

Адаптивная способность сельскохозяйственных растений в экстремальных условиях Северного Зауралья

Нина А. Боме¹✉, Наталья Н. Колоколова¹,
Лариса И. Вайсфельд², Александр Я. Боме³

¹Тюменский государственный университет – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования, г. Тюмень, Россия, e-mail: bomena@mail.ru; campanella2004@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-5467-6538; ORCID ID 0000-0002-9221-318X

²Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, г. Москва, Россия, e-mail: liv11@yandex.ru; ORCID ID 000000002-8449-3679

³Оптовая продажа плодоовощной продукции Ltd, г. Элгин, Канада, e-mail: alex_bol@aol.com

✉ bomena@mail.ru

Реферат.

Цель. Статья направлена на анализ и обобщение научной информации по вопросам биоразнообразия культурных растений в почвенно-климатических условиях Северного Зауралья. Исследования предназначены для выявления максимального потенциала сельскохозяйственных культур, изучения закономерностей взаимодействия «генотип×среда», как важнейшего проявления эффекта адаптации, создания мутантных и гибридных форм на основе генетико-биотехнологических методов. Материалы могут представлять интерес для обсуждения новых подходов к проблеме продовольственной безопасности. **Материалы и методы.** Эксперименты в моделируемых условиях выполнены в лаборатории биотехнологических и микробиологических исследований Института биологии Тюменского государственного университета (ТюмГУ). Полевые испытания проведены на экспериментальном полигоне биостанции ТюмГУ «Озеро Кучак» для изучения генетического разнообразия культурных растений и на экспериментальном участке Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения РАН. Закладка опытов, учеты, наблюдения

проведены по классическим методикам государственного сортоиспытания Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР) и Международным классификаторам СЭВ для различных родов растений. **Результаты и обсуждение.** Описаны абиотические и биотические факторы, влияющие на структурно-функциональное состояние культурных растений *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., *Linum usitatissimum* L. Представлены данные о реализации потенциала генотипа через проявление селекционно-ценных признаков растений на фенотипическом уровне. Сорты, коллекционные образцы, мутанты и гибриды, зарекомендовавшие себя в процессе комплексных оценок в моделированных условиях лаборатории и полевом испытании, могут быть включены в селекционные программы в качестве источников и доноров ценных признаков. Перспективность интродукции *Glycine max* (L.) Merr.) и *Linum usitatissimum* L. в условиях юга Тюменской области определяется поиском сортов, максимально приспособленных к лимитирующим факторам (температурный режим, фотопериод). Рассматривается эффективность предпосевной обработки семян яровой пшеницы наночастицами серебра, кремния и биопрепаратов как способ защиты растений от воздействия фитопатогенных грибов. **Выводы.** Выявлен широкий спектр изменчивости морфологических, физиологических, биохимических и генетических признаков культурных растений, выращиваемых в Северном Зауралье. Использование экспресс-диагностики хлорофилла в листьях с помощью прибора SPAD 502 дало возможность получить новую информацию о физиологическом статусе растений в меняющихся условиях окружающей среды. Показана роль мутационной и рекомбинационной изменчивости в увеличении генетического разнообразия растений.

Ключевые слова: генетические ресурсы, стресс-факторы, химический мутагенез, нанотехнологии, изменчивость.

Адаптивна спроможність сільськогосподарських рослин в екстремальних умовах Північного Зауралля

Ніна О. Боме¹✉, Наталія М. Колоколова¹,
Лариса І. Вайсфельд², Олександр Я. Боме³

¹Тюменський державний університет – Федеральна державна автономна освітня установа вищої освіти, м. Тюмень, Росія, e-mail: bomena@mail.ru;
campanella2004@mail.ru

ORCID ID 0000-0002-5467-6538; ORCID ID 0000-0002-9221-318X

²Інститут біохімічної фізики РАН ім. М. М. Емануеля, м. Москва, Росія,
e-mail: liv11@yandex.ru; ORCID ID 000000002-8449-3679

³Оптовий продаж плодоовочевої продукції Ltd, м. Елгін, Канада,
✉ bomena@mail.ru

Реферат.

Мета. Стаття спрямована на аналіз і узагальнення наукової інформації з питань біорізноманіття культурних рослин у ґрунтово-кліматичних умовах Північного Зауралля. Дослідження призначені для виявлення максимального потенціалу сільськогосподарських культур, вивчення закономірностей взаємодії «генотип×середовище», як найважливішого прояву ефекту адаптації, створення мутантних і гібридних форм на основі генетико-біотехнологічних методів. Матеріали можуть представляти інтерес для обговорення нових підходів до проблеми продовольчої безпеки. **Матеріали і методи.** Експерименти в модельованих умовах виконані в лабораторії біотехнологічних і мікробіологічних досліджень Інституту біології Тюменського державного університету (ТюмДУ). Польові випробування проведені на експериментальному полігоні біостанції ТюмДУ «Озеро Кучак» для вивчення генетичного різноманіття культурних рослин і на експериментальній ділянці Тобольської комплексної наукової станції Уральського відділення РАН. Закладка дослідів, обліки, спостереження проведено за класичними методиками державного сортовипробування Всеросійського інституту генетичних ресурсів рослин ім. М. І. Вавилова (ВІР) та Міжнародними класифікаторами РЕВ для різних родів рослин. **Результати та обговорення.** Описані абіотичні й біотичні чинники, що впливають на структурно-функціональний стан культурних рослин *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., *Linum ussitatissimum* L. Представлені дані щодо реалізації потенціалу генотипу через прояв селекційно-цінних ознак рослин на фенотипному рівні. Сорти, колекційні зразки, мутанти і гібриди,

