

АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И СЕЛЕКЦИОННЫЕ РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЕВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РОССИИ

В.П. ЯКУШЕВ, И.М. МИХАЙЛЕНКО, В.А. ДРАГАВЦЕВ

*«Торговля может сделать человека богатым,
но свободным — только сельское хозяйство!»
Жан-Жак Руссо (Jean-Jacques Rousseau)*

Рассматриваются новые подходы к решению задач повышения урожаев зерновых культур с помощью современных методов агротехнологий и селекционных технологий. Ранее было показано, что урожай агрофитоценоза детерминируется семью генетико-физиологическими системами — ГФС (А.Б. Дьяков с соавт., 1994), с которыми де факто работает селекционер, повышая продуктивность и урожай будущего сорта. В указанной работе А.Б. Дьяковым и В.А. Драгавцевым выполнено первое генотипирование каждой ГФС, способной поднять урожай, что позволило определить направления для оптимальных стратегий управления семью ГФС. В настоящей статье впервые показано, что эффективность работы некоторых систем может быть повышена как агротехнологическими, так и генетико-селекционными методами. В будущем улучшение агротехнологий пойдет в сторону совершенствования точного земледелия. Это предполагает мониторинг фитоценоза в его развитии, регистрацию стрессовых воздействий лим-факторов на признак, который закладывается на той или иной стадии онтогенеза, создание агроприемов, которые точно влияют на фитоценоз в конкретную фазу его развития за счет воздействия биопрепаратами для снятия негативного влияния лим-фактора. Следовательно, для защиты чувствительных фаз онтогенеза должны быть разработаны специальные «фазовые» агротехнологии. Максимальный эффект от точных селекционных технологий можно получить при создании математических моделей, которые позволяют строго количественно описать вклады каждой из семи ГФС в повышение урожая для каждой фазы онтогенеза, и реализации таких моделей как при классической полевой селекции, так и (с максимальной эффективностью) в специальном селекционном фитотроне при контролируемых изменениях лим-факторов среды, воспроизводящих условия в типичные годы для конкретной зоны селекции. Авторами были созданы первые модели и важные количественные алгоритмы для селекционеров, обеспечивающие быструю идентификацию индивидуальных генотипов по их фенотипам и оптимальный подбор родительских пар при скрещивании с предсказанием и дальнейшим получением трансгрессий (для самоопыляющихся растений). В настоящей статье отмечается, что эффективность некоторых важных систем может быть повышена только селекционными методами. Анализ уникальных селекционных достижений академиком В.С. Пустовойта и П.П. Лукьяненко и лауреата Нобелевской премии Нормана Борлоуга (Norman E. Borlaug) обнаружил те ГФС, которые были улучшены великими селекционерами, и те, которые еще не подвергались селекционному улучшению. Организация селекционных и агротехнических работ с ГФС (отдельно с каждой) должна дать большой прирост урожаев в будущем. В статье показаны перспективы использования гормонов в разные фазы онтогенеза для заглубления корневых систем, для повышения аттракции и адаптивности к лим-факторам (стрессорам). Агротехнологии и селекционные технологии должны формировать единую систему, потому что высокий генетический потенциал новых сортов нуждается в точно соответствующей ему агротехнологии, и наоборот, лучшая агротехнология может быть ограничена недостаточными возможностями конкретного сорта. В современном сельском хозяйстве главный фактор оптимальной командной работы агротехnologов и селекционеров — это агрофизическое оборудование и агрегаты, селекционный фитотрон, информационные технологии, надлежащее математическое моделирование и алгоритмы управления урожаями при их совместном взаимосвязанном практическом применении.

Ключевые слова: агротехнологии, селекция, резервы повышения урожаев в России.

Еще 100 лет назад аграрии мира располагали следующими рычагами увеличения валовых сборов продукции растениеводства: распашкой новых земель; оптимизацией размещения родов, видов и сортов сельскохозяйственных растений по макро-, мезо- и микроэкологическим нишам; совершенствованием агротехнологий; выведением новых сортов и гибридов с помощью генетико-селекционных технологий; созданием смесей сортов, видов и даже родов для максимального использования ресурсов

среды сложными агрофитоценозами. В настоящее время первое и второе направления уже почти исчерпали свои возможности: новых земель практически нет, оптимизация размещения культур по территориям в основном закончена (это был долгий эмпирический процесс «проб и ошибок»), продолжает непрерывно работать только система районирования сортов. По последним данным, для разных зон Российской Федерации соотношения вкладов в повышение урожая за счет улучшения агротехнологий и совершенствования селекционных технологий составляют от 50 %:50 % до 30 %:70 %. Создание смесей сортов, видов и даже родов очень развито, например, в Бразилии, где смесями генотипов засевают до 80 % площадей, в РФ этот подход только начинает развиваться, но испытывает трудности, в связи с отсутствием новых модификаций машин и специальных систем мониторинга и ухода за сложными агрофитоценозами.

Глобальный мировой кризис сельскохозяйственного производства в XXI веке возник потому, что техногенная интенсификация растениеводства не способна решить проблему дальнейшего повышения урожая, но связана с ростом энергозатрат и нарушениями экологического равновесия. Решение проблемы голода и недоедания растущего населения планеты и снижение негативного влияния на биосферу — две основные проблемы современного сельскохозяйственного сектора. Поэтому выявление резервов недорогих, экологически безопасных и точных агротехнологий, а также возможностей селекции для радикального повышения урожая имеет очень важное значение.

