

ISSN 2500-2627

Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2023



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

www.sciencejournals.ru

Научно-теоретический журнал



Растениеводство, защита и биотехнология растений

- Е. Н. Баранова, И. А. Чабан, Е. М. Лазарева, Н. В. Кононенко, Л. Р. Богоутдинова, Л. В. Куренина, А. А. Гулевич, П. Н. Харченко, Е. А. Смирнова**
Отличия в реорганизации цитоскелета в клетках корней табака у исходного сорта и трансгенной линии с гиперэкспрессией *FeSOD1* при засолении 3
- С. А. Чуракова, Е. М. Лисицын, Г. А. Баталова**
Изменение организации работы фотосистемы II листьев овса под действием осмотического стресса 11
- В. И. Чернявских, Е. В. Думачева, Л. Д. Сайфутдинова, В. Г. Чмирев**
Оценка селекционных форм и сортов клевера гибридного различного географического происхождения в условиях Центрально-Черноземного региона 15
- А.С. Цыгуткин**
Элементный состав семян люпина белого 21

Земледелие и мелиорация

- Д.А. Иванов, М.В. Рублюк, Н.А. Хархардинов**
К вопросу об адаптивно-ландшафтном обустройстве заброшенных земель на основе результатов прогнозирования урожайности ячменя 27
- О. И. Горянин, Б. Ж. Джангабаев, Е. В. Щербинина, Л. В. Пронович**
Оптимизация технологических операций при возделывании полевых культур в засушливых условиях Поволжья 34
- А.А. Алферов, С.Н. Никитин, Л.С. Чернова, А.А. Завалин**
Эффективность применения азотных удобрений и биопрепаратов на яровой пшенице 39
- С.И. Лоскутов, Я.В. Пухальский, А.С. Митюков, Н.И. Воробьев, Р.И. Глушakov**
Влияние различных фракций ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на рост, развитие и качество продукции базилика (*Ocimum basilicum* L.), в сравнении с химическими удобрениями 43
- Н.Н. Дубенок, А.Е. Новиков, В.В. Алексеев, С.А. Васильев, В.П. Филиппов, П.А. Михеев**
Моделирование режимов возникновения «солевой каймы» при капельном орошении 49

Агрочвоведение и агроэкология

- Ю.В. Аксенова, В.С. Бойко, А.Ю. Тимохин**
Влияние продолжительности использования многолетних трав на плодородие орошаемой лугово-черноземной почвы омского Прииртышья 54

Зоотехния и ветеринария

- Т. Н. Хамируев, С. М. Дашинимаев, Б. З. Базарон**
Сопряженность хозяйственно-полезных признаков табунных лошадей (*Equus caballus*) забайкальской породы 60
- Ю.Л. Силюкова, Е.С. Федорова, О.И. Станишевская**
Изменение кинетических показателей и цитологических характеристик сперматозоидов петухов под влиянием технологических факторов 64
- И.Ю. Ездакова, О.В. Капустина, А.Г. Григорьев, В.М.Ковайкина**
Взаимосвязи между показателями естественных антител, общих иммуноглобулинов и иммунокомпетентных клеток крови овец в процессе поствакцинального иммунного ответа 69

Crop production, plant protection and biotechnology

- E.N. Baranova, I.A. Chaban, E.M. Lazareva, N.V. Kononenko, L.R. Bogoutdinova, L.V. Kurenina, A.A. Gulevich, P.N. Kharchenko, E.A. Smirnova**
Differences in cytoskeleton reorganization in tobacco root cells in the original samsun variety and a transgenic line with *FeSOD1* overexpression under salinity 3
- S. A. Churakova, E. M. Lisitsyn, G. A. Batalova**
Changes in organization of action of photosystem II in oat leaves under osmotic stress 11
- V. I. Cherniavskih, E. V. Dumacheva, L. D. Sajfutdinova, V. G. Chmirev**
Evaluation of breeding forms and varieties of hybrid clover of different geographical origin in the conditions of the Central Black earth region 15
- A.S. Tsygutkin**
Elemental composition of white lupine grain 21

Farming and Amelioration

- D.A. Ivanov, M.V. Rublyuk, N.A. Kharkhardinov**
On the issue of adaptive landscape development of useless lands based on the results of barley yield forecasting 27
- O. I. Goryanin, B. Zh. Dzhangabaev, E. V. Shcherbinina, L. V. Pronovich**
Optimization of technological operations in the cultivation of field crops in arid conditions of the Volga region 34
- A.A. Alferov, S.N. Nikitin, L.S. Chernova, A.A. Zavalin**
Efficiency of application of nitrogen fertilizers and biological products on spring wheat 39t
- S.I. Loskutov, J.V. Pukhalsky, A.S. Mityukov, N.I. Vorobyov, R.I. Glushakov**
Influence of various fractions of ultrafine humato-sapropel suspension on the growth, development and quality of basil (*Ocimum basilicum* L.) products in comparison with chemical fertilizers 43
- N.N. Dubenok, A.E. Novikov, V.V. Alekseev, S.A. Vasiliev, V.P. Filippov, P.A. Mikheev**
Simulation of the modes of appearance of «salt frame» during drip irrigation 49

Agro-soil science and agroecology

- Yu.V. Aksenova, V.S. Boiko, A.Yu. Timokhin**
Influence of perennial grasses usage duration on fertility of Irtysh meadow-black earth soil 54

Animal science and veterinary medicine

- T. N. Khamiruev, S. M. Dashinimaev, B. Z. Bazon**
Association of economically useful features of herd horses (*Equus caballus*) of the transbaikal breed 60
- Yu.L. Silyukova, E.S. Fedorova, O.I. Stanishevskaya**
Changes in kinetic parameters and cytological characteristics of rooster spermatozoa under the influence of technological factors. 64
- I.Yu. Ezbekova, O.V. Kapustina, A.G. Grigoriev, V.M. Kovaikina**
The relationship between the indicators of natural antibodies, total immunoglobulins and immunocompetent blood cells of sheep in the process of post-vaccination immune response 69

ОТЛИЧИЯ В РЕОРГАНИЗАЦИИ ЦИТОСКЕЛЕТА В КЛЕТКАХ КОРНЕЙ ТАБАКА У ИСХОДНОГО СОРТА И ТРАНСГЕННОЙ ЛИНИИ С ГИПЕРЕЭКСПРЕССИЕЙ *FeSOD1* ПРИ ЗАСОЛЕНИИ*

Е. Н. Баранова^{1,2,3}, И. А. Чабан¹, Е. М. Лазарева^{1,4}, Н. В. Кононенко¹, кандидаты биологических наук, Л. Р. Богоутдинова¹, Л. В. Куренина¹, кандидат биологических наук, А. А. Гулевич¹, П. Н. Харченко¹, Е. А. Смирнова^{1,4}, доктора биологических наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, 127434, Москва, ул. Тимирязевская, 42

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, 127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49

³Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук, 127276, Москва, ул. Ботаническая, 4

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские Горы 1, стр. 12
E-mail: greenpro2007@rambler.ru

*Цель исследования – изучить состояние и реакцию элементов цитоскелета (микротрубочек и актиновых филаментов) в клетках корней табака сорта Самсун и его трансгенной линии, экспрессирующей ген *FeSOD1* из *Arabidopsis thaliana* с лидерной последовательностью *rbcS* гороха для локализации продукта гена в хлоропластах, кодирующей Fe зависимую супероксиддисмутазу, конститутивно индуцирующую внутриклеточный окислительный стресс, путем увеличения пула H_2O_2 на продолжительное действие умеренных концентраций $NaCl$ и Na_2SO_4 . Основной гипотезой было выявление положительного защитного действия контролируемого постоянного окислительного стресса на стабильность наиболее чувствительной системы, обеспечивающей рост делением и рост растяжением (тубулиновый цитоскелет), и эффективный внутриклеточный транспорт и стабильность структур (система актиновых филаментов). Электронно-микроскопическая и иммуноцитологическая локализация микротрубочкового цитоскелета и актиновых филаментов с использованием антител к тубулину клон DM1a и актину клон 10-B3, выявленных при обработке вторыми антителами конъюгированными с Alexa-488, позволила установить признаки реорганизации и разборки сети актиновых филаментов при действии $NaCl$ и Na_2SO_4 , как у контрольных, так и у трансгенных растений. При этом у трансгенных растений отличия наблюдали и без воздействия, что свидетельствует об эффективности используемого метода для стимуляции защитного ответа. Состояние системы тубулинового цитоскелета и актиновых филаментов может быть индикатором устойчивости трансгенных по *FeSOD1* растений к засолению. Установлена связь реорганизации цитоскелета с вакуолизацией особенно при Na_2SO_4 .*

DIFFERENCES IN CYTOSKELETON REORGANIZATION IN TOBACCO ROOT CELLS IN THE ORIGINAL SAMSUN VARIETY AND A TRANSGENIC LINE WITH *FeSOD1* OVEREXPRESSION UNDER SALINITY

E. N. Baranova^{1,2,3}, I. A. Chaban¹, E. M. Lazareva^{1,4}, N. V. Kononenko¹, L. R. Bogoutdinova¹, L. V. Kurenina¹, A. A. Gulevich¹, P. N. Kharchenko¹, E. A. Smirnova^{1,4}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, 127434, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 42

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127434, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49

³N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4

⁴Lomonosov Moscow State University, 119234, Moscow, Leninskie Gory 1, str. 12
E-mail: greenpro2007@rambler.ru

*The aim of the study was to study the state and reaction of cytoskeletal elements – microtubules and actin filaments, in root cells of Samsun tobacco plants and its transgenic line expressing the *FeSOD1* gene from *Arabidopsis thaliana* with the pea *rbcS* leader sequence for the localization of the gene product in chloroplasts encoding Fe-dependent superoxide dismutase, constitutively inducing intracellular oxidative stress, by increasing the H_2O_2 pool for a long-term effect of moderate concentrations of $NaCl$ and Na_2SO_4 . The main hypothesis was to identify the positive protective effect of controlled constant oxidative stress on the stability of the most sensitive system that provides growth by division and growth by extension – the tubulin cytoskeleton and effective intracellular transport and structural stability – the actin filament system. Localization of the microtubule cytoskeleton and actin filaments using antibodies to tubulin clone DM1a and actin clone 10-B3 by transmission electron microscopy and immunocytologically, detected by treatment with the second antibodies conjugated with Alexa-488, made it possible to establish signs of reorganization and disassembly of the actin filament network under the action of $NaCl$ and Na_2SO_4 as in control and in transgenic plants. At the same time, in transgenic plants, differences can be noted even without exposure, which indicates the effectiveness of this method for stimulating a protective response. These data suggest that the state of the system of the tubulin cytoskeleton and actin filaments may be an indicator of the resistance of *FeSOD1* transgenic plants to salinity. A relationship has also been established between the reorganization of the cytoskeleton and vacuolization, especially with Na_2SO_4 .*

Ключевые слова: табак (*Nicotiana tabacum* L.), трансгенные растения, цитоскелет, микротрубочки, актиновые филаменты.

Key words: tobacco (*Nicotiana tabacum* L.), transgenic plants, cytoskeleton, microtubules, actin filaments

*работа выполнена по теме гос. заданий 0431–2022–0003 (ВНИИСБ РАН) и 122042700002–6 (ГБС РАН)

Цитоскелет – динамичная система, реагирующая на разные виды внешних воздействий и внутриклеточных сигналов путем регулируемой сборки и разборки, а также реорганизации полимеризованных структур. У растений он участвует в формировании устойчивости к абиотическим и биотическим стрессовым факторам. У высших растений цитоскелет представлен микротрубочками и актиновыми филаментами, которые обеспечивают процессы внутриклеточной подвижности и передачу внутриклеточных сигналов, отвечают за морфогенез клеток и тканей, контролируют локализацию и распределение органелл в цитоплазме, участвуют в делении и поляризованном росте клеток [1, 2].

Абиотическим фактором, который оказывает сильное негативное воздействие на урожайность сельскохозяйственных культур и качество почвы во всем мире считают засоление. Оно вызывает у растений стрессовую реакцию, ведущую к повышению уровня активных форм кислорода в клетках (АФК) и индукции окислительного стресса [3]. В нормальном физиологическом состоянии АФК – важные сигнальные молекулы, которые, в частности, участвуют в регуляции роста пыльцевых трубок, гаметогенезе и развитии зародыша, развитии корневых волосков, функциях устьиц, опосредуют ответ растений на гормональные стимулы [4]. Во время стрессов уровень АФК быстро возрастает, вызывая так называемый окислительный взрыв, а серьезные нарушения гомеостаза АФК и их избыточное образование могут индуцировать процессы клеточной гибели [5]. Система защиты растений от нарушений гомеостаза АФК включает в себя активацию и работу важных сигнальных молекул и молекулярных комплексов – различных дисмутаз, аскорбатпероксидаз и низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбат и глутатион). Представители семейства дисмутаз – супероксиддисмутазы FeSOD1, эволюционно консервативные ферменты, которые у высших растений преимущественно функционируют в хлоропластах и пластидах. FeSOD1 отвечает за удаление супероксида, образующегося во время фотосинтетического переноса электронов, так как катализирует быструю дисмутацию супероксида в пероксид водорода и таким образом, участвует в метаболизме активных форм кислорода [6]. Абиотические факторы вызывают у растений стрессовую реакцию, в ходе которой увеличивается уровень выработки в клетках разных вариантов АФК и, если антиоксидантная защита способна справиться с избыточной выработкой АФК, растения переходят в адаптированное к стрессу состояние. Если антиоксидантная защита недостаточно активна и клетки накапливают поврежденные молекулы и структуры, запускаются механизмы программируемой клеточной гибели. Одним из вариантов повышения устойчивости растений к действию стрессовых факторов и защиты от окислительного стресса считают экспрессию дополнительных генов белков, кодирующих компоненты антиоксидантной защиты. Например, продемонстрировано повышение устойчивости к окислительному стрессу у трансгенных растений с гиперэкспрессией чужеродных генов, кодирующих супероксиддисмутазы, аскорбат пероксидазу, каталазу [7]. Однако возникают вопросы, касающиеся влияния продуктов экспрессии чужеродных генов на структурно-функциональную организацию клеток и тканей таких трансгенных растений. Кроме того, неясно, есть ли какие-то морфофункциональные критерии, которые отличают реакцию клеток на стрессовые факторы у трансгенных растений более или менее устойчивых к действию этих факторов.

В связи с изложенным, цель исследования – изучить состояние динамичных клеточных структур –

микротрубочек и актиновых филаментов – в клетках корней табака сорта Самсун и его трансгенной линии, экспрессирующей ген *FeSOD1* и установить, отличается ли организация систем микротрубочек и актиновых филаментов у этих растений после продолжительного действия невысоких концентраций NaCl и Na₂SO₄.

Методика. Объектами исследования служили растения табака (*Nicotiana tabacum* L.) сорта Самсун, а также полученные и охарактеризованные независимые трансгенные растения, экспрессирующие ген *FeSOD1*, который кодирует цитоплазматическую Fe-зависимую супероксиддисмутазу из *Arabidopsis thaliana* L. Heynh. с сигнальной последовательностью гена *rbcs* гороха (*Pisum sativum* L.) для локализации продукта в пластидах [8]. Все растения ранее поддерживали в культуре *in vitro* в асептических условиях.

Как исходные растения сорта Самсун, выступавшие контролем, так и трансгенные подращивали *in vitro* на среде ½ MS с добавлением 2 % сахарозы, 0,2 мг/л 3-индолилмасляной кислоты и 0,7 % агар до появления зачатков корней. Схожие по размеру растения табака с развивающимися корнями примерно одинаковой величины 2...3 мм асептически пересаживали в пробирки с агаризованной питательной средой MS с добавлением NaCl или Na₂SO₄ в концентрациях 76,5 мМ и 96,2 мМ соответственно, что приводило к увеличению осмотического давления питательной среды до 400 кПа и создавало солевой стресс. Питательную среду без добавления NaCl или Na₂SO₄ использовали в качестве контроля. Культивирование осуществляли в условиях световой комнаты при температуре 23 °С, освещенности 3,0 клк и 16/8 ч (день/ночь) фотопериода. На 8 сутки культивирования растения извлекали из пробирок. Фрагменты корней (длиной до 0,6 см) отсекали острой бритвой и помещали в раствор фиксатора (4 °С). Растительный материал (фрагменты корней пробирочных растений) отмывали для удаления фиксатора и анализировали с использованием иммуноцитохимии, световой и трансмиссионной электронной микроскопии в соответствии с методикой. Концентрация NaCl и Na₂SO₄ и длительность воздействия (8 суток) были выбраны на основании результатов предыдущих исследований [9, 10].

Для цитологических исследований использовали по 30 растений дикого типа и трансгенной линии. Растения разделяли на три группы и подвергали действию изосмотических концентраций NaCl или Na₂SO₄. Затем 20 растений оставляли для культивирования на среде MS (по 10 растений каждого генотипа), по 20 растений помещали на среду MS 76,5 мМ NaCl и 96,2 мМ Na₂SO₄ соответственно (по 10 растений сорта Самсун и FeSOD1 трансгенной линии).

Иммуноцитохимия. Для выявления микротрубочек и актиновых филаментов использовали кончики корней длиной не более 5 мм. Фиксацию, приготовление препаратов мацерированных клеток корня и иммуноцитохимическое окрашивание осуществляли по методике, предложенной ранее [11]. В качестве первых антител использовали мышиние моноклональные антитела к тубулину клон DM1α (Merck, Германия) и к актину клон 10-B3 (Merck, Германия), в качестве вторых антител – козы антитела к IgG мыши, конъюгированные с Alexa-488 (Termo Fisher Scientific, США). Препараты анализировали и фотографировали с использованием микроскопа Axiovert 200 M (Zeiss, Германия) с объективом Neofluar X 100/1,24, эпифлуоресцентным освещением и набором фильтров. Изображения получали с помощью цифровой камеры AxioCam HRm и обрабатывали в программе Adobe Photoshop 7.

Световая и трансмиссионная электронная микроскопия. Для ультраструктурного анализа кончики корней 1,0...1,5 мм фиксировали в 2,5 %-ном растворе глутарового альдегида на 0,1 М фосфатном буфере Соренсена (рН 7,2) с добавлением 1,5 % сахарозы. После отмывки от фиксирующей смеси образцы дофиксиروвали 1,0 %-ным раствором четырехокси осмия (OsO_4), обезвоживали в этаноле повышающейся концентрации (30, 50, 70, 96 и 100 %), окиси пропилена и заключали в смесь эпон-аралдитных эпоксидных смол. Полутонкие и ультратонкие срезы изготавливали с использованием ультрамикротомы LKB-V. Полутонкие срезы толщиной 1...2 мкм окрашивали 0,1 %-ным водным раствором метиленового синего (Merck, Германия) и анализировали на микроскопе Olympus BX51 (Olympus, Япония), оборудованном камерой Color View II (Soft Imaging System, Германия). Ультратонкие срезы контрастировали уранилацетатом и цитратом свинца по Рейнольдсу и анализировали при увеличении $\times 10,000$ с использованием трансмиссионного электронного микроскопа H-300 (Hitachi, Япония).

Результаты и обсуждение. Анализ структуры корней на полутонких срезах с использованием световой микроскопии показал, что в присутствии NaCl и Na_2SO_4 в корнях табака сорта Самсун происходят изменения в вакуолизации клеток коры, причем в случае Na_2SO_4 вакуолизация более выражена (рис. 1 а, б, в). У трансгенных растений структура тканей и коры клеток корня в присутствии NaCl имела менее выраженную вакуолизацию (см. рис. 1 г, д), однако была обнаружена значительная вакуолизация клеток всех тканей в присутствии Na_2SO_4 (см. рис. 1 е), превышающая вакуолизацию в клетках корня при аналогичном воздействии (рис. 1 в).

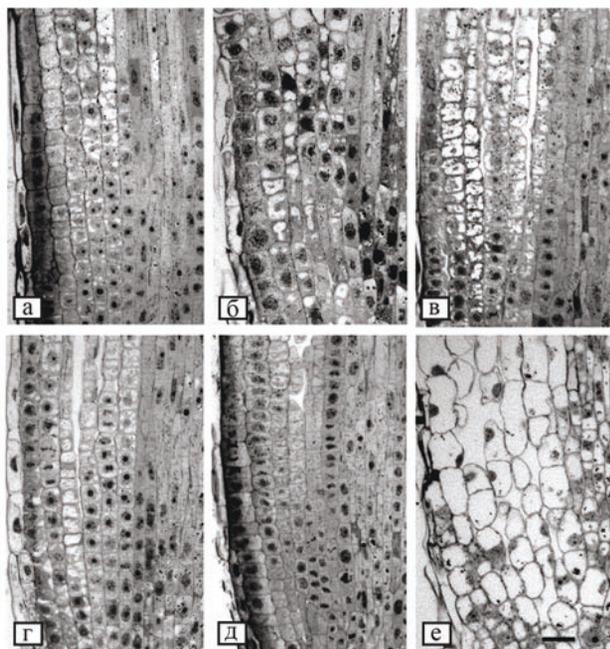


Рис. 1. Полутонкие срезы корней растений табака сорта Самсун (а, б, в) и его трансгенной линии с геном FeSOD1 (г, д, е): а, г – корни растений, выращенных в нормальных условиях; б, д – в присутствии NaCl ; в, е – в присутствии Na_2SO_4 (масштабная линейка 50 мкм).

Система микротрубочек в интерфазных клетках корней табака сорта Самсун имела типичную организацию и была представлена короткими перинуклеарными микротрубочками, радиально отходящими от ядра

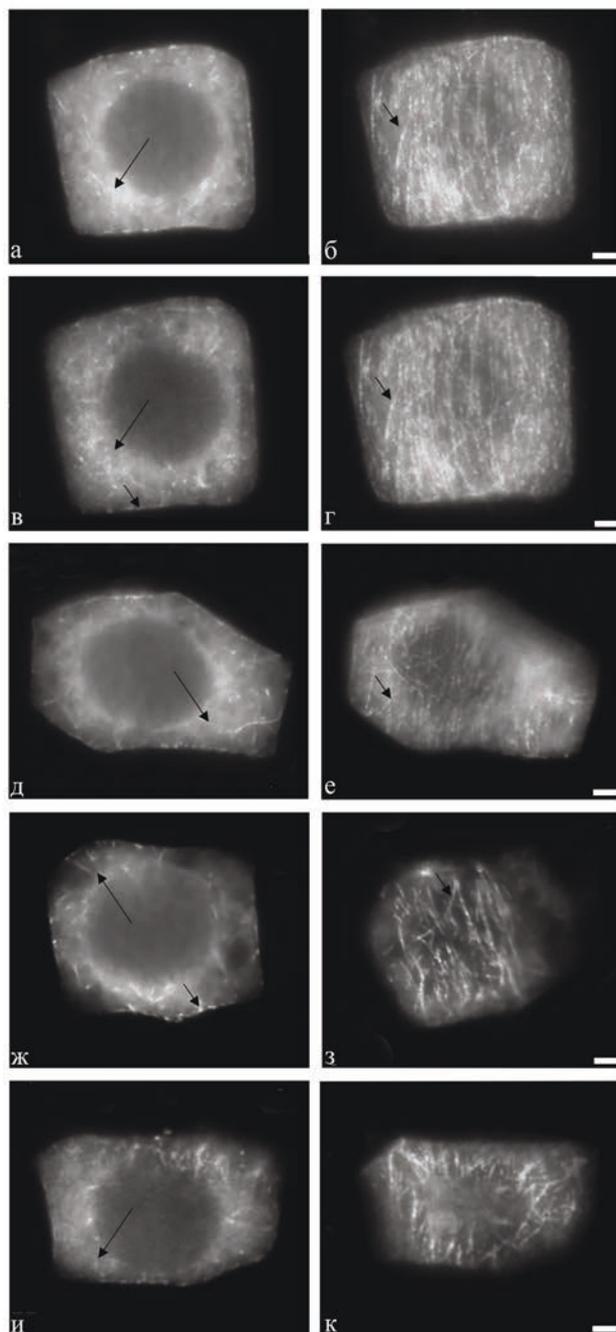


Рис. 2. Иммуноцитохимическое выявление микротрубочек в интерфазных клетках корней табака сорта Самсун (правая колонка – околоядерная зона, левая колонка – зона кортикальной цитоплазмы): а, б – растения контрольной группы; в, г, д, е – через 8 суток выращивания в присутствии NaCl ; ж, з, и, к – через 8 суток выращивания в присутствии Na_2SO_4 (длинными стрелками указаны перинуклеарные пучки микротрубочек, короткими стрелками указаны пучки кортикальных микротрубочек; масштабный отрезок 5 мкм).

(рис. 2 а) и длинными пучками (кортикальными пучками), расположенными в кортикальной зоне цитоплазмы (см. рис. 2 б), вдоль клеточных стенок. В присутствии NaCl существенных изменений в организации перинуклеарных (см. рис. 2 в, д) и кортикальных микротрубочек (см. рис. 2 г, е) не наблюдали. Даже в присутствии Na_2SO_4 перинуклеарные микротрубочки сохраняли упо-

рядоченную радиальную организацию (см. рис. 2 ж, и), однако было отмечено более хаотичное расположение, укрупнение пучков и уменьшение плотности тонкой сети кортикальных микротрубочек (рис. 2 з, к).

Система микротрубочек в интерфазных клетках трансгенных растений табака имела такую же организацию, как и у табака сорта Самсун (рис. 3 а, б) и не имела патологических изменений в присутствии NaCl (см. рис. 3 в, г, д, е). В присутствии Na₂SO₄ организация перинуклеарных микротрубочек также не менялась (см. рис. 3 ж, и), но происходило нарушение упорядоченной организации, значительное прореживание сети кортикальных микротрубочек и утрата их параллельного расположения вдоль клеточной стенки (см. рис. 3 з, к).

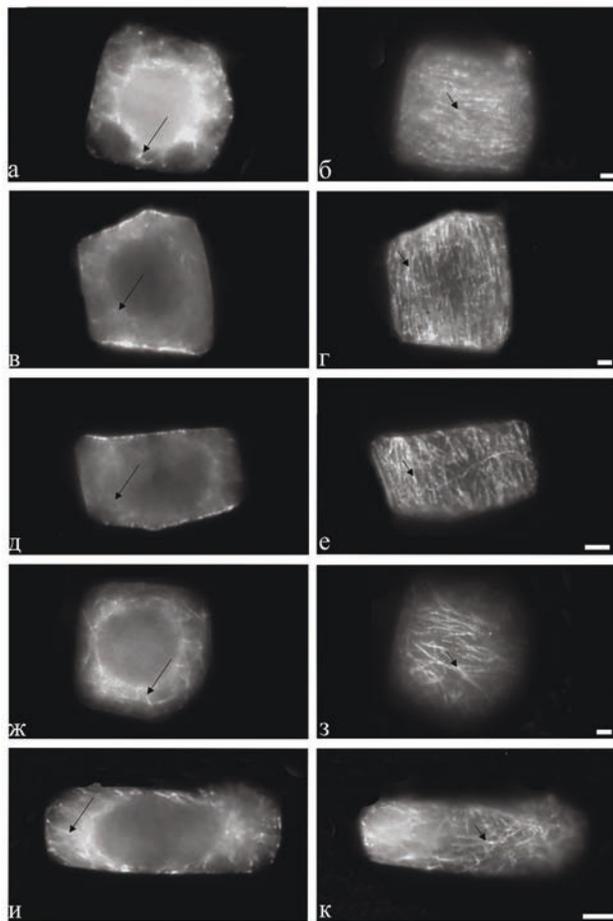


Рис. 3. Иммуноцитохимическое выявление микротрубочек в интерфазных клетках корней растений табака трансгенной линии с геном *FeSOD1* (правая колонка – околоядерная зона, левая колонка – зона кортикальной цитоплазмы): а, б – растения контрольной группы; в, г, д, е – растения через 8 суток выращивания в присутствии NaCl; ж, з, и, к – растения через 8 суток выращивания в присутствии Na₂SO₄ (длинными стрелками указаны перинуклеарные пучки микротрубочек, короткими – пучки кортикальных микротрубочек; масштабный отрезок 5 мкм).

Несмотря на изменения в организации микротрубочек интерфазных клеток у растений табака сорта Самсун и его трансгенной линии при действии Na₂SO₄, дестабилизирующих нарушений в организации микротрубочек в делящихся клетках не наблюдали. При изученных концентрациях в корнях отмечали нормально делящиеся клетки на всех фазах митоза, способных нарушить нормальный рост и вызвать асимметрию в ростовых процессах.

Актиновые филаменты в интерфазных клетках табака сорта Самсун были представлены пучками, отходящими от ядра и/или окружающими ядро (рис. 4 а, в) и длинными переплетающимися пучками, пересекающими цитоплазму (см. рис. 4 б, г). В присутствии NaCl (см. рис. 4 д, е, ж, з) и Na₂SO₄ (см. рис. 4 и, к, л, м) были обнаружены значительные изменения в плотности распределения диспергированного актина с сохранением околоядерных и цитоплазматических пучков актиновых филаментов.

