). Низкие коэффициенты вариации, характеризующие продолжительность периода I (от всходов до начала цветения), указывают на его относительную стабильность в данных условиях.

Несмотря на значительную вариабельность суммы температур, необходимой для прохождения III и IV периодов (рост плодов и налив семян), общая сумма активных температур от посева до созревания у представленных сортов изучаемых культур весьма стабильна, коэффициент вариации 3-5%. Установленная сумма активных температур, необходимая для прохождения вегетации от посева до полного созревания люпина узколистного сорта Кристалл, — 1665°C, для сои (раннеспелый сорт северного экотипа Магева) — на 400°C больше.

Показатели фотосинтетической деятельности посевов в среднем за годы исследований отражают особенности культур (табл. 8).

Таблица 8

**Показатели фотосинтетической деятельности посевов зернобобовых культур**  
(2007-2010 гг.)

Культура	ИЛП		ФП		ЧПФ	
	м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>	V, %	тыс. м <sup>2</sup> дн./га	V, %	г/м <sup>2</sup> в сутки	V, %
Кормовые бобы	3,0	54	1130	48	5,31	14
Люпин узколистный	3,0	30	1100	28	7,00	24
Соя	3,0	53	1970	44	3,00	11

ФП сои почти на 80% больше, чем у кормовых бобов и люпина, а ЧПФ, напротив, на 75% ниже, чем у кормовых бобов. ЧПФ у люпина узколистного во все годы исследований была значительно выше, чем у кормовых бобов и сои. Возможно, это объясняется тем, что листочки у люпина узколистного в 2 раза толще, чем у сои, и всегда повернуты к солнцу (гелиотропизм). Коэффициент вариации этого показателя намного ниже, чем ИЛП и ФП. Вариабельность, связанная с влиянием метеорологических условий, очень высокая у сои и кормовых бобов. Люпин узколистный более стабилен по показателям фотосинтетической деятельности посева.

Динамика накопления сухой массы растениями разных зернобобовых культур как интегрирующая величина фотосинтеза посева отражена в таблицах 9, 10. У сои и люпина период I (от всходов до цветения) в среднем был одинаковым по продолжительности и накоплению сухой массы. У кормовых бобов этот период на 6-7 дней короче и нарастание биомассы меньше.

Обсуждение данных таблиц 9, 10, приведенное ниже, показывает, что общего в динамике нарастания сухой биомассы по периодам развития у различных зернобобовых культур, влияние метеорологических условий вегетации, а также отражает особенности культур, вариабельность по этим динамическим параметрам и их связь с урожайностью семян.

В течение II периода, который по продолжительности меньше, чем I период, прирост биомассы в 2-3 раза больше. Посев как фотосинтезирующая система у зернобобовых культур интенсивно функционирует в течение II периода. В нарастающей

Таблица 9

**Сухая масса (СМ) на конец периода, ее вариабельность и коэффициент корреляции (r) с урожайностью семян у зернобобовых культур (СМ в среднем за 2007-2010 гг.)**

Культура	Показатель	I период	II период	III период
Кормовые бобы	СМ, кг/га	998	3525	6164
	V, %	23,7	40,2	56,7
	r	—	0,65	0,94
Люпин узколистный	СМ, кг/га	1396	4250	7112
	V, %	42,5	20,4	22,0
	r	—	0,62	0,43
Соя	СМ, кг/га	1365	3753	4559
	V, %	32,4	36,4	47,1
	r	—	0,41	0,73

Таблица 10

**Нарастание сухой массы у зернобобовых культур (на конец периода) в разные по метеорологическим условиям годы, т/га**

Год	I период		II период		III период	
	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>
<i>Кормовые бобы, сорт Мария</i>						
2007	0,71	0,04	1,67	0,15	2,00	0,17
2008	1,22	0,10	4,39	0,28	11,2	0,63
2009	0,82	0,05	5,31	0,36	7,41	0,64
2010	1,24	0,09	2,73	0,20	4,03	0,34
<i>Люпин узколистный, сорт Кристалл</i>						
2007	0,79	0,05	3,00	0,25	5,80	0,34
2008	2,20	0,20	4,25	0,25	8,48	0,72
2009	0,86	0,08	5,45	0,26	8,85	0,51
2010	1,73	0,11	4,29	0,41	5,32	0,39
<i>Соя, сорт Магева</i>						
2007	0,75	0,04	1,79	0,18	2,55	0,12
2008	1,37	0,13	3,76	0,39	5,80	0,27
2009	1,34	0,12	5,65	0,35	7,45	0,46
2010	2,00	0,20	3,81	0,25	2,43	0,24

сухой массе репродуктивные органы (цветки и завязи плодов) занимают незначительный удельный вес.