Приоритетное российское фенотипирование (расчленение итогового урожая на семь вкладов в него от результатов функционирования семи ГФС) и представленные подходы к повышению эффективности каждой отдельной системы за счет агротехнологических и селекционных приемов впервые демонстрируют оцененные количественно значительные резервы увеличения урожая зерновых культур в Российской Федерации.

Новые подходы к оценкам резервов агротехнологий и селекционных технологий в решении проблемы повышения урожая. Эффективность вышеуказанных пяти «рычагов» повышения урожая до настоящего времени не оценена в строгой форме. Целесообразно провести эту оценку на основе имеющихся на сегодня знаний о перспективах вкладов агротехнологий и генетико-селекционных технологий в процесс повышения урожая.

А.Б. Дьяков и В.А. Драгавцев показали (1), что урожай агрофитоценоза формируется следующими генетико-физиологическими системами (ГФС): аттракции (АТТР, 1-я система), или перераспределения, продуктов фотосинтеза и элементов минерального питания из стебля и листьев в центры аттракции — в колос (у зерновых), в корзинку (у подсолнечника) и т.д.; микрораспределений аттрагированных пластических веществ (МИК, 2-я система) между зернами и мякиной в колосе пшеницы, между ядром семени и лузгой у подсолнечника и т.д.; адаптивности (АД, 3-я система) — общей адаптации (к конкретным условиям поля и года испытаний) либо специальной адаптации (в случае формирования провокационного фона, например засухи, холода, жары, засоления, изменения рН почвы и т.д.); горизонтального иммунитета (ИММ, 4-я система) — горизонтальной (полигенной) устойчивости к болезням и вредителям; «оплаты» сухой биомассой растения единицы лимитирующего фактора в почвенном питании (ЭФФ, 5-я система) — азота, фосфора, калия и т.д.; толерантности к загущению (ТОЛ, 6-я система) — способности выдерживать высокую плотность посева и сохранять большое число колосьев на 1 м² его пло-

щади; генетической вариабельности по продолжительности фаз онтогенеза (ОНТ, 7-я система).

Этот подход, экспериментально проверенный и описанный еще в 1994 году (1), фактически стал приоритетным российским фенотипированием (phenotyping — недавно возникшее за рубежом направление исследований, пытающееся расчлнить формирующиеся в процессе роста итоговые признаки фенотипа и добраться до первичных элементов продуктивности, которые более тесно связаны с продуктами генов, чем результирующие сложные свойства продуктивности и урожая) (2-6).

Отечественный фенотайпинг оказался значительно эффективнее зарубежных подходов (7, 8). Однако он не содержал информации, как повышать эффективность работы ГФС — на основе агро- или(и) селекционных технологий.

Анализ и эксперименты показали, что эффективность вклада в урожай 1-й, 2-й и 3-й систем можно повышать как агротехнологическими, так и генетико-селекционными приемами, а 4-й, 5-й, 6-й и 7-й систем — в основном только генетико-селекционными.

Каковы резервы повышения урожаев при совершенствовании агро- и селекционных технологий? Рассмотрим сводную таблицу по зерновым зонам мира, представленную S. Borojevic (9) в специальной лекции на Международном конгрессе генетиков (Москва, 21-31 августа, 1978 год).

Средние и рекордные показатели продуктивности в сельскохозяйственном производстве основных зерновых зон мира (9)

Культура, продукция	Урожайность, продуктивность		Соотношение рекордных и средних показателей
	средняя	рекордная	
Кукуруза, ц/га	44,4	189,4	4,3
Пшеница, ц/га	18,8	145,2	7,7
Соя, ц/га	16,1	73,9	4,6
Сорго, ц/га	18,6	197,4	7,1
Овес, ц/га	17,2	106,3	6,2
Ячмень, ц/га	20,4	114,1	5,6
Картофель, ц/га	282,2	940,8	3,2
Сахарная свекла, ц/га	469,1	1333,0	2,8
Молоко (годовой надой), кг/гол.	4635	22500	4,9
Яйцо куриное (от 1 несушки), шт/год	230	365	1,6

Как видно, урожаи пшеницы и сорго в принципе могут быть увеличены более чем в 7 раз за счет совершенствования агротехнологий и генетико-селекционного улучшения сорта.

Перспективы развития прецизионных агротехнологий и их возможный вклад в повышение урожаев. В 2007-2008 годах на посевах яровой пшеницы (Меньковская опытная станция Агрофизического института — АФИ) технологии точного земледелия по сравнению с обычной технологией сэкономили около 20 % минеральных удобрений и обеспечили повышение урожая на 15 %. В условиях Северо-Запада России урожай достиг 60 ц/га (10). Это был один из первых этапов в отработке прецизионных технологий — дифференцированное внесение минеральных удобрений. Следующим шагом должно стать дробное внесение азотных удобрений (с оптимизацией доз и сроков обработки). Необходимо оптимизировать режимы использования удобрений и мелиорантов, действующих в течение ряда лет на нескольких культурах в различных севооборотах. Для решения обозначенных задач требуется достоверная информация о состоянии посевов и почвенной среды, что будет обеспечиваться ускоренным развитием наземных мобильных средств измерения и более широким использованием оптического и радиолокационного оборудования для дистанционного зондирования (11). Использование в преци-

зионных технологиях таких тонких средств управления состоянием посевов, как биопрепараты и гормоны, потребовало большей дифференцированности при обработках жидкими и сыпучими агрохимикатами. В АФИ были созданы и запатентованы схемы и конструкции таких машин (12). В целом все указанные направления в развитии прецизионных технологий могут стать основой для повышения урожаев еще на 20-25 % и более полно раскрыть продуктивный потенциал сортов, получаемых с помощью современных селекционно-генетических методов.