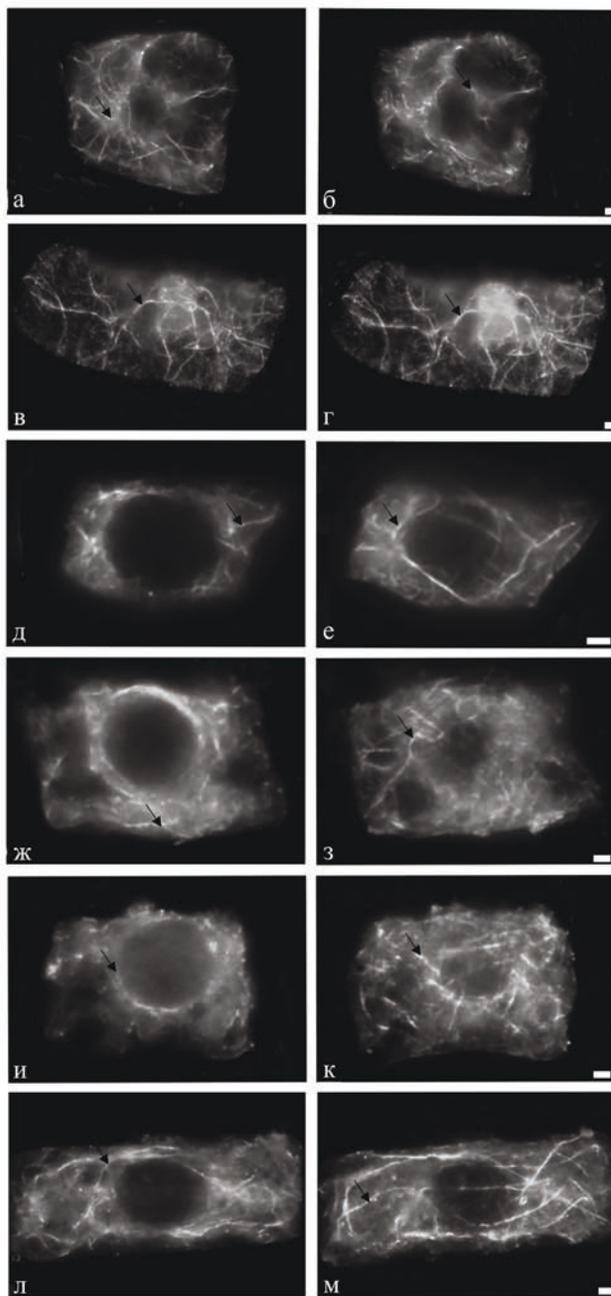


Рис. 4. Иммуноцитохимическое выявление актиновых филаментов в интерфазных клетках корней растений табака сорта Самсун (правая колонка – околоядерная зона, левая колонка – зона кортикальной цитоплазмы): а, б, в, г – растения контрольной группы; д, е, ж, з – растения через 8 суток выращивания в присутствии NaCl; и, к, л, м – растения через 8 суток выращивания в присутствии Na₂SO₄ (стрелками указаны пучки актиновых филаментов, масштабный отрезок 5 мкм).

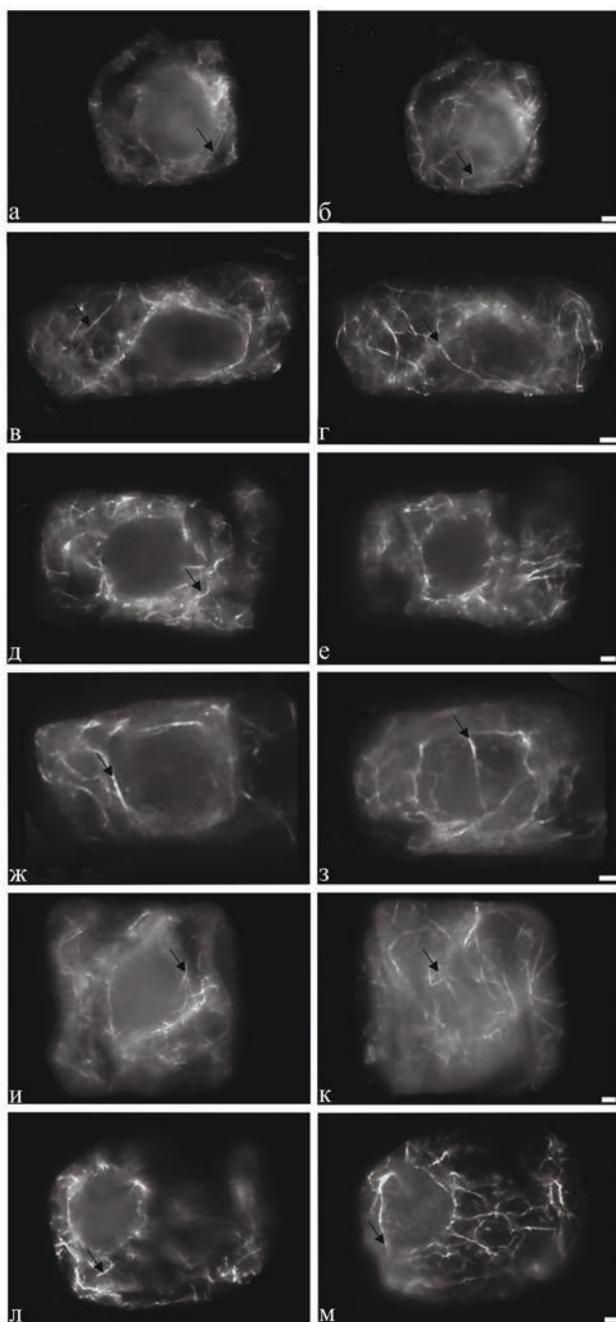


Рис. 5. Иммуноцитохимическое выявление актиновых филаментов в интерфазных клетках корней растений табака трансгенной линии с геном FeSOD1 (правая колонка – околядерная зона, левая колонка – зона кортикальной цитоплазмы): а, б, в, г – растения контрольной группы; д, е, ж, з – растения через 8 суток выращивания в присутствии NaCl; и, к, л, м – растений через 8 суток выращивания в присутствии Na₂SO₄ (стрелками указаны пучки актиновых филаментов; масштабный отрезок 5 мкм).

Система актиновых филаментов в интерфазных клетках корней трансгенных растений имела типичную организацию (рис. 5 а, б, в, г), сходную с клетками табака сорта Самсун. Однако в присутствии NaCl (см. рис. 5 д, е, ж, з) и особенно Na₂SO₄ (см. рис. 5 и, к, л, м) плотность сети актиновых филаментов, образованной околядерными (см. рис. 5 д, ж, и, л) и цитоплаз-

матическими (рис. 5 е, з, к, м) пучками, была заметно снижена. Они становились короткими, извилистыми и утолщенными. Можно заключить, что у трансгенных растений при засолении происходит нарушение организации актинового цитоскелета (см. рис. 5), которое ведет к таким изменениям, как нарушение морфогенеза вакуолей (см. рис. 1).

Использованный методический подход визуализации элементов цитоскелета не позволяет количественно оценить наблюдаемые эффекты. Это связано с тем, что выделение клеток сопровождается нарушением их целостности, причем на различных препаратах соотношение поврежденных и целых клеток разное. Именно поэтому метод подходит для визуализации качественных, но не количественных параметров.

Трансмиссионная электронная микроскопия – один из немногих методов, позволяющих выявить атипичные полимерные образования, которые не могут быть идентифицированы путем иммуноцитохимического анализа, так как химически состоят из тех же белков, но имеют существенные структурные различия.

Анализ ультраструктуры интерфазных клеток корней табака сорта Самсун и его трансгенной линии методом электронной микроскопии показал, что микротрубочки обычно выявляются в кортикальной цитоплазме вблизи клеточной стенки (рис. 6 а, б). Многочисленные микротрубочки присутствуют в кортикальной цитоплазме и в клетках корней растений, выращенных в присутствии NaCl и Na₂SO₄. Однако в этих условиях в клетках корней табака сорта Самсун и у трансгенных растений, наряду с микротрубочками, в цитоплазме выявляются отличающиеся по размеру, форме и плотности фибриллярные тяжи, состоящие из множества прямых или извитых нитей (см. рис. 6 в, г, д, е). Упаковка нитей в тяжах отличается по плотности (см. рис. 6 в, д, е), но на поперечных срезах (см. рис. 6 г) видно, что нити в составе пучка имеют упорядоченную ячеистую упаковку, характерную для описанных в литературе атипичных полимеров – паракристаллов тубулина [12].

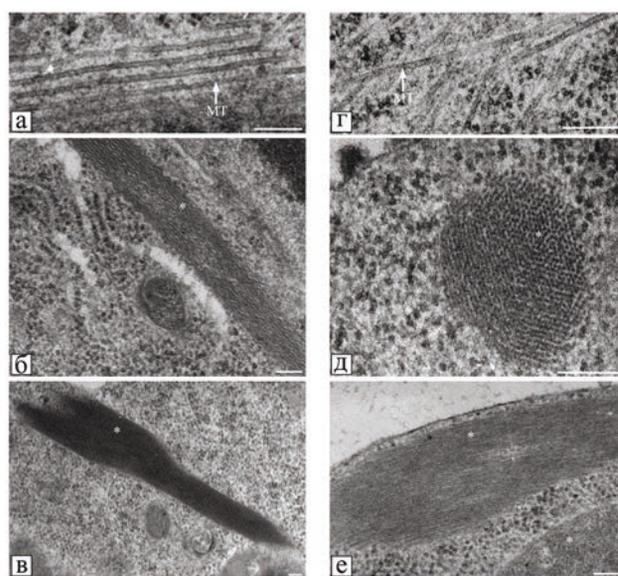


Рис. 6. Ультраструктура микротрубочек (MT) и фибриллярных паракристаллических пучков (обозначены *) в клетках корней табака сорта Самсун (а, б, в) и его трансгенной линии с геном FeSOD1 (г, д, е). Паракристаллические пучки присутствуют в клетках корней только при выращивании растений в присутствии NaCl (в, г) и Na₂SO₄ (д, е). Масштабные линейки – 250 нм.

Результаты наших исследований свидетельствуют, что выращивание в течение 8 суток в присутствии NaCl и Na₂SO₄ не приводит к существенным деструктивным процессам в системе микротрубочек в клетках корней табака сорта Самсун и его трансгенной линии. При этом у трансгенных растений плотность системы актиновых филаментов при засолении уменьшается, а у не трансгенных растений меняется не значительно.

В то же время, в клетках корней не трансгенных и трансгенных растений редукцию плотности системы микротрубочек наблюдали только при действии Na₂SO₄. Уменьшение плотности системы микротрубочек свидетельствует о том, что происходит деполимеризация их определенной субпопуляции. Косвенным свидетельством деполимеризации (разборки) может быть образование атипичных полимерных структур, которые мы обнаружили методом трансмиссионной электронной микроскопии. Поскольку изменений плотности системы микротрубочек при действии NaCl не выявлено, но атипичные полимерные структуры все равно формировались, можно предположить, что NaCl оказывает более мягкое, по сравнению с Na₂SO₄, воздействие на микротрубочки или деполимеризация идет на более низком уровне.

Обнаруженные атипичные полимерные структуры по морфологическим признакам сходны с тубулиновыми агрегатами, появляющимися при экспериментально индуцированном дисбалансе АФК [12, 13]. Тубулиновые агрегаты были выявлены и охарактеризованы много лет назад как в животных, так и в растительных клетках, при действии ингибиторов полимеризации микротрубочек растительного происхождения – колхицина [14], винбластина, винкристина [15]. В частности, было показано, что обработка колхицином клеток растений в течение короткого времени вызывала разборку микротрубочек, однако длительная обработка (до нескольких суток) приводила к формированию атипичных фибриллярных структур, не имеющих сходства с микротрубочками, но состоящих из тубулина [11, 14]. Интересно, что полимерные тубулиновые агрегаты, индуцированные в клетках растения колхицином, по структуре идентичны тубулиновым паракристаллам, которые формировались в клетках животных при действии растительных алкалоидов винбластина и винкристина [15]. Роль атипичных тубулиновых агрегатов в клетках растений до сих пор не ясна. В связи с тем, что тубулиновые паракристаллические образования выявили в клетках пшеницы после гиперосмотического стресса, высказано предположение о том, что сборка таких структур может быть неспецифической реакцией и/или базовым ответом клеток на различные стрессовые факторы [9].

Гомеостаз АФК представляет собой важный фактор в регуляции жизни растений, в том числе, путем влияния на состояние цитоскелета. Предполагают, что взаимодействие АФК и микротрубочек способствует восприятию стрессовой ситуации и запускает соответствующие сигнальные механизмы и клеточную реакцию. Оказалось, что в ходе этого процесса важную роль играет ремоделирование тубулинового цитоскелета. Оно включает в себя рекрутирование определенных белков семейства MAP с помощью MAPK сигнального каскада и регуляторных механизмов, действующих на транскрипционном и посттранскрипционном уровне [13]. При этом изменяется и организация системы микротрубочек. Наблюдения за проростками *Arabidopsis*, которые инкубировали

до 40 часов в присутствии 25...125 мМ NaCl [16] показали, что на ранних этапах воздействия кортикальные микротрубочки разбираются, а затем снова собираются и реорганизуются в новые системы. Стабилизация микротрубочек паклитаксолом приводила к усилению гибели проростков в присутствии NaCl, в то время как разрушение микротрубочек оризалином или пропизамидом спасало проростки от гибели. Более того, проростки, у которых произошла реорганизация кортикальных микротрубочек, не реагировали на солевой стресс. Такие результаты свидетельствуют о том, что динамика микротрубочек (деполимеризация и реорганизация) важны для повышения устойчивости растений к засолению [16]. Есть мнение, что динамическая регуляция тубулинового цитоскелета – часть клеточного механизма, направленного на восстановление гомеостаза АФК [13].

Реакция актинового цитоскелета растений на действие абиотических факторов изучена намного меньше. Например, была исследована роль актиновых филаментов в солеустойчивости проростков *Arabidopsis thaliana* [17]. У проростков в присутствии 150 мМ NaCl наблюдали сборку филаментов и формирование пучков, а вот обработка 250 мМ NaCl первоначально индуцировала сборку филаментов, но затем происходила их разборка. То есть, сборка и формирование пучков актина индуцируются на начальных стадиях солевого стресса, а после сильного воздействия полилимеризация филаментов подавляется. Стимуляция сборки филаментов с использованием фаллоидина уменьшала гибель проростков от солевого стресса, тогда как блокирование сборки с помощью латрункулина А и цитохалазина D приводило к снижению их выживаемости. Кроме того, полимеризация актиновых филаментов обеспечивала выживание растений, подвергшихся осмотическому стрессу. Эти данные свидетельствуют о том, что ремоделирование актина участвует в обеспечении устойчивости растений к солевому и осмотическому стрессу [17].

Взаимосвязь изменений динамики актинового цитоскелета с уровнем АФК также была продемонстрирована у проростков *Arabidopsis thaliana* [18]. Обработка 200 мМ NaCl нарушала динамику преобразования актиновых филаментов и повышала уровень АФК в клетках зоны растяжения корня, а обработка ингибитором активности НАДФН-оксидазы, дифениленйодонием, блокировала увеличение АФК в условиях солевого стресса. Роли динамики актина и НАДФН-оксидаз в образовании АФК были дополнительно проанализированы с использованием латрункулина В (вызывает разборку актиновых филаментов) и джасплакинолида (вызывает сборку актиновых филаментов). Было обнаружено, что оба агента повышают уровень АФК после обработки NaCl. Таким образом, динамика актинового цитоскелета участвует в регуляции уровня АФК в условиях солевого стресса.

Обращает на себя внимание тот факт, что нарушение полимеризации актиновых филаментов обработкой латрункулином А и цитохалазином D вызывало снижение выживаемости проростков *Arabidopsis*, а устранялся этот эффект стабилизацией актиновых филаментов с использованием фаллоидина [18]. Однако в другом исследовании [12] было показано, что латрункулин и джасплакинолид, обладающие противоположными эффектами (то есть полимеризацией и деполимеризацией актина соответственно) повышают уровень АФК в клетках зоны растяжения корня *Arabidopsis* при солевом стрессе. Высказано

предположение, что нарушение динамики актина – основная причина увеличения АФК в условиях солевого стресса [18].

В то же время пока остается неясным, влияет ли динамика актина на гомеостаз АФК, или, наоборот, дисбаланс АФК вызывает ремоделирование актинового цитоскелета при действии абиотических стрессовых факторов. Однако при биотическом стрессе именно повышение уровня АФК вызывает реорганизацию актинового цитоскелета, что не исключает и существование петли обратной связи между динамикой актина и выработкой АФК [19]. Результаты более поздних исследований указывают на то, что деполимеризация актинового цитоскелета способствует усилению устойчивости растений к биотическим факторам благодаря активации сигнального пути с участием салициловой кислоты [20]. Если предположить, что сходные механизмы могут быть задействованы и при действии таких абиотических факторов как засоление, то можно выдвинуть предположение, что уменьшение плотности расположения актиновых филаментов (разборка и ремоделирование), которое наблюдали при засолении у трансгенных по *FeSOD1* растений табака, указывает на их повышенную устойчивость к засолению. В этом случае, состояние системы актиновых филаментов может служить критерием для оценки устойчивости растений к действию абиотических стрессовых факторов, которые вызывают увеличение выработки АФК.

Выводы. Таким образом, актиновый и тубулиновый цитоскелет – чувствительная к засолению динамическая система. Его изменение напрямую связано с изменением вакуолизации клеток корня. Трансгенные растения незначительно отличались от исходных в организации перенуклеолярного и кортикального микротрубочкового цитоскелета и системе организации околядерных и цитоплазматических пучков актиновых филаментов. Na_2SO_4 оказывал более значимое воздействие на обе системы цитоскелета, как у трансгенных растений, так и растений дикого типа, при равных изоосмотических воздействиях. Влияние NaCl было практически незаметным на уровне модификаций цитоскелета у трансгенных растений, что свидетельствует о высокой эффективности их защиты. Можно предположить, что гипертрофированное усиление вакуолизации под воздействием Na_2SO_4 связано с активацией системы локализации ионов натрия в вакуолях из-за того, что при равном изоосмотическом давлении количество ионов натрия при индукции засоления Na_2SO_4 удваивается.

Литература.

1. Nick P. Microtubules, signaling, and biotic stress // *The Plant Journal*. 2013. No. 75. P. 309–323. doi: 10.1111/tip.12102.
2. Ma X., Liu M. The microtubule cytoskeleton acts as a sensor for stress response signaling in plants // *Molecular Biology Reports*. 2019. No. 46. P. 5603–5608. doi: 10.1007/s11033-019-04872-x.
3. Baxter A., Mittler R., Suzuki N. ROS as key players in plant stress signaling // *J Exp Bot*. 2014. Vol. 65. No. 5. P. 1229–2014. doi: 10.1093/jxb/ert375.
4. Mhamdi A., Van Breusegem F. Reactive oxygen species in plant development // *Development*. 2018. Vol. 145. No. 5. Article dev164376. URL: <https://journals.biologists.com/dev/article/145/5/dev164376/48468/Reactive-oxygen-species-in-plant-development> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.1242/dev.164376.
5. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants / V. Petrov, J. Hille, B. Mueller-Roeber, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. No. 69. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2015.00069/full> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.3389/fpls.2015.00069.
6. Pilon M., Ravet K., Tapken W. The biogenesis and physiological function of chloroplast superoxide dismutases // *Biochimica et Biophysica Acta*. 2010. Vol. 1807. No. 8. P. 989–998. doi: 10.1016/j.bbap.2010.11.002.
7. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses / A. Sofo, A. Scope, M. Nuzzaki, et al. // *Int J Mol Sci*. 2015. No. 16. P. 13561–13578. doi: 10.3390/ijms160613561.
8. Activity of the photosynthetic apparatus and antioxidant enzymes in leaves of transgenic *Solanum lycopersicum* and *Nicotiana tabacum* plants, with *FeSOD1* gene / E. N. Baranova, E. K. Serenko, T. I. Balachina, et al. // *Russian Agricultural Science*. 2010. Vol. 36. No. 4. P. 242–249. doi: 10.3103/S1068367410040075.
9. Formation of atypical tubulin structures in plant cells as a nonspecific response to abiotic stress / E. N. Baranova, N. K. Christov, L. V. Kurenina, et al. // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2016. Vol. 22. No. 6. P. 987–992. URL: <https://www.agrojournal.org/22/06-17.pdf> (дата обращения 25.08.2023).
10. Root cells structural changes induced by salt stress are mitigated in *FeSOD* transgenic tomato plants / L. R. Bogoutdinova, E. M. Lazareva, I. A. Chaban, et al. // *Biology*. 2020. Vol. 9. No. 9. Article 297. URL: <https://www.mdpi.com/2079-7737/9/9/297> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.3390/biology9090297.
11. Time and cell-cycle dependent formation of heterogeneous tubulin arrays induced by colchicine in *Triticum aestivum* root meristem / E. M. Lazareva, V. Y. Polyakov, Y. S. Chentsov, et al. // *Cell Biol Intern*. 2003. Vol. 27. No. 8. P. 633–646. doi: 10.1016/S1065-6995(03)00120-3.
12. Disturbance of reactive oxygen species homeostasis induces atypical tubulin polymer formation and affects mitosis in root-tip cells of *Triticum turgidum* and *Arabidopsis thaliana* / P. Livanos, B. Galatis, H. Quader, et al. // *Cytoskeleton*. 2012. No. 69. P. 1–21. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cm.20538> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.1002/cm.20538.
13. Livanos P., Galatis B., Aposolakos P. The interplay between ROS and tubulin cytoskeleton in plants // *Plant Signaling Behav*. 2014. No. 9. Article e28069 *Landes Bioscience*. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4161/psb.28069> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.4161/psb.28069.
14. Bennett M. D., Smith J. B. Colchicine-induced paracrystals in the tapetum of wheat anthers // *J Cell Sci*. 1979. No. 38. P. 23–32. doi: 10.1242/jcs.38.1.23.
15. Masurovsky E. B., Horwitz S. B. Ultrastructural effects of colchicine, vinblastine and taxol in drug-sensitive and multidrug-resistant J774.2 cells // *Protoplasma*. 1989. No. 148. P. 138–149. doi: 10.1007/BF02079333.
16. Wang C., Li J., Yuan M. Salt tolerance requires cortical microtubule reorganization in *Arabidopsis* // *Plant Cell Physiol*. 2007. No. 48. P. 1534–1547. doi: 10.1093/pcp/pcm123.
17. The microfilament cytoskeleton plays a vital role in salt and osmotic stress tolerance in *Arabidopsis* / C. Wang, L. Zhang, M. Yuan, et al. // *Plant Biology*. 2009. Vol. 12. No. 1. P. 70–78. doi: 10.1111/j.1438-8677.2009.00201.x.
18. Disrupted actin dynamics trigger an increment in the reactive oxygen species levels in the *Arabidopsis* root

- under salt stress / S. G. Liu, D. Z. Zhu, G. H. Chen, et al. // Plant Cell Rep. 2012. No. 31. P. 1219–1226. doi: 10.1007/s00299-012-1242-z.*
19. *Lipid signaling requires ROS production to elicit actin cytoskeleton remodelling during plant innate immunity / L. Cao, W. Wang, W. Zhang, et al. // Int J Mol Sci. 2022. No. 23. Article 2447. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/5/2447> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.3390/ijms23052447.*
20. *Actin depolymerization is able to increase plant resistance against pathogens via activation of salicylic acid signalling pathway / H. Leontovycova, T. Kalachova, L. Trda, et al. // Scientific Reports. 2019. No. 9. Article 10397. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-46465-5> (дата обращения 25.08.2023). doi: 10.1038/s41598-019-46465-5.*

Поступила в редакцию 06.08.2023

После доработки 26.08.2023

Принята к публикации 19.09.2023

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.13:581.131

DOI: 10.31857/S2500262723050022, EDN: PKMGSR

ИЗМЕНЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ФОТОСИСТЕМЫ II ЛИСТЬЕВ ОВСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА**С. А. Чуракова, Е. М. Лисицын**, доктор биологических наук,
Г. А. Баталова, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАНФедеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
610007, Киров, ул. Ленина, 166а
E-mail: edaphic@mail.ru

На двухнедельных растениях пленчатого (*Avena sativa* subsp. *sativa*) и голозерного (*Avena sativa* subsp. *nudisativa*) овса оценивали параметры быстрой флуоресценции хлорофилла *a*. Цель исследования – выявление различий между подвидами по контролю первичных процессов запасаания энергии в условиях осмотического стресса для последующего выбора параметров и стратегии селекции овса на повышение фотосинтетической продуктивности в условиях ранней засухи. Растения выращивали на полной питательной смеси Кнопа, стресс создавали добавлением 10 % полиэтиленгликоля (осмотическое давление 0,709 мПа). Параметры флуоресценции определяли на флуориметре Fluor Pen FP 110/S (Photon Systems Instruments, Czech Republic). Данные обрабатывали методом анализа главных компонент. У пленчатых генотипов четыре главных фактора были ответственны за 94,2 % (контроль) и 91,4 % (стресс) варибельности оцениваемых параметров. У голозерных овсов в отсутствие стресса выявлено три главных фактора (90,5 % варибельности), в условиях стресса – четыре (97,1 % варибельности). У голозерных овсов в условиях стресса потоки захваченной энергии (TR_f/RC) и электронного транспорта (ET_f/RC) контролировал один и тот же фактор, в отсутствие стресса – два разных; у пленчатых генотипов, наоборот, в отсутствие стресса – один фактор, при стрессе – два разных. Осмотический стресс привел к переходу контроля над потоками адсорбированной (ABS/RC) и захваченной (TR_f/RC) энергии со стороны одного фактора к двум факторам у пленчатых овсов, но не повлиял на голозерные овсы. Показатель эффективности переноса электронов к первичным акцепторам фотосистемы I (δRE) контролировали два разных фактора, действие которых он усиливал (факторные нагрузки от 0,564 до 0,740). В условиях стресса параметр δRE у голозерных генотипов снижал действие обоих факторов (факторные нагрузки –0,625 и –0,705), у пленчатых генотипов действие одного фактора снижал, второго – усиливал (факторные нагрузки –0,552 и 0,687).

CHANGES IN ORGANIZATION OF ACTION OF PHOTOSYSTEM II IN OAT LEAVES UNDER OSMOTIC STRESS**S. A. Churakova, E. M. Lisitsyn, G. A. Batalova**Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
610007, Kirov, ul. Lenina, 166a,
E-mail: edaphic@mail.ru

The parameters of chlorophyll *a* fast fluorescence were estimated with husked oats (*A. sativa* subsp. *sativa*) and naked oats (*A. sativa* subsp. *nudisativa*). The purpose of the study was to identify differences in the control of primary energy storage processes in two subspecies of oats under the influence of osmotic stress for the subsequent selection of parameters and strategies for oat breeding to increase photosynthetic productivity in early drought conditions. Plants were grown on a complete Knop's nutrient solution; osmotic stress was created by 10 % polyethylene glycol (PEG-400), osmotic pressure 0.709 mPa. Fluorescence parameters were determined using a Fluor Pen FP 110/S fluorometer (Photon Systems Instruments, Czech Republic). The data was processed by principal component analysis. In husked genotypes, the four main factors were responsible for 94.2 % (control) and 91.4 % (stress) variability of the parameters assessed. In naked oats, three main factors were governed 90.5 % of variability in the absence of stress, four factors (97.1 % variability) – under stress conditions. In naked oats, the flows of trapped energy (TR_f/RC) and electronic transport (ET_f/RC) under stress were controlled by the same factor and in the absence of stress – by two different factors; in husked genotypes – on the contrary, by one factor in the absence of stress and by two different factors under stress. Osmotic stress led to the transition of control of absorbed (ABS/RC) and trapped (TR_f/RC) energy flows from one factor to two factors in husked oats, but did not affect naked oats. The parameter of efficiency of electron transfer until the primary acceptors of photosystem I (δRE) was controlled by two different factors and enhanced their effect (factor loads from 0.564 to 0.740). Under stress, the δRE parameter reduced the effect of both factors in naked genotypes (factor loads –0.625 and –0.705), decreased the effect of one factor and strengthened the second factor in husked genotypes (factor loads –0.552 and 0.687).

Ключевые слова: овес пленчатый (*Avena sativa* subsp. *sativa*), овес голозерный (*Avena sativa* subsp. *nudisativa*), селекция, фотосистема II, анализ главных компонент.**Key words:** husked oat (*Avena sativa* subsp. *sativa*), naked oat (*Avena sativa* subsp. *nudisativa*), breeding, photosystem II, principal component analysis.

На сегодняшний день в Российской Федерации возделывают два подвида овса посевного (*Avena sativa* L.): пленчатый (*A. sativa* subsp. *sativa* L.) и голозерный (*A. sativa* subsp. *nudisativa* (Husn.) Rod. et Sold.) [1, 2]. При их сравнительном анализе чаще всего оценивают

биохимические характеристики зерна – содержание белка, крахмала и амилозы, зольность, содержание масла, жирных кислот и β -глюканов [3, 4]. Известны результаты исследований по сравнительному метаболомному профилю зерна овса (жирных кислот, фенольных соеди-

нений, фитостеролов, органических кислот и сахаров) [5]. Однако для повышения эффективности фотосинтеза и накопления органического вещества в зерне, необходимо знать особенности функционирования фотосинтетического аппарата листьев растений в нормальных и стрессовых условиях роста. Ранее мы сравнили голозерные и пленчатые сорта овса по абсолютным характеристикам работы фотосистемы II (PSII) листьев [6] и показали статистически значимые различия между этими группами сортов. В частности, абсолютные величины потоков адсорбированной (ABS/RC) и максимальной захваченной (TRo/RC) световой энергии были выше (на 7,8 и 7,4 % соответственно) в группе голозерных форм, а средняя величина эффективности передачи электронов от пластохинона Q_B к фотосистеме I у них была выше, чем у пленчатых форм, на 8,2 %. В то же время суммарная эффективность работы PSII, оцененная по перфоманс-индексам PI_{ABS} и PI_{ABS total}¹ была больше у пленчатых форм овса (на 39 и 28 % соответственно).

Цель исследования – выявление различий в контроле первичных процессов запасаения энергии у двух подвидов овса под действием осмотического стресса для последующей корректировки параметров и стратегии селекции культуры на повышение фотосинтетической продуктивности в условиях ранней засухи.

Методика. Для оценки параметров кинетики индукции флуоресценции хлорофилла *a* использовали двухнедельные растения 16 генотипов (сортов и селекционных линий) пленчатого и 17 генотипов голозерного ярового овса, выращенные на полной питательной среде Кнопа при комнатной температуре, относительной влажности воздуха 40 % и фотопериоде 16/8 ч (день/ночь). Для освещения растений использовали лампы PPG-WP 1200/L Agro (ОПАЛТЕК (ГК) Лимитед, Гонконг, КНР) с фотонным потоком 46 мкмоль/с, соотношение синего (450 нм) и красного (650 нм) света 1:5. Растения выращивали в трехкратной повторности по 35 растений в каждой.

Осмотический стресс создавали добавлением в питательную среду 10 % ПЭГ-400 (осмотическое давление 0,709 мПа, или 7 атмосфер). Подробная методика выращивания растений и оценки быстрой флуоресценции хлорофилла была изложена ранее [6].