Коэффициенты корреляции величины сухой массы в этот период с урожайностью семян указывают на связь, приближающуюся к сильной у кормовых бобов и люпина и среднюю у сои. Очевидно, возрастающий индекс листовой поверхности и величина фотосинтетического потенциала в это время определяют возможности посева для формирования потенциального числа бобов на 1 м<sup>2</sup>. Этот период — критический в формировании урожайности у зернобобовых культур.

Во время роста плодов (III период) у современных сортов с определенной степенью детерминации обычно прекращается вегетативный рост. Исключение составлял очень влажный 2008 г., когда увеличение массы и площади листьев отмечалось и в периоде III. Обычно в этом периоде общая сухая масса продолжает нарастать высокими темпами только за счет роста образовавшихся в периоде II плодов. Темпы нарастания будут высокими, если в периоде II сформировалось много плодов и условия для их роста благоприятны. *В конце периода III у всех зернобобовых культур отмечается максимальная за вегетацию величина сырой массы.* У люпина белого масса плодов в это время составляет 60% сырой массы растений.

В благоприятные по погодным условиям годы (2008, 2009) сухая масса плодов у кормовых бобов и люпина узколистного составляла к концу периода III 48-50% общей сухой массы растений, у сои — 30-35%. В засушливые годы (2007, 2010), когда в течение периода II формировалось мало плодов, прирост сухой массы за счет роста плодов в периоде III был небольшим, удельный вес плодов в сухой биомассе растений снижался.

Высокий коэффициент корреляции величины сухой массы с урожайностью семян у кормовых бобов и сои указывает на сильную между этими показателями связь. У люпина эта связь средняя.

В течение IV периода (налив семян) пластические вещества перемещаются в семена из створок плодов и других органов растений. Измеряемые приросты сухой биомассы за этот период небольшие, в большинстве случаев общая сухая масса в конце IV периода оказывалась ниже, чем в конце III периода, что связано с быстрым уменьшением массы листьев. В период налива семян листья желтеют и опадают. Поэтому величина сухой биомассы в конце III периода близка к максимальной за вегетацию.

Данные таблицы 10 показывают, как сильно варьирует величина сухой массы в периоды II и III в разные по метеорологическим условиям годы. Наибольшие различия наблюдаются у кормовых бобов. В засушливом 2007 г. максимальная за вегетацию биомасса у этой культуры была в 5,5 раза меньше, чем во влажном 2008 г. Коэффициент вариации, характеризующий вариабельность нарастания сухой массы у кормовых бобов, очень высокий — 57%. Люпин узколистный показал большую стабильность в нарастании сухой массы в периоды II и III по сравнению с соей, и особенно кормовыми бобами.

В формировании элементов структуры урожая и урожайности семян большое значение имеет такой параметр, как скорость роста посева — СРП (табл. 11, 12).

Этот показатель в среднем за 4 года (табл. 11) наглядно отражает общее в динамике функционирования фотосинтезирующей системы у зернобобовых культур, видовые особенности и вариабельность, в основном связанную с действием метеорологических условий. В среднем СРП до начала цветения всего 34-39 кг га<sup>-1</sup> сут.<sup>-1</sup> в зависимости от культуры. У всех культур скорость роста во время цветения и образования плодов (период II) в 3-5 раз больше, чем до цветения. У люпина этот период