Говоря о прецизионных технологиях, не следует упускать из виду инновационные агроприемы, лежащие в их основе. Так, К.Г. Алимов, обнаружив в периоде вегетации зерновых культур наиболее чувствительные фазы развития и воздействуя на растения технологическими средствами, добился того, что корни растений уходили вглубь и потребляли влагу с глубины от 1 м. Он использовал известные работы физиологов растений по стимуляции роста корневой системы (13), которые показали, что при водном дефиците в почве корни начинают двигаться в глубокие влажные горизонты. Заглубление стимулируется гормоном — абсцизовой кислотой (АБК), который начинает синтезироваться в растениях при засухе, подавляя рост надземной части, но способствуя развитию корней. Если дополнительно обработать гормоном АБК посев в соответствующую фазу (перед началом формирования признака «число зерен в колосе»), то заглубление корней происходит более интенсивно. Оптимизация питания (манипуляции дробным внесением азота, воздействие регулятором роста и фунгицидом по фазам онтогенеза) приводит к формированию в колосе 90-98 зерен вместо обычных в условиях весенне-летней засухи в Сибири 15-20 зерен. Продуктивная кустистость при этом остается небольшой (не более двух колосьев), что позволяет убрать урожай до снега: как известно, колосья стеблей-подгонов созревают на 1 нед позже, и если агроном будет ждать их созревания (а они дают до $\frac{2}{3}$ урожая), то поле может уйти под снег. Эта оригинальная технология сводится только к точному мониторингу фаз развития и соблюдению установленных в соответствии с ними сроков проведения операций по этапам органогенеза, то есть не требует дополнительных затрат. К сожалению, пока оценка состояния посева выполняется на глаз, ее необходимо совершенствовать и постепенно превратить в точную инструментальную. Технология К.Г. Алимова в 1990-е годы в учхозе НГАУ «Тулинское» (Новосибирская обл.) давала на яровой пшенице 62-76 ц/га, на яровых сортах Кантегирская 89 и Лютесценс 70, вышедших из кооперированной сибирской программы ДИАС (диаллельные скрещивания) — 62-63 ц/га. На Екатеринбургской станции Всероссийского НИИ растениеводства (ВИР) (Тамбовская обл.) в течение 4 лет на яровой пшенице получали 70-74 ц/га. В полевые сезоны 2000-х годов в Ульяновской области сорт яровой пшеницы Эстер давал урожаи до 75 ц/га. На фоне экстремальной засухи эта технология в 70 % экспериментов обеспечивала урожайность 30-35 ц/га, тогда как на расположенных рядом полях, где применялась обычная технология, удавалось получить только 10-12 ц/га.

Эти факты иллюстрируют повышение засухоустойчивости (вследствие искусственного заглубления активных корней до влажного горизонта почвы) за счет технологических приемов. Конечно, глубина и форма корневой системы могут быть улучшены и генетико-селекционными методами. Так, у засухоустойчивого сорта яровой пшеницы Казахстанская 10 (авторы В.В. Новохатин, Р.А. Уразалиев, Казахский НИИ земледелия им. В.Р. Вильямса, Каскелен, Алматинская обл., Казахстан) корневая система на богаре проникала до глубины 2,42 м. В настоящее время интенсивно ведутся ра-

боты по селекционному управлению глубиной залегания и формой корневых систем, начиная с фазы проростков (14).

Как было указано выше, большое значение имеет дробное внесение удобрений. В эксперименте В.В. Кузнецова и Г.А. Дмитриевой (13) одну и ту же небольшую дозу удобрений ($N_{30}P_{45}K_{45}$) вносили под яровую пшеницу двумя способами — при вспашке почвы полностью либо частично при вспашке ($N_{15}P_{30}K_{30}$) и частично в рядки при посеве ($N_{15}P_{15}K_{15}$). Во втором варианте уже в фазу кущения общая и активная поглощающая поверхность корней увеличилась в 1,5 раза, и в итоге урожай зерна возрос в 1,5 раза (13, с. 424).