Флуоресценцию хлорофилла *a* регистрировали с использованием флуорометра Fluor Pen FP 110/S (Photon Systems Instruments, Czech Republic) согласно руководству производителя. Оценивали следующие параметры: начальную, максимальную и переменную флуоресценции (соответственно F₀, F_m и F_v = F_m - F₀); максимальный квантовый выход первичного разделения зарядов (F_v/F_m); соотношение констант скорости фотохимиче-

ской реакции и нефотохимической дезактивации возбуждений (F_v/F₀); эффективность переноса электронов – от пластохинона Q_A к пластохинону Q_B (ψ₀), от Q_B к первичным акцепторам фотосистемы I (δ_{RE}) и от PSII к первичным акцепторам фотосистемы I (ψ_{RE}); величины потоков энергии – адсорбированной (ABS/RC), захваченной реакционным центром (TR₀/RC), электронного транспорта от Q_A к Q_B (ET₀/RC) и рассеянной в виде тепла (DI₀/RC). Кроме того, рассчитывали интегральные показатели функциональной активности PSII (PI_{ABS}) и фотосинтетического аппарата в целом (PI_{ABS total}).

Статистическую обработку данных проводили методом анализа главных компонент (PCA = principal component analysis), реализованном в надстройке XLSTAT 2016.02.28451 для программы работы с электронными таблицами MS Excel 2013. Оптимальное число факторов выделяли по критерию Кайзера (учитывали только факторы с собственным значением (eigenvalue) выше 1,0). Это наиболее часто используемый в научной литературе критерий для выделения главных компонент по корреляционной матрице исходных данных. Факторную нагрузку признавали значимой, если ее абсолютное значение превышало 0,5 [7]. Чем выше значение факторной нагрузки, тем сильнее сила связи фактора с изучаемым признаком.

Результаты и обсуждение. Одновременный анализ 13 показателей структурно-функциональной организации работы фотосистемы II листьев групп генотипов пленчатого и голозерного овса позволил выявить значительные различия между ними как по числу значимых факторов, ответственных за изменчивость величин оцениваемых показателей, так и по связи отдельных показателей с выявленными факторами.

В контрольных условиях (отсутствие действия осмотического стресса) для группы голозерных генотипов выявлено только три главных фактора (компонента), суммарно объясняющих 90,5 % изменчивости. Для группы генотипов пленчатого овса выявлено четыре основных фактора (компонента), объясняющих 94,2 % изменчивости всех тринадцати показателей работы PSII (табл. 1).

Такие результаты позволяют предположить, что организационная структура функционирования фотосистемы II у пленчатых и голозерных генотипов несколько различается. В частности, параметры F₀, F_v/F_m, F_v/F₀ у голозерных генотипов контролирует тот же фактор, что и потоки адсорбированной и захваченной энергии (параметры ABS/RC, TR₀/RC), тогда как для пленчатых сортов контроль этих двух групп параметров осуществляют разные ортогональные (не связанными между собой) факторы. Тот факт, что контроль некоторых по-

Табл. 1. Величины факторных нагрузок параметров работы фотосистемы II листьев овса в отсутствие стресса (контроль)

Параметр	Голозерные генотипы			Пленчатые генотипы			
	фактор 1	фактор 2	фактор 3	фактор 1	фактор 2	фактор 3	фактор 4
F _v /F _m	-0,983	-	-	-0,915	-	-	-
F _v /F ₀	-0,979	-	-	-0,698	0,685	-	-
ψ ₀	-	0,963	-	-	0,590	-	-0,505
δ _{RE}	0,564	-	0,697	0,632	-	-	0,740
ψ _{RE}	0,569	0,713	-	0,830	-	-	-
ABS/RC	0,968	-	-	-	-0,690	0,508	-
TR ₀ /RC	0,557	-	-	-	-0,573	0,522	-
ET ₀ /RC	-	0,907	-	-	-	0,867	-
DI ₀ /RC	0,984	-	-	0,894	-	-	-
PI _{ABS}	-0,624	0,739	-	-	0,962	-	-
PI _{ABS total}	-	0,827	-	-	0,853	-	-
F ₀	0,871	-	-	-0,752	-	-	-
F _m	-	-	-0,693	-0,834	-	-	-
Объясняемая изменчивость, %	47,3	29,9	13,3	40,5	29,8	14,0	9,9

¹здесь и в табл. 2 прочерк означает, что нагрузки статистически незначимы при p ≤ 0,05.

казателей осуществляют в равной степени два разных фактора, может быть связан с тем, что пластидный аппарат белкового синтеза (в том числе и фотосистемы II) находится под двойным генетическим контролем – как со стороны ядерных генов, так и со стороны собственных генов пластид [8]. Отсюда можно предположить, что те показатели, которые связаны одновременно с двумя главными факторами, в приблизительно равной степени контролируют два типа генов, а остальные – преимущественно или ядерные, или пластидные.

Параметры начальной и максимальной флуоресценции у пленчатых генотипов связаны с одним и тем же фактором, у голозерных их контролируют разные факторы. Наоборот, параметр δ_{RE} у пленчатых генотипов контролирует отдельный фактор, а у голозерных – тот же, который контролирует максимальную флуоресценцию. Следует отметить, что потоки адсорбированной и захваченной энергии у голозерных генотипов четко связаны только с одним фактором, а у пленчатых на эти параметры влияют в равной степени два разных фактора.

В то же время в обоих наборах генотипов совместно контролируются (связаны с одним фактором) такие группы параметров, как $[F_v/F_m, F_v/F_0, DI_0/RC \text{ и } F_0]$, $[ABS/RC \text{ и } TR_0/RC]$ и $[PI_{ABS} \text{ и } PI_{ABS_total}]$. Понимание этого факта необходимо в селекционной практике в процессе выбора критериев оценки функционирования фотосистемы II у отдельных генотипов, родительских форм и их гибридов и др., поскольку на сегодня среди исследователей нет единообразного подхода к этой проблеме. Так, при решении разных частных вопросов, связанных с селекцией и выращиванием овса, исследователи всегда используют параметры $F_0, F_m, F_v/F_m$ [9, 10, 11], вдобавок к ним, разные авторы дополнительно применяют показатели F_v/F_0 [10, 12], PI_{ABS} , ABS [10, 13], ET_0 [12, 13], TR_0, DI_0 [13].

Воздействие на растения осмотического стресса отражается не только на абсолютных значениях показателей, что отмечено в работах многих исследователей [14, 15, 16], но и на организации работы фотосистемы II листьев. При этом для набора голозерных форм овса в нашем исследовании отмечено увеличение числа главных компонент с трех до четырех, то есть проявился еще один фактор, значимо влияющий на вариабельность оцениваемых параметров (табл. 2).

В отношении качественных аспектов организации работы этой фотосистемы, для голозерных генотипов овса можно отметить переход контроля показателя ψ_{RE} к обособленному фактору 4, тогда как в контрольных условиях (см. табл. 1) его контролировали факторы,

связанные с восемью (фактор 1) или четырьмя (фактор 2) другими показателями. В условиях засухи контроль показателей начальной и максимальной флуоресценции у этой группы генотипов осуществляет один и тот же фактор (фактор 3), а в отсутствии стресса – разные факторы (соответственно фактор 1 и фактор 3). Аналогичную картину наблюдали для пар показателей $[\psi_0 \text{ и } \delta_{RE}]$ и $[TR_0/RC \text{ и } ET_0/RC]$. Так, в условиях стресса каждую из пар контролируют одни и те же факторы, а в отсутствии стресса – разные.

В группе пленчатых генотипов осталось таким же, как и в контрольных. В то же время, если при отсутствии стресса такие показатели как DI_0/RC и ABS/RC контролировали разные факторы, то под действием осмотического стресса их контроль осуществлял один фактор. Для пары показателей ABS/RC и TR_0/RC характерна обратная ситуация – в случае стресса контроль этих показателей перешел к двум разным факторам. Шесть показателей $[F_0, F_m, DI_0/RC, \delta_{RE}, \psi_{RE} \text{ и } F_v/F_m]$ контролировал один фактор как в присутствии стрессора, так и в его отсутствии, но если в отсутствии стресса показатель DI_0/RC усиливал его (положительный вклад), то в случае стресса, наоборот, ослаблял (отрицательный вклад), показатель F_v/F_m усиливал фактор в стрессовых условиях.

Использование результатов анализа главных компонент, построенного на основе матрицы парных корреляций, позволяет снизить количество оцениваемых показателей без потери эффективности отбора. Так, если к одному фактору относятся сразу несколько параметров, и они имеют высокую факторную нагрузку, значит они тесно коррелируют как между собой, так и с самим главным фактором. Поэтому часть таких параметров может быть исключена из анализа. Например, в наборе параметров $F_v/F_m, F_v/F_0, DI_0/RC$ и F_0 можно уделить внимание только индексу F_v/F_0 (характеризует способность антенных комплексов ФСII улавливать энергию возбуждения) и показателю DI_0/RC (характеризует размеры непроизводительно потраченной энергии). Величину первого показателя желательно повышать, второго – снижать. Оба достаточно сильно варьируют в использованных наборах сортов: для голозерных – 12,4 и 19,0 % соответственно, для пленчатых – 10,5 и 25,5 %.

В то же время, в условиях осмотического стресса (моделирующего условия ранней почвенной засухи, часто наблюдающейся в реальных условиях европейского Нечерноземья России) селекционная работа по усилению эффективности фотосинтеза листьев овса должна учитывать перестройку организации работы фотосистемы

Табл. 2. Величины факторных нагрузок параметров работы фотосистемы II листьев овса в условиях осмотического стресса

Параметр	Голозерные генотипы				Пленчатые генотипы			
	фактор 1	фактор 2	фактор 3	фактор 4	фактор 1	фактор 2	фактор 3	фактор 4
F_v/F_m	0,944	-	-	-	0,505	0,784	-	-
F_v/F_0	0,946	-	-	-	-	0,801	-	-
ψ_0	0,679	0,683	-	-	0,703	-	-	-
δ_{RE}	-0,705	-0,625	-	-	0,687	-0,552	-	-
ψ_{RE}	-	-	-	0,945	0,864	-	-	-
ABS/RC	-0,845	0,506	-	-	-0,873	-	-	-
TR_0/RC	-0,702	0,636	-	-	-	0,630	-	-
ET_0/RC	-	0,929	-	-	-	-	0,522	0,517
DI_0/RC	-0,943	-	-	-	-0,904	-	-	-
PI_{ABS}	0,947	-	-	-	0,867	-	-	-
PI_{ABS_total}	0,881	-	-	-	0,926	-	-	-
F_0	-0,642	-	0,706	-	-0,799	-	0,507	-
F_m	-	-	0,976	-	-0,717	-	0,545	-
Объясняемая вариабельность, %	54,7	20,2	12,3	9,9	52,3	21,0	10,7	7,4

II и изменения характера взаимодействия различных показателей этой системы.

Выводы. Характер влияния осмотического стресса на контроль параметров быстрой флуоресценции хлорофилла у двух подвидов овса значительно отличается. У пленчатых генотипов четыре главных фактора ответственны за 94,2 % (контроль) и 91,4 % (стресс) варибельности оцениваемых параметров. У голозерных овсов в отсутствии стресса выявлено 3 главных фактора (отвечают за 90,5 % варибельности), в условиях стресса – четыре (97,1 % варибельности). Показатели F_0 , DI_0/RC , δ_{RE} , и F_v/F_m в обоих наборах генотипов контролировал совместно один фактор, однако направления действия на это фактор показателей DI_0/RC и F_v/F_m были прямо противоположными в контроле и в стрессовых условиях: показатель DI_0/RC в контроле снижал действие фактора, а при стрессе усиливал (факторные нагрузки от –0,904 до 0,984); показатель F_v/F_m , наоборот, усиливал в контроле и снижал при стрессе (величины нагрузок от 0,944 до –0,915). Показатель δ_{RE} в обоих наборах генотипов овса в отсутствии стресса усиливал действие контролирующих факторов (факторные нагрузки от 0,564 до 0,740); в условиях осмотического стресса – у голозерных генотипов снижал (факторные нагрузки от –0,625 до –0,705), у пленчатых генотипов действие одного фактора снижал, а второго – усиливал (факторные нагрузки соответственно –0,552 и 0,687). В контрольных условиях в обоих наборах генотипов совместно контролировались группы параметров [F_v/F_m , F_v/F_0 , DI_0/RC и F_0] и [ABS/RC и TR_0/RC]. Под действием осмотического стресса у голозерных генотипов картина не изменялась, а у пленчатых образцов контроль показателей ABS/RC и TR_0/RC переходил к разным факторам, контроль показателя F_v/F_0 – к другому главному фактору.

В целом, селекционная работа по усилению эффективности фотосинтеза листьев в условиях ранней почвенной засухи должна учитывать различия в контроле параметров работы PSII двух подвидов овса.

Литература

1. Культурная флора. Овес. Т. 2. Ч. 3. / под ред. В. Д. Кобылянского, В. Н. Солдатова. М.: Колос, 1994. 367 с.
2. Селекция голозерного овса, ценного по качеству зерна / Г. А. Баталова, С. Н. Шевченко, М. В. Тулякова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2016. № 5. С. 6–9.
3. Влияние генотипа и условий выращивания овса на содержание биологически активных компонентов в зерне / С. А. Герасимов, В. И. Полонский, А. В. Сумина и др. // Химия растительного сырья. 2020. № 2. С. 65–71. doi: 10.14258/jcprm.2020025515.
4. Изучение голозерного овса из коллекции ВИР на качественные показатели в условиях Казахстана / А. И. Абуғалиева, И. Г. Лоскутов, Т. В. Савин и др. // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021. Т. 182(1). С. 9–21. doi: 10.30901/2227-8834-2021-1-9-21.
5. Новый подход к структурированию сортового разнообразия голозерных и пленчатых форм культурного овса (*Avena sativa* L.) / И. Г. Лоскутов, Т. В. Шеленга, А. В. Конарев и др. // Экологическая генетика. 2020. Т. 18 (1). С. 27–41.
6. Лисицын Е. М., Чуракова С. А., Баталова Г. А. Генотипическая варибельность функционирования фотосистемы II листьев пленчатого и голозерного овса // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183 (3). С. 17–26. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-17-26.
7. Comrey A. L. Factor-analytic methods of scale development in personality and clinical psychology // J Consult Clin Psychol. 1988. Vol. 56. P. 754–761. doi: 10.1037//0022-006x.56.5.754.
8. Генетика развития растений / Л. А. Лутова, Н. А. Проворов, О. Н. Тиходеев и др. / под ред. С. Г. Инге-Вечтомова. СПб.: Наука, 2000. 539 с.
9. Effects of drought stress during critical periods on the photosynthetic characteristics and production performance of Naked oat (*Avena nuda* L.) / X. Zhang, W. Liu, Y. Lv, et al. // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 11199. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-15322-3> (дата обращения: 21.08.2023). doi: 10.1038/s41598-022-15322-3.
10. Stadnik B., Tobiasz-Salach R. Physiological Response of Oat (*Avena sativa* L.) to the Foliar Application of Silicon in Conditions of Increased soil Salinity // Chem. Proc. 2022. Vol. 10. Article 21. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4583/10/1/21> (дата обращения: 21.08.2023). doi: 10.3390/IOAG2022-12332.
11. Application of photochemical parameters and several indices based on phenotypical traits to assess intraspecific variation of oat (*Avena sativa* L.) tolerance to drought / I. Marcinska, I. Czyzylo-Mysza, E. Skrzypek, et al. // Acta Physiol Plant. 2017. Vol. 39. Article 153. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11738-017-2453-2> (дата обращения: 21.08.2023). doi: 10.1007/s11738-017-2453-2.
12. PSII Activity Was Inhibited at Flowering Stage with Developing Black Bracts of Oat / B. Liu, D. Zhang, M. Sun, et al. // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. Article 5258. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/10/5258> (дата обращения: 21.08.2023). doi: 10.3390/ijms22105258.
13. Sunil B., Strasser R. J., Raghavendra A. S. Targets of nitric oxide (NO) during modulation of photosystems in pea mesophyll protoplasts: studies using chlorophyll a fluorescence // Photosynthetica. 2020. Vol. 58. P. 452–459. doi: 10.32615/ps.2019.183.
14. Нестеренко Т. В., Шихов В. Н., Тихомиров А. А. Флуоресцентный метод определения реактивности фотосинтетического аппарата листьев растений // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80. № 3. С. 187–199. doi: 10.1134/S0044459619030060.
15. Photosynthetic activity and metabolic profiling of bread wheat cultivars contrasting in drought tolerance / A. Ghaffar, N. Hussain, R. Ajaj, et al. // Front. Plant Sci. 2023. Vol. 14. Article 1123080. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1123080/full> (дата обращения: 21.08.2023). doi: 10.3389/fpls.2023.1123080.
16. Физиологические реакции линий пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с генетически различным опушением листа на водный дефицит / С. В. Осипова, А. В. Рудиковский, А. В. Пермяков и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24(8). С. 813–820. doi: 10.18699/VJ20.678.

Поступила в редакцию 26.05.2023

После доработки 22.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

ОЦЕНКА СЕЛЕКЦИОННЫХ ФОРМ И СОРТОВ КЛЕВЕРА ГИБРИДНОГО РАЗЛИЧНОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОГО РЕГИОНА*

В. И. Чернявских, доктор сельскохозяйственных наук, **Е. В. Думачева**, доктор биологических наук, **Л. Д. Сайфутдинова**, **В. Г. Чмирев**

Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В. Р. Вильямса,
141055, Московская обл., Лобня, ул. Научный городок, корп. 1
E-mail: dumacheva63@mail.ru

*Исследования проводили с целью оценки дикорастущих форм клевера гибридного (*Trifolium hybridum* L.) различного географического происхождения в год посева (первый год жизни травостоя), в сравнении с районированными сортами, в условиях неустойчивого увлажнения Центрально-Черноземного региона. Изучено 20 сортов и дикорастущих форм – сорта Новатор (стандарт), Первенец, Фрегат, дикорастущие формы из Северо-Западного, Центрального, Волго-Вятского, Центрально-Черноземного регионов, Татарстана, Чувашии, Канады и др.) работу выполняли в Белгородской области в двух закладках коллекционных питомников в 2022–2023 гг. на черноземе типичном. Наибольшей урожайностью сухого вещества в год посева (0,411...0,504 кг/м²) в среднем за два года отличались сорта Новатор (стандарт) и Первенец, а также дикорастущие формы из Канады (ВИК 8), Татарстана (ВИК № 753), Московской (М-2/21) и Белгородской (Б-2/20) областей. Особую ценность переставляет форма М-2/21. При урожайности сухого вещества в год посева в 2022 г. на уровне стандарта (0,416 кг/м²), в 2023 г. номер обеспечивал урожайность 0,672 кг/м², достоверно превосходя стандарт на 0,165 кг/м², или 32,5 %. В среднем за два года образцы проявляли значительную морфологическую разнотипность и вариацию по длине стебля (43,1...57,6 см), массе одного стебля (1,6...3,5 г), облиственности (26,5...50,1 %). При оценке форм клевера гибридного по продуктивности в год посева к наиболее надежным признакам оценки можно отнести длину ($r=0,514$) и массу стебля ($r=0,599$), степень проявления антоциановой окраски стебля ($r=0,501$) и площадь листа ($r=0,521$). Использование кластерного анализа позволяет достаточно надежно выделять ценные селекционные образцы по комплексу сопряженных селекционных признаков.*

EVALUATION OF BREEDING FORMS AND VARIETIES OF HYBRID CLOVER OF DIFFERENT GEOGRAPHICAL ORIGIN IN THE CONDITIONS OF THE CENTRAL BLACK EARTH REGION

V. I. Cherniavskih, E. V. Dumacheva, L. D. Sajfutdinova, V. G. Chmirev

Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology,
141055, Moskovskaya obl., Lobnya, ul. Nauchnyi gorodok, korp. 1
E-mail: dumacheva63@mail.ru

*The aim of the research was to evaluate wild forms of hybrid clover (*Trifolium hybridum* L.) of different geographical origin in the year of sowing (the first year of herbage life), in comparison with varieties, under conditions of unstable moisture in the Central Black Earth region. We studied 20 varieties and wild forms – varieties Novator (standard), Pervenets, Fregat, wild forms from the North-West, Central, Volgo-Vyatsky, Central Black Earth regions, Tatarstan, Chuvashia, Canada, etc.). The research was conducted in Belgorod region in two plots of collection nurseries in 2022–2023 on typical chernozem. The highest dry matter yield in the year of sowing (0.411...0.504 kg/m²) on average for two years possessed varieties Novator (standard) and Pervenets, as well as wild forms from Canada VIC 8, Tatarstan – VIC № 753, Moscow – M-2/21 and Belgorod – B-2/20 regions. The form M-2/21 is of particular value. With dry matter yield in the year of sowing in 2022 at the level of the standard (0.416 kg/m²) in 2023 the number provided a yield of 0.672 kg/m², significantly exceeding the standard by 0.165 kg/m², or 32.5 %. On average for two years, the samples showed significant morphological dissimilarity and variation in length of one stem (43.1...57.6 cm), weight of one stem (1.6...3.5 g), obliquity (26.5...50.1 %). When evaluating the forms of hybrid clover by productivity in the year of sowing, the most reliable evaluation traits include stem length ($r=0.514$) and stem weight ($r=0.599$), the degree of anthocyanin colouration of the stem ($r=0.501$) and leaf area ($r=0.521$).*

Ключевые слова: гибридный клевер (*Trifolium hybridum* L.), урожай сухого вещества, селекция, морфологические признаки, дикорастущие формы, сорта, кластерный анализ, корреляция

Key words: *Trifolium hybridum* L., dry matter yield, selection, morphological characters, wild forms, varieties, cluster analysis, correlation

Многолетние бобовые травы – важнейший компонент агроэкосистем и неизменный лидер по продуктивности, полифункциональности, экологической ценности, по сравнению с другими культурами, для сохранения и повышения почвенного плодородия, стабилизации кормовой базы животноводства [1, 2, 3].

Для различных регионов страны особую важность приобретают вопросы расширения сортимента

и видового разнообразия кормовых бобовых трав связанные с необходимостью использования различных почв, в том числе с низким плодородием, освоения залежей, быстрого создания устойчивой кормовой базы животноводства. На сегодняшний день это сопряжено с острой необходимостью импортозамещения и формирования рынка отечественных семян [4, 5].

*исследования выполнены при поддержке Нацпроекта «Наука и университеты» на создание молодежной лаборатории в рамках Госзадания FGGW-2022-0013 «Разработка теоретических основ ускорения интродукции, селекции и повышения эффективности семеноводства сельскохозяйственных растений на основе оценки сопряженности фундаментальных физиологических процессов».

Ценной культурой для создания травостоев различного назначения считают клевер гибридный или шведский (*Trifolium hybridum* L.), обладающий широкой амплитудой устойчивости к комплексу био- и абиотических факторов [6, 7, 8].

Его активно используют в смешанных посевах, при создании лугов и пастбищ, кормовых севооборотов, а также в качестве сидеральной и медоносной культуры [9, 10]. Ткани растений клевера гибридного содержат ряд биологически активных веществ, в связи с чем его рассматривают как возможный источник флавоноидов и изофлавоноидов [11, 12].

Работу по созданию сортов клевера гибридного в России ведут с 60-х гг. прошлого века. Селекция на продуктивность зеленой массы, семенную продуктивность, содержания белка, жира и клетчатки в сухом веществе, позволила создать ряд ценных сортов и селекционных форм [13].

В 1962–2022 гг. в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ, включены 16 сортов клевера, в том числе 15 – отечественной селекции. Большую роль в становлении и развитии селекции клевера гибридного играют ученые Федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса (ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»), создавшие такие высокопродуктивные сорта, как Первенец (1979 г.), Маяк (1999 г.) и Новатор (2022 г.) [14].

В современных работах широко используют индуцированный мутагенез, метод поликросса, экологическую селекцию, многократный массовый отбор из местных популяций и сортов, биотипический отбор с привлечением в качестве источников ценных признаков родительских форм, имеющих различное происхождение и высокую общую комбинационную способность [15].

Мировой опыт возделывания клевера гибридного показал значительную ценность местных дикорастущих форм, их высокую продуктивность, устойчивость к неблагоприятным факторам среды [16].

Тенденцией современного травосеяния считают максимальную интенсификацию производства на основе ускоренного формирования высокопродуктивных травостоев уже непосредственно в год посева с их использованием как в однолетней, так и в многолетней культуре [17, 18]. Вовлечение в процесс селекции дикорастущих форм различного эколого-географического происхождения, позволяет вести необходимый отбор исходного материала, обладающего рядом полезных селекционных признаков и свойств [19, 20].

Клевер гибридный – высокопродуктивная культура, распространенная в регионах с достаточным количеством влаги. Главной задачей его селекции сегодня считают создание высокопродуктивных сортов высокого качества, адаптированных к различным экологическим условиям изменяющегося климата в разных регионах [21]. Клевер гибридный, обладая потенциально высокой скоростью роста на начальных этапах, может быть перспективным не только в зонах с достаточным увлажнением, но и в других регионах [22].

Цель исследования – оценка дикорастущих форм клевера гибридного различного географического происхождения в год посева (первый год жизни травостоя), в сравнении с наиболее продуктивными сортами, в условиях неустойчивого увлажнения Центрально-Черноземного региона.

Методика. Изучали 20 селекционных образцов клевера гибридного из коллекции лаборатории генофонда

ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса», а также селекционные сорта и оригинальные образцы, отобранные авторами в экотопах юга Среднерусской возвышенности и Московской области – сорта Новатор, Маяк, Первенец (селекции ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса»), сорт Фрегат (селекции Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого), ВИК № 785 (дикорастущий, Тверская область), ВИК № 92 (дикорастущий, Сахалин), ВИК № 795 (дикорастущий, Рязанская область), ВИК № 755 (дикорастущий, Чувашия), ВИК № 612 (дикорастущий, Ленинградская область), ВИК № 641 (дикорастущий Вологодская область), ВИК № 534 (дикорастущий Карелия), ВИК № 672 (дикорастущий, Смоленская область), ВИК № 8 (дикорастущий, Канада), ВИК № 665 (дикорастущий, Нижегородская область), ВИК № 753 (дикорастущий, Республика Татарстан), М-2/21 (дикорастущий, Московская область), М-3/21 (дикорастущий, Московская область), М-4/21 (дикорастущий, Московская область), Б-1/20 (дикорастущий, Белгородская область), Б-2/20 (дикорастущий, Белгородская область).

Оценивали проявление основных морфологических признаков и свойств растений клевера гибридного первого года жизни (год посева) в условиях Центрально-Черноземного региона.

Исследования проводили на опытном поле семеноводческого предприятия ИП «С. А. Мавродин» в с. Драгунское Белгородского района Белгородской области. Почва – чернозем типичный, содержание гумуса 4,9...5,1 %, P_2O_5 и K_2O (по Чирикову) – 120 и 180 мг/кг соответственно, pH_{KCl} – 6,8. За период вегетации с температурой воздуха выше $10^{\circ}C$ среднесуточное количество выпадающих осадков составляет 275 мм, среднесуточная температура воздуха – $16,8^{\circ}C$.

Исследования выполняли стандартным методом в двух закладках коллекционных питомников в 2022 и 2023 гг. [23]. Делянки однорядные длиной 3 м, ширина междурядий 0,7 м. Норма высева – 100 всхожих семян на 1 погонный метр. Стандарт – сорт Новатор, высевали через каждые 4 номера. Коллекционный питомник закладывали без повторностей в соответствии с общепринятой методикой [24]. Учет урожая зеленой массы проводили путем скашивания делянок 1 раз за вегетацию в фазе начала цветения. Оценивали среднюю урожайность стандарта, его варьирование и стандартную ошибку, за ошибку урожайности селекционных образцов принимали стандартную ошибку среднего стандарта по общепринятой методике оценки селекционных данных с малым количеством исходного материала в селекционных питомниках [25]. Зеленую массу высушивали в сушильном шкафу при температуре $105^{\circ}C$ и определяли массовую долю сухого вещества (СВ). Урожайность зеленой массы пересчитывали на сухое вещество. После этого проводили попарное сравнение величин урожая селекционных образцов со средним стандарта. Разницу оценивали с использованием *t*-критерия, применение которого обусловлено тем, что дисперсии урожая образцов одинаковы [26].

На отдельных растениях оценивали стандартные морфологические признаки в соответствии с UPOVTG/5/4 [27] и дополнительные показатели – масса листьев (г), масса стебля (г), масса 1 стебля с листьями (г), облиственность (%), длина стебля (см), толщина стебля (см), число междоузлий стебля (шт.), длина листа (см), ширина листа (см), соотношение длина/ширина листа, площадь листа (см²), интенсивность окраски соцветия (1...9 баллов), диаметр соцветия (см), интенсивность антоциановой окраски стебля (1...9 баллов).