що зарекомендували себе в процесі комплексних оцінок у модельованих умовах лабораторії і польовому випробуванні, можуть бути включені в селекційні програми як джерела і донори цінних ознак. Перспективність інтродукції *Glycine max* (L.) Merr.) і *Linum usitatissimum* L. в умовах півдня Тюменської області визначається пошуком сортів, максимально пристосованих до лімітувальних чинників регіону (температурний режим, фотоперіод). Розглядається ефективність передпосівної обробки насіння пшениці ярої наночастками срібла, кремнію і біопрепаратів як способу захисту рослин від впливу фітопатогенних грибів. **Висновки.** Виявлено широкий спектр мінливості морфологічних, фізіологічних, біохімічних і генетичних ознак культурних рослин, вирощуваних у Північному Заураллі. Використання експрес-діагностики хлорофілу в листі за допомогою приладу SPAD 502 дало можливість отримати нову інформацію про фізіологічний статус рослин у мінливих умовах довкілля. Показана роль мутаційної і рекомбінаційної мінливості в збільшенні генетичного різноманіття рослин.

Ключові слова: генетичні ресурси, стрес-фактори, хімічний мутагенез, нанотехнології, мінливість.

Adaptive ability of agricultural plants in extreme conditions of the Northern Trans-Urals

Nina A. Bome^{1✉}, Natalya N. Kolokolova¹, Larisa I. Weisfeld², Alex Ja. Bome³

¹Tyumen State University – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, Tyumen, Russia,

e-mail: bomena@mail.ru; campanella2004@mail.ru

ORCID ID 0000-0002-5467-6538; ORCID ID 0000-0002-9221-318X

²Emanuel Institute of Biochemical Physics, RAS, Moscow, Russia

e-mail: liv11@yandex.ru; ORCID ID 000000002-8449-3679

³Exeter Produce & Storage Co Ltd, Elgin, ON, Canada, e-mail: alex_bo1@aol.com

✉ bomena@mail.ru

Abstract.

Aim. The article aims to analyze and summarize scientific data on the biodiversity of cultivated plants in the soil and climatic conditions of the Northern Trans-Urals. The research is developed to identify the maximum potential of crops, study the patterns of interaction between “genotype×environment” as the most

important manifestation of the adaptation effect, and create mutant and hybrid forms based on genetic and biotechnological methods. The materials may be of interest in discussing new approaches to food security. **Methods.** Experiments under simulated conditions were performed in the laboratory of biotechnological and microbiological research of the Institute of Biology of Tyumen State University (TSU). Field tests were conducted at the experimental site of the Biological Station of TSU “Lake Kuchak” to study the genetic diversity of cultivated plants and at the experimental site of the Tobolsk scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Laying of experiments, accounting, and observation had been carried out according to the classical methods of State Variety Trials of the Vavilov Institute of Plant Industry (VIR) and the CMEA International Classifiers for various plant genera. **Results.** Abiotic and biotic factors influencing the structural and functional state of cultivated plants *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., *Linum usitatissimum* L. had been analyzed. The data on the potential implementation of the genotype through selectively valuable characteristics of plants at the phenotypic level had been presented. An assessment of fusarium resistance was carried out in 22 cultivars of spring bread wheat grown in the Northern Trans-Urals. Cultivars, collection specimens, mutants and hybrids that had proven themselves in the process of comprehensive assessments in simulated laboratory conditions and field trials could be included in breeding programs as sources and donors of valuable traits. The prospect of the introduction of *Glycine max* (L.) Merr.) and *Linum usitatissimum* L. in the South of the Tyumen region is determined by the search of cultivars for most adapted to the limiting factors (temperature mode and photoperiod). The efficiency of pre-sowing treatment of spring wheat seeds with nanoparticles of silver, silicon and biological products was considered as a method of protecting plants from the effects of phytopathogenic fungi. **Conclusions.** A wide variability range of morphological, physiological, biochemical and genetic characters of plants in the Northern Trans-Urals was revealed. The use of express diagnostics of chlorophyll in leaf cells using SPAD 502 device made it possible to obtain new information on the physiological status of plants under changing environmental conditions. The role of mutational and recombination variability for increasing the genetic diversity of plants was shown. A positive effect had been obtained from the pre-sowing treatment of seeds of spring soft wheat cultivars with silver nanoparticles to activate growth processes with the prospect of minimizing the use of chemical fertilizers.

Key words: genetic resources, stress factors, chemical mutagenesis, nanotechnology, variability.

Введение/Introduction. Северное Зауралье относится к одному из богатейших и уникальных ресурсов продовольственных, кормовых, лекарственных и технических растений. Однако низкий биоклиматический потенциал, развитие газо- и нефтедобывающего комплексов, индустриализация и урбанизация территорий существенно уменьшают способность растений к выживанию, воспроизведению и конкуренции, приводит к ослаблению потенциальных способностей видов, а иногда к их полному исчезновению. Совершенно очевидно, что нужно не только рациональное использование растительных ресурсов, но также сохранение и увеличение генетического разнообразия.

В настоящее время на кафедре ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры Института биологии Тюменского государственного университета проводится научно-исследовательская работа с использованием имеющихся структур: научная лаборатория биотехнологических и микробиологических исследований; гербарный и семенной фонды; низкотемпературное хранилище для биологических объектов (семена, растительные ткани, микроорганизмы и др.); интродукционный и испытательный экспериментальный участок (биостанция «Озеро Кучак») с полевым портативным оборудованием для изучения особенностей роста и развития растений (динамика формообразовательного процесса, фотосинтез, восприимчивость к фитопатогенам, устойчивость к абиотическим факторам и др.).