Таблица 11

**Скорость роста посевов (СРП) зернобобовых культур (средняя за 2007-2010 гг.)  
и ее вариабельность**

Культура	Показатель	I период	II период	III период
Кормовые бобы	СРП, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	34	140	165
	V, %	25,2	54,0	82,1
Люпин узколистный	СРП, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	38	220	204
	V, %	34,7	25,0	32,3
Соя	СРП, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	39	119	36
	V, %	28,3	56,6	43,7

Таблица 12

**Скорость роста посевов (СРП) в годы исследований, кг га<sup>1</sup> сут.<sup>1</sup>**

Год	I период		II период		III период	
	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>	средняя, x	ошибка средней, S <sub>x</sub>
<i>Кормовые бобы, сорт Мария</i>						
2007	25,3	1,23	53	4,10	24	1,35
2008	42,1	4,39	244	13,2	359	17,9
2009	26,5	2,00	187	10,0	117	10,4
2010	44,4	3,73	83	5,23	108	7,00
<i>Люпин узколистный, сорт Кристалл</i>						
2007	23,9	1,08	184	12,4	187	13,2
2008	52,4	4,07	171	10,7	299	29,5
2009	25,4	1,76	306	25,7	170	12,8
2010	45,5	3,78	197	12,9	128	11,2
<i>Соя, сорт Магева</i>						
2007	22,1	1,54	47	3,90	25	2,16
2008	38,1	2,21	120	9,88	85	6,63
2009	41,8	2,10	227	15,6	82	5,79
2010	52,6	5,18	82	7,32	—	—

почти в 2 раза короче, чем у кормовых бобов и сои, но СРП в 1,5-1,8 раза больше. У люпина наименьший коэффициент вариации СРП в этот период — 25%, в то время как у сои и кормовых бобов он более 50%.

СРП всегда снижается в условиях засухи (табл. 12). В 2007 г. начиная с III декады мая и до конца июня (в течение I и II периодов) осадков выпало значительно меньше нормы, поэтому СРП в I и II периоды, а также и число плодов на 1 м<sup>2</sup> были меньше, чем в годы с достаточным количеством осадков. В дальнейшем осадки вы-

падали регулярно, однако они уже не могли существенно повлиять на нарастание биомассы. В 2010 г., напротив, в течение I периода и до середины цветения осадков было больше нормы, поэтому СРП была выше, чем в другие годы. Затем в течение двух месяцев осадков не было, экстремальная засуха сопровождалась жаркой погодой. У кормовых бобов и сои во II период СРП была в 2,5 раза ниже, чем при благоприятных условиях, у люпина эта разница была меньше. В 2010 г. соя, а также кормовые бобы сильнее пострадали от засухи по сравнению с люпином. У сои в 2010 г. не отмечался прирост биомассы в течение периода III.

Нарастание биомассы и СРП периода III контролируется числом плодов, сформировавшихся в период II.

Коэффициенты вариации урожайности семян, сухой массы, числа семян на 1 м<sup>2</sup> у люпина узколистного в пределах 17-26%, в то время как у сои — 29-40%, у кормовых бобов — 60-68% (табл. 13).

Т а б л и ц а 13

**Урожайность семян, сбор протеина и компоненты урожая (2007-2010 гг.)**

Выходные данные	Ед.измерения	Кормовые бобы	Люпин узколистный	Соя
Урожайность семян	т/га	2,29	1,97	1,49
	V, %	68	26	37
СМ на конец III периода	кг/га	6160	7113	4558
	V, %	57	22	47
Сбор протеина с урожаем семян	кг/га	677	709	624
	V, %	76	30	40
Число плодов	шт./м <sup>2</sup>	245	509	635
	V, %	45	32	35
Число семян	шт./м <sup>2</sup>	671	1796	1338
	V, %	60	17	29
Масса 1000 семян	г	448	142	150
	V, %	13	10	20

Коэффициент вариации массы 1000 семян небольшой, что свидетельствует об относительной стабильности этого показателя.

Коэффициенты парной корреляции демонстрируют сильную связь между СРП периода II и элементами структуры урожая, а также урожайностью семян (табл. 14).