Табл. 1. Характеристика селекционных образцов клевера гибридного в первый год жизни по некоторым морфологическим признакам

Селекционный образец	Масса стебля, г СВ			Длина стебля, см			Облиственность, %		
	2022 г.	2023 г.	среднее	2022 г.	2023 г.	среднее	2022 г.	2023 г.	среднее
Новатор (st)	2,9	4,1	3,5	43,4	62,3	52,9	40,9	37,1	39,0
Маяк	2,1*	2,9*	2,5*	44,0	52,7*	48,4	31,2	31,6	31,4
Первенец	3,1	4,1	3,6	39,6	63,3	51,5	38,8	37,4	38,1
ВИК № 785	1,4*	1,8*	1,6*	43,7	50,6*	47,2	25,5	27,4	26,5
ВИК № 92	1,9*	2,0*	2,0*	44,2	51,8*	48,0	41,7	30,2	36,0
ВИК №795	2,6	3,0*	2,8	47,2	56,3	51,8	40,5	40,3	40,4
ВИК №755	2,3*	3,2	2,8	39,3	55,1	47,2	45,9	31,2	38,6
Фрегат	1,6*	1,8*	1,7*	33,2*	54,3	43,8*	42,2	38,9	40,6
ВИК №612	1,9*	2,1*	2,0*	36,4*	53,2*	44,8*	36,5	36,5	36,5
ВИК №641	2,1*	3,2	2,6*	37,4*	51,5*	44,5*	39,9	36,0	38,0
ВИК №534	2,5	2,9*	2,7	43,3	64,5	53,9	44,2	37,9	41,1
ВИК №672	2,0*	2,6*	2,3*	36,7*	56,8	46,8	37,1	41,7	39,4
ВИК №8	2,9	4,1	3,5*	46,9	68,2	57,6	45,9	44,3	45,1
ВИК №665	2,6	3,0*	2,8*	40,5	52,2*	46,4	43,2	44,5	43,9
ВИК №753	2,6	3,4*	3,0*	45,6	57,6	51,6	52,1	44,2	48,2
М-2/21	2,9	4,6	3,8*	41,8	67,4	54,6	43,2	33,9	38,6
М-3/21	1,9*	2,8*	2,4*	32,4*	53,7*	43,1*	46,3	38,2	42,3
М-4/21	2,9	3,5	3,2	47,1*	56,5	51,8	53,7	46,4	50,1*
Б-1/20	1,6*	1,8*	1,7*	32,3*	53,3*	42,8*	52,2	39,9	46,1
Б-2/20	1,9*	1,9*	1,9*	37,4*	54,4	45,9	45,6	39,1	42,4
Среднее	2,3	2,9	2,6	40,6	56,8	48,7	42,3	37,8	40,1
НСР ₀₅	0,4	0,9	0,9	5,1	8,2	7,0	10,5	F<F ₀₅	13,3

*различия достоверны, по сравнению со стандартом, при $p < 0,05$.

Для выявления естественной объективно существующей связи между изучаемыми селекционными образцами, которые можно отнести к выборке, взятой из различных генеральных совокупностей (из регионов с различными географическими и климатическими условиями) применяли кластерный анализ. Для его проведения использовали средние характеристики 20-и сортообразцов за 2022–2023 гг. по ранее перечисленным изучаемым результативным признакам. Метод кластеризации – самый дальний сосед (полная связь), метрика расстояния – Евклидова, пакет прикладных программ Statgraphics.

Морфологические признаки оценивали в 20-и кратной повторности. Полученные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа. Для выявления силы влияния факторов на результативные признаки использовали метод Снедекора. Для выявления тесноты связей между изучаемыми признаками использовали корреляцию Пирсона [28].

Результаты и обсуждение. Для популяций клевера гибридного различного географического происхождения была характерна значительная изменчивость морфологических признаков (форма куста, длина и ширина листочков, их форма, длина стеблей, число междоузлий, окраска соцветий размеры головки соцветия и др.), обусловленная популяционными особенностями форм различного географического происхождения, экологическими условиями исходных местообитаний. Проявление тех или иных признаков в культуре в значительной степени зависит от региональных экологических условий [16].

В годы исследования (2022–2023 гг.) изменчивость длины стебля у сортов и селекционных образцов различного географического происхождения составляла 32,3...68,2 см, массы одного стебля – 1,4...4,6 г, толщины стебля – 2,7...3,7 мм, длины листа – 2,4...3,5 см, ширины листа – 1,3...2,6 см (табл. 1).

Варьирование обусловлено как особенностями сортообразцов, так и условиями года. В 2022 г. масса стебля на уровне стандарта отмечена у растений восьми образцов (Первенец, ВИК № 795, ВИК № 534, ВИК № 8, ВИК № 665, ВИК № 753, М–2/21) с массой стебля 2,5...3,1 г СВ. В 2023 г. таких было шесть (Первенец, ВИК № 755, ВИК № 641, ВИК № 8, М-2/21, М-4/21)

с варьированием от 3,2 до 4,6 г. У растений остальных номеров масса стебля была ниже, чем у стандарта, в 2022 г. на 10,3...51,7 %, в 2023 г. – на 26,8...56,1 %. В среднем за два года исследований селекционные образцы Маяк, ВИК № 785, ВИК № 92, Фрегат, ВИК № 612, ВИК № 672, Б-1/20 и Б-2/20 по массе стебля уступали стандарту на 1,7...2,5 г.

Длина стебля изученных образцов в 2022 г. варьировала в пределах 32,2...47,2 см, в 2023 г. – 50,6...68,2 см. За два года исследований селекционные образцы ВИК № 612, ВИК № 641, М-3/21, Б-1/20 были ниже стандарта в среднем на 8,1...10,1 см.

По облиственности растений изученные селекционные образцы отличались от стандарта не значительно. Отдельно необходимо отметить образец М-4/21, найденный в Московской области, со средней за два года облиственностью 50,1 %, что на 11,1 % выше стандарта.

Наши данные в целом согласуются с результатами исследований Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР)

Табл. 2. Сила влияния различных факторов проявление морфологических признаков клевера гибридного (2022–2023 гг.)

Признак	Сила влияния фактора, % ¹				
	h ² _A	h ² _B	h ² _{AB}	h ² _П	h ² _{сл}
Масса листьев, г	9,7	43,1	9,5*	1,2	36,5
Масса стебля, г	30,1	40,5	9,5	0,4	19,5
Масса 1 стебля с листьями, г	23,4	42,0	10,4	0,8	23,4
Облиственность, %	5,4*	40,2	6,7*	0,1	47,5
Длина стебля, см	11,2	57,6	15,8	1,0	14,3
Толщина стебля, см	4,9*	26,8*	5,8*	5,8	56,7
Число междоузлий стебля, шт	2,2	60,7	2,3*	2,8	35,4
Длина листа, см	1,2*	50,7	1,9*	2,5	43,7
Ширина листа, см	15,0	42,7	1,3*	3,2	37,9
Площадь листа, см ²	5,8	56,0	0,7*	5,3	32,0
Соотношение длина/ширина	3,5	42,4	0,8*	0,8	52,4
Интенсивность окраски соцветия, балл	4,9*	26,8*	5,8*	5,8	56,7
Диаметр соцветия, см	10,7	53,7	3,5*	1,5	33,2
Антоциановая окраска стебля, балл	19,1	6,4*	1,1	0,2	32,4

¹сила влияния источника вариации: h²_A – фактор А «условия года»; h²_B – фактор В «генотип селекционного образца»; h²_{AB} – взаимодействие факторов АВ; h²_П – повторение; h²_{сл} – случайные факторы; *нулевую гипотезу влияния организованного фактора на результативный признак в опыте отвергать нельзя (F_f < F₀₅).

при изучении изменчивости признаков популяций клевера гибридного прибалтийской, западносибирской, среднерусской, канадской, западноевропейской и скандинавской агроэкологической групп, а также северо-русского, сахалинского, кавказского экотипа дикорастущих клеверов. Растения разных популяций обладали высоким полиморфизмом различных признаков, что необходимо учитывать при их селекционной оценке в тех или иных экологических условиях [16].

Дисперсионный анализ двухфакторных комплексов позволил оценить степень влияния организованных факторов (А – «условия года», В – «генотип селекционного образца» и их взаимодействие), а также неорганизованных факторов. Самая высокая доля в общем варьировании большинства изученных признаков приходилась на генотип. Самое сильное влияние он оказывал число междоузлий ($h^2_B=60,7\%$), площадь листа ($h^2_B=60,7\%$), на длину стеблей ($h^2_B=57,6\%$), диаметр соцветия ($h^2_B=53,7\%$). Это может свидетельствовать о том, что они наиболее важны при оценке исходного материала (табл. 2).

В год посева наименьшая урожайность зеленой массы (2022 г. – 0,153...0,231 кг/м², 2023 г. – 0,131...0,299 кг/м²) отмечена у сорта Фрегат (Кировская область), селекционных образцов ВИК № 92 (дикорастущий, Сахалин), ВИК № 755 (дикорастущий, Чувашия), ВИК № 534 (дикорастущий Карелия), ВИК № 672 (дикорастущий, Смоленская область), ВИК № 665 (дикорастущий, Нижегородская область). Остальные генотипы формировали урожайность на уровне стандарта или выше: в 2022 г. – 0,262...0,416 кг/м², в 2023 г. – 0,402...0,672 кг/м² (табл. 3).

Наибольший интерес среди изученных образцов представляла дикорастущая форма М-2/21, отобранная в Московской области. При урожайности сухого вещества в год посева в 2022 г. на уровне стандарта (0,416 кг/м²), в 2023 г. она составила 0,672 кг/м², что было достоверно выше стандарта на 0,165 кг/м², или 32,5%. Образец отличался высокой скоростью роста в год посева и быстро формировал продуктивную травостой.

Для группировки селекционных образцов по нескольким признакам одновременно и комплексной

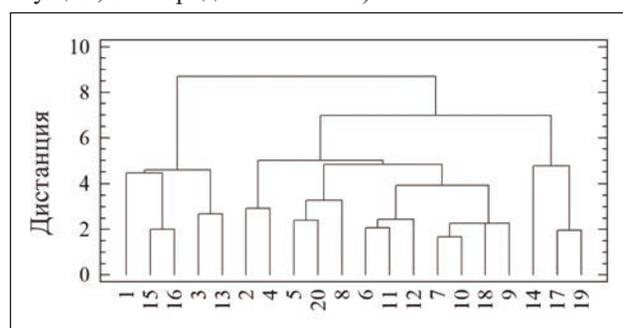
Табл. 3. Урожай сухого вещества селекционных образцов клевера гибридного различного географического происхождения, кг/м²

Селекционный образец	2022 г.		2023 г.		В среднем	
	М±m	t _f *	М±m	t _f	М±m	C _v , %
Новатор (st)	0,336±0,020	-	0,507±0,026	-	0,421±0,086	28,8
Маяк	0,298±0,018	1,4	0,488±0,025	0,5	0,393±0,095	34,2
Первенец	0,314±0,019	0,8	0,507±0,026	0,1	0,411±0,097	33,2
ВИК № 785	0,262±0,016	2,9	0,412±0,021	2,8	0,337±0,075	31,5
ВИК № 92	0,167±0,010	7,5	0,131±0,007	14,0	0,149±0,018	17,1
ВИК № 795	0,319±0,019	0,6	0,408±0,021	3,0	0,364±0,045	17,3
ВИК № 755	0,183±0,011	6,7	0,286±0,015	7,4	0,235±0,05	31,1
Фрегат	0,203±0,012	5,7	0,281±0,014	7,6	0,242±0,03	22,8
ВИК № 612	0,283±0,017	2,0	0,402±0,021	3,1	0,343±0,060	24,6
ВИК № 641	0,316±0,019	0,7	0,418±0,021	2,6	0,367±0,051	19,7
ВИК № 534	0,153±0,009	8,3	0,196±0,010	11,2	0,175±0,022	17,4
ВИК № 672	0,231±0,014	4,3	0,357±0,018	4,7	0,294±0,063	30,3
ВИК № 8	0,336±0,022	0,1	0,611±0,031	2,6	0,474±0,138	41,1
ВИК № 665	0,202±0,012	5,7	0,299±0,015	6,9	0,251±0,049	27,4
ВИК № 753	0,381±0,023	1,5	0,627±0,032	2,9	0,504±0,123	34,5
М-2/21	0,416±0,025	2,5	0,672±0,034	3,8	0,544±0,128	33,3
М-3/21	0,298±0,018	1,4	0,431±0,022	2,2	0,365±0,067	25,8
М-4/21	0,312±0,019	0,9	0,583±0,030	1,9	0,448±0,136	42,8
Б-1/20	0,386±0,023	1,7	0,422±0,022	2,5	0,404±0,018	6,3
Б-2/20	0,398±0,024	2,0	0,466±0,024	1,2	0,432±0,034	11,1
Среднее	0,290±0,017	1,7	0,425±0,022	2,4	0,357±0,068	26,8

*t₀₅=3,18

оценки, используют методы многомерной статистики. Ранее в селекционных исследованиях с многолетними травами они показали достаточно высокую эффективность как для ординации селекционных образцов, так и отбора их для практической селекции [29].

Изученные сортообразцы распределились в отдельные обособленные группы (кластеры), по общности признаков, изучаемых в опытах (см. рисунок). Первый из них сформировали 5 генотипов – сорт Новатор (стандарт), сорт Первенец, селекционный образец ВИК № 8 (дикорастущий, Канада), ВИК № 753 (дикорастущий, Республика Татарстан), М-2/21 (дикорастущий, Московская область). Второй кластер объединил в себе 13 сортов и форм из различных регионов (Сахалин, Карелия, Чувашия Московская, Смоленская, Ленинградская, Вологодская, Рязанская, Тверская область). Третий кластер был представлен тремя сортообразцами – ВИК № 665 (дикорастущий, Нижегородская область), М-3/21 (дикорастущий, Московская область), Б-1/20 (дикорастущий, Белгородская область).



Дендрограмма распределения при кластеризации по морфологическим признакам 20-и селекционных образцов клевера гибридного в среднем за 2022–2023 гг.: 1 – Новатор (st); 2 – Маяк; 3 – Первенец; 4 – ВИК № 785; 5 – ВИК № 92; 6 – ВИК № 795; 7 – ВИК № 755; 8 – Фрегат; 9 – ВИК № 612; 10 – ВИК № 641; 11 – ВИК № 534; 12 – ВИК № 672; 13 – ВИК № 8; 14 – ВИК № 665; 15 – ВИК № 753; 16 – М-2/21; 17 – М-3/21; 18 – М-4/21; 19 – Б-1/20; 20 – Б-2/20.

Сравнительная оценка средних величин результативных признаков селекционных номеров, вошедших в разные кластеры с использованием t-критерия Стьюдента, выявила достоверные различия только по трем признакам – урожай сухого вещества, длина стебля, масса стебля (табл. 4).

Селекционные образцы из первого кластера достоверно превосходили по урожайности генотипы второго на 0,314 г/м² (t_f=2,15, t₀₅=2,13) и находились на одном уровне с третьим (t_f=1,90, t₀₅=2,45). Различий по величине этого признака между вторым и третьим кластером так же не выявлено. По длине стебля образцы первого кластера были выше образцов второго кластера на 8,6 см (t_f=2,77, t₀₅=2,13), образцов второго – на 18,4 см (t_f=7,52, t₀₅=2,45), разница по высоте между растениями второго и третьего кластеров составляла 9,8 см (t_f=3,99, t₀₅=2,16). Растения первого кластера формировали стебли с более высокой массой, по сравнению с растениями 2 и 3 кластера, на 1,2 г (t_f=2,51; t₀₅=2,13 для второго и t_f=2,74; t₀₅=2,45 для третьего кластера).

Значимое влияние на величину урожайности сухого вещества, подтвержденное коэффициентами корреляции Пирсона, достоверное при p<0,05, среди изучаемых результативных признаков оказывали длина стебля (r=0,514), масса стебля (r=0,599), площадь листа (r=0,521), степень выраженности антоциановой окраски стебля (r=0,501). Кроме того, установлены тесные зависимости между интенсивностью окраски соцветий

Табл. 4. Результаты кластерного анализа, характеризующие сходство исследуемых образцов клевера гибридного (среднее за 2022–2023 гг.)

Результативный признак	Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3	
	M±m*	Cv, %	M±m	Cv, %	M±m	Cv, %
Урожай сухого вещества, кг/м ²	0,471±0,036	11,9	0,315±0,063	24,4	0,340±0,059	23,5
Длина стебля, см	49,8±2,2	6,8	41,2±4,2	12,5	31,4±1,1	5,1
Толщина стебля, мм	3,3±0,3	12,4	3,3±0,1	5,8	3,1±0,3	12,4
Масса стебля, г	3,5±0,2	8,5	2,3±0,4	21,4	2,3±0,4	24,2
Антоциановая окраска стебля, балл	4,7±0,7	21,8	4,1±0,7	24,3	5,2±1,9	46,2
Интенсивность окраски соцветия, балл	5,9±0,5	12,5	5,4±0,9	21,8	6,8±1,0	20,5
Ширина листа, см	1,7±0,1	8,6	1,6±0,2	12,7	1,6±0,1	12,4
Длина листа, см	3,0±0,4	17,8	2,6±0,2	10,6	3,1±0,2	7,7
Площадь листа, см	4,1±0,5	17,6	3,2±0,3	12,3	3,8±0,5	18,5
Облиственность, %	41,8±3,2	10,9	38,4±3,9	15,1	44,1±1,3	4,3
Диаметр соцветия, см	1,6±0,1	4,2	1,8±0,1	9,6	1,7±0,1	11,7

M – среднее, m – ошибка средних; Cv – коэффициент вариации; n – число селекционных образцов в кластере.

и антоциановой окраской стебля ($r=0,869$). В целом, можно предполагать, что потенциально большей продуктивностью кормовой массы с высокой долей вероятности в условиях недостаточного увлажнения Центрально-Черноземного региона могут обладать высокорослые формы клевера ползучего с длинными стеблями большой массы, выраженной антоциановой окраской и интенсивной розовой окраской соцветий.

Выводы. Таким образом, селекционные образцы клевера гибридного различного географического происхождения проявляют значительную морфологическую разнотипность при возделывании в условиях Центрально-Черноземного региона. Максимальную продуктивность сухого вещества в год посева (в среднем на уровне 0,411...0,504 кг/м²) формируют сорта Новатор и Первенец, дикорастущие формы ВИК 8 (Канада), ВИК 753 (Республика Татарстан), М-2/21 (Московская область) и Б-2/20 (Белгородская область).

Значительный интерес для селекции представляет дикорастущая форма М-2/21, отобранная в Московской области. В отдельные годы он может достоверно превосходить по урожайности сухого вещества в год посева стандарт на 32,5 %. Образец отличается высокой скоростью роста в год посева и быстрым формированием высокопродуктивного травостоя.

К наиболее надежным признакам оценки селекционного материала клевера гибридного по продуктивности в год посева в условиях Центрально-Черноземного региона отнесены длина и масса стебля, степень проявления антоциановой окраски стебля и площадь листа. Использование кластерного анализа позволяет достаточно надежно выделять наиболее продуктивные селекционные образцы по комплексу сопряженных признаков.

Литература.

1. Думачева Е. В., Чернявских В. И. Биологический потенциал бобовых трав в естественных сообществах эрозионных агроландшафтов Центрального Черноземья // *Кормопроизводство*. 2014. № 4. С. 8–11.
2. Productivity of galega (*Galega orientalis*) in single-species and binary crops with sainfoin (*Onobrychis arenaria*): a case study of forest-steppe of European Russia / V. I. Cherniavskii, E. V. Dumacheva, F. N. Lisetskii, et al. // *Bioscience Biotechnology Research Communications*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 15–22. doi: 10.21786/bbrc/13.1/4.
3. Байкалова Л. П., Власова Т. С. Питательная ценность кормовой массы в зависимости от нормы высева и режима скашивания многолетних бобовых трав // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 6(171). С. 122–129. doi: 10.36718/1819-4036-2021-6-122-129.

4. Основные направления развития лугового кормопроизводства в России / А. А. Кутузова, Д. М. Тебердиев, К. Н. Привалова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 2. С. 17–20. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10204.
5. Косолапов В. М., Чернявских В. И. Кормопроизводство: состояние, проблемы и роль ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» в их решении // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36 № 4. С. 5–14. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_5.
6. Sheremet N., Lamanova T., Doronkin V. Agropopulations of *Trifolium Hybridum* (Fabaceae) on the Coal Mining Spoils in the Forest-Steppe of the Kuznetsk Basin // *BIO Web of Conferences*. 2020. Vol. 24. Article 00080. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2020/08/bioconf_pd2020_00080/bioconf_pd2020_00080.html (дата обращения 29.09.2023). doi: 10.1051/bioconf/20202400080.
7. Шергина О. В., Михайлова Т. А. Фитоэкстракция тяжелых металлов травянистыми растениями на техногенных почвах // *Химия растительного сырья*. 2022. № 4. С. 311–320. doi: 10.14258/jcprtm.20220411012.
8. Евстратова Л. П., Евсеева Г. В. Питательная ценность кормовой массы в зависимости от режима скашивания многолетних травостоев // *Кормопроизводство*. 2020. № 9. С. 7–11. doi: 10.25685/KRM.2020.9.2020.008.
9. Продуктивность агрофитоценозов при совместном выращивании многолетних трав и топинамбура / Л. П. Евстратова, Е. В. Николаева, Г. В. Евсеева и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021. № 5. С. 67–72. doi: 10.30850/vrsn/2021/5/67-72.
10. Курманов Р. Г., Галеев Р. И. Картографирование мелиоративных угодий европейской части России // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2021. № 3. С. 77–85.
11. Isolation and Structural Determination of Triterpenoid Glycosides from the Aerial Parts of Alsike Clover (*Trifolium hybridum* L.) / A. J. Pérez, M. Kowalczyk, A. M. Simonet, et al. // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2013. Vol. 61. No. 11. P. 2631–2637. doi: 10.1021/jf305541e.
12. Сравнительное исследование фенольных соединений видов рода клевер (*Trifolium* L.) флоры Сибири / В. Ю. Андреева, Г. И. Калинин, Т. В. Полуэктова и др. // *Химия растительного сырья*. 2018. № 1. С. 97–104. doi: 10.14258/jcprtm.2018011846.
13. Селекционеры ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса в развитии клеверосеяния России / М. Ю. Новоселов, Л. В. Дробышева, О. А. Старшинова и др. // *Кормопроизводство*. 2022. № 7. С. 34–41. doi: 10.25685/KRM.2022.7.2022.005.

14. Оценка кормовой продуктивности перспективных селекционных образцов многолетних клеверов и люцерны рогатого / М. Ю. Новоселов, Л. В. Дробышева, Г. П. Зятчина и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. № 2. С. 25–28. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10206.
15. Косолапов В. М., Чернявских В. И., Костенко С. И. Новые сорта кормовых культур и технологии для сельского хозяйства России // *Кормопроизводство*. 2021. № 6. С. 22–26. doi: 10.25685/KRM.2021.89.77.001.
16. 16. Культурная флора. М.: Колос, 1975. Т. 13: Многолетние бобовые травы (клевер, люцерна) / сост.: Н. А. Мухина, Н. Г. Хорошайлов, Т. А. Коломиец и др. М.: Колос, 1993. 334 с.
17. Косолапов В. М., Кутузова А. А. Исторические аспекты становления и развития лугового кормопроизводства в России и его перспективы в XXI веке // *Кормопроизводство*. 2022. № 2. С. 3–8. doi: 10.25685/KRM.2022.2.2022.008.
18. Трофимов, И. А. Природа, сельское хозяйство и глобализация / И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева // *Век глобализации*. 2022. № 2(42). С. 86–99. doi: 10.30884/vglob/2022.02.07.
19. Дикорастущие генетические ресурсы в селекции кормовых трав / В. М. Косолапов, Н. Н. Козлов, В. Л. Коровина и др. // *Кормопроизводство*. 2018. № 1. С. 29–32. doi: 10.25685/KRM.2018.2018.9950.
20. Хлесткина Е. К. Современные исследования генетических ресурсов растений: в развитие научных школ и научных направлений, основанных при Н. И. Вавилове // *Экологическая генетика*. 2022. Т. 20. № 3. С. 169–173. doi: 10.17816/ecogen112018.
21. Новый сорт клевера гибридного Фламинго / М. Н. Грипась, Е. Г. Арзамасова, Е. В. Попова и др. // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2016. № 3 (52). С. 10–14.
22. Evaluation of the effectiveness of land reclamation based on microbiological and biochemical parameters assessed in an ozokerite mining and processing landfill sown with *Trifolium hybridum* and *Dactylis glomerata* / J. Joniec, J. Gąsior, S. Voloshanska, et al. // *Journal of environmental management*. 2019. Vol. 242. P. 343–350. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.058>.
23. Методические указания по изучению коллекции многолетних кормовых трав / сост.: П. А. Лубенец, А. И. Иванов, Ю. И. Кириллов и др. Л.: ВИР, 1979. 42 с.
24. Селекция и семеноводство культивируемых растений / Ю. Л. Гужов, А. Фукс, П. Валичек. М.: Мир, 2003. 536 с.
25. Вольф В. Г. Статистическая обработка опытных данных. М.: Колос, 1966. 254 с.
26. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 352 с.
27. UPOV TG/5/4 «Guidelines For The Conduct Of Tests For Distinctness, Homogeneity And Stability». Original: English/anglais/englisch Date/Datum: 1985–11–13 https://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg005_04.pdf (дата обращения: 29.09.2023).
28. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
29. Семенная продуктивность сортообразцов овсяницы тростниковой газонного направления / В. М. Косолапов, В. И. Чернявских, М. Н. Маринич // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 13–18. doi: 10.31857/S2500262722010033.

Поступила в редакцию 07.08.2023

После доработки 28.08.2023

Принята к публикации 12.09.2023

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ СЕМЯН ЛЮПИНА БЕЛОГО

А. С. Цыгуткин, кандидат биологических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа –
филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра,
601390, Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2
E-mail: asz.ru@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения элементного состава различных частей семян люпина белого сортов Гамма, Дег и Дегер 1, которые возделывали в 2009–2011 гг. на Северо-Востоке Центрального Черноземья. Содержание 19 элементов определяли в Государственном центре агрохимической службы «Белгородский». Благодаря интенсивному потреблению питательных веществ люпин белый характеризуется уникальным составом семян, с содержанием многих нормируемых в кормлении животных и птицы химических элементов значительно большее, чем у других зернобобовых культур. По содержанию марганца люпин белый выступает растением-концентратором. В его семенах в значительных количествах накапливаются азот ($6,82 \pm 0,25$ %), фосфор ($0,45 \pm 0,07$ %), калий ($1,37 \pm 0,17$ %), магний ($0,17 \pm 0,02$ %), сера ($0,31 \pm 0,02$ %), железо ($41,85 \pm 1,36$ мг/кг), цинк ($48,55 \pm 4,33$ мг/кг), марганец ($390,70 \pm 181,57$ мг/кг), кобальт ($0,82 \pm 0,19$ мг/кг), молибден ($6,80 \pm 0,67$ мг/кг), которые сконцентрированы в большей степени в ядре. В оболочке содержание кальция ($0,35 \pm 0,02$ %), натрия ($0,240 \pm 0,006$ %), хрома ($0,329 \pm 0,049$ мг/кг), свинца ($0,60 \pm 0,04$ мг/кг), кадмия ($0,061 \pm 0,003$ мг/кг), мышьяка ($0,024 \pm 0,002$) выше, чем в ядре. Разделение семян люпина на ядро и оболочку при глубокой переработке может быть использовано для увеличения или уменьшения концентрации химических элементов. Размах варьирования содержания химических элементов возрастает с увеличением их концентрации. В анализируемых образцах содержание свинца, кадмия, мышьяка и ртути было меньше предельно допустимых значений для семян люпина белого, используемых в кормах. Результаты исследования необходимо учитывать при производстве комбикормов, белковых концентратов и определении нормативов содержания химических элементов в семенах белого люпина и его частях как статистические материалы при составлении программ кормления сельскохозяйственных животных, птицы, рыбы.

ELEMENTAL COMPOSITION OF WHITE LUPINE GRAIN

A. S. Tsygutkin

All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat –
branch of the Upper Volga Federal Agrarian Research Center,
601390, Vladimirskaya obl., Sudogodsky r-n, d. Vyatkin, ul. Pryanishnikova, 2
E-mail: asz.ru@mail.ru

The study was carried out to study the elemental composition of various parts of the grain of white lupine varieties Gamma, Dega and Deter 1, which were cultivated in 2009–2011. in the North-East of the Central Black Earth Region. The content of 19 elements was determined at the Belgorodsky State Center for Agrochemical Service. The elemental composition of grain and its parts has been studied. Intensive consumption of chemical elements allows white lupine to have a unique chemical composition of the grain, which shows that the content of many chemical elements standardized in feeding is much higher than in the seeds of other leguminous crops. In terms of manganese content, white lupine is a concentrator plant. In the grain of white lupine, nitrogen (6.82 ± 0.25 %), phosphorus (0.45 ± 0.07 %), potassium (1.37 ± 0.17 %), magnesium (0.17 ± 0.02 %) accumulate in significant quantities 0.02 %, sulfur (0.31 ± 0.02 %), iron (41.85 ± 1.36 mg/kg), zinc (48.55 ± 4.33 mg/kg), manganese ($390, 70 \pm 181.57$ mg/kg), cobalt (0.82 ± 0.19 mg/kg), molybdenum (6.80 ± 0.67 mg/kg), which are concentrated to a greater extent in the core. The shell contains calcium (0.35 ± 0.02 %), sodium (0.240 ± 0.006 %), chromium (0.329 ± 0.049 mg/kg), lead (0.60 ± 0.04 mg/kg), cadmium (0.061 ± 0.003 mg/kg), arsenic (0.024 ± 0.002) higher than in the core. The separation of lupine grain into core and shell during deep processing can be used to increase or decrease the concentration of chemical elements. The range of variations in the content of chemical elements increases with increasing their concentration. In the analyzed samples, the content of lead, cadmium, arsenic and mercury is less than the maximum permissible values for white lupine grain used in feed. The data obtained are important for use in the production of compound feeds, protein concentrates and for determining standards for the content of chemical elements in white lupine grain and its parts as statistical materials when drawing up feeding programs for farm animals, poultry, and fish.

Ключевые слова: люпин белый (*Lupinus albus L.*), ядро семени, оболочка семени, содержание химических элементов.

Key words: white lupine (*Lupinus albus L.*), seed kernel, seed coat, content of chemical elements.

Люпин белый (*Lupinus albus L.*) – относительно новая сельскохозяйственная культура в АПК России, которая при этом имеет многовековую историю возделывания. Исследования белого люпина, которые в XX в. были начаты под руководством Н. А. Майсурына, привели к тому, что в XXI в. в результате интродукции культуры и успехов в селекции она превратилась в один из сегментов экономики Российской Федерации [1]. Вместе с другими зернобобовыми культурами люпин белый стал основой биологизации земледелия [2, 3], которая предусматривает решение проблем кормопроизводства

[4] и обеспечения населения продовольствием при максимальном использовании биологических факторов для повышения плодородия почв и продуктивности агроэкосистемы при снижении антропогенной нагрузки.