Материалы и методы/Materials and Methods. Биостанция Тюменского государственного университета была создана в 1993 году и расположена в Нижнетавдинском районе Тюменской области, в 50 км к северо-востоку от г. Тюмень на южном берегу озера Кучак [57°20' N, 66°03' E] (рис. 1).

На рубеже 19–20 столетий здесь был небольшой поселок Кучаково, в нем проживали русские и чуваша. В 30-е годы 20 века местный колхоз, объединивший несколько поселков Кучакско-Ипкульской озерной системы, стал заниматься промыслом рыбы. С начала 60-х годов на озере усилиями специалистов Сибирского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и Тюменского рыбокомбината было создано рыбноводное хозяйство, действовавшее до начала 90-х годов ("Lake Kuchak". Monograph. 2005).

Высота над уровнем моря 61 м. Климат резко-континентальный, характеризуется суровой зимой и коротким летним периодом. Территория умеренно-увлажненная, ГТК=1,2–1,3. Годовое количество осадков составляет 350–380 мм. Сумма положительных температур воздуха за период с температурой выше 10⁰С равна 1700–1900⁰С; продолжительность периода 114–123 суток. Отмечаются довольно частые засухи слабой и средней интенсивности (Bakulin & Kozin, 1996; Ivanenko & Kulyasova, 2008).

Изучение генетического разнообразия культурных растений и их диких сородичей началось на экспериментальном участке в 2006 году в рамках совместной научной программы Тюменского государственного университета и Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н. И. Вавилова (ВИР); в соответствии с решением Ученого Совета ТюмГУ от 27.03.2006 был организован Тюменский опорный пункт, Биостанция «Озеро Кучак», куратором которого был назначен А. Я. Боме. Исследования были поддержаны ректором Геннадием Филипповичем Куцевым.



А



Б

Рисунок 1. Расположение полигона для изучения генетических ресурсов растений, Тюменская область, Нижнетавдинский район: А – Расположение на карте, Б – Часть территории Биологической станции Тюменского государственного университета «Озеро Кучак», 2019 г., август (снято с дрона).

Figure 1. Location of the test site for the study of plant genetic resources, Tyumen region, Nizhnetavdinsk district: A – Location on the map, B – Part of the territory of the Biological Station of Tyumen State University “Lake Kuchak”, 2019, August (made by drone).

Почва участка окультуренная, дерново-подзолистая супесчаная. Кислотность в солевой вытяжке почвы близкая к нейтральной (рН – 6,6). Содержание гумуса 3,67%. Содержание биогенных веществ (мг/кг): NH_4^+ – 19,5±0,12; NO_2^- – 9,15±0,73; NO_3^- – 18,8±0,32; H_2PO_4^- и HPO_4^- – 433,3±34,51. Валовое содержание макро- и микроэлементов (мг/кг): Ca – 3362,33; Mg – 1125,37; Fe – 3553,51; Cu – 55,41; Zn – 402,52. Анализ почвенных проб проведён на базе лаборатории «Экотоксикология» Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения РАН.

В настоящее время экспериментальный участок на биостанции «Озеро Кучак» можно рассматривать как природный полигон (Experimental Polygon) для изучения экологической пластичности различных полевых культур и отбора форм с высоким адаптивным потенциалом, на котором студенты Института биологии в период учебных и производственных практик осваивают полевые и лабораторные методы исследования растительных и животных организмов.

Оценка генетических ресурсов растений включала систематический сбор данных по устойчивости к биотическим и абиотическим стресс-факторам, продуктивности и качеству урожая, выявление особенностей роста и развития растений (Dospekhov, 1985; Merezhko et al., 1999; Guide to the study ..., 2012).

Учёт и описание морфологических признаков и биологических свойств растений производится с использованием Международных классификаторов СЭВ, разработанных для разных родов растений (The international COMECON..., 1983, 1984a,b). Экспресс-оценку динамики накопления и деградации хлорофилла в листьях, выполняли с использованием оптического счетчика SPAD 502 Plus производства Minolta Camera Co, Ltd, Токио, Япония (рис. 2.).

Результаты и обсуждение/Results and Discussion. Генофонд семян Института биологии Тюменского государственного университета представлен образцами из мировой коллекции ВИРа, мутантными и гибридными формами, сортами, проходящими оценку на опытных полях государственных сортоиспытательных участков (ГСУ) Тюменской области. Коллекции включают более 2,5 тыс. образцов из 60 стран мира и 33 регионов Российской Федерации (яровая пшеница, озимая пшеница, ячмень, овес, горох, соя, лён, картофель, лекарственные растения, цветочно-декоративные растения).



Рисунок 2. Оптический счетчик SPAD-502 Plus

Figure 2. Chlorophyll Meter SPAD-502 Plus

Биоразнообразие и устойчивость растений к факторам окружающей среды в значительной степени определяется условиями выращивания, что особенно важно в контексте изменяющегося климата. Анализ погодных условий показал, что в сельскохозяйственной зоне Тюменской области из 25 вегетационных периодов (1993–2017 гг.) только 24% были близки к среднему многолетнему значению по количеству осадков и 48% – по среднесуточной температуре воздуха. В течение 10 лет вегетация растений проходила при недостатке влаги, из них 7 лет сопровождалась повышенной температурой воздуха. Теплообеспеченность в течение 11 лет превышала норму, 2 года были прохладными. Данные по показателям температуры воздуха и количеству осадков взяты с сайта "Погода и климат" URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/>.