Существуют реальные возможности повышать эффективность аттракции не только селекционными методами, результативность которых такова, что, как отмечают В.В. Кузнецов и Г.А. Дмитриева, достигнутое перераспределение ассимилятов (усиление аттракции) позволило повысить долю зерна в общей массе сухого вещества у кукурузы — с 24 до 47 %, у риса — с 43 до 57 % (13, с. 334). По их данным, при технологическом воздействии на интенсивность аттракции с использованием гормональных обработок через 5 сут после опрыскивания томата 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислотой (2,4-Д) приток сахаров к цветкам увеличивался в 5 раз, азотистых веществ — более чем в 2 раза (13, с. 331). Авторы отмечают, что ассимиляты движутся туда, где содержится больше гормонов, поскольку именно гормоны создают аттрагирующие зоны, регулируют синтез АТФ и работу H^+ -помп (13, с. 331). Очень перспективны исследования по обработке колосьев кинетином перед фазой налива зерна для усиления аттракции. При аттракции возникает конкуренция за пластические вещества между колосом и листьями. Здоровые листья препятствуют оттоку ассимилятов в колос. В.Ф. Альтергот (г. Новосибирск) предложил обрабатывать с самолетов поля в фазу начала налива зерна сеникатами — дешевыми минеральными солями, ускоряющими старение листьев. При сеникации ослабленные листья легче отдавали колосу запасы пластических веществ, и урожайность повышалась на 4–5 ц/га. Этот авиатехнологический прием широко применялся на полях в Сибири в 1960–1970-е годы, пока не были созданы сорта (в том числе вышедшие из программы ДИАС) с генетически усиленной аттракцией колоса.

Перспективы развития селекционных технологий и их возможный вклад в повышение урожаев. Как отмечал S. Vogojević, урожаи, которые ранее считались рекордными, через 20 лет стали средними. Известно, что в результате селекции урожайность сортов мягкой озимой пшеницы на Кубани с 1930-х годов увеличилась на 44,9 ц/га, или на 218,8 % (15). По сообщению Л.А. Беспаловой, сорта озимой пшеницы, созданные в Краснодарском НИИ сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский НИИСХ), в 2013 году иногда достигали урожайности 130 ц/га (на фоне базовых технологий). По информации руководителя Тюменского селекционного центра В.В. Новохатина (персональное сообщение, 2014 год) недавно созданный сорт яровой пшеницы Икар в течение 6 последних лет на площади несколько тысяч гектаров имел урожайность в среднем 45 ц/га, по удобренному пару — до 75 ц/га (при базовых технологиях); сорт тритикале Тюменский зернокормовой (автор В.В. Новохатин) в настоящее время в Тюменской области имеет урожайность до 120 ц/га.

В системе Госсортосети СССР был уникальный Пржевальский сортоучасток (на восточной оконечности озера Иссык-Куль в Киргизии). Там на поливе у всех яровых сортов пшеницы из Западной Сибири уро-

жайность всегда составляла 80-90 ц/га, что свидетельствовало о вполне нормальных системах фотосинтеза, дыхания, энергообмена и всех процессов онтогенеза. В Сибири эти же сорта давали 11-18 ц/га, что однозначно указывало на их слабую устойчивость к типичной сибирской весенне-летней засухе, снижающей число зерен в колосе, и на фоне осенних холодов, уменьшающих массу 1000 зерен. Сегодня в РФ главные лим-факторы, ограничивающие урожаи зерновых культур — засухи разных типов (16).

Генетико-селекционные попытки повысить засухоустойчивость зерновых уже много лет не приводят к серьезным результатам только потому, что засухоустойчивость — очень сложное многокомпонентное свойство, формируемое более чем 20 признаками, из которых каждый определяется десятками и даже сотнями генов. Найти «большой» менделевский ген, радикально повышающий засухоустойчивость, практически невозможно. Для генетического усиления засухоустойчивости нужны другие подходы на основе экологической генетики количественных признаков. Большинство современных традиционных и молекулярных генетиков, как правило, работают в рамках геноцентрической парадигмы, то есть продолжают искать специфические гены засухоустойчивости, что вряд ли перспективно. В то же время уже существуют более адекватные системные подходы к повышению засухоустойчивости (17). Слабая генетическая засухоустойчивость современных сортов зерновых приводит к ежегодному убытку для экономики Российской Федерации в размере 5-7 млрд руб.

Анализ уникальных селекционных достижений. Рассмотрим механизмы получения уникальных селекционных результатов с позиций анализа семи вышеуказанных генетико-физиологических систем.

Так, В.С. Пустовойт повысил выход масла у подсолнечника с 20 до 55 %, что стало не только выдающимся отечественным, но и мировым селекционным достижением. Механизмы такого революционного успеха были тщательно изучены А.Б. Дьяковым и В.А. Драгавцевым (18). На первых этапах работы В.С. Пустовойт с помощью специального прибора, приобретенного в США, определял у разных сортов процентное содержание масла на единицу массы ядра семянки. Он не нашел селекционно значимого генетического разнообразия по этим признакам и даже усомнился в возможности повысить выход масла посредством селекции. Тогда еще не было известно, что у диких форм (как и у культурных сортов) содержание масла в расчете на клетку ядра семянки одинаковое (если в клетке количество масла еще увеличить, она просто погибнет). Однако он обратил внимание на интересный факт гораздо большего выхода масла с 1 кг массы семян у тонколузжистых сортов по сравнению с толстолузжистыми («грызловыми»). В.С. Пустовойт понял, что при селекции на уменьшение толщины лузги семянки (это означало одревеснение лишь малого числа наружных слоев) внутренние слои лузги, оставаясь живыми, увеличивают число клеток в ядре семянки и, как следствие, повышается выход масла с корзинки (или с единицы площади плантации). Толщину лузги можно было ощущать языком, поэтому необходимость в использовании дорогих американских приборов отпала. Таким образом, уникальный селекционный результат был получен В.С. Пустовойтом в основном за счет системы МИК. Его сотрудники работали также с системой ИММ и смогли существенно повысить иммунитет сортов-популяций. При этом системы АТТР, АД, ЭФФ, ТОЛ и ОНТ генетически не улучшались (с ними никто не работал), что указывает на существенные перспективы дальнейшего селекционного совершенствования подсолнечника.