В ходе исследований были получены следующие результаты:

выведены сорта [5], адаптированные к возделыванию в условиях Российской Федерации [6];

изучены этапы роста и развития растений, определено влияние сорного компонента и патогенной микрофлоры на фитосанитарное состояние посевов люпина белого [7];

разработаны элементы технологии возделывания люпина белого в чистых и смешанных посевах [8, 9], его уборки в чистых посевах [10] и с подсевом зерновых культур [11] с последующей послеуборочной и глубокой переработкой семян [12, 13];

начато производство комбикормов и белковых концентратов на основе люпина белого [14, 15];

изучены рационы кормления высокопродуктивной сельскохозяйственной птицы мясного и яичного направления [16, 17], сельскохозяйственных животных и рыбы в аквакультуре [18, 19];

определены способы повышения плодородия почв в процессе оптимизации питания люпина белого при его возделывании [20, 21];

установлена возможность использования люпина белого при производстве продуктов питания и полуфабрикатов мясного и растительного происхождения [22].

Для каждого из перечисленных направлений необходимо изучение химического и биохимического состава семян, их технологических свойств. Исследование элементного состава растений и продуктов их переработки позволяет уточнить технологию возделывания культуры, оптимизировать систему удобрения, довести размеры урожая с заданными параметрами качества до планируемой величины. Ранее изучали вопросы химии семян люпина белого, но исследования или касались нескольких химических элементов, или проводились на ограниченном числе растительных образцов [23]. Это не позволяло получать представительные выборки статистических данных, так как определяли химические элементы только во всём семени или его ядре без оболочки [24].

В связи с этим особенности химического состава семени и составляющих его ядра и оболочки у наиболее распространённых и перспективных сортов люпина белого представляют интерес не только для науки, но и для производства. Разработка технологии возделывания люпина белого, определение стратегии и методов его переработки для производства продукции более высокого качества основаны на знаниях элементного состава семян, особенностей транслокации химических элементов из почвы в растения с последующим переходом в кормовой цепи от растения в организм животного и человека.

Выбор химических элементов для исследований сделан, исходя из их значения для жизни растений и содержания в семенах – основной продукции, ради которой белый люпин возделывают. В результате все исследуемые химические элементы можно разделить на три группы: необходимые, которые включают макро- и микроэлементы (азот, фосфор, калий, кальций, магний, натрий, сера, железо, молибден, медь, марганец, цинк, кобальт); условно необходимые (никель, хром, свинец, кадмий); поллютанты (мышьяк, ртуть).

Цель исследования – анализ элементного состава семян и их частей трех сортов люпина белого для совершенствования технологий его возделывания и расширения направлений переработки.

Методика. Для исследования использовали семена люпина белого сортов Гамма, Дега и Детер 1, выращенные при проведении полевых опытов в 2009–2011 гг. на северо-востоке Центрального Черноземья в Тамбовской области. Они относятся к разным морфотипам, но устойчиво созревают в условиях Центрального Черноземья. Сорт Детер 1 не имеет боковых побегов и выступает наиболее скороспелым из всех существующих сортов люпина белого. Сорт Гамма формирует семена на главном побеге и побегах 1-го и 2-го порядка, сорт Дега – на главном и побегах 2-го и 3-го порядка.

Средняя продолжительность периода вегетации от всходов до полной спелости у сорта Гамма составляет 103 дня, у сорта Дега – 104 дня, у сорта Детер 1 – 96 дней. Различия между сортами по архитектонике, продолжительности периода вегетации, устойчивости к болезням, особенностям формирования урожая и потенциалу урожайности семян позволили сделать выборку представительной, в том числе для исследования элементного состава семени и его частей. Для исследования проводили обрушение 9 образцов трёх сортов, урожай которых собирали в течение трёх лет. В результате были получены 27 образцов, в каждом из которых определяли содержание 19 химических элементов.

Почва опытного участка чернозём выщелоченный, среднесуглинистый. Среднезвешенные агрохимические показатели плодородия: содержание гумуса – 8,0 %, подвижного фосфора (по Чирикову) – 64 мг/кг P_2O_5 , обменного калия (по Масловой) – 104 мг/кг K_2O , pH_{KCl} – 5,7, степень насыщенности почвы основаниями – 82,7 %.

Семена люпина белого разделяли на ядро и оболочку в лаборатории механически с взвешиванием навесок до и после разделения. Валовое содержание химических элементов определяли в семенах в целом, ядре и оболочке в Государственном центре агрохимической службы «Белгородский» по методикам, принятым в Государственной агрохимической службе России. Для определения содержания азота использовали ГОСТ 13496.4-93, фосфора – ГОСТ 26657-97, калия – ГОСТ 30504-97, кальция – ГОСТ 26570, магния – ГОСТ 32343-2013, железа – ГОСТ 27998-88, натрия – ГОСТ 30503-97, цинка, меди, свинца и кадмия – ГОСТ 30692-2000, мышьяка – ГОСТ 26930-86, ртути – ГОСТ 26927-86, кобальта – ГОСТ 10.155-88, марганца – ГОСТ 27997-88. Концентрацию никеля, хрома, молибдена и серы измеряли в соответствии с действующими методическими указаниями [25, 26, 27].

При подготовке к проведению химических анализов массу семян пересчитывали на стандартную чистоту и влажность. Содержание химических элементов выражали в расчете на элемент в процентах и в мг/кг сухого вещества.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Microsoft Excel. Вычисляли среднее значение ($X_{\text{сред.}}$) совокупности данных по каждому из химических элементов, доверительный интервал и устанавливали его границы. Кроме того, определяли минимальные (X_{min}) и максимальные (X_{max}) величины концентрации химических элементов, а также разность между крайними значениями для оценки амплитуды их разброса в семенах люпина белого и его частях.

Результаты и обсуждение. Доля ядра в среднем за три года составляла $81,31 \pm 3,40$ % от массы семени, оболочки – $18,69 \pm 3,40$ %. Границы доверительного интервала изменялись соответственно от 77,9 до 84,7 % и от 15,3 до 22,1 %. Сведения о соотношении ядра и оболочки в массе семян люпина белого необходимы для производства белковых концентратов, которые используют в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы, рыбы.

В исследованных семенах содержание азота изменялось от 6,36 до 7,10 % при средней величина этого показателя $6,82 \pm 0,25$ % (см. табл.). Наибольшее количество азота отмечали в ядре – $7,98 \pm 0,42$ %, в оболочке оно находилось на уровне $1,57 \pm 0,09$ %.

В результате обрушения семян содержание азота в конечном продукте увеличилось на 1,16 %. При умножении этой величины на коэффициент 6,25 можно

Элементный состав семян люпина белого

Элемент	Семена в целом		Ядро		Оболочка	
	$X_{\text{среднее}} \pm$ доверительный интервал	границы значений $X_{\text{min}} \dots X_{\text{max}}$	$X_{\text{среднее}} \pm$ доверительный ин- тервал	границы значений $X_{\text{min}} \dots X_{\text{max}}$	$X_{\text{среднее}} \pm$ доверительный интервал	границы значений $X_{\text{min}} \dots X_{\text{max}}$
Азот, %	6,82 ± 0,25	6,36...7,10	7,98 ± 0,42	7,53...8,71	1,57 ± 0,09	1,45...1,72
Фосфор, %	0,45 ± 0,07	0,38...0,56	0,50 ± 0,08	0,40...0,61	0,10 ± 0,02	0,07...0,12
Калий, %	1,37 ± 0,17	1,18...1,68	1,51 ± 0,17	1,27...1,82	0,59 ± 0,05	0,48...0,68
Кальций, %	0,35 ± 0,02	0,32...0,39	0,21 ± 0,01	0,19...0,23	0,79 ± 0,04	0,74...0,84
Магний, %	0,17 ± 0,02	0,15...0,21	0,19 ± 0,03	0,16...0,25	0,100 ± 0,008	0,09...0,11
Натрий, %	0,240 ± 0,006	0,23...0,25	0,231 ± 0,006	0,22...0,24	0,25 ± 0,01	0,24...0,27
Сера, %	0,31 ± 0,02	0,30...0,35	0,35 ± 0,03	0,31...0,41	0,11 ± 0,02	0,09...0,14
Железо, мг/кг	41,85 ± 1,36	39,19...43,19	47,90 ± 1,62	45,52...51,40	21,28 ± 1,19	20,13...22,99
Цинк, мг/кг	48,55 ± 4,33	40,65...52,59	53,37 ± 7,59	42,47...55,52	15,83 ± 3,53	10,27...19,59
Молибден, мг/кг	6,80 ± 0,67	5,39...7,91	7,04 ± 0,73	5,48...8,22	1,12 ± 0,21	0,88...1,59
Медь, мг/кг	6,06 ± 0,82	4,83...7,22	6,60 ± 1,05	5,38...8,89	3,24 ± 0,99	2,39...4,91
Марганец, мг/кг	390,7 ± 181,6	208,9...732,8	498,42 ± 215,04	215,20...943,33	141,9 ± 62,1	87,6...266,8
Кобальт, мг/кг	0,82 ± 0,19	0,61...1,20	0,84 ± 0,22	0,62...1,30	0,74 ± 0,09	0,63...0,87
Никель, мг/кг	3,39 ± 0,86	2,09...4,95	4,05 ± 0,73	3,10...5,16	0,50 ± 0,02	0,47...0,53
Хром, мг/кг	0,329 ± 0,049	0,27...0,41	0,281 ± 0,044	0,23...0,35	0,447 ± 0,033	0,39...0,49
Свинец, мг/кг	0,60 ± 0,04	0,52...0,64	0,55 ± 0,05	0,50...0,63	0,69 ± 0,03	0,65...0,74
Кадмий, мг/кг	0,061 ± 0,003	0,057...0,067	0,056 ± 0,003	0,052...0,062	0,064 ± 0,004	0,058...0,069
Мышьяк, мг/кг	0,024 ± 0,002	0,020...0,026	0,022 ± 0,002	0,019...0,025	0,028 ± 0,002	0,025...0,032
Ртуть, мг/кг	0,0030 ± 0,0012	0,0022...0,0060	0,0034 ± 0,0014	0,0023...0,0063	0,0025 ± 0,0003	0,0022...0,0027

рассчитать содержание сырого протеина в семени и ядре, которое после обрушения оболочки возросло на 7,25 % с 42,63 до 49,88 %. При этом оболочка семян люпина белого, которая выступает отходом процесса обрушения, может служить ценным кормом для животных, испытывающих дефицит клетчатки в рационах.

Известно, что при оптимизации азотного питания содержание сырого протеина в семенах может быть повышено на 2...3 % [28]. При глубокой переработке, включающей обрушение и сушку с использованием инфракрасного излучения, можно увеличить содержание сырого протеина на 10 % и более, что дает возможность производить корма с новыми, более ценными качествами и сохранять содержания алкалоидов на уровне ниже ПДК для кормов [29].

Люпин белый относится к культурам с высоким содержанием фосфора в семенах (0,45 ± 0,07 %). Большая его часть сосредоточена в ядре (0,50 ± 0,08 %), меньшая – в оболочке (0,10 ± 0,02 %). Значительное потребление растениями азота требует большого количества фосфора, так как они тесно взаимосвязаны. При высоком содержании азота и фосфора в семенах их соотношение не самое широкое среди зерновых, зернобобовых, технических и других культур.

Большая часть калия содержится в ядре семени (1,51 %) люпина белого, меньшая – в оболочке (0,59 %). Улучшение калийного питания растений приводит к повышению урожая и содержанию азота в семенах. В связи с этим повышение плодородия почв, мониторинг их состояния становится важной задачей, сопутствующей возделыванию белого люпина, и формированию высоких урожаев на уровне 80...90 % потенциальных возможностей сорта при сохранении заданных параметров качества [30].

Содержание кальция в семенах люпина белого значительно меньше, чем в вегетативных органах и корневой системе. Поэтому из-за высокой концентрации фосфора в семенах необходима корректировка рационов животных по количеству кальция при использовании целого (0,35 ± 0,02 %) и обрубленного семени (0,21 ± 0,01 %). Так как считается, что их усвоение будет хорошим, если в кормовом рационе сельскохозяйственных животных и птицы на одну часть Р приходится 0,5...2,0 части Са.

Высокое содержание фосфора в семенах люпина белого связано со способностью растений хорошо обеспечивать питание этим элементом, в том числе из трёхзамещённых фосфатов, недоступных для пита-

ния большинства сельскохозяйственных культур. В результате соотношение Са: Р в семени составляет 0,78, в ядре – 0,43, в оболочке – 7,90. Таким образом, в семени оно находится в оптимальных пределах, а в ядре сильно сокращается. Поэтому при использовании обрубленных семян для производства кормов их необходимо балансировать по содержанию кальция и фосфора [31].

Магния в семени содержится меньше, чем кальция (0,17 ± 0,02 %). В ядре его доля несколько увеличивается (0,19 ± 0,03 %), а в оболочке снижается (0,100 ± 0,008 %). Соотношение Са: Mg в семени равно 2,06, в ядре – 1,09, в оболочке – 7,9. Принято считать, что корм лучше усваивается если соотношение этих химических элементов находится в пределах 2,0...3,0 [31]. По нашим данным в семенах оно находится на оптимальном уровне, а при использовании отдельно ядра и оболочки на корм соотношение Са: Mg необходимо балансировать.

Натрия в семени также содержится меньше, чем кальция (0,240 ± 0,006 %). Больше его находится в оболочке (0,25 ± 0,01 %), меньше – в ядре (0,231 ± 0,006 %). Разброс величины этого показателя минимальный. В семени она изменяется от 0,23 до 0,25 %, в ядре – от 0,22 до 0,25 %, в оболочке – от 0,24 до 0,27 %.

Содержание серы в семенах люпина белого составляет 0,31 ± 0,02 %. Участвуя в цикле азота, этот элемент выступает исходным продуктом при синтезе белков и конечным при их распаде, сера усиливает формирование клубеньковых бактерий и способствует фиксации азота из атмосферы. Поэтому люпин белый, накапливая в семенах значительное количество азота, потребляет для его усвоения серу значительно больше, чем другие культуры [32].

Сера входит в состав незаменимой аминокислоты метионина и заменимой аминокислоты цистина, содержание которых нормируют в кормах для сельскохозяйственной животных и птицы [32]. В семени этот элемент накапливается в основном в ядре (0,35 ± 0,03 %) и в меньшей степени в оболочке (0,11 ± 0,02 %). Разброс данных по содержанию серы в семени варьирует от 0,30 до 0,35 %.

Белый люпин считают концентратом марганца. В его семенах содержание этого элемента составляет 390,70 ± 181,57 мг/кг. При обрушении семян количество марганца на единицу массы возрастает до 498,4 ± 215,0 мг/кг. Содержание марганца в оболочке ниже, оно составляет 141,9 ± 62,1 мг/кг. Производить корма, богатые марганцем, важно для развития мясного на-

правления животноводства и птицеводства, так как этот элемент укрепляет кости животных и птицы, что позволяет формировать большую убойную массу [33].

Способность люпина белого потреблять большое количество марганца определяется не только его физиологическими особенностями. Прототипом выведенных в России сортов послужили формы этой культуры, произрастающие в субтропиках северного Причерноморья на почвах, содержащих повышенное количество марганца. Радиационное и химическое воздействие на семена люпина белого позволили создать формы, устойчиво созревающие в условиях северо-востока Центрального Черноземья. Расщепление генома с последующей интродукцией не изменили способность культуры усваивать марганец в гипертрофированных количествах при возделывании на атипичных для роста и развития растений чернозёмах и серых лесных почвах.

В условиях северного Причерноморья культурные формы люпина белого произрастали на почвах с кислой реакцией почвенного раствора. В таких условиях марганец в почве обладает большой подвижностью. На чернозёмах и серых лесных почвах кислотность почвенного раствора снижается, достигая значений слабокислой или близкой к нейтральной, при которых марганец становится малоподвижным и недоступным для растений. Корневые выделения люпина белого способны изменять величину pH в ту или иную сторону на две единицы. В результате чего малоподвижный марганец, как и фосфор трёхзамещённых фосфатов, становится более доступным для питания растений и накапливается в семенах люпина белого.

Железо и другие необходимые микроэлементы (молибден, цинк, медь, кобальт) сконцентрированы, в основном, в ядре и в меньшей степени в оболочке люпина белого. Содержание железа в семени составило $41,85 \pm 1,36$ мг/кг. Большая часть его накапливалась в ядре ($47,90 \pm 1,62$ мг/кг). В оболочке содержание железа составило $21,28 \pm 1,19$ мг/кг. По годам содержание железа в семенах изменялось от 39,19 до 43,19 мг/кг.

Люпин белый накапливает в семенах достаточно большое количество цинка – в среднем $48,55 \pm 4,33$ мг/кг с изменением по годам от 40,65 до 52,59 мг/кг. В ядре его концентрация достигает $53,37 \pm 7,59$ мг/кг, в оболочке содержание цинка значительно меньше ($15,83 \pm 3,53$ мг/кг).

Содержание молибдена в семенах составляет в среднем $6,80 \pm 0,67$ мг/кг с варьированием от 5,39 до 7,91 мг/кг. Молибден концентрируется в основном в ядре ($7,04 \pm 0,73$ мг/кг) и в меньшей степени в оболочке ($1,12 \pm 0,21$ мг/кг).

Концентрация кобальта в семенах составляет в среднем $0,82 \pm 0,19$ мг/кг с варьированием от 0,61 до 1,20 мг/кг. Кобальт в большей части концентрируется в ядре ($0,84 \pm 0,22$ мг/кг), в составе оболочки его несколько меньше ($0,74 \pm 0,09$ мг/кг).

Содержание меди в семенах в среднем находится на уровне $6,06 \pm 0,82$ мг/кг. Минимальная величина этого показателя составляет 4,83 мг/кг, максимальная – 7,22 мг/кг. Медь концентрируется в основном в ядре ($6,60 \pm 1,05$ мг/кг), в оболочке ее содержание составляет $3,24 \pm 0,99$ мг/кг.

Разброс данных по содержанию химических элементов в семени, ядре и оболочках связан, вероятно, с погодными условиями при возделывании люпина белого, пестротой плодородия почвы, уровнем обеспеченности растений питательными элементами. Необходимо отметить, что железо, молибден, цинк, медь, кобальт сконцентрированы, в основном, в ядре, разброс между

максимальными и минимальными величинами этих химических элементов в ядре так же более значительный, чем в семени и оболочке.

Содержание в семенах люпина белого марганца, цинка, кобальта и молибдена больше, чем у сои и других зерновых и зернобобовых культур, меди – меньше [34, 35], что приводит к их большему выносу с урожаем.

Содержание условно необходимых элементов хрома, свинца и кадмия больше в оболочке, чем в ядре, а никеля – в ядре, чем в оболочке. Количество никеля в семенах составляет в среднем $3,39 \pm 0,86$ мг/кг с варьированием от 2,09 до 4,95 мг/кг. Концентрация этого элемента в ядре составляет $4,05 \pm 0,73$ мг/кг, в оболочке – $0,50 \pm 0,02$ мг/кг. Содержание хрома в семенах $0,329 \pm 0,049$ мг/кг с амплитудой крайних значений от 0,27 до 0,41 мг/кг. В ядре накапливается $0,281 \pm 0,044$ мг/кг хрома, что почти в 2 раза меньше, чем в оболочке ($0,447 \pm 0,033$ мг/кг). В семенах люпина белого в среднем $0,60 \pm 0,04$ мг/кг свинца при разбросе значений от 0,52 до 0,64 мг/кг. Его содержание в ядре составляет $0,55 \pm 0,05$ мг/кг, в оболочке – $0,69 \pm 0,03$ мг/кг. Концентрация кадмия в семенах находится на уровне $0,061 \pm 0,003$ мг/кг с крайними величинами от 0,057 до 0,067 мг/кг. В ядре люпина белого содержание этого элемента составляло $0,056 \pm 0,003$ мг/кг, в оболочке – $0,064 \pm 0,004$ мг/кг.

Среди поллютантов больше содержание мышьяка отмечено в оболочке, ртути – в ядре. Концентрация мышьяка в семенах составляла $0,024 \pm 0,002$ мг/кг, в ядре – $0,022 \pm 0,002$ мг/кг, в оболочке – $0,028 \pm 0,002$ мг/кг. Количество ртути в семенах составляет $0,0030 \pm 0,0012$ мг/кг, в ядре – $0,0034 \pm 0,0014$ мг/кг, в оболочке – $0,0025 \pm 0,0003$ мг/кг.

Содержание свинца, кадмия, мышьяка и ртути меньше предельно допустимых концентраций (ПДК), принятых для семян белого люпина в соответствии с техническим регламентом таможенного союза «О безопасности зерна»: свинца – не более 5,0 мг/кг, кадмия – не более 0,5 мг/кг, мышьяка – не более 2,0 мг/кг, ртути – не более 0,1 мг/кг [23].

Сведения об элементном составе семян и его частей важны не только для разработки системы удобрения люпина белого и управления производственным процессом, но и для его глубокой переработки с целью производства продукта, который в большей степени отвечает требованиям для кормления сельскохозяйственных животных, птицы, рыбы [36, 37]. Поэтому при необходимости повысить или снизить содержание химических элементов в люпине белом необходимо семена оставить или в нативном состоянии, или провести их обрушение. Полученные при обрушении семян люпина белого, ядро и оболочка могут служить основой для производства комбикормов и белковых концентратов.

Получить данные об элементном составе семян белого люпина в различных почвенно-климатических зонах страны можно без привлечения дополнительных средств. Для этого целесообразно использовать результаты демонстрационных опытов, в которых, обычно, выращивают районированные и перспективные сорта, с проведением анализа растительных образцов в сертифицированных лабораториях для получения сопоставимых результатов, что позволит накапливать информацию для формирования соответствующей базы данных.

Выводы. В продукции белого люпина накапливается большое количество азота, фосфора, калия, магния, натрия, серы, железа, цинка, марганца, кобальта, молибдена. Ядра содержат больше азота, фосфора, калия, магния, серы, железа, молибдена, цинка, меди, марганца, кобальта, никеля, оболочки – кальция, натрия,

хрома, свинца, кадмия, мышьяка. Люпин белый служит растением-концентратором марганца.

Разделение семян на части может быть использовано при переработке белого люпина и производстве концентрированных кормов и кормовых добавок. В анализируемых образцах содержание свинца, кадмия, мышьяка и ртути было меньше предельно допустимых значений, принятых в Таможенном союзе (технический регламент таможенного союза «О безопасности зерна») для продукции, используемой на кормовые цели.

Благодарность. Автор благодарит и выражает признательность доктору сельскохозяйственных наук, профессору Лукину Сергею Викторовичу за помощь, оказанную при изучении состава семян.

Литература

1. Достижения и перспективы селекции люпина / М. И. Лукашевич, П. А. Агеева, Н. В. Новик и др. // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 2. С. 29–32. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10207.
2. Лукин С. В. Биологизация земледелия в Белгородской области: итоги и перспективы // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 7. С. 20–23.
3. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия / В. М. Косолапов, А. С. Цыгуткин, Н. В. Алдошин и др. // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41–47.
4. Косолапов В. М., Чернявских В. И. Кормопроизводство: состояние, проблемы и роль ФНЦ «ВИК им. В. Р. Вильямса» в их решении // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 4. С. 5–4. doi: 10.53859/02352451_2022_36_4_5.
5. Влияние новых изолятов клубеньковых бактерий на рост и развитие белого люпина сорта Детер 1 / Ч. Зулицэцг, О. В. Селицкая, А. С. Цыгуткин и др. // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 11. С. 78–80.
6. Мониторинг патогенной микрофлоры в посевном материале сортов люпина белого и узколистного в условиях Брянской области / Л. И. Пимохова, Н. В. Мисникова, Г. Л. Яговенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 6. С. 47–54. doi: 10.53859/02352451_2022_36_6_47.
7. Пимохова Л. И., Яговенко Г. Л. Болезни и вредители люпина: система и средства защиты. Брянск: Читай-город, 2020. 89 с.
8. Смешанные посевы с люпином в земледелии Нечерноземной зоны / М. Н. Новиков, И. П. Такунов, Т. Н. Слесарева и др. М.: ООО «Столичная типография», 2008. 160 с. ISBN 978-5-9974-0010-1.
9. Слесарева Т. Н., Такунов И. П., Новиков М. Н. Люпино-злаковые посевы – перспективное направление в земледелии // Земледелие. 2010. № 4. С. 7–9.
10. Обоснование технологических параметров комбайнов на уборке белого люпина / Н. В. Алдошин, А. А. Золотов, А. С. Цыгуткин и др. // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 1. С. 64–66.
11. Алдошин Н. В., Золотов А. А., Цыгуткин А. С. Технологические аспекты уборки белого люпина с яровым тритикале // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 2. С. 73–76.
12. Зверев С. В., Ставцев А. Э., Цыгуткин А. С. Белый люпин: обрушение и термообработка зерна. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2019. 128 с. ISBN 978-5-00077-826-5.
13. Термовлагообмен зерна люпина при нагреве в потоке инфракрасного излучения / С. В. Зверев, В. М. Косолапов, А. Э. Ставцев и др. // Кормопроизводство. 2021. № 7. С. 34–39.
14. Белковый концентрат на основе белого люпина с высоким содержанием протеина / И. А. Егоров, Т. В. Егорова, Л. И. Криворучко и др. // Птицеводство. 2018. № 9. С. 15–19.
15. Использование белкового концентрата на основе белого люпина в рационах цыплят-бройлеров / И. А. Егоров, Т. В. Егорова, А. Э. Ставцев и др. // Птица и птицепродукты. 2017. № 1. С. 33–36.
16. Фисинин В. И. Мировое и российское птицеводство: реалии и вызовы будущего: монография. М.: Хлебпродинформ, 2019. 470 с.
17. Люпин в кормлении сельскохозяйственной птицы / Е. Н. Андрианова, И. А. Егоров, Е. Н. Григорьева и др. // Птицеводство. 2019. № 11–12. С. 31–36. doi: 10.33845/0033-3239-2019-68-11-12-31-36.
18. Особенности формирования бактериального сообщества рубца и биохимический статус организма коров в зависимости от источника протеина / Н. П. Буряков, Г. Ю. Лаптев, М. А. Бурякова и др. // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2021. № 12 (197). С. 3–22. doi: 10.33920/sel-05-2112-01.
19. Рыбопродуктивность осетров при использовании отечественных комбикормов / С. И. Николаев, Ю. М. Батракова, А. Э. Ставцев и др. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (68). С. 83–87.
20. Формирование урожайности зерна и показатели качества люпина белого (*Lupinus albus* L.) при применении селенита натрия / И. И. Серегина, А. О. Шумилин, Ю. М. Вигилянский и др. // Агрохимия. 2018. № 7. С. 73–80. doi: 10.1134/S0002188118070128.
21. Цыгуткин А. С., Азаров А. В. Изучение влияния технологий возделывания сельскохозяйственных культур и почвы, как саморазвивающейся системы, на содержание гумуса // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 6. С. 44–49. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10608.
22. Грикшас С. А., Муромцева Д. В., Кузьмина М. О. Технологические особенности использования клетчатки белого люпина в производстве полукопченых колбас // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 4. С. 76–80. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10416.
23. Лукин С. В. Агроэкологическая оценка макро- и микроэлементного состава растений белого люпина // Земледелие. 2017. № 8. С. 42–44.
24. Люпин: селекция, возделывание, использование / В. М. Косолапов, Г. Л. Яговенко, М. И. Лукашевич и др. Брянск: Брянское областное полиграфическое объединение, 2020. 304 с. ISBN 978-5-94632-223-2.
25. Прижужкова В. Г., Шаймухаметова А. А., Тюхова М. В. Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. 8 с.
26. Атомно-абсорбционные методы определения токсичных элементов в пищевых продуктах и пищевом сырье. Методические указания. М., 1992. 16 с.
27. Методические указания по колориметрическому определению микроэлементов в кормах и растениях. М.: Центральный институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства МСХ СССР (ЦИНАО), 1977. 39 с.
28. Научные основы и рекомендации по диагностике и оптимизации минерального питания зерновых и других культур: Коллективная монография /

- П. Г. Акулов, Р. А. Афанасьев, Г. П. Гамзиков и др. М.: Агроконсалт, 2000. 100 с.
29. Использование метода спектрофотометрии для идентификации высокоалкалоидных семян белого люпина / С. В. Зверев, В. М. Косолапов, В. Б. Зайцев и др. // Кормопроизводство. 2020. № 10. С. 25–28.
30. Мониторинг основных агрохимических показателей плодородия пахотных почв в Центрально-Черноземном районе России / Р. В. Некрасов, С. В. Лукин, Д. А. Куницын и др. // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 9. С. 4–10. doi: 10.53859/02352451_2021_35_9_4.
31. Методическое руководство по кормлению сельскохозяйственной птицы / И. А. Егоров, В. А. Манукян, Т. М. Околелова и др. Сергиев Посад: Изд-во ВНИТИП, 2015. 199 с.
32. Подобед Л. И. Аминокислоты в питании сельскохозяйственных животных и птицы. Одесса: Акватория, 2017. 280 с.
33. Природный источник марганца – белый люпин / Е. Н. Андрианова, Л. В. Кривопишина, О. А. Чванова и др. // Птица и птицепродукты. 2015. № 5. С. 47–49.
34. Лукин С. В., Селюкова С. В. Агроэкологическая оценка микроэлементного состава растений сои // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 6. С. 34–36.
35. Лукин С. В., Жуйков Д. В. Мониторинг содержания марганца, цинка и меди в почвах и растениях Центрально-Черноземного района России // Почвоведение. 2021. № 1. С. 60–69.
36. Промышленное птицеводство. Под общ. ред. В. И. Фисинина. М.: ФНЦ «ВНИТИП» РАН, 2016. 354 с.
37. Адаптивная ресурсосберегающая технология производства яиц: монография / В. И. Фисинин, А. Ш. Кавтарашвили, И. А. Егоров и др. Сергиев Посад: Изд-во ВНИТИП, 2016. 351 с.