В сложных, нередко экстремальных условиях Северного Зауралья практическую ценность приобретают формы культурных растений, обладающие способностью приспосабливаться к различным стрессам окружающей среды. Поэтому крайне важно изучение генетического потенциала видов и сортов растений и механизмов его реализации, а также познание генетической детерминации признаков и в первую очередь хозяйственно ценных. Понимание процессов адаптации растительного организма в теоретическом и прикладном значении позволяет более конструктивно создавать качественно новые формы растений с высокой устойчивостью к внешним неблагоприятным факторам и неизвестным ранее сочетанием желаемых признаков.

Увеличение генетического разнообразия растений необходимо для повышения устойчивости растениеводства при ухудшении условий окружающей среды и для обеспечения населения качественными и экологически безопасными продуктами питания. Эти задачи требуют быстрой оценки получаемых форм растений и обработки информации о биологии их развития. Традиционные морфометрические показатели, определяющие адаптивный потенциал генотипов, в наших исследованиях были дополнены экспресс-оценкой динамики накопления и деградации хлорофилла в листьях, способствовали выявлению существенных различий между 20 образцами льна по среднесуточному накоплению хлорофилла в листьях до фазы цветения и его деградации в фазах зеленой и ранней желтой спелости. Значительные преимущества по урожайности тресты и семян имели образцы с относительно быстрым увеличением показателей SPAD 502 в первой половине вегетации и равномерным снижением в период созревания семян (Korolev & Bome, 2018).

На образцах *Hordeum vulgare* L. и *Linum usitatissimum* L. показано, что определение содержания хлорофилла в листьях с помощью SPAD 502 может быть хорошим инструментом для отслеживания фотосинтетических изменений растений в ответ на солевой и водный стресс. Такой подход в отличие от

традиционных методов является менее трудоемким и более удобным для масштабных скрининговых исследований (Bome et al., 2020c).

Выявлена неоднозначная реакция генотипов ячменя на воздействие фитопатогенных грибов *Cochliobolus sativus* (S. Ito et Kurib.) Drechsler ex Dastur – возбудителей темно-бурой пятнистости ячменя. Методом абсорбционной спектроскопии («Spicole», длина волны 662, 644, 440 нм) на 102 коллекционных образцах было установлено, что концентрация хлорофиллов (*a* и *b*) в клетках пораженных листьев у образцов с очень низкой устойчивостью к темно-бурой пятнистости была достоверно меньше по сравнению с листьями без признаков поражения. В дальнейшем возможность использования содержания хлорофилла в листьях в качестве физиологического маркера была подтверждена результатами измерения пигмента с помощью SPAD 502 на 146 образцах ячменя.

Существенный вклад в решение проблемы вносят научно-исследовательские программы, основанные на партнерстве российских и зарубежных научных и образовательных центров. Изучение селекционно-ценных признаков сортов яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции выполняется совместно с Научно-производственным Центром зернового хозяйства им. А. И. Бараева (Казахстан), с целью открытия новых генотипов с повышенным потенциалом продуктивности и качества зерна.

Молекулярно-генетический анализ аллельного состава коллекционного фонда яровой мягкой пшеницы позволил выявить разнообразие генов НМВ-субъединиц высокомолекулярных глютеинов и предложить для селекции на качество зерна наиболее перспективные сорта. Спектры электрофореза глиадинов не изменяются в зависимости от условий окружающей среды и могут быть дополнением к молекулярным методам (Utebayev et al., 2019). Высокая частота аллелей глиадинов может быть связана с отбором генотипов с улучшенными признаками в условиях Северного Зауралья (Utebayev et al., 2019a). Для успешной селекции пшеницы огромное значение имеет подбор родительских пар, которые должны обладать комплексом необходимых хозяйственно-ценных признаков. По результатам комплексных анализов выделены сорта, стабильно формирующие качественное зерно и хлеб с высокой хлебопекарной оценкой. Установлены сильные положительные связи между содержанием белка в зерне и водопоглотительной способностью (ВПС) муки – 0,88Б а также ВПС с содержанием клейковины 0,83 (Utebayev, et al., 2020).

К снижению зерновой продуктивности пшеницы приводит заражение мучнистой росой (*Blumeria graminis* f.sp. *tritici*), при этом вредоносность заболевания значительно усиливается при поражении флагового листа. Сравнительное изучение растений, пораженных и непораженных (контроль)

мучнистой росой у сортов российской и казахстанской селекции показало, что на фенотипическом уровне реакция на воздействие фитопатогенных грибов проявилась в достоверном уменьшении длины флагового листа и количества хлорофилла в клетках. У сортов со слабой восприимчивостью зарегистрированы высокие показатели хлорофилла в листьях непораженных растений, влияние мучнистой росы было несущественным. У сортов, устойчивых к заболеванию, отмечено увеличение содержания белка в зерне.

Проводится оценка районированных и перспективных в Тюменской области сортов яровой мягкой пшеницы к воздействию фитопатогенных грибов рода *Fusarium*. В микрофлоре семян 15 сортов яровой мягкой пшеницы из четырех агроэкологических зон (таежная, подтаежная, северная лесостепная, южная лесостепная) были идентифицированы фитопатогенные грибы родов *Fusarium*, *Alternaria*, *Helminthosporium*. Среди возбудителей болезней семян преобладали грибы рода *Alternaria*.