Наши данные показывают, что предшествующее состояние посева (период II) по рассмотренным параметрам в значительной мере определяет в последующем величину компонентов урожайности и непосредственно урожайность семян у зерновых бобовых культур. Засуха приводит к уменьшению нарастания биомассы и СРП в критический период цветения и завязывания плодов (период II), что вызывает уменьшение числа плодов и семян на 1 м<sup>2</sup>. Этот показатель (СРП) в период цветения и образования плодов является определяющим для величины компонентов урожай-

**Коэффициенты парной корреляции скорости роста посевов (СРП) зернобобовых культур во II периоде с элементами структуры урожая и урожайностью семян**

Культура	Число бобов на 1 м <sup>2</sup>	Число семян на 1 м <sup>2</sup>	Урожайность семян, т/га
Кормовые бобы	0,96	0,96	0,94
Люпин узколистный	0,74	0,65	0,97
Соя	0,91	0,87	0,71

ности, а также и урожайности семян. Величина сухой массы растений в конце II и III периодов может служить прогностическим показателем потенциальной урожайности семян.

*Динамические параметры формирования урожая у сортов сои с разной продолжительностью вегетации в условиях Центрального Нечерноземья*

Выращивание теплолюбивой культуры — сои — в Центральном Нечерноземье часто ограничивается ее продолжительной вегетацией и недостатком тепловых ресурсов в период налива и созревания семян. Характеристика различных раннеспелых сортов сои имеет большое значение для ее производства в данном регионе. В опытах, проведенных в 2008-2010 гг. на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, изучалось развитие растений и формирование урожая у разнотипных раннеспелых сортов сои: Касатка (селекции Рязанского НИПТИ АПК) и УСХИ 6 (селекции Ульяновской сельскохозяйственной академии) с более продолжительным вегетативным ростом [1]. Новый сорт Касатка — наиболее скороспелый из сортов сои северного экотипа. В таблице 15 приведены данные для оптимальной густоты растений сои — 500 тыс. раст./га при ширококормяном способе посева.

У изучаемых сортов была определена продолжительность периодов-подсистем в соответствии с изложенными выше морфологическими признаками, которые были увязаны со шкалой микрофаз для сои по *Fehr, W.R. & Caviness, C.E* [17].

Продолжительность вегетации сорта Касатка была на 10-14 дней меньше, чем у сорта УСХИ 6 (табл. 15).

Большое влияние на этот показатель оказывали метеорологические условия года. 2009 г. по осадкам и температурному режиму был близким к среднемуголетним. Во влажном 2008 г. вегетационный период увеличился на 10-14 дней, а в экстремально засушливом 2010 г. снизился на 18 дней по сравнению с 2009 г.

В исследованиях определена сумма активных температур, необходимая для прохождения всех этапов вегетации. У сорта Касатка она составила в среднем 2040°C, у сорта УСХИ 6 — 2230°C. В условиях Центрального Нечерноземья лимитирующим фактором является не общая сумма активных температур за вегетацию, а их сумма и напряженность по периодам развития. Это обстоятельство особенно важно для сои на последних этапах формирования урожая — налива и созревания семян, так как пониженные среднесуточные температуры в эти периоды являются лимитирующим фактором при возделывании сои в Центральном Нечерноземье [2, 4].

## Продолжительность вегетации и отдельных периодов, дни

Г о д	Посев — всходы	I Всходы — цветение	II Цветение — образование бобов	III Рост бобов	IV Налив семян	Созре- вание	Всходы — созре- вание	Посев — созрева- ние
	-	$V_1 - V_n$	$R_1 - R_4$	$R_5 - R_6$	$R_6 - R_7$	$R_7 - R_8$	-	-
<i>Касатка</i>								
2008	14	46	30	10	14	12	112	126
2009	16	45	27	8	10	9	99	115
2010	7	42	17	9	13	9	90	97
<i>УСХИ 6</i>								
2008	14	57	31	12	17	9	126	140
2009	11	51	32	11	11	10	115	126
2010	7	48	18	9	16	10	101	108

Динамические характеристики изучаемых сортов в условиях достаточной влагообеспеченности (2008, 2009 гг.) рассматриваются в таблице 16, в условиях засухи (2010 г.) — в табл. 17.