Поступила в редакцию 01.08.2023

После доработки 23.08.2023

Принята к публикации 12.09.2023

Земледелие и мелиорация

УДК 631.5;631.6;911.2

DOI: 10.31857/S2500262723050058, EDN: PKYNZO

К ВОПРОСУ ОБ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОМ ОБУСТРОЙСТВЕ ЗАБРОШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЯЧМЕНЯ**Д. А. Иванов**, член-корреспондент РАН, **М. В. Рублюк**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Н. А. Хархардинов**

Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт
им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр.2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Исследования проводили с целью оценки пригодности заброшенных земель конкретного хозяйства для выращивания ячменя в чистых и покровных посевах на основе анализа данных многолетнего мониторинга его урожайности на агроэкологическом полигоне. В работе использовали данные многолетнего (1997–2012 гг.) мониторинга урожайности ячменя сорта Гонор в чистых и покровных (позволяющих производить дополнительную продукцию) посевах на агрополигоне «Губино» ВНИИМЗ. Агрополигон расположен в 4 км к востоку от г. Тверь, на холме с относительной высотой 15 м, состоящем из плоской вершины, северного пологого склона крутизной 2...3°, южного склона (3...5°) и межхолмных депрессий (северной и южной). С использованием статистико-математического моделирования выявлены закономерности формирования урожайности ячменя. На основе полученных формул и архивных данных по состоянию заброшенных земель рассчитывали прогнозные поверхности урожайности культуры для всей территории хозяйства. Ячмень в чистых посевах реагирует только на высоту местоположения, тогда как в покровных посевах его урожай зависит от высоты и крутизны поверхности, а также от содержания фосфора в почве. Четверть площади хозяйства (верхние части холмов на западе и юге) потенциально способны обеспечить урожайность ячменя в чистых посевах от 1,4 до 3,3 т/га, повышенная величина этого показателя в покровных посевах (1,1...3,4 т/га) возможна только на 20 % территории, занимающей переходные зоны между моренным и долинным ландшафтами. Использование только архивных данных не всегда оправдано – разные подходы к проектированию систем земледелия должны быть взаимодополняемыми и для уточнения прогноза урожайности необходимо проводить специальные ландшафтно-почвенные исследования.

ON THE ISSUE OF ADAPTIVE LANDSCAPE DEVELOPMENT OF USELESS LANDS BASED ON THE RESULTS OF BARLEY YIELD FORECASTING**D. A. Ivanov, M. V. Rublyuk, N. A. Kharkhardinov**

Federal Research Centre Dokuchaev Soil Science Institute,
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 2b,
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

The research aimed to assess the suitability of useless lands of a particular farm for growing barley in pure and cover crops based on the analysis of data from long-term monitoring of its yield at an agro-ecological test site. The work used data from long-term (1997–2012) monitoring of the yield of barley variety Gonor in pure and cover (allowing for additional production) crops at the Gubino agricultural site of All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands. The agricultural site is located 4 km east of the city of Tver, on a hill with a relative height of 15 m, consisting of a flat top, a northern gentle slope with a steepness of 2–3°, a southern slope (3–5°) and interhill depressions (northern and southern). Using statistical and mathematical modelling, patterns of barley yield formation were identified. Based on the obtained formulas and archival data on the state of useless lands, forecast crop yield surfaces were calculated for the entire territory of the farm. Barley in pure crops responds only to the height of the location, while in cover crops its yield depends on the height and steepness of the surface, as well as the phosphorus content of the soil. A quarter of the farm's area (the upper parts of the hills in the west and south) is potentially capable of providing barley yields in pure crops from 1.4 to 3.3 t/ha, and an increased yield of this crop in cover crops (1.1–3.4 t/ha) can be obtained only on 20 % of the territory occupying the transition zones between moraine and valley landscapes. Using only archival data is not always justified – different approaches to the design of farming systems must complement each other, and to clarify the yield forecast, it is necessary to conduct special landscape and soil studies.

Ключевые слова: чистые посева, покровные посева, математико-статистическое моделирование, заброшенные земли.

Key words: clean crops; cover crops; mathematical and statistical modelling; useless lands.

По данным Минсельхоза Российской Федерации, общая площадь неиспользуемых сельскохозяйственных земель в стране достигает 44 млн га, в том числе 20 млн га бывшей пашни, из которых в оборот можно вернуть 12 млн га [1, 2, 3]. Сельскохозяйственное использование заброшенных земель необходимо вести на основе адаптивно-ландшафтных подходов, которые обеспечивают экологически обусловленное адресное размещение угодий и посевов сельскохозяйственных культур, способствующее полному раскрытию биологического

потенциала растений и затуханию деградационных процессов [4, 5].

В нашей стране общепризнана методология адаптивно-ландшафтного земледелия, разработанная академиком В. И. Кирюшиным, краеугольным камнем которой выступает определение первичной структурной единицы агроландшафта. В качестве таковой рассматривают элементарный ареал агроландшафта (ЭАА) – участок на элементе мезорельефа, ограниченный элементарной почвенной структурой (ЭПС)

(реже – элементарным почвенным ареалом (ЭПА)) при одинаковых геологических и микроклиматических условиях. Агроэкологическая оценка рельефа, литологии, климата, грунтовых вод, растительности, почвенного покрова представляет собой основной предмет ландшафтного анализа, по результатам которого выделяют конкретные ЭАА на местности и карте. Близкие по условиям возделывания сельскохозяйственных культур ЭАА объединяют в агроэкологические типы земель, то есть участки, однородные по агроэкологическим требованиям культуры и условиям ее возделывания [6]. Такой подход к природообустройству территории можно условно назвать «дискретным», так как в результате его реализации на территории проектируемого хозяйства должна быть выделена совокупность строго ограниченных ландшафтно-обусловленных ареалов, различающихся по урожайности культур (определяемой на основе методов программирования урожая) и набору мероприятий по их возделыванию. Накопленный опыт земледелия подтверждает применимость этого подхода на практике. Так, по данным В. М. Матасова, в течение 250 лет на одном из объектов в пределах Рязанской Мещеры специализацию и территориальную дифференциацию хозяйственного использования на 70 % контролируют ландшафтными и позиционными факторами, что объясняется высокой консервативностью структуры угодий, лимитированной природными условиями – недостаточной трофностью и избыточной влажностью почв [7].

Однако на основе исследований литературных источников и экспериментальных данных исходная посылка методологии «дискретного» подхода – пространственная однородность условий произрастания растений в границах конкретного ЭАА (иначе из них невозможно составить типы земель) – представляется несколько условной, так как предполагает неизменность свойств геокомплекса в его пределах, что противоречит утверждениям классиков ландшафтоведения, биогеоценологии и теории структуры почвенного покрова. Однородность фации нельзя понимать буквально, так как в ее пространстве наблюдается заметная флуктуация (тренд) параметров компонентов ландшафтов – так склоновые фации характеризуются градиентом высоты местоположения и эродированности почв, плакорные – пестротой нанорельефа и др. По И. И. Мамай внутри фаций отчетливо выделяются ядра, переходные полосы (экотоны) и границы. Экотоны по свойствам значительно ближе к ядру своей фации, чем к переходной полосе соседней [8]. Биогеоценозы, часто отождествляемые с фациями (хотя это не всегда верно), обладают ярко выраженной парцеллярной структурой, образованной вследствие мозаичного (по составу, густоте, накапливаемой массе и активной поверхности) размещения растений [9]. Элементарные почвенные ареалы также не всегда характеризуются отсутствием внутренней пестроты свойств. Исходя из определения, данного В. М. Фридландом, ЭПА обладают однородностью только в классификационном смысле, по устройству же внутренней среды они подразделяются на гомогенные, регулярно-циклические и спорадически-пятнистые. Структурно однородными выступают только гомогенные ЭПА, в то время, как спорадически пятнистые характеризуются присутствием пятен предельно-структурных элементов (ПСЭ) – почвенных образований, возникших по биологическим причинам, в пространстве фоновой почвы. Регулярно-циклические ЭПА, свойственные для тундр, характеризуются наличием какой-либо одной почвы, разбитой на сектора вследствие морозобойных процессов [10].

Кроме пространственно-структурной неоднородности, в пределах ЭПА наблюдается факторная пестрота. В. М. Фридланд все ЭПА подразделяет по характеру пространственного изменения свойств почвы на две группы – со сквозным и центральным трендами. Почвенные тела со сквозным трендом какого-либо параметра (например, pH_{KCl}) характеризуются его постепенным изменением от одной границы к другой, а с центральным – от границ к центру. ЭПА с центральным трендом образуют внутренние части элементарных почвенных структур, а со сквозным – их внешние, переходные к другим ЭПС, экотонные части [11]. Таким образом, структурно-гомогенные ЭПА (а тем более ЭПС) весьма редки, а факторно-гомогенные практически не встречаются, следовательно, урожайность культуры в пространстве ЭАА должна варьировать.

Для адаптивно-ландшафтного землепользования крайне важен вопрос о границах типов земель, на основе которых по методике В. И. Кирюшина следует проводить рубежи полей и угодий. При выявлении границ природно-территориальных комплексов (ПТК) необходимо исходить из анализа взаимодействия всех компонентов их природы, а не ограничиваться выявлением ведущего фактора обособления геосистем. Это обуславливает наличие переходных полос между соседними геокомплексами, так как свойства разных компонентов ландшафта в пространстве меняются не синхронно. Фациальные границы весьма устойчивы в пространстве и во времени, так как связаны с оролитогенным фундаментом геокомплекса. И. И. Мамай утверждает, что ширина границ фаций на местности не превышает 1...2 м [8]. Рубежи более крупных географических единиц представляют собой достаточно широкие переходные полосы. Границы биогеоценозов, а особенно парцелл, неустойчивы во времени и пространстве, вследствие сезонных, миграционных и сукцессионных изменений биоты. Границы ЭПА весьма условны – их характер во многом зависит от особенностей классификации почв. По утверждению И. Ю. Савина «... при использовании разных классификационных схем можно получить разную сеть контуров, то есть разные почвенные карты» [12], таким образом почвенная карта выступает лишь моделью почвенного покрова территории в рамках определенной классификации почв, что предполагает некоторую условность выделения ЭАА и типов земель.

Следовательно, «дискретный» подход не может быть единственным при определении границ посевов и угодий, так как «... часть свойств почв коррелирует в большей или меньшей степени с классификационно значимыми признаками почв, но существует группа свойств, часто не обнаруживающая подобной корреляции (например, агрохимические свойства почв, влажность и др.)» [12]. Н. Д. Кутузова выяснила, что «... почвенные карты, подготовленные традиционными методами, в большинстве случаев не могут быть напрямую использованы для характеристики почвенно-экологических условий, определяющих параметры урожайности. Распределение многих ... почвенных признаков и агрохимических характеристик, оказывающих непосредственное влияние на биопродуктивность культурных растений, не во всех случаях совпадают с формой почвенных контуров, а также между собой. Это свидетельствует о том, что к оценке влияния почв на урожайность следует подходить дифференцированно, с учетом доли и характера влияния отдельных почвенных свойств и их динамики на урожайность ... культурных растений» [13]. Нашими исследованиями показано, что пространственное изменение урожайности зерновых и многолетних трав весьма слабо коррелирует

с особенностями ландшафтного и почвенного устройства территории, набор факторов природной среды, достоверно влияющих на урожайность различных культур, неодинаков и трансформируется при изменении агроклиматической обстановки, что обуславливает первоочередность изучения вариативности свойств растительного покрова при разработке систем земледелия [14, 15]. Результаты исследований адаптации культур к условиям ландшафта широко используют в современной науке [16, 17, 18]. Крайне интересен и вопрос влияния агроклиматических условий на продуктивность культур [19, 20].

Для более успешного проектирования систем земледелия нового поколения «дискретный» метод необходимо дополнять «континуальным» подходом, который учитывает пространственное варьирование факторов плодородия вне зависимости от картографической модели ландшафта и почвенного покрова. В результате его реализации для территории проектируемого (прогнозного) хозяйства создается изолинейная карта варьирования урожайности культуры, реагирующей на изменение достоверно влияющих на нее факторов ландшафтно-почвенной среды. Каждая культура характеризуется уникальными чертами «топографии посева», которые зависят также и от агроклиматической обстановки. Совмещение карт прогнозной урожайности культуры, полученных для разных климатических обстановок, позволит выявить ареалы, оптимальные для ее произрастания независимо от погодных условий и, напротив, критические – сильно зависящие от агроклимата. Наложение карт прогнозной урожайности разных культур даст возможность выявить места, оптимальные для размещения севооборотов и др. [21].

Итак, основные принципы «континуального» метода – учет адаптивных реакций растений на пространственную и временную изменчивость параметров природной среды агроландшафта и выбор, на основе их анализа, эколого-территориальных ниш с наиболее близкими к оптимальным условиям для произрастания культуры. Проект адаптивно-ландшафтной системы земледелия, по-видимому, должен состоять из двух слоев – «дискретного» и «континуального», синтез которых позволит выявить эколого-территориальные ниши, оптимальные для произрастания конкретных культур, и наиболее корректно определить границы производственных участков. Первоочередной проблемой при проектировании современной системы земледелия выступает наличие информации, характеризующей состояние ландшафта и посевов [22, 23].

«Континуальный» подход осуществляется на основе анализа мониторинговой информации по урожайности культур и динамике факторов природной среды геоконтекста, полученной на агроэкологическом полигоне. В ходе статистической обработки данных многолетнего мониторинга урожайности культуры можно выявить основные факторы, влияющие на производственный процесс, и создать математические модели, отражающие ее адаптивные реакции на изменчивость природной среды агроландшафта. На основе таких моделей и ГИС-технологий можно попытаться спрогнозировать «поведение» культуры (изменчивость ее урожайности) даже в пределах заброшенного участка, расположенного в аналогичных с агроэкологическим полигоном ландшафтных условиях, на базе имеющихся архивных данных. Анализ карт прогнозной урожайности выявит места с различными агроэкологическим и технологическим потенциалами, что позволит решить вопрос о перспективах их освоения.

В нашей работе выполнено прогнозирование урожайности ячменя, выращиваемого разными способами,

на планируемых к введению в сельскохозяйственный оборот заброшенных землях конкретного хозяйства в Тверской области на основе результатов ее долговременного мониторинга на агрополигоне и использования архивных данных.

Цель исследований – оценка пригодности заброшенных земель конкретного хозяйства для выращивания ячменя в чистых и покровных посевах на основе анализа данных многолетнего мониторинга его урожайности на агроэкологическом полигоне.

Научная новизна заключается в определении возможности прогнозирования урожайности культур в пределах давно заброшенного хозяйства на основе только сохранившихся архивных данных (агрохимических картограмм, карты почв и рельефа) без привлечения средств на дополнительное обследование территории.

Методика. Для достижения поставленной цели использовали данные многолетнего (1997–2012 гг.) мониторинга урожайности ячменя сорта Гонор в чистых и покровных (позволяющих получить дополнительную продукцию) посевах на агрополигоне «Губино» ВНИИМЗ [24]. Агрополигон расположен в 4-х км к востоку от г. Тверь, на холме с относительной высотой 15 м, состоящем из плоской вершины, северного пологого склона крутизной 2...3°, южного склона (3...5°) и межхолмных депрессий (северной и южной). Различия в экспозиции склонов определяют разницу в прогреве территории, неоднородность гранулометрического состава почв, что во многом обусловлено генезисом конечно-моренных образований. Почвенный покров агрополигона представлен вариацией-мозаикой дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв, образованных на двучленных отложениях – песчано-супесчаная толща в пределах почвенного профиля на разной глубине подстилается легко и среднесуглинистой закамененной мореной. В южной части полигона мощность кроющего наноса местами превышает 1,5 м – почвы здесь преимущественно песчаные. На вершине и северном склоне холма пахотные горизонты сложены супесью и иногда легким суглинком с мощностью кроющего наноса около 1 м, в межхолмной депрессии морена местами выходит на поверхность.

Исследования проводили на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – севооборотном массиве, пересекающем все микроландшафтные позиции (подурочища) конечно-моренного холма: транзитно-аккумулятивные депрессий, почвы которых частично накапливают элементы питания растений из намывных и грунтовых вод; транзитные средних частей склонов, где господствует латеральный ток влаги; элювиально-транзитные верхних частей склонов, в которых, совместно с латеральным перемещением влаги, интенсивно протекает и вертикальное промывание почв; элювиально-аккумулятивные плоской вершины, в пределах которых на фоне вертикального промывания почвенного профиля наблюдается аккумуляция элементов питания растений в микропонижениях.

Трансекта, в пределах которой развернуты два пятипольных зернотравяных севооборота, состоит из десяти параллельных полос-полей, каждая из которых занята определенной культурой. В пределах конкретной полосы антропогенное воздействие однотипно – проводили одновременные и одинаковые обработки почвы, соблюдали единые нормы, даты и способы посева и проведения прочих мероприятий, что позволяет изучать влияние ландшафтных условий на культуры в наименее искаженном виде.

Поля, на которых проводили наблюдения, имеют ширину 7,2 м, длину – 1300 м. Урожайность ячменя

определяли в 30-и точках опробования, равномерно расположенных вдоль трансекты через каждые 40 м в 4-х кратной повторности, методом прямого комбайнирования. Площадь учетной площадки – 20 м².

Покровные посевы ячменя с многолетними травами (клевер красный ВИК 7, тимофеевка полевая ВИК 9) размещали на трансекте в основном с 1997 по 2006 гг. (в 2002 г. на разных полях трансекты ячмень выращивали в чистом и покровном посеве) в рамках следующего чередования культур: ячмень с подсевом трав, клеверо-тимофеечная травосмесь 1 г.п., клеверо-тимофеечная травосмесь 2 г.п., яровая пшеница, овес.

С 2007 по 2012 гг., вследствие смены покровной культуры, на агрополигоне культивировали чистые посевы ячменя, при этом характер севооборота изменился: овес с подсевом трав, клеверо-тимофеечная травосмесь 1 г.п., клеверо-тимофеечная травосмесь 2 г.п., яровая пшеница, ячмень.

Под ячмень, при любом способе выращивания, удобрения не вносили (экстенсивная технология) за исключением подкормки в фазе кущения аммиачной селитрой в дозе 0,1 т/га (N₃₀). После 2012 г. ячмень на полигоне не возделывали.

Для исключения влияния агроклиматического фактора на результаты исследований из временного ряда наблюдений были выбраны годы с активной температурой (выше 10°C) ≈ 2100°C, суммой осадков за вегетационный период ≈ 300 мм, гидротермическим коэффициентом по Селянину ≈ 1,2...1,3. Для покровных посевов такими условиями характеризовались 2000, 2002 и 2005 гг., для чистых – 2002, 2007 и 2012 гг.

Для прогноза урожайности учитывали влияние факторов рельефа (абсолютной высоты, крутизны и кривизны поверхности, интенсивности солнечной радиации) и агрохимических свойств почвы (содержание гумуса (по Тюрину), подвижного фосфора (по Кирсанову), обменного калия (по Масловой), рН_{KCl}), определяемых в описанных точках опробования, так как, только эти параметры известны для территории прогнозного хозяйства (ОПХ «Заветы Ленина» Калининского района Тверской области), на продуктивность ячменя. В пределах трансекты для более подробного сравнения адаптивных реакций ячменя, выращенного разными способами, использовали также данные о гидrolитической кислотности почв, содержании в них кальция, магния и легкогидролизуемого азота.

Прогнозное хозяйство, в пределах которого размещен агрополигон «Губино», в основном, прекратило хозяйственную деятельность в конце 90-х гг. и было

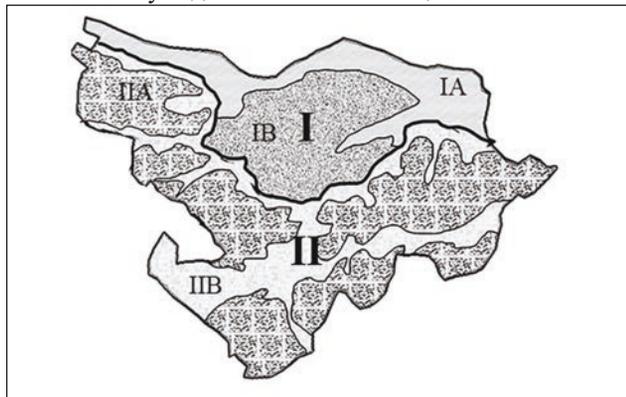


Рис. 1. Карта-схема ландшафтного устройства ОПХ «Заветы Ленина»: I – зандрово-аллювиальная равнина, II – водно-ледниковая равнина, IA – долины рек, IB – зандровая равнина, IIA – конечно-моренные холмы, IIB – межхолмны депрессии.

юридически ликвидировано в 2006 г. Общая площадь предприятия составляла 6312 га, в том числе сельхозгодий – 4923 га, из них пашни – 3394 га. На территории ОПХ расположены два генетически различных ландшафта (рис. 1).

Долинный ландшафт, расположенный в северной части хозяйства, образован древними и современными русловыми процессами, занимает 29,2% площади хозяйства. Рельеф его плоский, осложненный внутриводораздельными останцами гривистых зандров, занятых сосновым бором. Почвообразующие породы – аллювиальные отложения различного возраста и гранулометрического состава. Доминантная местность – современная долина р. Волги, состоящая из сложного урочища первой надпойменной террасы и простых урочищ долин впадающих в нее мелких водотоков. Сложное урочище надпойменной террасы состоит в основном из элювиально-аккумулятивных и аккумулятивных геосистем. Элювиально-аккумулятивные геоконплексы занимают прирусловую возвышенную часть террасы. В её пределах доминируют песчаные дерново-глеватые почвы. Она частично занята разнотравной растительностью, частично была распашана. Аккумулятивные геоконплексы расположены у тылового шва террасы в местах выклинивания грунтовых вод. Они характеризуются широким распространением дерново- и торфянисто-глеевых легко- и среднесуглинистых почв, развивающихся на старичном аллювии. Субдоминантной местностью долинного ландшафта служит древнеаллювиальная (зандровая) плоская равнина, сложенная слоистыми песками различной крупности, на разной глубине подстилаемыми карбонатной мореной. Она целиком образована одним сложным урочищем плоской равнины, наиболее обширными подурочищами которой выступают транзитно-аккумулятивные геоконплексы, занимающие слабонаклонные поверхности. Для них характерны почвенные пятнистости, состоящие из дерново-подзолистых глеевых и глееватых песчаных и супесчаных почв. Аккумулятивные подурочища, располагающиеся в микропонижениях с дерново- и торфянисто-глеевыми почвами, заняты заболоченными лугами.

Ландшафт моренно-ледниковой равнины, занимающий центральные и южные части хозяйства, образован флювиогляциальными процессами, происходившими при отступании Московского ледника. Он занимает 70,8% площади ОПХ. Рельеф его волнисто-увалистый с перепадами высот, достигающими 30 м. Почвообразующие породы – двучленные отложения различной мощности, образованные флювиогляциальными песками и супесями, подстилаемыми карбонатной мореной. Ландшафт образован одной местностью волнисто-увалистой равнины, которая, в свою очередь, состоит из сложных урочищ отдельных моренных холмов. Доминантными подурочищами этого ландшафта выступают транзитные геоконплексы, на которые приходится около половины территории хозяйства, субдоминантными – транзитно-аккумулятивные микроконплексы, занимающие значительно меньшие площади. Элювиальные и элювиально-аккумулятивные подурочища в сумме занимают менее 8% территории ОПХ.

На основании архивных материалов ОПХ и ВНИИМЗ (материалы обследования Гипрозема и Гипроводхоза, агрохимической службы Тверской области, данные по опытным участкам института) были составлены цифровая модель рельефа (ЦМР) хозяйства, агрохимические картограммы, почвенные и ландшафтные карты. В пределах ОПХ выбраны 60 равномерно расположенных опорных точек, для каждой из которых определены все рассматриваемые параметры.

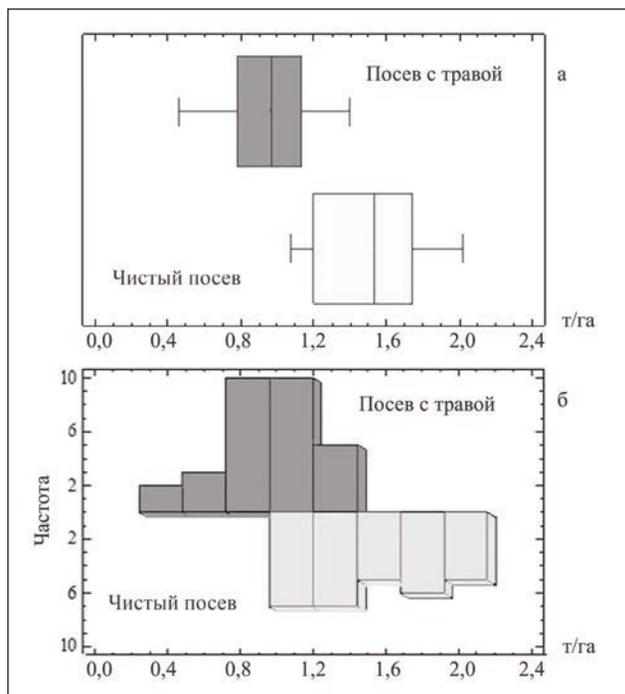


Рис. 2. Статистические показатели урожайности ячменя при разных способах посева: а – средние значения, б – гистограммы распределения.

Статистическую (описательная статистика, корреляционный, линейный мультирегрессионный и регрессионный анализ по методу Partial Least Squares (PLS) и графическую обработку данных мониторинга и прогноза осуществляли с использованием пакетов программ

Statgraphic+19, Excel 19 и геоинформационной системы ArcGIS 10. Степень влияния ландшафтных факторов на урожайность ячменя вычисляли на основе метода Н. А. Плохинского путем деления частной факториальной суммы квадратов на общую [25].

Результаты и обсуждение. Среднегодушная урожайность (рис. 2а) покровного ячменя (0,97 т/га) была достоверно ниже ($HCP_{0,05} = 0,14$ т/га), чем в чистом посеве (1,52 т/га), что отмечают и другие исследователи [26, 27]. Это может быть обусловлено негативным влиянием трав, которые в некоторых местоположениях к концу вегетации ячменя могут его перерастать. Такой вывод подтверждают результаты анализа гистограмм распределения – в покровных посевах ячменя наиболее вероятна урожайность 0,80...1,20 т/га, в то время как в чистых она ниже 0,90 т/га не встречается (рис. 2б).

Достоверные различия между агрохимическими показателями почв полей при разных способах посева отмечены только по содержанию гумуса – под покровным ячменем оно в среднем было равно 2,79 %, под чистыми посевами – 2,51 % ($HCP_{0,05} = 0,25$ %), что свидетельствует о тенденции минерализации гумуса со временем под воздействием агротехники и осушительной мелиорации, однако почвы всех полей относятся к разряду сильногумусированных [27].

Установлена также устойчивая корреляция (в нашей работе достоверны коэффициенты корреляции $\geq 0,32$) между полями с разными способами посева по пространственной изменчивости одного и того же показателя: обменной ($r = 0,80$) и гидролитической ($r = 0,88$) кислотности, содержания фосфора ($r = 0,81$), калия ($r = 0,77$), гумуса ($r = 0,76$), кальция ($r = 0,97$) и магния ($r = 0,87$), что свидетельствует о постоянном характере изменения этих факторов плодородия почв в пределах агроландшафта. Это позволяет сравнивать результаты регрессионных мо-

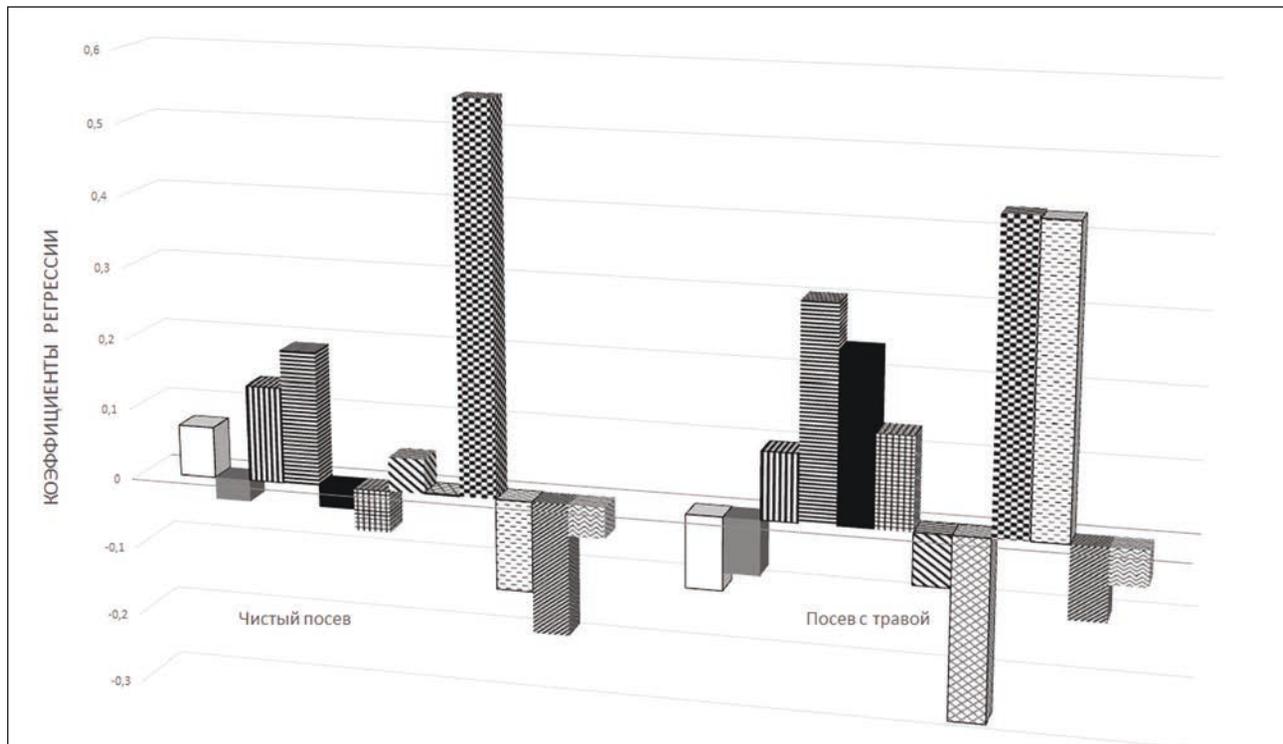


Рис. 3. Факторы, влияющие на урожайность ячменя на трансекте в различных посевах:

□ – рН, ■ – N, ▨ – фосфор, ▩ – калий, ■ – гумус, ▨ – Ca, ▨ – Mg, ▨ – N, ▨ – высота, ▨ – крутизна, ▨ – крутизна, ▨ – радиация.