Для развития вредоносных фитопатогенных грибов *Fusarium graminearum* Shwabe, *F. culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., *F. avenaceum* Sacc. наиболее благоприятными по влаго- и теплообеспеченности были условия в посевах яровой пшеницы Нижнетавдинского Государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) (подтаежная зона, доля пораженных семян 9,1%, степень поражения 2,7 балла). По результатам исследования выявлены сорта яровой мягкой пшеницы: без признаков поражения – Скэнт 3 (Омутинский, Ишимский, Аромашевский, Бердюжский ГСУ); со слабой восприимчивостью к болезням семян: фузариозу – Тобольская (Ялуторовский, Омутинский, Ишимский, Аромашевский ГСУ); альтернариозу – Казахстанская 10 (Омутинский, Ишимский, Бердюжский ГСУ), гельминтоспориозу – Авиада (Ялуторовский, Омутинский, Аромашевский, Нижнетавдинский ГСУ) (Fasylova et al., 2017).

Устойчивость сортов яровой мягкой пшеницы к фузариозу зерна исследуется в полевых условиях на Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения РАН (Тюменская область, Тобольский район) в условиях искусственного инфекционного фона. Идентификация патогенов проводится в лаборатории с использованием микроскопа Axiostar Plus («Karl Zeiss», Германия) и с возможностью фотосъемки объектов (рис. 3).

В полевых условиях на искусственном инфекционном фоне проведена оценка фузариозоустойчивости у 22 сортов яровой мягкой пшеницы, выращиваемых в Северном Зауралье. Выявлены связи фузариозоустойчивости с другими хозяйственно-ценными признаками, в том числе урожайностью и резистентностью к листовстемельным инфекциям. Материалы исследования представлены на 4-м съезде микологов (постер 13–18, Москва, 2017 г., Авторы: Боме Н. А., Колоколова Н. Н., Земцова Е. С.)



1



2



3



4



5

Рисунок 3. Эксперименты на Тобольской комплексной научной станции
1 – искусственный инфекционный фон в полевом питомнике; 2 – развитие болезни на колосе; 3 – микроскоп Аxiostar Plus («Karl Zeiss», Германия); 4, 5 – пораженные зерновки яровой мягкой пшеницы. (Фото: Земцовой Е.С.)

Figure 3. Experiments at the Tobolsk scientific station
1 – artificial infectious background in a field nursery; 2 – the development of the disease on the head; 3 – Axiostar Plus microscope (Karl Zeiss, Germany); 4, 5 – affected grains of spring bread wheat. (Photo: Zemtsova E.S.)

Для устойчивого и ресурсосберегающего сельского хозяйства решающее значение имеет расширение биоразнообразия бобовых культур. Соя (*Glycine max* (L.) Merrill) – одна из культур, которая при введении в полевой севооборот позволяет снизить количество минеральных азотных удобрений, а также может рассматриваться как источник азота в органическом земледелии.

Биологические особенности сои в агроэкологических условиях юга Тюменской области выявлены в совместных исследованиях ученых Института биологии ТюмГУ (Россия) и Университета прикладных наук (Оснабрюк,

Германия), выполненных в рамках Российско-германского экологического мега-проекта SASCHA «Устойчивое землепользование и стратегии адаптации к изменениям климата для Западной Сибири» (Kühling et al., 2018).

Растения сои нуждаются в специфических клубеньковых бактериях для биологической азотфиксации (BNF). При отсутствии бактерий в почве необходима предпосевная обработка семян отселектированными штаммами *Bradyrhizobium japonicum*, эффективность инокуляции подтверждена полевыми испытаниями в условиях России и Германии (Kühling et al., 2018) (рис. 4).



Контроль



Штамм 626 а

Рисунок 4. Образование клубеньков на корнях сои сорта СибНИИК 315 после инокуляции семян штаммами *Bradyrhizobium japonicum* (Биостанция «Озеро Кучак». Фото: Гальчинской Т. И.)

Figure 4. Formation of nodules on the roots of soybean cultivar SibNIİK 315 after inoculation of seeds with *Bradyrhizobium japonicum* strains (Biological station "Lake Kuchak". Photo: Galchinskaya T. I.)

Изменение содержания хлорофилла в клетках листьев по годам, экспериментальным участкам и сортам использовали как индикатор BNF и определяли с помощью прибора SPAD 502.

Содержание белка в зерне после инокуляции было выше, чем в контроле, без ущерба для урожайности.

Учитывая роль сорта в успешном внедрении культуры и возрастающий спрос на генетически немодифицированную сою в будущем, на экспериментальном полигоне проводится изучение агробиологических характеристик сортов, максимально приспособленных к контрастным, меняющимся во времени и пространстве почвенно-климатическим факторам.

На основании многолетних данных и многократных отборов выделен перспективный селекционный материал (Vome & Galchinskaya, 2016; Vome et al., 2020b). Вегетационный период сортов, устойчивых к холодному стрессу, можно существенно сократить за счет раннего срока посева (первая декада мая). Исследования осуществляются в партнерстве с научными центрами: Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии (Санкт-Петербург), Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Омск).

На основе многолетних исследований генетического разнообразия *Hordeum vulgare* L., *Linum ussitatisimum* L., *Triticum aestivum* L. в различных условиях выращивания с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) определена доля отдельных факторов в общей фенотипической изменчивости признаков. Установлена реакция 36 гибридных форм льна на абиотические факторы внешней среды, влияние которых наиболее ярко проявилось на признаках высоты растений, технической длины стебля и содержания волокна (Korolev & Vome, 2017).

Исследование 146 образцов ячменя, и четырех гибридов (F_4 , F_5) яровой пшеницы в трех экологических пунктах России и Германии показало, что значительная доля изменчивости полевой всхожести семян, биологической устойчивости и выживаемости растений обусловлена взаимодействием факторов «генотип×среда». Почвенно-климатические условия наибольшее влияние оказали на высоту и семенную продуктивность растения, генотип ячменя влиял на массу 1000 семян (Ripberger et al., 2016a,b; Tetyannikov, 2019; Korolev & Vome, 2017).