Лауреат Нобелевской премии мира американец Норман Борлауг

(Norman Ernest Borlaug), работавший в Мексике, совершил первую «зеленую революцию» на Земле (в основном, с пшеницей), создав низкорослые (короткостебельные) сорта, которые не полегали при высоких дозах азота и обилии влаги (поливной и приносимой субтропическими и тропическими дождями). Он использовал только «большие» менделевские гены короткостебельности (а иногда и карликовости), но он не работал с системами АТТР, МИК, АД, ИММ, ЭФФ, ТОЛ и ОНТ. Следовательно, имеются существенные перспективы второй «зеленой революции», причем не только для пшеницы, но и для других родов и видов сельскохозяйственных растений.

Известный ученый и селекционер П.П. Лукьяненко, приступив к работе в Краснодарском НИИ сельского хозяйства, тщательно изучил «узкие места» продукционного процесса у сортов озимой пшеницы Кубани. Как пишет Л.А. Беспалова (19), П.П. Лукьяненко провел основательный анализ факторов, лимитирующих урожай пшеницы на Кубани. Он первым понял, что причины низких урожаев озимой пшеницы — бурая ржавчина, полегаемость, недостаточная скороспелость и малая продуктивность колоса (добавим к этому слабую зимостойкость). Недостаточную скороспелость (налив зерна приходился на неблагоприятную июльскую жару) изменили, сместив генетически фазу налива на июнь. Отбор на зимостойкость проводили в специальных бетонных емкостях (корытах), поднятых над поверхностью почвы, чтобы в мягкие зимы корни промерзали сильнее, чем в почве. В сорта ввели менделевские гены устойчивости к ржавчинам. Так был создан сорт Безостая 1 — шедевр мировой селекции пшеницы. По урожайности он сразу превзошел все имеющиеся на Кубани озимые сорта на 10-15 ц/га. Очевидно, что П.П. Лукьяненко усовершенствовал системы АД, ИММ и ОНТ, однако системы АТТР, МИК, ЭФФ и ТОЛ в процессе создания сорта Безостая 1 не улучшались.

Следующее радикальное повышение урожайности озимой мягкой пшеницы на Кубани произошло в 1980-1990-е годы, когда Ю.М. Пучков и Л.А. Беспалова стали повышать толерантность к загущению (ТОЛ) селекционными методами. Если сорт Безостая 1 способен поддерживать на 1 м² около 200 колосьев, то у сортов Спартанка и Скифянка это уже соответственно 600 и 800 колосьев, у сорта Крошка (автор Л.А. Беспалова) — 1000 колосьев (превышение урожайности по сравнению с сортом Спартанка достигает 10 ц/га). Таким образом, генетическое улучшение только одной из семи систем (МИК — у подсолнечника, ТОЛ — у озимой пшеницы) может привести к радикальному повышению урожая.

Совершенствование селекционных и агротехнологий. В АФИ были созданы модели, позволяющие строго количественно описать вклады всех семи систем в повышение урожаев (20-22). На основе этих моделей предложены важные для успешной селекционной работы алгоритмы идентификации генотипов по фенотипам и оптимальный подбор родительских пар. Следующий шаг — создание специальных компьютерных программ для автоматической пошаговой реализации алгоритмов подбора родительских пар для скрещивания, прогнозирования трансгрессий (и эффектов гетерозиса) и алгоритмов точной идентификации генотипов (по компонентам продуктивности и урожая).

К 2013 году в АФИ завершилась разработка приоритетной теории эколого-генетической организации количественных признаков (ТЭГОКП) на базе открытия (1984 год) нового эпигенетического феномена — смены спектра и числа генов, детерминирующих любой компонентный признак продуктивности при смене фактора внешней среды (лим-фактора), тормозящего

рост растений. Из этой теории были выведены и экспериментально изучены 24 селекционно важных следствия и девять селекционных ноу-хау (23-25).

Еще в 1984 году впервые в мировой науке на огромном экспериментальном материале программы ДИАС были сделаны строгие расчеты возможного селекционного повышения урожая яровой пшеницы на территории от Урала (г. Красноуфимск) до Забайкалья (г. Иволгинск) (по параллели) и от г. Тюмени до г. Усть-Каменогорска (по меридиану) (26). Согласно математическим выкладкам, между восемью географическими точками пределы варьирования потенциала генетического повышения урожая (ПГПУ) относительно лучшего сорта в выборке из 15 сортов и 225 гибридов — 21-60 % (в среднем 41 %). Количественно ПГПУ составляет в среднем 8,5 ц/га при средней урожайности по всей зоне исследований 21 ц/га. Быстро реализовать этот потенциал можно только в селекционном фитотроне, моделируя типичную динамику различных лим-факторов для любого региона, подбирая родителей по приоритетным алгоритмам АФИ и применяя сверхточные методы идентификации генотипов по фенотипам.