делей зависимости урожайности ячменя от ландшафтных условий трансекты при разных способах посева (рис. 3).

Результаты регрессионного анализа методом Partial Least Squares (PLS) свидетельствуют, что изменение способа посева ячменя приводит к резкой перестройке набора факторов, влияющих на его урожайность. Из анализа результатов уравнений регрессии видно, что в чистых посевах ячмень наиболее продуктивен на плоских возвышенностях, осложненных микропонижениями (положительное воздействие абсолютной высоты и отрицательное – кривизны поверхности). Это объясняется его экологическими особенностями – хотя злак и хорошо переносит низкие температуры и устойчив к засухе, тем не менее, растению необходимо тепло, свет, регулярное питание и дополнительная влага.

Урожайность покровного ячменя зависит от большего числа факторов. Максимальное влияние на продуктивность культуры оказывают высота местоположения и крутизна склона, при увеличении которых усиливается освещенность посевов и самодренаж территории, что препятствует сильному развитию трав и дает ячменю конкурентные преимущества. В сложных посевах также значительную роль играет конкуренция за элементы питания растений. Увеличение в почве содержания легкогидролизуемого азота приводит к ускоренному развитию трав, что снижает урожайность зерновых.

Мультирегрессионный анализ такого же набора факторов показал зависимость ячменя в чистых посевах только от высоты местоположения, определяющей 41,1 % вариабельности его урожайности, в то время как коэффициент детерминации уравнения регрессии по покровному ячменю достигал 74,5 %, из которых максимальная доля вариабельности (35,3 %) приходится на высоту, 14,3 % – на легкогидролизуемый азот, 13,0 % – на крутизну склонов, 11,9 % – на содержание магния.

Линейный мультирегрессионный анализ для условий ОПХ позволил определить характер адаптивных реакций ячменя на ландшафтные условия при различном посеве:

$$\begin{aligned} \text{урожай чистого посева ячменя} &= -89,1939 + 0,678699 \times \text{высота местоположения;} \\ R^2 &= 41,1 \%, P = 0,0001; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{урожай покровного ячменя} &= -70,1333 + 0,0294193 \times \text{фосфор} + 2,26147 \times \text{крутизна склонов} + 0,496278 \times \text{высота местоположения;} \\ R^2 &= 58,2 \%, P = 0,0000. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения 1 и 2 использовали для создания прогнозных карт урожайности культуры в пределах ОПХ (рис. 4). Оказалось, что около четверти всей площади хозяйства (1578 га) имеет благоприятные условия для выращивания чистых посевов ячменя. Лучшие местоположения для этого способа возделывания культуры – запад и юг хозяйства в пределах моренно-ледниковой равнины. Урожайность ячменя здесь может варьировать от 1,40 до 3,30 т/га. Долинный ландшафт, в котором господствуют низменные равнины, малопригоден для чистых посевов этой культуры.

Ареалы с относительно высокой урожайностью (1,10...3,40 т/га) покровного ячменя, на которые приходится около 20 % территории хозяйства (1262 га), расположены в основном в переходной зоне между моренно-ледниковой равниной и долинным ландшафтом, тогда как центральные части таких геосистем характеризуются пониженной урожайностью культуры. Это можно объяснить тем, что только в экотонных частях ландшафтов складывается оптимальное соотношение между параметрами рельефа и плодородия почв рассматриваемого способа возделывания культуры.

Результаты анализа прогнозных поверхностей сви-

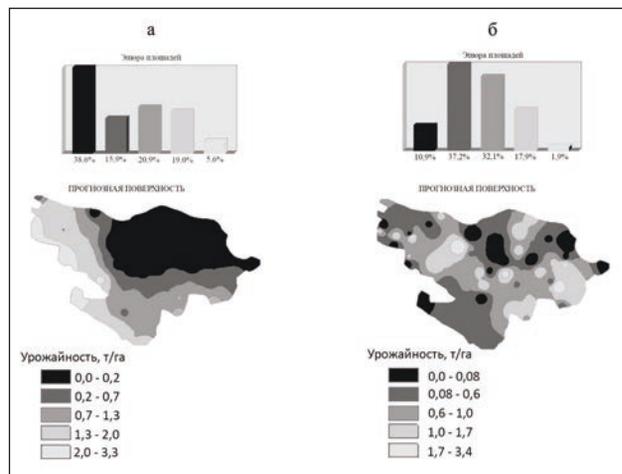


Рис. 4. Прогнозные поверхности и эиоры площадей ареалов урожайности чистых (а) и покровных (б) посевов ячменя в пределах ОПХ.

детельствуют, что ландшафтное устройство территории хозяйства определяет только самые общие черты вариабельности урожайности культуры, которая зависит в основном от способа посева. Можно отметить, что, чем больше факторов влияет на продуктивность растений, тем меньше карта прогнозной урожайности коррелирует с характером ландшафтного устройства территории. Прогнозные поверхности урожайности ячменя (см. рис. 4) вследствие невысокой точности (41,1 % для чистых посевов и 58,2 % для покровных) не отражают полной картины пространственной вариабельности продуктивности культуры, поэтому для адекватного проектирования адаптивно-ландшафтной технологии выращивания ячменя, необходимо проводить дополнительные исследования территории ОПХ в рамках «дискретного» подхода, которые позволят увеличить количество факторов, используемых в регрессионном анализе, что повысит его точность, а также определить характер ландшафтно-почвенных границ, что в синтезе с прогнозными поверхностями урожайности культуры позволит проложить технологически оптимальные рубежи полей и угодий.

Выводы. В пространстве геосистем можно выделить относительно однородные в почвенном или ландшафтном отношении участки, разделенные четкими границами. Однако картографические материалы не отражают всего разнообразия почвенно-ландшафтных условий. Растение, находясь под влиянием природной среды, адаптируется ко всему комплексу факторов агроландшафта, поэтому для разработки наиболее адекватного способа использования территории необходимо рассматривать факторный континуум с разных сторон.

Использование двух подходов к определению границ полей и угодий – «дискретного», направленного на выделение в пределах территории хозяйства однородных в производственном отношении «типов земель», и «континуального», предназначенного для создания непрерывных прогнозных поверхностей урожайности культур, в пределах которых выявляются места, оптимальные для их произрастания, создает возможность разработки более гибких схем использования сельскохозяйственной территории.

Результаты исследования на основе «континуального» подхода свидетельствуют, что при экстенсивном использовании земель бывшего ОПХ возможно фор-

мирование урожая ячменя до 3,40 т/га. Однако величина этого показателя в пределах ОПХ, в зависимости от способа посева, реагирует на разные наборы факторов ландшафтно-почвенной среды, что обуславливает разницу в расположении посевов и мероприятиях по его выращиванию в режиме адаптивно-ландшафтного земледелия.

Литература

1. Михайлова А. Непакханое поле: стоит ли возвращать в оборот залежные земли // *Агроинвестор*. 24 октября 2020. URL: <https://www.agroinvestor.ru/analytics/news/34684-nerpakhanoe-pole-stoit-li-vozvrashchat-v-оборот-zaleznyye-zemli/> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Детерминанты пространственного распределения заброшенных сельскохозяйственных земель в европейской части России / А. В. Прищепов, Д. Мюллер, М. Ю. Дубинин и др. // *Пространственная экономика*. 2013. № 3. С. 30–62.
3. Шилов П. М., Козлов Д. Н. Почвенно-агроэкологическая оценка пахотнопригодности земель Валдайской возвышенности по материалам генерального межсезония // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*. 2019. № 98. С. 5–36. doi: 10.19047/0136-1694-2019-98-5-36.
4. Андриященко С. А. Тенденции и условия повышения экологической устойчивости АПК Российской Федерации // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. № 2 (392). С. 143–146. doi: 10.55186/25876740_2023_66_2_143.
5. Шалов Т. Б., Азубеков Л. Х. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия в схеме землеустройства территории сельского поселения // *Земледелие* № 6. 2013. С. 28–29.
6. Кирюшин В. И., Кирюшин С. В. Агротехнологии. СПб.: Лань, 2022. 464 с.
7. Матасов В. М. Внутриландшафтная динамика использования земель Мещерской низменности за последние 250 лет // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2017. № 4 С. 65–74.
8. Мамай И. И., Роганов С. Б. Границы природных территориальных комплексов // *Известия Русского географического общества*. 2004. Т. 136. № 3. С. 37–49.
9. Дылис Н. В. Структура лесного биогеоценоза. М.: Наука, 1969. 57 с.
10. Фридланд В. М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
11. Фридланд В. М. Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 236 с.
12. Технология составления и обновления почвенных карт / И. Ю. Савин, В. С. Столбовой, А. И. Иванов и др. М.: Издательство «Перо», 2019. 328 с.
13. Effect of the spatial heterogeneity of soil properties on the growth and productivity of soybeans / N. D. Kutuzova, G. S. Kust, S. Y. Rozov, et al. // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 1. С. 85–94.
14. Иванов Д. А., Карасева О. В., Рублюк М. В. Исследование влияния почвенного покрова и рельефа на продуктивность культур // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. № 2. С. 19–26. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10203.
15. Ivanov D. A. Theoretical aspects of agrogeography // *Herald of the Russian academy of sciences*. 2018. Vol. 88. No. 5. P. 379–384. doi: 10.1134/S1019331618040111.
16. Юсова О. А., Николаев П. Н. Адаптивность новых перспективных сортов ярового ячменя омской селекции // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 8. С. 20–24.
17. Лихачева Л. И., Москалев А. В. Экологическая адаптивность сортообразцов гороха посевного в условиях Среднего Урала // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 4. С. 47–51.
18. Адаптивность сортов ярового ячменя селекции ФАНЦ Северо-Востока / Т. К. Шешигова, И. Н. Щенникова, Л. М. Щеклеина, и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 2. С. 25–29. doi: 10.31857/S2500262722020053.
19. Епифанова И. В. Изучение адаптивных показателей люцерны изменчивой в условиях лесостепи среднего Поволжья // *Кормопроизводство*. 2022. № 1. С. 31–36. doi: 10.25685/KRM.2022.94.80.001.
20. Кинчаров А. И., Дёмина Е. А. Анализ и краткосрочный прогноз изменения климатических условий в адаптивной селекции яровых зерновых // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 23–30. doi: 10.31857/S2500262722010057.
21. Иванов Д. А., Ковалев Н. Г. Ландшафтно-мелиоративные системы земледелия (прикладная агрогеография). Монография. Тверь: Издатель А. Н. Кондратьев, 2017. 310 с.
22. Бугаевская В. В., Вершинин В. В., Мартынова Д. Ю. Цифровизация землеустройства на основе многофункциональной земельно-информационной системы и геоинформационных технологий: результаты инноваций и проблемы // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. № 1 (391). С. 4–7. doi: 10.55186/25876740_2023_66_1_4.
23. Михайленко И. М., Якушев В. П. Информационно-техническая база интеллектуализации управления агротехнологиями // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2022. № 2. С. 4–11. doi: 10.30850/vrsn/2022/2/4-11.
24. Монгуш Л. Т. Изучение влияния покровных культур на урожайность и продуктивность многолетних трав в условиях республики Тыва // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 12. С. 19–24. doi: 10.36718/1819-4036-2020-12-19-24.
25. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.
26. Борисова Е. Е., Сизова Ю. В., Шуварин М. В. Влияние покровных культур на урожайность клевера // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2020. № 2 (61). С. 56–60.
27. Технология возделывания ячменя в Воронежской области / В. И. Турусов, А. М. Новичихин, И. М. Корнилов и др. Воронеж: Каменная Степь, 2019. 37 с.

Поступила в редакцию 27.07.2023

После доработки 21.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ ПОВОЛЖЬЯ

О. И. Горянин, доктор сельскохозяйственных наук,
Б. Ж. Джангабаев, Е. В. Щербинина, Л. В. Пронович

Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова – филиал Самарского федерального исследовательский центра РАН,
446254, Самарская обл., Безенчукский р-н, пос. Безенчук, ул. К. Маркса, 41
E-mail: gorjanin.oleg@mail.ru

Исследования выполняли с целью выявления возможности и перспективности использования ресурсосберегающих технологий в шестипольном зернопаропропашном севообороте на чернозёме обыкновенном в 2019–2022 гг. Испытывали четыре технологии выращивания полевых культур: традиционную, две с дифференцированной обработкой почвы и прямой посев. За период исследований выявлена перспективность ресурсосберегающих технологий с комплексом средств интенсификации. По сравнению с традиционной, прибавка урожайности составила 0,30...0,57 т/га (11,0...21,0 %). Максимальная в опыте продуктивность севооборота отмечена в технологии с дифференцированной обработкой почвы и при применении средств интенсификации – 2,40 тыс. зерн. ед./га, что на 0,20 тыс. зерн. ед./га (9,1 %) больше, чем при прямом посеве и на 0,38...0,61 тыс. зерн. ед./га, по сравнению с традиционной и ресурсосберегающей (экстенсивный фон). По результатам исследований, предлагаются технологические операции при выращивании полевых культур с использованием при прямом посеве зерновых агрегата АУП-18.05, подсолнечника – сеялки Кuhn: дифференцированная обработка почвы в севообороте (в том числе рыхление на 25...27 см ПЧ-4,5 под подсолнечник и сою; под чистый пар – без осенней обработки; под ячмень и яровую пшеницу – прямой посев) или прямой посев с целью наибольшей окупаемости затрат; внесение аммиачной селитры в дозе N_{40} (до посева яровой пшеницы и ячменя, весенняя подкормка озимой пшеницы); основное внесение азотоски (N_{15}, P_{15}, K_{15}) при выращивании подсолнечника и сои; обработка посевов зерновых агрохимикатом Бионекс Кемп, биофунгицидом Фитоспорин, фунгицидом Солигор, подсолнечника – агрохимикатом Борозум.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS IN THE CULTIVATION OF FIELD CROPS IN ARID CONDITIONS OF THE VOLGA REGION

O. I. Goryanin, B. Zh. Dzhangabaev, E. V. Shcherbinina, L. V. Pronovich

Tulajkov Samara research Institute of agriculture,
Samara Federal research center of the Russian Academy of Sciences
446254, Samarskaya obl., Bezenchukskii r-n, pos. Bezenchuk, ul. K. Marksa, 41
E-mail: gorjanin.oleg@mail.ru

The research was carried out in order to identify the possibility and prospects of using resource-saving technologies in six-field grain-and-crop rotation on ordinary chernozem in 2019–2022. Four technologies of growing field crops were tested: traditional, two with differentiated processing and direct sowing. During the research period, the prospects of resource-saving technologies with a complex of means of intensification were revealed. Compared with the traditional one, the yield increase here was 0.30...0.57 t/ha (11.0...21.0 %). The maximum productivity of crop rotation is established in technology with differentiated tillage and with the use of intensification means – 2.40 thousand grain units/ha, which is 0.20 thousand grain units/ha (9.1 %) more than the technology with direct sowing and 0.38...0.61 thousand grain units/ha traditional and resource-saving (extensive background). According to the research results, technological operations are proposed for growing field crops using the AUP-18.05 unit for direct sowing of cereals, sunflower – Kuhn seeder: differentiated tillage in crop rotation (including loosening by 25–27 cm of bee-4.5 for sunflower and soy; for pure steam – without autumn processing; for barley and spring wheat – direct sowing) or direct sowing for the purpose of maximum cost recovery; application of ammonium nitrate in a dose of N_{40} (before sowing spring wheat and barley, spring fertilizing of winter wheat); the main application of azofoski (N_{15}, P_{15}, K_{15}) in the cultivation of sunflower and soybeans; treatment of grain crops with the agrochemicals Bionex Kemi, biofungicide Phytosporin, fungicide Soligor, sunflower – agrochemicals Borozum.

Ключевые слова: технологии, севооборот, урожайность, продуктивность, экономическая эффективность

Key words: technologies, crop rotation, yield, productivity, economic efficiency.

При рыночных отношениях, которые сложились в последние годы в России, основное направление возделывания полевых культур – ресурсосбережение [1, 2, 3]. При этом в засушливых условиях при выращивании зерновых культур наиболее перспективны технологии прямого посева и производственные системы No-till, которые решают проблему не только сокращения трудовых и материальных затрат, но и сохранения почвенного плодородия [4, 5, 6].

Возделывание пропашных культур по таким технологиям до недавнего времени не находило применения. Основным препятствием при этом выступали

агрофизические свойства почвы, так как для роста и развития подсолнечника, кукурузы и сои необходимо более рыхлое сложение, по сравнению с зерновыми культурами. Однако нарастание аридности климата на большой площади страны, удорожание технологических операций и нехватка трудовых ресурсов, занятых в растениеводстве, делают актуальным вопрос о возможности применения технологий прямого посева под пропашные культуры в зональных севооборотах. При этом, известно, что при длительном использовании прямого посева и производственных систем No-till агрофизи-

ческие свойства почвы не ухудшаются, по сравнению с традиционной технологией [7, 8, 9].

Цель исследований – выявление возможности и перспективности применения ресурсосберегающих технологий, в том числе прямого посева, в зональных севооборотах засушливого Поволжья.

В задачи исследований входило: выявить оптимальные технологические приёмы при возделывании полевых культур в зональном севообороте; предложить производству оптимальные приёмы возделывания полевых культур в чернозёмной степи.

Методика. Исследования проводили в зернопаропропашном севообороте (2019–2022 гг.) отдела земледелия Самарского НИИСХ – филиала СамНЦ РАН со следующим чередованием культур: чистый пар (чёрный в варианте 1, ранний – в вариантах 2, 3 и 4) – озимая мягкая пшеница – соя – яровая твёрдая пшеница – подсолнечник – ячмень.

Испытывали четыре варианта технологий, которые включали в себя следующие операции:

1) зяблевая вспашка под все культуры севооборота (посев зерновых культур и сои сеялкой СЗ 3,6, подсолнечника сеялкой Kuhn) + пестициды;

2) дифференцированная обработка почвы в севообороте (рыхление на 25...27 см ПЧ-4,5 под подсолнечник и сою; под чистый пар – без осенней обработки; ячмень и яровая пшеница – прямой посев АУП-18.05) + пестициды;

3) прямой посев зерновых культур и сои сеялкой АУП-18.05, подсолнечника сеялкой Kuhn + пестициды + минеральные удобрения (под подсолнечник и сою – азофоска ($N_{15}P_{15}K_{15}$); под ячмень и яровую пшеницу – предпосевное внесение аммиачной селитры (N_{40}); на озимой пшенице весенняя подкормка аммиачной селитрой (N_{40}));

4) дифференцированная обработка почвы в севообороте (рыхление на 25...27 см ПЧ-4,5 под подсолнечник и сою; под чистый пар – без осенней обработки; ячмень и яровая пшеница – прямой посев АУП-18.05) + пестициды + минеральные удобрения (под подсолнечник и сою – азофоска ($N_{15}P_{15}K_{15}$); под ячмень и яровую пшеницу – предпосевное внесение аммиачной селитры (N_{40}); на озимой пшенице весенняя подкормка аммиачной селитрой (N_{40})) + Бионекс Кеми (озимая и яровая пшеница, ячмень, соя), Борогум (подсолнечник) + биофунгицид Фитоспорин + фунгицид Солигор под ячмень и яровую твёрдую пшеницу.

Применение пестицидов во всех вариантах предусматривало протравливание семян, обработку вегетирующих растений гербицидами (зерновые – Секатор турбо, Прима; соя – Пульсар, подсолнечник – Экспресс) и инсектицидами (зерновые при превышении численности вредителей экономического порога вредоносности).

Почва опытных участков – чернозем обыкновенный. В слое 0...0,3 м содержание гумуса составляло 4,0...4,5 %, фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 170...200 и 180...200 мг/кг. Минеральные удобрения во всех опытах вносили сеялкой СЗ-3,6, биопрепараты и агрохимикаты – опрыскивателем ОН-400. Повторность опыта 3-кратная, общая площадь делянок – 550 м², учетная площадь – 200 м². Уборку проводили комбайном «Сампо-130».

Экономическую эффективность возделывания полевых культур рассчитывали в соответствии с общепринятой методикой. Продуктивность севооборотов определяли в тысячах зерновых единиц на 1 га севооборотной площади. При расчётах использовали следующие коэффициенты перевода урожайности культур в зерновые единицы: озимая и яровая пшеница, яровой ячмень – 1,00, соя – 1,17, подсолнечник – 1,47 [10]. Ма-

тематическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа на компьютере (программа AGROVer. 2.09).

В целом метеосостояние в районе исследований отличалось засушливостью – среднегодовое гидротермический коэффициент (ГТК) за май–август был равен 0,70. При ГТК за май–август 0,61 погодные условия вегетации 2019 г. характеризовались засушливостью для зерновых культур и были в пределах нормы для пропашных культур. Раннее начало вегетации при прохладной погоде в июне (18,3 °С) в 2020 г. обеспечило благоприятные условия для роста и развития зерновых культур. При ГТК за май–август равном 0,47 условия для возделывания подсолнечника были удовлетворительными, для сои – неблагоприятными. На урожайность полевых культур в 2021 г., при ГТК за май–август 0,52, отрицательно повлияли недостаточное количество осадков и повышенный температурный режим во все месяцы вегетации. Температурный режим (на уровне нормы и ниже) и количество осадков выше нормы с мая по июль обеспечили благоприятные условия для роста и развития зерновых культур в 2022 г. При отсутствии осадков в июле и ГТК за май–август 0,85 условия для роста и развития подсолнечника и сои были удовлетворительными.

Результаты и обсуждение. В среднем за годы исследований применение ресурсосберегающих технологий при возделывании полевых культур не ухудшало водный режим почвы, по сравнению с традиционной. Прямой посев и дифференцированная обработка в технологиях с внесением удобрений способствовали увеличению запасов продуктивной влаги в слое почвы 0...1 м весной (табл. 1), по сравнению с традиционной технологией, на 6,5...7,4 мм (4,2...4,7 %). При этом в посевах озимой пшеницы (весеннее кущение) и подсолнечника (всходы) запасы влаги не зависели от технологии возделывания. В посевах сои и ячменя в фазе всходов преимущество ресурсосберегающих технологий в накоплении влаги было незначительным и составляло 0,9...8,5 мм (0,6...5,3 %).

Табл. 1. Запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...1,0 м в весенний период (среднее за 2019–2022 гг.), мм

Культура, поле	Вариант технологии				НСР ₀₅
	1	2	3	4	
Чистый пар	145,8	153,2	158,1	161,4	8,8
Озимая пшеница	173,0	169,0	172,4	178,2	$F < F_T$
Соя	152,5	154,7	160,2	153,4	$F < F_T$
Яровая твёрдая пшеница	158,4	164,7	166,6	175,2	$F < F_T$
Подсолнечник	149,7	153,4	149,5	147,8	$F < F_T$
Ячмень	159,0	166,3	167,5	167,1	$F < F_T$
Среднее	156,4	160,2	162,9	163,8	$\frac{F}{2}, 2$

Установлено улучшение водного режима почвы при прямом посеве яровой твёрдой пшеницы (интенсивный фон), по сравнению с традиционной технологией. В период всходов культуры в слое 0...1 м преимущество в запасах влаги в ресурсосберегающих вариантах составило 16,8 мм (10,6 %). Увеличение запасов влаги при ресурсосберегающих технологиях отмечено и в паровом поле, которое, по отношению к традиционной технологии, составило 7,4...15,6 мм (5,1...10,7 %).

Одной из основных причин недобора урожая сельскохозяйственных культур по необработанным с осени полям и минимальной обработке в регионе, по сравнению со вспашкой, выступает ухудшение питательного режима почвы. Для решения этой проблемы необходимы наблюдения за содержанием основных элементов питания и мероприятия, обеспечивающие улучшение питания растений (внесение соломы, пожнивно-корневых остатков, применение биопрепаратов и др.)

Один из главных макроэлементов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур, в чернозёмной зоне Среднего Поволжья – азот, который в связи с преобладанием аэробных процессов в почве находится в большинстве случаев в нитратной форме [11]. Установлено, что в первые годы прямого посева с внесением измельчённой соломы, вследствие иммобилизационных процессов происходит ухудшение азотного режима почв, которое со временем сглаживается [3, 12]. В наших исследованиях в начале парования содержание нитратов не зависело от технологий возделывания (табл. 2).

Табл. 2. Содержание нитратов (NO₃) в весенний период в слое почвы 0...0,4 м (среднее за 2019–2022 гг.), мг/кг

Культура, поле	Вариант технологии				HCP ₀₅
	1	2	3	4	
Чистый пар	35,0	26,5	28,9	32,4	F _φ < F _T
Озимая пшеница	25,5	26,3	53,7	96,0	21,4
Соя	39,2	41,3	38,0	50,6	10,2
Яровая твёрдая	30,8	16,6	61,4	74,8	22,5
Подсолнечник	33,7	27,2	38,5	54,7	15,9
Ячмень	16,7	14,6	39,6	41,4	17,0
Среднее	30,2	25,4	43,4	58,3	16,5

В фазе начала трубоквания озимой пшеницы содержание нитратов в зависимости от вида чистого пара (чёрный и ранний) на экстенсивных фонах существенно не изменялось и составляло 25,5...26,3 мг/кг почвы. Ранневесенняя подкормка азотными удобрениями, обеспечив интенсивный рост растений в фазе весеннего кущения пшеницы, способствовала улучшению азотного питания и в следующие фазы развития. Преимущество удобренных фонов по содержанию NO₃ над неудобренными составило 27,4...70,5 мг/кг, или в 2,0...3,8 раза. Наибольшее в опыте содержание нитратов установлено при максимальном уровне интенсивности – 96,0 мг/кг почвы, или в 1,8...3,8 раза больше, чем в других вариантах.

Внесение аммиачной селитры обеспечивало существенное увеличение NO₃ в посевах яровой пшеницы и ячменя. В период всходов этих культур содержание нитратов в почве возросло, по сравнению с вариантами без удобрений, в 2,0...4,5 раза.

В фазе всходов сои и подсолнечника лучший азотный режим в 0...0,4 м слое почвы складывался при дифференцированной обработке и внесении сложных удобрений. Содержание NO₃ в этом варианте было выше, чем при традиционной технологии, на 11,4...21,0 мг/кг почвы (29,1...62,3 %), по сравнению с ресурсосберегающими – на 12,6...27,5 мг/кг (33,2...101,1 %).

В среднем по севообороту на фоне естественного плодородия изменений в азотном режиме почвы не отмечено. При внесении удобрений содержание нитратов, по сравнению с естественным фоном ресурсосберегающей технологии, увеличивалось на 18,0...32,9 мг, или в 1,7...2,3 раза, по сравнению с традиционной технологией – на 28,1 мг/кг почвы, или в 1,9 раза.

Результаты предыдущих исследований, проведенных в Самарском НИИСХ, свидетельствуют, что длительное использование прямого посева и минимальных обработок почвы в севообороте обеспечивает улучшение фосфатного и калийного режимов почвы, по сравнению с традиционной технологией [3, 12, 13].

В наших исследованиях в паровом поле и под посевами подсолнечника наибольшее содержание фосфатов установлено в варианте с дифференцированной обработкой почвы в севообороте – 204,1...232,0 мг/кг, что на 18,8...46,7 мг/кг (10,1...25,2 %) больше, чем при традиционной технологии (табл. 3). В поле озимой пшеницы в начале трубоквания максимальное содержание подвижного фосфора в почве отмечено

при дифференцированной обработке и внесении удобрений – 198,8 мг/кг, что существенно на 20,3...29,2 мг (11,4...17,2 %) больше, чем в остальных исследуемых вариантах. На фоне внесения сложных удобрений под сою и их последствия на яровой твёрдой пшенице происходило улучшение фосфатного режима почвы при прямом посеве и ресурсосберегающей технологии на этих культурах, по сравнению с традиционной, на 14,9...45,9 мг/кг (8,3...26,9 %). Использование всех ресурсосберегающих технологий в среднем за годы исследований повышало содержание P₂O₅ в почве при возделывании ячменя, по сравнению с традиционной, на 16,0...26,8 мг/кг (8,9...14,7 %). В среднем по севообороту их применение обеспечивало увеличение содержания фосфатов, по сравнению с традиционной технологией, на 14,9...29,9 мг/кг почвы (8,1...16,7 %), при наибольших величинах этого показателя в варианте с дифференцированной обработкой и внесением удобрений – 209 мг/кг.

Табл. 3. Содержание питательных веществ под посевами культур в весенний период в слое почвы 0...0,4 м (среднее за 2019–2022 гг.), мг/кг

Культура, поле	Вариант технологии				HCP ₀₅
	1	2	3	4	
P₂O₅					
Чистый пар	188,8 ²	209,8	196,2	209,7	12,0
Озимая пшеница	169,6	178,5	171,5	198,8	16,6
Соя	180,5	185,8	195,4	199,6	14,0
Яровая твёрдая	170,4	185,2	210,9	216,3	16,3
Подсолнечник	185,3	204,1	196,8	232,0	18,2
Ячмень	179,9	206,7	195,9	206,3	16,0
Среднее	179,1	194,7	194,0	209,0	15,0
K₂O					
Чистый пар	164,0	184,5	183,2	197,8	20,5
Озимая пшеница	168,3	189,5	193,6	203,3	22,4
Соя	166,6	163,5	178,9	188,1	F _φ < F _T
Яровая твёрдая	158,9	161,8	193,4	200,5	21,0
Подсолнечник	168,0	163,8	168,2	201,2	22,1
Ячмень	153,8	182,1	186,6	196,2	18,4
Среднее	168,5	172,5	182,6	198,7	11,6

Содержание подвижного калия в почве в посевах сои не зависело от технологий возделывания. В паровом поле и посевах подсолнечника максимальное в опыте содержание K₂O отмечено при дифференцированной обработке почвы (интенсивный фон) – 197,8...201,2 мг/кг, что на 33,2...33,8 мг/кг (19,8...20,6 %) больше, чем в варианте с традиционной технологией. В посевах озимой мягкой и яровой твёрдой пшеницы последствия сложных и внесения азотных удобрений при ресурсосберегающих технологиях способствовало существенному увеличению количества подвижного калия в почве, по сравнению с традиционной, на 25,3...41,6 мг/кг (15,0...26,2 %). Аналогично содержанию фосфатов, прямой посев обеспечивал существенное улучшение калийного режима почвы при возделывании ячменя, по сравнению с традиционной технологией, на 28,3...42,4 мг/кг (18,4...27,6 %). В среднем по севообороту на естественном плодородии фоне количество подвижного калия в зависимости от технологий не изменялось (1, 2 варианты). При внесении удобрений оно увеличивалось, по сравнению с традиционной технологией, на 14,1...30,2 мг/кг почвы (8,4...17,9 %).