Климатические условия Тюменской области вполне благоприятны для обеспечения потенциально высокой урожайности голозёрного ячменя. В результате многолетних полевых испытаний относительно высокой урожайностью в сочетании с другими полезными признаками характеризовались образцы: С.І. 10975 (к-30624, var. *coeleste*) из Эфиопии, Liguleless (к-29894, Таджикистан, var. *himalayense*) и Schwarze Nackte Kraftborn (к-25788, var. *violaceum*) из Германии, относящиеся к подвиду многорядного ячменя, а также двурядный образец De printermpe (к-23491, var. *nudum*) по происхождению из Франции (Tetyannikov & Vome, 2020).

Теоретические и прикладные аспекты химического мутагенеза, разработанные И. А. Рапопортом, рассматриваются как один из инструментов увеличения генетического разнообразия и улучшения сельскохозяйственных растений.

В партнерстве с Институтом биохимической физики им. Н. М. Эмануэля для создания новых генотипов пшеницы, ячменя и льна проводятся

эксперименты с использованием нового химического мутагена фосфемид, полное название ди-(этиленимид)-пиримидил-2-амидофосфорная кислота. Синтез препарата фосфемид для наших исследований осуществлен в лаборатории физических и химических методов анализа на Химическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ) профессором Е. В. Бабаевым.

На основании лабораторных и полевых экспериментов определены оптимальные концентрации растворов мутагена для обработки семян. Выявлены различия по чувствительности к воздействию мутагена в первом поколении M_1 , частота и спектр мутаций во втором поколении M_2 . Для оценки биологического эффекта фосфемид использовали показатели полевой всхожести семян, биологической устойчивости растений, восприимчивости к фитопатогенным грибам, динамики накопления и деградации хлорофилла в листьях, биохимического состава зерна (Bome et al., 2017, 2019a,b; Weisfeld et al., 2019).

Для отбора форм растений ячменя с высоким качеством зерна ставилась задача проследить за изменениями крахмалосодержащих продуктов в зерне под влиянием химического мутагена фосфемид. Установлено, что мутантные популяции ячменя можно рассматривать как хорошую платформу для отбора генотипов начиная с M_3 , имеющих повышенное содержание амилозы, и рекомендовать их для практической селекции (Tetyannikov, 2019) (рис. 5).

На примере яровой мягкой пшеницы доказана возможность увеличения генетического разнообразия на основе мутационной и рекомбинационной изменчивости. Гибрид Сага×Скэнт 3 в географических пунктах Германии (Земля Баден-Вюртемберг, экспериментальный участок Вальдорфской школы и Земля Нижняя Саксония, опытная станция «Waldhof») и России (Тюменская область, биостанция «Озеро Кучак») был устойчив к поражению листовой ржавчиной и мучнистой росой. По отношению к мутагену гибрид по сравнению с сортами характеризовался меньшей чувствительностью в M_1 и большим числом и спектром измененных признаков в M_2 . Экологическое испытание новых генотипов растений в условиях, значительно различающихся по комплексу абиотических и биотических факторов, позволяет выявить формы растений с высокой адаптацией (Ripberger et al., 2016a,b).

Для повышения устойчивости современных систем растениеводства, обеспечения продовольственной безопасности, значительное внимание уделяется нанотехнологиям. Известно, что потенциал урожайности сорта изначально зависит от генотипа, но, продолжает оставаться актуальным поиск современных биологических технологий, направленных на его улучшение.

На сортах яровой мягкой пшеницы, выращиваемых в агроценозах Тюменской области, на экспериментальном участке биостанции «Озеро Кучак» изучается биологический эффект наносеребра (Vome et al., 2020), нанокремния (с дополнением микроэлементами), биопрепаратов (АФГ, АФГ-В, Бисолбисан, Бисолбифит, Экстрасол, Альбит, Цитогумат) и штаммов (бактерии родов *Bacillus simplex* 948 P-1 TS и *Bacillus megaterium* 312 TS) на семенах (предпосевная обработка) и на вегетирующих растениях (опрыскивание растворами разной концентрации).



Рисунок 5. Мутации колоса ячменя, индуцированные химическим мутагеном фосфемидом. Образцы: к-30453 var. erectum 1 – контроль, 2 – крупный колос, 3 – изменение строения колоса, 4 – ветвистость колоса; (к-22934), var. nigripallidum: 5 – контроль, 6 – крупный колос, 7 – изменение окраски колоса; (к-30630), var. sinicum: 8 – контроль; 9 – увеличение длины фурок («курчавый»); 10 – крупный колос; 11, 12 – изменение видовых признаков колоса: двурядный, остистый (11); многорядный, остистый (12). Фото Тетяникова Н. В.

Figure 5. Barley spike mutations induced by the chemical mutagen phosphemide
Sample k-30453 var. erectum 1 – control, 2 – large head, 3 – structural change,
4 – head branchiness;

Sample (k-22934), var. nigripallidum: 5 – control, 6 – large head,
7 – change in head coloration;

Sample (k-30630), var. sinicum: 8 – control; 9 – change in the length of the lobed, three-forked
appendages of the awns – furrows; 10 – large head; 11, 12 – change of species characteristics:
double-row, spinous (11); multi-row, prickly (12). Photo by N. V. Tetyannikov.