Однако описанные примеры (поиск и оценка типичных лет по динамике главных лим-факторов в данной географической точке селекции и точная идентификация генотипов по максимальному эффекту взаимодействия «генотип—среда» по компонентным и результирующим признакам продуктивности на фоне типичной динамики лим-факторов) — это только два из возможных подходов при эколого-генетическом повышении урожайности. Третье направление предполагает исключение влияния лим-факторов среды за счет задействованных в критические фазы онтогенеза систем АД к стрессорам. Этот рычаг способен поднять урожайность на 30-40 %. Наконец, четвертая возможность — преодоление влияния лимитов в суточной динамике физиологических процессов роста и развития. Только продление их активного состояния на 2 ч в сутки даст за 100 сут вегетации прибавку биомассы, равную таковой у более позднеспелого (на 9 сут) сорта, то есть около 20-30 %. Как известно, если один гибрид кукурузы созревает всего на 10 сут позже другого, то за этот период урожайность сухой биомассы у него может увеличиться в 2 раза по сравнению с той, которая была накоплена растениями этого гибрида к сроку созревания более раннеспелого. Суммарное возможное эколого-генетическое повышение урожайности для яровой пшеницы за счет четырех инновационных технологий селекции в экстремальной зоне Западной Сибири составляет 50-70 %, в европейской части РФ — 70-90 %. Повторим, что реализация этих задач должна базироваться на новых селекционных технологиях, важный элемент которых — применение селекционного фитотрона.

В настоящее время интенсивно развиваются работы по совершенствованию агро- и селекционных технологий по следующим направлениям: агрофизика, экологическая генетика количественных признаков продуктивности, физиология и биохимии растений, фенотипирование, генетика онтогенеза, генетические ресурсы растений и др. (27-35).

Таким образом, ранее нами были обнаружены семь генетико-физиологических систем (ГФС) — аттракции, микрораспределений аттрагированных пластических веществ, адаптивности, горизонтального иммунитета, оплаты сухой биомассой лим-фактора почвенного питания, толерантности к загущению и генетической вариабельности продолжительности фаз онтогенеза. Селекционеры и агротехники никогда осознанно не работали над улучшением каждой системы в отдельности, хотя именно такой подход может дать максимальные прибавки урожайности. Показано, что некоторые из систем могут быть улучшены на основе как агро-, так и

селекционных технологий, тогда как другая часть — только селекционными методами. Анализ позволил выявить те ГФС, которые усовершенствовали великие селекционеры, получившие выдающиеся результаты, а также понять, какие ГФС не были генетически улучшены и, следовательно, сохраняют потенциал для повышения урожая в будущем. Перспективным направлением может считаться воздействие гормонами на разные фазы онтогенеза для управления заглублением корневых систем, усилением аттракции и повышением устойчивости растений к стрессорам. Важно отметить, что рассмотренные агротехнологические и селекционные резервы роста урожайности зерновых культур должны органично дополнять друг друга, но ни в коем случае не противопоставляться: для реализации высокого генетического потенциала культуры, достигаемого селекционными методами, требуются усовершенствованные прецизионные агротехнологии, и наоборот, самые передовые технологические приемы могут не дать желаемого результата из-за ограниченного генетического потенциала сортов. Для объединения агротехнологического и селекционного резервов при решении задач агропромышленного комплекса требуется создание соответствующих агрофизических приборов и агрегатов, строительство селекционного фитотрона, разработка информационных технологий, средств математического моделирования и управления процессами формирования продуктивности и урожая.

Авторы благодарны профессору С.И. Малецкому (ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск) за ценные замечания при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков А.Б., Драгавцев В.А. Разнонаправленность сдвигов количественного признака индивидуального организма под влиянием генетических и средовых причин в двумерных системах признаковых координат. В сб.: Алгоритмы эколого-генетической инвентаризации генофонда и методы конструирования сортов сельскохозяйственных растений по урожайности, устойчивости и качеству (Методические рекомендации) /Под ред. В.А. Драгавцева. СПб, 1994: 22-47.
2. Chen D., Neumann K., Friedel S., Kilian B., Chen M., Altmann T. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell*, 2014, 26: 4636-4655 (doi: 10.1105/tpc.114.129601).
3. Fiorani F., Schurr U. Future scenarios for plant phenotyping. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2013, 64: 267-291 (doi: 10.1146/annurev-arplant-050312-120137).
4. Iyer-Pascuzzi A.S., Symonova O., Mileyko Y., Hao Y., Belcher H., Harer J., Weitz J.S., Benley P.N. Imaging and analysis platform for automatic phenotyping and trait ranking of plant root systems. *Plant Physiol.*, 2010, 152: 1148-1157 (doi: 10.1104/pp.109.150748).
5. Klukas C., Chen D., Pape J.M. Integrated analysis platform: an open-source information system for high-throughput plant phenotyping. *Plant Physiol.*, 2014, 165: 506-518 (doi: 10.1104/pp.113.233932).
6. Chen Y., Libberstedt T. Molecular basis of trait correlations. *Trends Plant Sci.*, 2010, 15: 454-461 (doi: 10.1016/j.tplants.2010.05.004).
7. Оценка сортов зерновых культур по адаптивности и другим полигенным системам /Под ред. В.А. Драгавцева. СПб, 2002.
8. Отбор носителей полигенных систем адаптивности и других, контролирующих продуктивность озимой пшеницы, ячменя, овса, в различных регионах России /Под ред. В.А. Драгавцева. СПб, 2005.
9. Vorojevic S. Can we develop varieties and races as we model them? *Proc. XIV Int. Congr. of Genetics*. Moscow, 1978.
10. Рунов Б., Пильникова Н. Основы технологий точного земледелия. СПб, 2012.
11. Михайленко И.М. Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования. *Экологические системы и приборы*, 2011, 8: 17-25.
12. Михайленко И.М. Устройство для дифференцированного внесения жидких ядохимикатов. Патент РФ 2415545 A01C 23/00. Агрофизический институт. Заявл. 10.05.2009. Оpubл. 10.04.2011. Бюл. № 5.

13. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М., 2011.
14. Berger V., Parent V., Tester M. High-throughput shoot imaging to study drought responses. *J. Exp. Bot.*, 2010, 61: 3519-3528 (doi: 10.1093/jxb/erq201).
15. Новиков А.В. Изменение уборочного индекса в процессе селекции и его влияние на урожайность пшеницы мягкой озимой. Автореф. канд. дис. Краснодар, 2012.
16. Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость, влияние на урожай. Л., 1958.
17. Sellammal R., Robin S., Raveendran M. Association and heritability studies for drought resistance under varied moisture stress regimes in backcross inbred population of rice. *Rice Sci.*, 2014, 21: 150-161 (doi: 10.1016/S1672-6308(13)60177-8).
18. Драгавцев В.А., Дьяков А.Б. Теория селекционной идентификации генотипов растений по фенотипам на ранних этапах селекции. *Фенетика популяций*. М., 1982: 30-37.
19. Беспалова Л.А., Колесников Ф.А., Пучков Ю.М., Тимофеев В.Б., Фоменко Н.П., Кудряшов И.Н., Костин В.В., Набоков Г.Д. Достижения отдела селекции и семеноводства пшеницы и тритикале к 100-летию академика П.П. Лукьяненко. В сб.: Пшеница и тритикале: материалы научно-практической конференции «Зеленая революция» П.П. Лукьяненко». Краснодар, 2001: 13-27.
20. Михайленко И.М., Драгавцев В.А. Основные принципы моделирования систем взаимодействия «генотип—среда». *Сельскохозяйственная биология*, 2010, 3: 26-35.
21. Михайленко И.М., Драгавцев В.А. Математические модели в селекции растений. Сообщение I. Теоретические основы идентификации генотипов по их фенотипам при отборе в расщепляющихся поколениях. *Сельскохозяйственная биология*, 2013, 1: 26-34 (doi: 10.15389/agrobiology.2013.1.26rus, doi: 10.15389/agrobiology.2013.1.26eng).
22. Михайленко И.М., Драгавцев В.А. Математические модели в селекции растений. Сообщение II. Алгоритмы управления генетико-селекционным улучшением хозяйственно-ценных свойств самоопылителей. *Сельскохозяйственная биология*, 2013, 1: 35-41 (doi: 10.15389/agrobiology.2013.1.35rus, doi: 10.15389/agrobiology.2013.1.35eng).
23. Кочерина Н.В., Драгавцев В.А. Введение в теорию эколого-генетической организации полигенных признаков и теорию селекционных индексов. СПб, 2008.
24. Драгавцев В.А. Уроки эволюции генетики растений. *Биосфера*, 2012, 4(3): 251-262.
25. Драгавцев В.А. Как помочь накормить человечество. *Биосфера*, 2013, 5(3): 279-290.
26. Драгавцев В.А., Цильке Р.А., Рейтер Б.Г., Воробьев В.А., Дубровская А.Г., Коробейников Н.И., Новохатин В.В., Максименко В.П., Бабакишиев А.Г., Илющенко В.Г., Калашник Н.А., Зуйков Ю.П., Федотов А.М. Генетика признаков продуктивности яровых пшениц в Западной Сибири. Новосибирск, 1984: 196-199.
27. Kurtener D.A., Komarov A.A., Krueger E.D., Lavrikov M.Yu., Nayda N.M. Fuzzy multi-attributive analyses of organic-mineral fertilizer Stimulayf and Humate Sodium: application for cultivation of *Dracocephalum* L. *European Agrophysical Journal*, 2014, 1(1): 14-24.
28. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Krueger D.A., Bondarenko A.S. Seed assessment using fuzzy logic and gas discharge visualization data. *European Agrophysical Journal*, 2014, 1(4): 124-133.
29. Tsegaye B., Berg T. Genetic erosion of ethiopian tetraploid wheat landraces in Eastern Sheva, Central Ethiopia. *Gen. Res. Crop Evol.*, 2007, 54: 715-726 (doi: 10.1007/s10722-006-0016-2).
30. Cabrera J., Perron-Welch F., Rukundo O. Overview of national and regional measures on access to genetic resources and benefit-sharing: challenges and opportunities in implementing the Nagoya Protocol (first edition). Montreal, Centre for International Sustainable Development Law, 2011.
31. Kurtener D.A., Yakushev V.P. Utilization of fuzzy computing in agrophysics (review). *European Agrophysical Journal*, 2014, 1(2): 63-78.
32. Torbert H.A., Ingra J.T., Prior S.A. High residue conservation tillage system for cotton production: a farmer's perspective. *European Agrophysical Journal*, 2015, 2(1): 1-14.
33. Esquinas-Alcazar J., Hilmi A., Lopez-Noriega I. A brief history of the negotiations of the International treaty on plant genetic resources for food and agriculture. In: *Crop genetic resources as a global commons: challenges in international governance and low /M. Hallowood, I.L. Noriega, S. Louafi (eds.)*. London, Earthscan, 2013.
34. Nartov V.P., Dragavtsev V.A. Application of thermal imaging in agriculture and forestry. *European Agrophysical Journal*, 2015, 2(1): 15-20.
35. Plant genetic resources and food security: stakeholder perspectives on the International treaty on plant genetic resources for food and agriculture /E. Frison, F. Lopez, J.T. Esquinas-Alcazar (eds.). London-NY, 2011.