В этих исследованиях также подтверждено, что агроценоз сои как фотосинтезирующая система функционирует наиболее продуктивно в период цветения и образования плодов. Этот же период — критический в формировании урожая. В это время формируются плоды и высокими темпами нарастают вегетативные ор-

Динамические параметры посевов сортов сои по периодам развития  
(средние за 2008-2009 гг.)

Показатель	Периоды, фазы			
	I Всходы — цветение	II Цветение и обра- зование бобов	III Рост бобов	IV Налив семян
	$V_1 - V_1$	$R_1 - R_4$	$R_5 - R_6$	$R_6 - R_7$
<i>Сорт Касатка</i>				
Продолжительность периода, дни	45	<b>30</b>	9	11
Индекс листовой поверхности	1,2	<b>5,3</b>	3,0	1,0
Наращивание сухой биомассы, кг/га	1225	<b>5250</b>	5650	5250
СРП, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	27	<b>134</b>	44	—



Показатель	Периоды, фазы			
	I Всходы — цветение	II Цветение и обра- зование бобов	III Рост бобов	IV Налив семян
	V <sub>1</sub> - R <sub>1</sub>	R <sub>1</sub> — R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub> — R <sub>6</sub>	R <sub>6</sub> — R <sub>7</sub>
<i>Сорт УСХИ 6</i>				
Продолжительность периода, дни	54	<b>32</b>	13	16
Индекс листовой поверхности	1,6	<b>5,5</b>	5,2	1,1
Наращение сухой массы, кг/га	1450	<b>5400</b>	5750	5500
СРП, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	27	<b>123</b>	27	—

Таблица 17

**Динамические параметры посевов сортов сои  
по периодам развития в засушливом 2010 г.**

Показатель	Периоды, фазы			
	I Всходы — цветение	II Цветение — образование бобов	III Рост бобов	IV Налив семян
	V <sub>1</sub> - R <sub>1</sub>	R <sub>1</sub> — R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub> — R <sub>6</sub>	R <sub>6</sub> — R <sub>7</sub>
<i>Сорт Касатка</i>				
Продолжительность периода, дни	42	<b>19</b>	8	8
Индекс листовой поверхности	3,0	<b>3,2</b>	1,5	0,2
Сухая масса, кг/га	2450	<b>3250</b>	3000	2400
Скорость роста посевов, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	58	<b>42</b>	-	-
<i>Сорт УСХИ 6</i>				
Продолжительность периода, дни	48	<b>19</b>	9	10
Индекс листовой поверхности	2,3	<b>3,2</b>	1,5	0,31
Сухая биомасса, кг/га	2500	<b>3300</b>	2900	2300
Скорость роста посевов, кг га <sup>-1</sup> сут. <sup>-1</sup>	52	<b>42</b>	-	-

ганы, в том числе листья и общая биомасса растений. В 2008-2009 гг. за этот период, продолжительностью 30 дней, что составляет 35% от периода I—III, сформировалось 70% общей сухой биомассы. Скорость роста посева (СРП) в это время была в 5 раз больше по сравнению с предшествующим периодом.

Влияние водного стресса на указанные параметры проявилось в полной мере в 2010 г. В этом году погодные условия до цветения были более благоприятными для ростовых процессов, и среднесуточный прирост сухой массы в I период был в 2 раза больше, чем в предшествующие годы. Однако наступившая засуха угнетающе действовала на интенсивность ростовых процессов, приросты снизились в 3 раза по сравнению с 2008-2009 гг. и их продолжительность в 2 раза. В период роста плодов листья пожелтели и стали опадать, прироста биомассы не отмечено.

В формировании урожайности особое значение имеет величина накопления сухой биомассы к моменту завершения образования бобов на растениях, так как их максимально возможное количество в расчете на растение и на единицу площади в это время уже сформировалось. Поэтому величина сухой биомассы в этот период может характеризовать потенциал урожайности. Многие американские ученые [11, 13, 16, 19] полагают, что накопление сухой массы сои к фазе R5 определяет потенциальную урожайность семян. Кроме того, большое значение для анализа продукционного процесса имеет показатель скорости роста посева (Crop Growth Rate). По данным Egli and Yu [15], Board and Modali [11], величина сухой биомассы у сои в этот критический период очень важна для формирования компонентов урожая, особенно в связи с действием абиотических факторов, таких как водный стресс. От ее величины зависит число плодов и семян на 1 м<sup>2</sup>.