Для защиты от вредоносного воздействия фитопатогенных грибов семена пшеницы перед посевом обрабатывают химическими препаратами, что может быть небезопасно для окружающей среды и здоровья человека. Полученные нами данные дают основание считать, что применение на семенах нанопрепаратов способствует включению наночастиц в фотосинтетический метаболизм, оптимизации процессов потребления питательных веществ из почвы, что обеспечивает защиту растений от болезней.

Учитывая, что нанозлементы могут накапливаться в органах растений пшеницы, особенно в семенах, возникает риск, касающийся безопасности хлебобулочных продуктов. Диагностика технологических и хлебопекарных свойств зерна проводилась в лаборатории биохимии и технологии качества Научно-производственного центра зернового хозяйства им. А.И. Бараева (Казахстан) и лаборатории биотехнологических и микробиологических исследований Института биологии ТюмГУ.

По комплексу признаков исследовательская группа ученых оценивает продуктивные и адаптивные свойства различных видов, сортов, мутантных и гибридных форм культурных растений; определяет преимущество нанозлементов в технологическом процессе выращивания; отбирает пробы растений, семян и почвы для лабораторных анализов.

Генетические ресурсы растений рассматриваются как ценный потенциал для селекционных программ, так как лучшие формы из фонда несут гены устойчивости к стресс-факторам, болезням, гены повышения урожайности и качества продукции.

Анализ изменчивости признаков сортов различного географического диапазона под влиянием метеорологических факторов позволяет правильно использовать генетическое разнообразие растений, изучаемых на экспериментальном полигоне, и разработать стратегию их адаптации к климатическим изменениям.

Выводы/Conclusions. Выявлен широкий спектр изменчивости морфологических, физиологических, биохимических и генетических признаков культурных растений в Северном Зауралье. Использование экспресс-диагностики хлорофилла в клетках листьев с помощью SPAD 502 дало возможность получить новую информацию о физиологическом статусе растений в меняющихся условиях окружающей среды. Показана роль мутационной и рекомбинационной изменчивости в увеличении генетического разнообразия растений. Получен положительный эффект от предпосевной обработки семян сортов яровой мягкой пшеницы наночастицами серебра для активации ростовых процессов с перспективой минимизации использования химических удобрений.

Благодарности/Acknowledgement. В настоящее время исследования выполняются в рамках НИОКТР «Применение морфофизиологических, биохимических и генетических маркеров в оценке и создании новых форм сельскохозяйственных растений, устойчивых к экстремальным условиям Западной Сибири». Номер гос. регистрации 19-119062490013-4; Дата регистрации: 24/06/2019 (2019–2021гг.).

Список литературы/References

"Lake Kuchak". *The nature of the biological station of Tyumen State University "Lake Kuchak"*. Monograph. (2005). Editor I. S. Mukhachev. Tyumen: Tyumen State University Publishing House. 112 p. (in Russian).

Bakulin, V. V., & Kozin, V. V. (1996). *Geography of the Tyumen Region*. Textbook. Ekaterinburg. Central Ural Book Publishing House. 240 p. (in Russian).

Bome, N. A., & Galchinskaya, T. I. (2016). Cultivation of soybeans in the south of the Tyumen region. *Leguminous crops — a developing direction in Russia*. The First International Forum, July 19–22, 2016. Omsk. P. 28–31. (in Russian).

Bome, N. A., Bratenkova, V. A., Kolokolova, N. N., Martynov, A. A., & Weisfeld, L. I. (2020a). Phytoeffect on *Triticum aestivum* L. Cultivars Under the Influence of Silver Nanoparticles. *Bioantioxidant: Materials of the X International Conference dedicated to the 105th Anniversary of Academician N. M. Emanuel*. Moscow, September 29–October 2, 2020. Moscow: RUDN, P. 11–12. (in Russian).

Bome, N. A., Kolokolova, N. N., & Weisfeld, L. I. (2020b). Inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* seeds as a tool for soybean adaptation in agrocenoses of northern latitudes of Russia. Materials of the international forum: "Biotechnology: state and development prospects". October 28–30, 2020. Issue 18. Moscow: EXPO-BIOCHEM-TECHNOLOGIES LLC. P. 336–338. DOI: 10.37747/2312-640X-2020-18. (in Russian).

Bome, N. A., Korolev, K. P., Tetyannikov, N. V. & Kolokolova, N. N. (2020c). Diagnostics of plant abiotic stress by chlorophyll content in leaves. *Molecular, membrane and cellular foundations of the biosystems functioning*. Abstracts of the international scientific conference of the XIV Congress of the Belarusian public education of phytobiologists and biophysicists. Belarus, Minsk, June 17–19, 2020. Belarusian State University. Executive editor I. D. Volotovskiy. Minsk. BSU. P. 163. (in Russian).

Bome, N. A., Korolev, K. P., Tetyannikov, N. V., Weisfeld, L. I., & Kolokolova, N. N. (2019a). Creation of mutant populations of barley (*Hordeum vulgare* L.) and flax (*Linum usitatissimum* L.) induced by the chemical mutagen of the phosphemide. Current Challenges in Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology Proceedings of the Fifth International Scientific Conference PlantGen2019. P. 92–94. DOI: 10.18699/ICG-PlantGen2019-29.

Bome, N. A., Korolev, K. P., Tetyannikov, N. V., Weisfeld, L. I., & Kolokolova, N. N. (2019b). Mutagenic effect of phosphemide for induction of mutations of *Hordeum vulgare* L. and *Linum usitatissimum* L. *Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology (PlantGen2019)*. Abstracts. Eds. A. V. Kochetov & E. A. Salina; Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. P. 49. DOI: 10.18699/PlantGen2019-031.