ФГБНУ Агрофизический институт,
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: yakushev@agrophys.ru, ilya.mihailenko@yandex.ru,
dravial@mail.ru

Поступила в редакцию
26 апреля 2015 года

RESERVES OF AGRO-TECHNOLOGIES AND BREEDING FOR CEREAL YIELD INCREASING IN THE RUSSIAN FEDERATION

V.P. Yakushev, I.M. Mikhailenko, V.A. Dragavtsev

Agrophysical Research Institute, Federal Agency of Scientific Organizations, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail yakushev@agrophys.ru, ilya.mikhailenko@yandex.ru, dravial@mail.ru

Acknowledgements:

The authors thank Professor Dr S.I. Maletskii (The Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Novosibirsk) for valuable comments during writing the article.

Received April 26, 2015

doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.550eng

Abstract

The authors consider new approaches to cereal yield increasing by relevant agro-technologies and breeding methods. Earlier it was shown that the yield of agrophytocenosis is determined by seven genetic and physiological systems, the GPS (A.B. Dyakov and V.A. Dragavtsev, 1994), the breeders are de facto faced to increase the crop yield. There was the first genotyping of each GPS of productivity which showed the ways to optimal strategy of yield management via GPS. In this paper for the first time it is shown that effect of some systems can be increased both by agro-technological and breeding methods. In the future the agro-technologies should be improved by the development of precise agriculture. In this, it is necessary to provide i) monitoring of phytocenoses, ii) indication of limiting factors for each stage of ontogenesis which impact the traits starting their development, iii) development of new agro-methods precisely influencing the phytocenosis by biologicals which can level the negative effects of specific limiting factors. In other words, «phase-specific agro-technologies» must be developed to protect sensitive phases of plant ontogenesis. To obtain maximal effect from precise breeding technologies, it is necessary to create mathematic models allowing to estimate quantitatively how each GPS contributes to yield increasing at each stage of ontogenesis. Moreover, these models should be further used both in classical field breeding and, most effectively, in special phytotron where the dynamics of environment limiting factors typical for the territory of interest can be simulated. On the base of first created models the important quantitative algorithms for breeders were suggested which provide rapid identification of individual genotypes by their phenotypes and optimal selection of the parents to predict and obtain the transgressions (for self-pollinated plants). In this paper it is shown that, though certain GPSs can be improved both by agro-technologies and breeding, there are some traits which can be changed only by breeding. Analysis of unique breeding results of V.S. Pustovoyt, P.P. Lukyanenko and Norman E. Borlaug showed the GPSs improved by these great breeders and those ones unimproved. Breeding and agro-technology programs for each GPS must result in further yield increase. The paper summarizes the perspectiveness of hormones used during different phases of ontogenesis to deepen roots into soil, to increase attraction and to improve stress tolerance. Agro-technologies and breeding technologies must work together, because the high genetic potential of newly bred varieties can not be realized with improper agro-technology, and, in contrary, the best agro-technology will be limited by low potency of the variety. Modern agro-physical equipment (in particular, special phytotron accelerating breeding process), IT-technologies, mathematical modeling used to control crop yields are the main factors for optimal teamwork of agro-technologists and breeders with the view of effective agriculture in Russia.

Keywords: agro-technologies, breeding, reserves of cereal yield increase in Russia.

Научные собрания

«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БИОЛОГИИ РАСТЕНИЙ» (научная конференция, посвященная 125-летию Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН — ИФР РАН)
(23-27 ноября 2015 года, г. Москва)

Организаторы: ИФР РАН, Общество физиологов растений России, Научный совет по физиологии растений и фотосинтезу РАН

Тематика:

- Регуляция экспрессии генома и трансдукция сигналов в процессах клеточной дифференцировки и онтогенеза растений
- Физиология, биохимия и экология фотосинтеза, дыхания и фиксации азота как теоретическая основа продукционного процесса
- Молекулярные и физиологические основы адаптации растений в связи с экологическими стрессами и глобальными биосферными явлениями
- Биология фототрофных и гетеротрофных клеток растений как основа развития инновационных биотехнологий

Контакты и информация: ipp125anniversary@gmail.com, <http://www.ofr.su/ifr125>