В наших исследованиях в благоприятные по погодным условиям годы к концу этого периода величина сухой массы у раннеспелых сортов составляла в среднем 525 г/м<sup>2</sup> у сорта Касатка и 540 г у сорта УСХИ 6, индекс листовой поверхности достигал максимума — 5,3-5,5 в зависимости от сорта. Период цветения и образования плодов является определяющим в формировании потенциальной урожайности.

При благоприятных условиях величина нарастания сухой массы 450-550 г/м<sup>2</sup> к моменту завершения образования бобов в значительной мере определяет будущую урожайность, которая в условиях Центрального Нечерноземья реализуется на уровне 2,0-2,2 т/га при оптимальной густоте стояния растений и резко снижается (в 2010 г. в 2,5 раза), если в критический период растения подвергаются водному стрессу.

Сравнение двух сортов по динамическим параметрам формирования урожайности показывает, что продолжительность вегетации и отдельных периодов значительно больше у сорта УСХИ 6. Этот сорт к фазе R5 формировал на 10% больше сухой массы, однако СРП у этого сорта была на 9% меньше. В результате по урожайности семян сорта существенно не различались. Однако налив и созревание у сорта УСХИ 6 приходились на более поздний период, когда в отдельные годы (2008) среднесуточная температура была ниже биологического минимума, и семена не созревали. В условиях Центрального Нечерноземья ограничивающим фактором реализации биологического потенциала раннеспелых сортов сои являются периоды налива семян и созревания, когда среднесуточная температура может оказаться ниже 14°C. Сорт Касатка по своим особенностям развития более соответствует возможной вариабельности тепловых ресурсов в данном регионе по сравнению с сортом УСХИ 6.

### **Заключение**

Обоснована целесообразность рассмотрения агроценоза зернобобовых культур как сложной динамической фотосинтезирующей системы с выделением в ее пределах периодов онтогенеза как подсистем с определенными входными и выходными показателями. Границы выделенных периодов-подсистем определяются одинаковы-

ми морфологическими признаками. Фотосинтез отсутствует в течение начального периода — *от посева до появления всходов* и конечного — *созревания*, когда на растениях отсутствуют зеленые листья. В течение активной фотосинтетической деятельности выделяются четыре периода: *I— от всходов до начала цветения; II— цветение и образование плодов; III—рост плодов; IV— наливание семян*. В исследованиях выявлена продолжительность отдельных периодов, вегетации в целом и их вариабельность в связи с изменением метеорологических условий. Определена также необходимая для прохождения отдельных периодов сумма активных температур у различных видов зернобобовых культур и сортов сои, что имеет большое значение для производства.

Выявлены закономерности фотосинтетической деятельности и продукционного процесса, общие для зернобобовых культур, а также особенности, связанные с генотипом и метеорологическими факторами. Посев зернобобовых культур как фотосинтезирующая система наиболее эффективно функционирует в течение II и III периодов. За это время, составляющее около 40% от общего за вегетацию, синтезируется более 70% сухой надземной биомассы.

С использованием корреляционного и регрессионного анализов оценены связи между динамическими характеристиками продукционного процесса предшествующего и последующих периодов, установлена степень их влияния на компоненты урожайности и конечные показатели развития системы — урожайность семян и сбор протеина с гектара.

Выявленные нами зависимости и уравнения регрессии позволили оценить характер изменений в фотосинтетической деятельности на отдельных этапах развития посева, которые приводят к снижению урожайности. Выходные величины периода цветения и образования плодов в значительной мере определяют размер будущего урожая.

Установлено, что предшествующее состояние посева по величине ФП, нарастанию сухой массы и скорости роста посева (СРП), особенно в критический период II (цветение и образование плодов), в значительной мере определяет в последующем величину компонентов урожайности и непосредственно урожайность семян. СРП II периода наряду с накоплением сухой массы III периода могут служить прогностическими показателями потенциальной урожайности семян.