Bome, N. A., Weisfeld, L. I., Babaev, E. V., Bome, A. Ya., & Kolokolova, N. N. (2017). Effect of phosphemide, chemical mutagen, for agrobiological characteristics of spring wheat *Triticum aestivum* L. *Agricultural biology*. Vol. 52, No. 3. P. 570–579. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.570eng.

Dospikhov, B. A. (1985). *Field experiment technique (with the basics of statistical processing of research results)*. Moscow: Agropromizdat. 351 p. (in Russian).

Fasylova, D. D., Bome, N. A., & Zemtsova, E. S. (2017). Study of microflora of seeds of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *History and methodology of physiological, biochemical and soil research*. Collection of scientific papers based on the materials of the scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the Department of Plant Physiology and Microorganisms, Perm State National University. Perm: PSNU. P. 34–36. (in Russian).

Guide to the study and conservation of the world collection of barley and oats (fourth edition, supplemented and revised) (2012). [Ed.: I. G. Loskutov]. GNU VIR of the Russian Agricultural Academy. 63 p. (in Russian).

Ivanenko, A. S., & Kulyasova, O. A. (2008). *Agroclimatic conditions of the Tyumen region*. Study guide. Tyumen State Agricultural Academy. 206 p. (in Russian).

Korolev, K. P., & Bome, N. A. (2017). Evaluation of the genotypes of fiber flax (*Linum usitatissimum* L.) for ecological adaptability and stability in the North-Eastern part of Belarus. *Agricultural biology*. Vol. 52. No. 3. P. 615–621. (in Russian).

Korolev, K. P., & Bome, N. A. (2018). On the use of morphophysiological markers in the study of intraspecific polymorphism of common flax (*Linum usitatissimum* L.). *Agricultural biology*. Vol. 53. No. 5. P. 927–937. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.5.927rus (in Russian).

Kühling, I., Hüsing, B., Bome, N., & Trautz D. (2018). Soybeans in high latitudes: effects of *Bradyrhizobium* inoculation in Northwest Germany and southern West Siberia. *Organic Agriculture*. Vol. 8. No 2. P. 159–171. DOI: 10.1007/s13165-017-0181-y.

Merezhko, A. F., Udachin, R. A., Zuev, V. E. & Filatenko, A. A. (1999). *Replenishment, conservation and study of the world collection of wheat, Aegilops and Triticale. Methodical instructions*. St. Petersburg: Vavilov Institute of Plant Industry. 82 p. (in Russian).

Ripberger, E. I., Bome, N. A., & Trautz, D. (2016a). Resistance to leaf phytopathogens of hybrid (F_4 , F_5) forms of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under various ecological and geographical conditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. Vol. 20. No. 5. P. 629–635. DOI: 10.18699/VJ16.184. (in Russian).

Ripberger, E. I., Bome, N. A., & Trautz, D. (2016b). Variation in the plant height of spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) hybrid forms under different ecological and geographical conditions. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. Vol. 6, No. 3. P. 258–263. DOI: 10.1134/S2079059716030102. (in Russian).

Tetyannikov, N. V. (2019). Ecological and biological features of the intraspecific diversity of *Hordeum vulgare* L. and its use for creating new forms. *Author's abstract. dis. candidate s.-kh. Sciences* (06.01.05 – Selection and seed production of agricultural plants). Moscow. 22 p. https://vstisp.org/vstisp/images/Avtoreferat_Tetyannikov.pdf. (in Russian).

Tetyannikov, N. V., & Bome, N. A. (2020). Sources of characters useful for breeding in hullless barley. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. Vol. 181. No. 3. P. 49–55. DOI: ORG/10.30901/2227-8834-2020-3-49-55. (in Russian).

The international COMECON list of descriptors for the genus Avena L. (1984) Leningrad: Vavilov Institute of Plant Industry. 41 p.

The international COMECON list of descriptors for the genus Hordeum L. (1983). Leningrad: Vavilov Institute of Plant Industry. 55 p.

The international COMECON list of descriptors for the genus Triticum L. (1984). Leningrad: Vavilov Institute of Plant Industry. 84 p.

Utebayev, M. U., Bome, N. A., Shelaeva, T. V., Kradetskaya, O. O., & Chilimova, I. V. (2020). Grain quality of spring soft wheat in the conditions of Northern Kazakhstan. *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. No. 2 (38). P. 99–111. (in Russian).

Utebayev, M. Yu., Bome, N. A., Dashkevich, S. M., & Fasylova, D. D. (2019a). Polymorphism within the cultivar Tyumenskaya 29 in the spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) under the conditions of the Northern Trans-Urals. *Biotechnology in plant growing, animal husbandry and agricultural microbiology*. Collection of abstracts of the XIX All-Russian Conference of Young Scientists dedicated to the memory of Academician of Russian Agricultural Academy of Sciences Georgy Sergeevich Muromtsev. Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Biotechnology". Moscow. P. 90–91. (in Russian).

Utebayev, M., Dashkevich, S., Bome, N. A., Bulatova, K., & Shavrukov, Yu. (2019b). Genetic diversity of gliadin-coding alleles in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from Northern Kazakhstan. *Peer J*. Vol. 2019. No. 7. P. e7082. DOI: 10.7717/peerj.7082.

Weisfeld, L. I., Bome, N. A., Korolev, K. P., Tetyannikov, N. V., & Shiryaev P. A. (2019). Application of the chemical mutagen phosphemide for the induction of diversity in plants. *Genetics and breeding in the current agrocomplex*. Materials of the All-Ukrainian Science and Practice Conference (June 26, 2019). [Eds.: O. O. Nepochatenko (Editor-in-Chief) et al.]. Uman. P. 10–13. (in Russian).