Вариабельность динамических характеристик продукционного процесса и урожайности семян в значительной степени связана с изменением метеорологических условий в разные годы и в зависимости от региона возделывания. В условиях, приводящих к угнетению ростовых процессов (засуха), особенно в критический период II — цветения и образования плодов, сильно уменьшается нарастание сухой массы и СРП. Их величина в этом периоде тесно коррелирует с числом плодов и семян на 1 м<sup>2</sup> и урожайностью семян.

#### Библиографический список

1. Бельшикина М.Е. Соя в Центральном Нечерноземье. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. 128 с.
2. Бельшикина М.Е., Гатаулина Г.Г. Урожайность и элементы структуры урожая ультраскороспелого сорта сои Касатка при разных способах и густоте стояния растений // Изв. ТСХА. 2010. №6. С. 51-54.
3. Гатаулин А.М. Системы и системный анализ в экономике. Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 166 с.
4. Гатаулина Г.Г., Бельшикина М.Е. Рост и развитие раннеспелых сортов сои при разных сроках посева в Московской области // Кормопроизводство. 2012. № 3. С. 26-28.

5. Гатаулина Г.Г., Медведева Н.В., Штеле А.Л., Цыгуткин А.С. Рост, развитие, урожайность и кормовая ценность сортов белого люпина (*Lupinus albus* L.) селекции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Изв. ТСХА. 2013. Вып. 6. С. 12-30.
6. Гатаулина Г.Г., Соколова С. С. Динамика нарастания биомассы и семенная продуктивность люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.), сои (*Glycine max* (L.) Merr.) и кормовых бобов (*Vicia faba* L.) в Центральном Нечерноземье // Кормопроизводство. 2013. № 11. С. 13-16.
7. Гатаулина Г.Г., Соколова С.С. Формирование урожая и динамические характеристики продукционного процесса у зерновых бобовых культур. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2012. 271 с.
8. Дебелый Г.А. Зернобобовые культуры в Нечерноземной зоне РФ. Москва; Немчиновка: НИИСХ ЦРНЗ, 2009. 260 с.
9. Соколова С. С., Гатаулина Г.Г. Продолжительность вегетации и особенности формирования урожая зернобобовых культур на дерново-подзолистых почвах Центрального региона // Изв. ТСХА. 2011. № 1. С. 19-23.
10. Шнаар Д. Зернобобовые культуры / Под ред. Д. Шнаар. Минск: ФУАинформ. 2000. 263 с.
11. Board J.E. & Modali H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean // Crop Sci. 2005. Vol. 45. Pp. 1790-1799.
12. Board J.E. and Kahlon C.S. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved, Soybean Physiology and Biochemistry, Prof. Hany El-Shemy (Ed.). 2011. 488 p.
13. Carpenter A. C. & Board J.E. Growth dynamic factors controlling soybean yield stability across plant populations // Crop Sci. 1997. 37. Pp. 1520-1526.
14. De Bruin J.L. & Pedersen P. Growth, yield, and yield component changes among old and new soybean cultivars // Agron. J. 2009. Vol. 101. P. 123-130.
15. Egli D.B. & Yu Z. W. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean // Crop Sci. 1991. Vol. 31. P. 439-442.
16. Egli D.B. Soybean reproductive sink size and short-term reductions in photosynthesis during flowering and pod set // Crop Sci. 2010. Vol. 50. P. 1971-1977.
17. Fehr W.R. & Caviness C.E. Stage of soybean development. Iowa State University, Cooperative Extension Service, 1977. 11 p. (Special report, 80). Ames, IA.
18. Gataulina G.G., Sokolova S.S. Photosynthetic activity and productivity of different-type cultivars of narrow-leaved lupin (*Lupinus angustifolius* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in the conditions of the Central area of Non-chernozem zone // Izvestiya TSKliA. Special issue. 2013. P. 86-92.
19. Kahlon C.S., Board J.E. and Kang M.S. An analysis of yield component changes for new vs. old soybean cultivars // Agron. J. 2011. Vol. 103. P. 13-22.

## SYSTEMATIC APPROACH TO ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GRAIN LEGUMES YIELD FORMATION

G.G. GATAULINA, S.S. SOKOLOVA, M.E. BELYSHKINA

(RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev)

*The field experiments have been conducted to study the dynamic process of yield formation through photosynthetic characteristics canopy of *Lupinus albus* L. under the conditions of the Central-Chernozem zone and *Lupinus angustifolius* L., *Vicia faba* L. and *Glycine max* (L.) Merr. under the conditions of the Non-Chernozem zone of Russia. The species were represented by cultivars adapted for growing in the respective regions. The studied dynamic parameters were the following: Leaf*

*Area Index (LAI), Photosynthetic Potential (Ph.P.), Total Wet and Dry Matter Accumulation (TWM, TDM), Crop Growth Rate (CGR), Net Assimilation Rate (NAR), number of pods and seeds per nr.*

*Grain legumes canopy as a photosynthetic system functions from emergence till maturity and may be divided into four periods (subsystems): I— emergence -beginning of flowering; II — flowering and podformation; III—pod growth; IV— seed filling. Timeline of respective periods and their length for presented cultivars of different species were defined. Interrelation between dynamic parameters of previous and subsequent periods of development, as well as their interconnection with seed yield were estimated for *Lupinus albus*, correlation and regression analyses being used. Then the same method has been applied for other grain legumes species. The species and cultivars differed in the length of periods, the needed sum of active temperature, the Ph.P value and other characteristics.*

*Grain legumes canopy as a photosynthetic system functions effectively during periods II (flowering and pod formation) and III (pod growth). 70% of TDM is accumulated at this time, which is 40% of a total period from emergence till maturity CGR during period II is 2-4 times higher compared to the previous period. The number of pods and seeds formed per nr at the end of this period was measured. These parameters determine the potential seed yield.*

*Ph.P, TDM and CGR values during the critical period of flowering and pod formation (period II) strongly correlate with the number of pods and seeds per ml and seed yield, and can be used as criteria for predicting seed yield. These parameters may be effective in controlling yield formation.*

*Weather greatly affects several dynamic parameters and seed yield of grain legumes. Drought during the critical period II (flowering and pod formations) 1.5-3 times reduces TDM and CGR. *Vicia faba* is especially susceptible to water stress. Coefficient of variation (CV%) of TDM, CGR, seed/nr and seed yield for *Lupinus angustifolius* is 17-26%, for *Glycine max*— 29-40% and for *Vicia faba* — 60-68%.*

*Key words: grain legumes, growth and development, yield formation periods, photosynthetic activity, seed yield.*

**Гатаулина Галина Глебовна** — д. с.-х. н., проф. кафедры растениеводства и луговых экосистем, гл. науч. сотр. лаборатории белого люпина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; тел. (499) 976-18-18; e-mail: gataulin35@mail.ru).

**Соколова Светлана Сергеевна** — к. с.-х. н., ст. преп. кафедры растениеводства и луговых экосистем РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; тел. (499) 976-18-18; e-mail: sokolova-svetlana@bk.ru).

**Бельшккина Марина Евгеньевна** — к. с.-х. н., доц. кафедры растениеводства и луговых экосистем РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; тел. (499) 976-18-18; e-mail: bely-mari@yandex.ru).

**Gataulina Galina Glebovna** — Doctor of Agricultural Sciences, professor of the department of crop production and meadow ecosystems, RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev (127550, Moscow, Timiryazevskaya street, 49; tel. (499) 976-18-18; e-mail: gataulin35@mail.ru).

**Sokolova Svetlana Sergeevna** — Ph.D. in Agriculture, senior lecturer of the department of crop production and meadow ecosystems, RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev (127550, Moscow, Timiryazevskaya street, 49; tel. (499) 976-18-18; e-mail: sokolova-svetlana@bk.ru).

**Belyshkina Marina Evgenievna** — Ph.D. in Agriculture, associate professor of the department of crop production and meadow ecosystems, RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev (127550, Moscow, Timiryazevskaya street, 49; tel. (499) 976-18-18; e-mail: bely-mari@yandex.ru).