Средняя урожайность зерновых в шестипольном зернопаропропашном севообороте в сложившихся условиях благодаря результатам 2020 и 2022 гг. находилась на высоком для региона уровне – 2,33...3,29 т/га (табл. 4). В исследованиях отмечена высокая отзывчивость на применение азотных удобрений зерновых культур, особенно ярового ячменя. На фоне протравливания семян препаратами с ростостимулирующим эффектом

Табл. 4. Влияние технологий возделывания на урожайность полевых культур (среднее за 2019–2022 гг.), т/га

Культура	Вариант технологии				НСР ₀₅
	1	2	3	4	
Озимая пшеница	4,01	3,62	4,05	4,14	0,17
Соя	0,65	0,56	0,59	0,68	0,10
Яровая твёрдая пшеница	2,14	1,78	2,38	2,57	0,17
Подсолнечник	2,18	2,08	2,34	2,55	0,16
Яровой ячмень	2,00	1,60	2,64	3,16	0,17
Среднее по зерновым	2,72	2,33	3,02	3,29	0,17
Продуктивность севооборота, тыс. зерн. ед./га	2,02	1,79	2,20	2,40	0,15

(Сценки Комби) в варианте с его прямым посевом, по сравнению с традиционной технологией, прибавка от азотных удобрений и других средств интенсификации составила 0,64...1,16 т/га (32,0...58,0 %). Внесение азотных удобрений, по сравнению с неудобренным фоном прямого посева, способствовало существенному улучшению азотного питания растений, увеличению густоты стеблестоя, что обеспечило увеличение урожайности зерна ячменя на 1,04 т/га (65,0 %). Применение азотных удобрений (перед посевом), биопрепарата (кушение) и фунгицида Солигор (конец трубоквания) увеличивало урожайность ярового ячменя, по отношению к ресурсосберегающей технологии без удобрений, на 1,56 т/га (97,5 %).

При выращивании яровой твёрдой пшеницы прибавка от применения удобрений и фунгицидов при прямом посеве, по отношению к традиционной технологии, была меньше, чем у ячменя, и составляла 0,24...0,43 т/га (11,2...20,1 %). Внесение азотных удобрений на яровой пшенице, по сравнению с неудобренным фоном прямого посева, способствовало, как и на посевах ячменя, увеличению густоты стеблестоя, что обеспечило рост урожайности на 0,60 т/га (33,7 %). Комплексное применение азотных удобрений, биопрепарата и фунгицида увеличивало урожайность пшеницы, по отношению к прямому посеву без удобрений, на 0,79 т/га (44,4 %).

При возделывании озимой пшеницы прибавка от применения средств интенсификации при ресурсосберегающей технологии была минимальной среди зерновых культур и составила 0,43...0,52 т/га (11,9...14,4 %), по отношению к варианту без применения удобрений при прямом посеве. Средняя прибавка урожайности зерновых культур от комплекса средств интенсификации, по сравнению с традиционной технологией, составила 0,30...0,57 т/га (11,0...21,0 %), по сравнению с ресурсосберегающей без применения удобрений – 0,69...0,96 т/га (29,6...41,2 %).

Достоверных различий в урожайности сои по вариантам технологий в опыте не отмечено. Замена вспашки глубоким чизельным рыхлением под подсолнечник на неудобренном фоне сопровождалась заметным (на 0,10 т/га, или на 4,6 %) снижением урожайности культуры, а при добавлении удобрений – ростом на 0,37 т/га (17,0 %). Переход от рыхления к прямому посеву подсолнечника на удобренном фоне приводил к достоверному снижению его урожайности на 0,21 т/га (8,2 %).

Наибольшая в опыте продуктивность зернопаропропашного севооборота отмечена при дифференцированной обработке почвы, применении удобрений, фунгицидов и регуляторов роста – 2,40 тыс. зерн. ед./га, что на 0,20 тыс. зерн. ед./га (9,1 %) выше, чем в технологии с прямым посевом, наименьшая – при традиционной и ресурсосберегающей на экстенсивном фоне технологиях – 1,79 тыс. зерн. ед./га.

При выращивании озимой пшеницы, в среднем за годы исследований, лучшие в опыте значения условно чистого дохода выявлены в технологиях с ранним паром и внесе-

нием азотных удобрений – 21896,7...22595,2 руб./га, что на 268,2...2518,6 руб./га (1,2...12,5 %) больше вариантов без внесения удобрений. Самая высокая рентабельность отмечена при ресурсосберегающей технологии без применения средств интенсификации – 137,0 %. Самым рентабельным из всех зерновых культур возделывание было яровой твёрдой пшеницы. Максимальные условный чистый доход и уровень рентабельности (соответственно 41172,6...46501,1 руб./га и 268,3...271,6 %) отмечены при прямом посеве с внесением азотных удобрений. При выращивании ячменя установлена самая высокая среди зерновых культур окупаемость азотных удобрений. Наибольшие в опыте условный чистый доход 15383,1 руб./га и уровень рентабельности 109,5 % были получены при комплексном применении удобрений.

В аномальных для поздних пропашных и зерновых культур метеоусловиях, которые сложились в годы исследований, рентабельность возделывания сои составила 5,4...14,7 %, при более высоких значениях в вариантах с традиционной технологией. Наибольший условный чистый доход при выращивании подсолнечника был достигнут в вариантах с прямым посевом и ресурсосберегающей технологией (интенсивный фон) – 36516,4...39245,2 руб./га, что на 2711,4...5440,2 руб./га (8,0...16,1 %) больше чем при традиционной технологии, а самый низкий выявлен на экстенсивном фоне ресурсосберегающей технологии – 32421,0 руб./га. Максимальную в опыте рентабельность производства маслосемян наблюдали при прямом посеве – 239,6 %.

В среднем по зерновым культурам наибольший условный чистый доход и уровень рентабельности обеспечили технологии с дифференцированной обработкой почвы или с прямым посевом и применением средств интенсификации – соответственно 22233,9...24189,5 руб./га и 171,8...172,5 % (табл. 5). При традиционной и ресурсосберегающей технологиях без удобрений уровень рентабельности снижался на 28,6...30,9 %.

В целом на 1 га зернопаропропашного севооб-

Табл. 5. Уровень рентабельности технологий возделывания полевых культур в зернопаропропашном севообороте (среднее за 2019–2022 гг.), %

Показатель	Вариант технологии			
	1	2	3	4
Зерновые на 1 га	143,2	141,6	172,5	171,8
На 1 га севооборотной площади	133,8	131,6	148,2	146,7

рота наибольшие в опыте условный чистый доход и уровень рентабельности установлены при ресурсосберегающих технологиях с применением удобрений – 18797,0...20695,5 руб./га и 146,7...148,2 %, при этом наибольшая рентабельность отмечена при прямом посеве полевых культур – 148,2 %, что на 1,5...16,6 % выше, чем в вариантах с традиционной и ресурсосберегающей технологиями.

Выводы. При возделывании полевых культур в зернопаропропашном севообороте выявлена перспективность ресурсосберегающих технологий, в том числе прямого посева с применением средств интенсификации. Средняя прибавка урожайности зерновых культур от комплекса средств интенсификации в этих технологиях, по сравнению с традиционной, составила 0,30...0,57 т/га (11,0...21,0 %), с ресурсосберегающей без применения удобрений – 0,69...0,96 т/га (29,6...41,2 %).

Максимальная в опыте продуктивность зернопаропропашного севооборота установлена при использовании технологии с дифференцированной обработкой почвы и применением средств интенсификации –

2,40 тыс. зерн. ед./га, что на 0,20 тыс. зерн. ед./га (9,1 %) больше, чем в варианте с технологией с прямым посевом и на 0,38...0,61 тыс. зерн. ед./га, по сравнению с традиционной и ресурсосберегающей (экстенсивный фон).

Наибольшие условный чистый доход на 1 га зернопаропашного севооборота, а также уровень рентабельности обеспечили ресурсосберегающие технологии с применением удобрений – 18797,0...20695,5 руб./га и 146,7...148,2 %, при этом максимальная в опыте рентабельность отмечена при возделывании полевых культур с прямым посевом – 148,2 %, что на 1,5...16,6 % выше остальных вариантов.

На основании исследований предлагаются следующие технологические операции при выращивании полевых культур в региональных севооборотах в засушливой зоне Поволжья с использованием при прямом посеве зерновых агрегата АУП-18.05, подсолнечника – сеялки Kuhn:

дифференцированная обработка почвы в севообороте (в том числе рыхление на 25...27 см ПЧ-4,5 под подсолнечник и сою; под чистый пар – без осенней обработки; ячмень и яровая пшеница – прямой посев) для достижения наибольшей продуктивности и условного чистого дохода в севообороте;

прямой посев для наибольшей окупаемости затрат; внесение аммиачной селитры в дозе N_{40} (до посева яровой пшеницы и ячменя, весенняя подкормка озимой пшеницы);

основное внесение азофоски ($N_{15}P_{15}K_{15}$) при выращивании подсолнечника и сои;

в фазе кушения зерновых обработка посевов агрохимикатом Бионекс Кеми, биофунгицидом Фитоспорин;

в фазе трёх пар настоящих листьев подсолнечника обработка агрохимикатом Борогум;

в конце трубования зерновых обработка фунгицидом Солигор.

Литература.

1. О целесообразности освоения системы прямого посева на чернозёмах России / А. Л. Иванов, В. В. Кулинцев, В. К. Дридигер и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 4. С. 8–16. doi:10.24411/0235-2451-2021-10401.
2. Экономическая эффективность возделывания яровой пшеницы по технологиям прямого посева в условиях Среднего Поволжья / А. Л. Тойгильдин, М. И. Подсевалов, И. А. Тойгильдина и др. // *Нива Поволжья*. 2022. № 3 (63). С. 1006. doi: 10.36461/NP.2022.63.3.011.
3. *Agrotechnological Fundamentals of Direct Sowing of Grain Crops in Russia's Arid Conditions* / O. I. Goryanin, S. N. Zudilin, I. F. Medvedev, et al. // *Revista geintec-gestao inovacao e tecnologias*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 204–215. doi: 10.47059/revistageintec.v11i2.1654.
4. *Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains* / G. Singh, R. Bhattacharyya, T. K. Das, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2018. Vol. 184. P. 291–300. doi: 10.1016/j.still.2018.08.006.
5. *Rehabilitation of soil properties by using direct seeding technology* / V. K. Dridiger, A. L. Ivanov, V. P. Belobrov, et al. // *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 9. P. 1293–1301. doi: 10.1134/S1064229320090033.
6. *Skaalsveen K., Ingram J., Clarke L. E. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in northwestern Europe: a literature review* // *Soil & Tillage research*. 2019. Vol. 189. P. 98–109. doi: 10.1016/j.still.2019.01.004.
7. *Изменение физических свойств черноземов при прямом посеве* / В. П. Белобров, С. А. Юдин, Н. В. Ярославцева и др. // *Почвоведение*. 2020. № 7. С. 880–890. doi:10.31857/S0032180X20070023.
8. *Blanco-Canqui H., Ruis S. J. No-tillage and soil physical environment* // *Geoderma*. 2018. Vol. 326. P. 164–200. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.03.011.
9. *Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis* / Y Li, Z. Li, S. Cui, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194. P. 104–292. doi:10.1016/j.still.2019.06.009.
10. *Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 6 июля 2017 г. № 330 «Об утверждении коэффициентов перевода в зерновые единицы сельскохозяйственных культур»*. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71634802/> (дата обращения: 15.05.2023)
11. *Шафран С. А. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур. Сообщение 1. Азотные удобрения* // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 27–35. doi: 10.31857/S0002188121070097.
12. *Корчагин В. А., Горянин О. И., Новиков В. Г. Прямой посев яровой мягкой пшеницы в степных районах Среднего Поволжья* // *Достижения науки и техники АПК*. 2007. № 8. С. 17–19.
13. *Эффективность применения удобрений в засушливых условиях Поволжья* / О. И. Горянин, С. В. Обущенко, Б. Ж. Джангабаев и др. // *Земледелие*. 2020. № 8. С. 29–33. doi: 10.24411/0044-3913-2020-10806.

Поступила в редакцию 16.07.2023

После доработки 15.08.2023

Принята к публикации 12.09.2023

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ И БИОПРЕПАРАТОВ НА ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЕ*

А.А. Алферов¹, доктор биологических наук, С.Н. Никитин², доктор сельскохозяйственных наук, Л.С. Чернова¹, кандидат сельскохозяйственных наук, А.А. Завалин¹, академик РАН

¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а
E-mail: alferov72@yandex.ru

²Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Самарского научного центра РАН, 433315, Ульяновская обл., Ульяновский р-он, п. Тимирязевский, ул. Институтская, 19

Исследования проводили с целью изучения влияния новых биопрепаратов на основе ризосферных микроорганизмов на урожай и качество зерна яровой пшеницы. Работу выполняли в 2018–2020 гг. в Ульяновской области на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом в микрополе в опыте в сосудах без дна площадью 0,018 м². Схема опыта: P₄₅K₄₅ (контроль) – фон 1; фон 1 + штамм КЛ-10; фон 1 + штамм 17-1; фон 1 + Ризоагрин; N₄₅P₄₅K₄₅ – фон 2; фон 2 + штамм КЛ-10; фон 2 + штамм 17-1; фон 2 + Ризоагрин; N₉₀P₄₅K₄₅. Предпосевная инокуляция семян яровой пшеницы новыми биопрепаратами на основе штаммов ассоциативных ризобактерий увеличивает массу зерна на 19...22 %. Прибавки от используемого в качестве стандарта биопрепарата Ризоагрин на РК-фоне составили 66 г/м² (+13 % к контролю), от штамма КЛ-10–98 г/м² (+19 %), от штамма 17-1 – 113 г/м² (+22 %). На NPK-фоне наибольшей эффективностью обладал биопрепарат на основе штамма 17-1 – 80 г/м² (+15 %). Максимальная в опыте урожайность отмечена от N₉₀– 789 г/м² (+ 51 %), от N₄₅– 647 г/м² (+ 24 %), что сравнимо с применением штамма 17-1 (636 г/м²). Сбор сырого белка возрастал от внесения N₉₀ на 80 % вследствие улучшения азотного питания растений яровой пшеницы, от применения биопрепаратов или N₄₅ – на 25...32 %. Использование азотного удобрения и биопрепаратов положительно повлияло на накопление в зерне потребленного азота, увеличивая азотный индекс (долю накопленного в зерне азота от общего его накопления в урожае) с 64 % до 71 %, повышая окупаемость азота аммиачной селитры прибавкой урожая зерна на 52...67 %.

EFFICIENCY OF APPLICATION OF NITROGEN FERTILIZERS AND BIOLOGICAL PRODUCTS ON SPRING WHEAT

A.A. Alferov¹, S.N. Nikitin², L.S. Chernova¹, A.A. Zavalin¹

¹Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, 127434, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 a
E-mail: alferov72@yandex.ru

²Ulyanovsk Research Agricultural Institute, branch of Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 433315, Ul'yankovskaya obl., Ul'yankovskii r-n, pos. Timiryazevskoe, ul. Institutskaya, 19

The research was carried out in order to study the new biologics' effect based on rhizosphere microorganisms on the yield and the spring wheat grain's quality. The work was carried out in 2018–2020 in the Ulyanovsk region on leached heavy loam chernozem in a microfield experiment in vessels without a bottom with an area of 0.018 m². The experiment's scheme: Background 1: P₄₅K₄₅ (control); Background 1+ Strain KL-10; Background 1+ Strain 17-1; Background 1+ Rhyzoagrין; Background 2: N₄₅P₄₅K₄₅; Background 2+ Strain KL-10; Background 2+ Strain 17-1; Background 2+ Rhyzoagrין; N₉₀P₄₅K₄₅. It was discovered that pre-sowing inoculation of spring wheat seeds with new biological preparations based on associative rhizobacteria's strains increases grain weight by 19...22 %. The increases from the Rhyzoagrין biologics' using on P₄₅K₄₅ as a standard averaged 66 g/m² (+13 % to Background 1), from strain KL-10–98 g/m² (+19 %), strain 17-1 – 113 g/m² (+22 %). Based on NPK-one of the most common in pollination, which contains a biological product based on nitric oxide 17-1 – 80 g / m² (+15 %). The maximum yield obtained from N₉₀–789 g/m² (+51 %), from N₄₅–647 g/m² (+ 24 %), that is comparable to 17-1 (636 g/m²). The raw protein's collection increased from the introduction of N₉₀ to 80 % as a result of exposure to nitrogen nutrition, crop production, from the biological products' usage or N₄₅ – by 25...32 %. The nitrogen fertilizers' using and biologics positively affected the accumulation of nitrogen consumed in the grain, increasing the nitrogen index (the share of nitrogen accumulated in the grain from its total accumulation in the crop) from 64 % to 71 %, increasing the ammonium nitrate nitrogen's payback with the grain harvest's growth by 52 ...67 %.

Ключевые слова: яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), биопрепараты, азотные удобрения, сырой белок, масса зерна.

Key words: spring wheat (*Triticum aestivum* L.), biopreparations, nitrogen fertilizers, raw protein, grain weight

Урожайность сельскохозяйственных культур – интегральный показатель, лимитируемый многими факторами, среди которых важное значение отводится обеспеченности растений азотом [1, 2, 3]. На протяжении последних 30 лет в России применение в сельском хозяйстве мине-

ральных и органических удобрений не позволяет обеспечить оптимальный баланс азота [4, 5]. Ежегодное отрицательное сальдо баланса азота составляет 34...50 кг/га [6]. Это не позволяет существенно повышать продуктивность сельскохозяйственных растений и отрицательно сказыва-

*работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-016-00200.

ется на их устойчивости к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды. Как следствие возрастает вариативность размеров урожая по годам. К этому необходимо добавить, что он формируется преимущественно благодаря естественному плодородию (2/3 необходимого азота растения получают из азотного пула почвы, создаваемого и поддерживаемого деятельностью разных групп диазотрофов) и при недостатке применения удобрений влечет за собой угрозу усиления деградиционных процессов почв сельскохозяйственных угодий.

Одним из технологических приемов, направленных на решение перечисленных проблем, может стать применение биопрепаратов, созданных на основе ризобактерий, стимулирующих рост сельскохозяйственных культур (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria – PGPR-бактерий) [7] благодаря образованию биологически активных веществ, способности к азотфиксации, улучшению водного и минерального питания растений, предотвращению или уменьшению роста фитопатогенов [8, 9, 10]. В этой связи создание новых штаммов PGPR-бактерий и потребность в изучении их взаимодействия с растениями, наряду с применением удобрений, представляют несомненный научный и практический интерес для разработки элементов современных агротехнологий в конкретных почвенно-климатических условиях и оптимизации агроэкосистем [11, 12, 13].

Цель исследования – научно обосновать эффективность использования новых биопрепаратов на основе ризосферных микроорганизмов в сочетании с применением минеральных удобрений на яровой пшенице.

Методика. Исследования проводили в Ульяновской области на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом со следующими агрохимическими показателями: pH_{KCl} – 6,7, сумма поглощенных оснований – 42,7 ммоль/100 г; содержание гумуса в пахотном слое (по Тюрину) – 6,62 %, общего азота – 0,21 %, подвижных P_2O_5 и K_2O (по Чирикову) – соответственно 226 и 127 мг/кг.

Схема опыта предусматривала следующие варианты: $P_{45}K_{45}$ (контроль) – фон 1; фон 1 + штамм КЛ-10; фон 1 + штамм 17-1; фон 1 + Ризоагрин; $N_{45}P_{45}K_{45}$ – фон 2; фон 2 + штамм КЛ-10; фон 2 + штамм 17-1; фон 2 + Ризоагрин; $N_{90}P_{45}K_{45}$.

Изучали биопрепараты, разработанные во ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии на основе штаммов ассоциативных ризобактерий КЛ-10 и 17-1. В качестве стандарта был выбран Ризоагрин – препарат, созданный на основе штамма ассоциативных азотфиксирующих бактерий. Более подробные характеристики биопрепаратов и методика проведения исследований были представлены ранее [14]. Семена яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Симбирцит инокулировали биопрепаратами ризосферных бактерий в день посева. Микрополевой опыт проводили в сосудах без дна площадью 0,018 м², что обусловлено использованием азотного удобрения, меченого стабильным изотопом ¹⁵N, что дает возможность определить вклад разных источников азота (удобрения, почвы, ассоциативного и «экстра»-азота) в формирование урожая яровой пшеницы. Исследования проводили в 2018–2020 гг.; повторность опыта – 6-кратная. Для лучшего восприятия соответствующие результаты опыта даны в пересчете на г/м². Минеральные удобрения вносили при набивке сосудов почвой. В качестве азотного удобрения применяли аммиачную селитру ¹⁵NH₄¹⁵NO₃ (Наа) с обогащением 54,04 ат. % в дозе 81 мг/сосуд и 162 мг/сосуд, что соответствует 45 и 90 кг N/га, суперфосфат двойной и хлористый калий – в дозах P_{45} и K_{45} в качестве фона. Агрономическую эффективность применения азотного удобрения рассчитывали по величине

прибавки урожайности, полученной от внесенной дозы N [15]. Коэффициент хозяйственной эффективности урожая (Кхоз) определяли, как долю основной продукции (зерно) в общебиологическом урожае (зерно + солома).

Статистический анализ экспериментальных данных проводили дисперсионным методом по модели двухфакторного полевого опыта с использованием программ Excel и Statistica. Достоверность различий оценивали по *F*-критерию Фишера.

Вегетационные периоды в годы исследований различались по метеорологическим условиям, что оказало влияние на эффективность удобрений и биопрепаратов на яровой пшенице. Отличительная особенность периода вегетации 2018 г. – неравномерное распределение атмосферных осадков по месяцам при повышенной температуре воздуха. ГТК за вегетационный период яровой пшеницы составил 0,5. Температура воздуха в мае–июне 2019 г. была на 1,6...3,9 °C выше среднепогодной, что в сочетании с низким количеством выпавших осадков (44 % от климатической нормы) приводило к ускорению прохождения фаз развития растений и не позволило им сформировать значительную биомассу. Погодные условия июля–августа 2019 г. находились на уровне климатической нормы. ГТК за период вегетации яровой пшеницы был равен 0,9. Агрометеорологические условия вегетационного периода 2020 г. сложились благоприятно, температура воздуха была близка к климатической норме при достаточном выпадении осадков (+12 % к среднепогодному значению).

Результаты и обсуждение. Различия в погодных условиях периодов вегетации яровой пшеницы способствовали варьированию (11...13 % от среднего значения за 3 года) массы зерна в варианте $P_{45}K_{45}$ по годам от 462,7 г/м² в 2018 г. и 514,8 г/м² в 2019 г., до 592,0 г/м² в 2020 г. Более низкая урожайность в 2018 и 2019 гг. обусловлена уменьшением числа зерен в колосе на 50...80 % и массы 1000 зерен на 10...14 %. В среднем за 3 года исследования масса зерна в варианте $P_{45}K_{45}$ составила 523,1 г/м² (табл. 1). Улучшение азотного питания растений яровой пшеницы при внесении аммиачной селитры в дозе N_{45} способствовало ее увеличению на 24 %, а при дозе N_{90} – на 51 %. Инокуляция посевного материала яровой пшеницы биопрепаратами содействовала росту зерновой продуктивности на фоне $P_{45}K_{45}$: в варианте с Ризоагрином – на 13 %, штаммом КЛ-10 – на 19 % и штаммом 17-1 – на 22 %. При внесении полного минерального удобрения в дозе $N_{45}P_{45}K_{45}$ масса зерна от инокуляции биопрепаратами увеличилась соответственно на 11 %, 13 % и 15 %. То есть, прибавка урожая зерна от их применения была меньше, чем от внесения азотного удобрения N_{45} , что вызвано низким содержанием в почве доступных для растений соединений азота [2, 3].

Одним из показателей, позволяющих оценить эффект применяемого агроприема, выступает коэффициент хозяйственной эффективности урожая ($K_{хоз}$). Повышение его величины рассматривается как результат улучшения реутилизации пластических веществ в колос, лучшей ассимиляции и продуктивности фотосинтеза [16]. В 2020 г. в условиях благоприятного температурного и водного режимов величина коэффициента хозяйственной эффективности урожая была наибольшей – 0,59...0,69. В 2018 и в 2019 г. из-за недостаточного количества осадков $K_{хоз}$ снизилось до 0,44...0,46. В среднем за три года внесение азотного удобрения в дозе N_{90} оказало наибольшее влияние на $K_{хоз}$. Благодаря повышению доли зерна в общебиологическом урожае при применении $N_{90}P_{45}K_{45}$ величина

Табл. 1. Эффективность применения удобрений и биопрепаратов на яровой пшенице (среднее за 2018–2020 гг.)

Вариант	Масса зерна, г/м ²	Прибавка к контролю, %	K _{хоз}	Содержание N, %		Содержание сырого белка в зерне, %	Сбор сырого белка, г/м ²	Азотный индекс, %	Окупаемость N прибавкой урожая, кг/кг
				зерно	солома				
P ₄₅ K ₄₅ (контроль) – фон 1	523,1	–	0,49	1,84	0,96	10,5	54,9	64	–
Фон 1 + Штамм КЛ-10	621,1	19	0,52	1,94	0,92	11,6	68,5	68	–
Фон 1 + Штамм 17-1	635,9	22	0,52	2,00	0,94	11,1	68,7	68	–
Фон 1 + Ризоагрин	589,4	13	0,51	2,04	0,96	11,4	72,5	67	–
N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ – фон 2	646,7	24	0,51	1,95	0,91	11,1	71,9	67	27,4
Фон 2 + Штамм КЛ-10	719,1	37	0,49	1,98	1,02	11,4	80,4	65	43,6
Фон 2 + Штамм 17-1	727,3	39	0,51	2,05	0,94	11,3	81,2	68	45,4
Фон 2 + Ризоагрин	705,6	35	0,51	2,00	0,91	11,7	85,0	68	40,5
N ₉₀ P ₄₅ K ₄₅	789,0	51	0,53	2,14	0,91	12,2	96,2	71	29,5
P ₄₅	2,63		3,31	2,53	3,91	–	–	–	–
HCP ₀₅ А – удобрение	25,9		0,02	0,05	0,03	–	–	–	–
HCP ₀₅ В – биопрепарат	18,3		0,02	0,06	0,04	–	–	–	–
HCP ₀₅ частных различий	31,7		0,03	0,08	0,05	0,4	5,9	–	–

на K_{хоз} составила 0,53, а при P₄₅K₄₅ – 0,49, что на 18 % больше. Существенных различий величины K_{хоз} при применении РК-удобрений (0,49) и N₄₅PK-удобрений (0,51) не установлено. При инокуляции семян яровой пшеницы биопрепаратами отмечена тенденция к росту K_{хоз} до 0,52.

Эффективность применения удобрений и биопрепаратов определяет комплекс факторов – тип и плодородие почвы, метеорологические условия, генотипические особенности возделываемой культуры, а также условия питания растений (по содержанию и накоплению азота в урожае) [3, 17]. В проведенном эксперименте на черноземе выщелоченном содержание азота в зерне яровой пшеницы на РК-фоне находилось на уровне 1,84 %. Применение N₄₅ способствовало росту величины этого показателя на 0,1 %, N₉₀ – на 0,3 %. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами на РК-фоне достоверно повышала содержание азота в зерне на 0,1...0,2 %. Концентрация азота в соломе яровой пшеницы в результате применения азотных удобрений снижалась из-за ростового разбавления, при инокуляции биопрепаратами – существенно не менялась, и только при использовании аммиачной селитры и штамма КЛ-10 – увеличилась на 0,11 %.

Содержание сырого белка в зерне зависит от условий возделывания и наследственности [2, 3, 17]. При недостатке влаги оно увеличивается, поэтому в засушливые 2018–2019 гг. величина этого показателя была выше среднееголетнего значения (10,5 %) и варьировала в пределах 11,0...13,3 %, а во влажном 2020 г. – меньше на 1,5...2,1 %. При внесении азотного удобрения в дозах N₄₅ и N₉₀ отмечена положительная тенденция. Инокуляция биопрепаратами на РК-фоне повысила содержание сырого белка в зерне яровой пшеницы на 0,6...1,1 %. При применении азотного удобрения и инокуляции семян рост величины этого показателя выявлен только от Ризоагрин (+0,6 %). Сбор сырого белка повышался как от биопрепаратов, так и от азотных удобрений. При внесении N₄₅ он вырос на 30 %, при N₉₀ – на 75 %, от биопрепаратов на РК-фоне – на 25...32 %, на NPK-фоне – на 12...18 %.

Применение азотного удобрения и биопрепаратов положительно повлияло на распределение азота по органам растений яровой пшеницы – доля азота зерна от общего его накопления биомассой (азотный индекс) увеличилась до 67...71 %. На РК-фоне без биопрепаратов в зерне накапливалось не больше 64 % от потребленного растениями азота.

Критерием целесообразности применения удобрений выступает их агрономическая эффективность. Применение биопрепаратов способствовало росту эффективности использования азота аммиачной селитры. Окупаемость 1 кг действующего вещества Naa повысилась при ино-

куляцией семян яровой пшеницы Ризоагрином на 52 %, штаммом КЛ-10 – на 63 %, штаммом 17-1 – на 67 %.

Вынос азота определяли биологические особенности культуры и условия питания (табл. 2). Он повышался от инокуляции семян биопрепаратами на РК-фоне на 20...30 %, на NPK-фоне – на 10...20 %. Применение N₄₅ способствовало увеличению выноса азота с урожаем зерна в среднем за три года на 31 %, а в дозе N₉₀ – на 76 %, с соломой – соответственно на 11 % и 25 %. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратом КЛ-10 оказывала такое же положительное влияние на накопление азота, как и N₄₅. От применения Ризоагрин и штамма 17-1 вынос азота с зерном увеличивался на 25 %, а с соломой – на 7...11 %. Использование азотного удобрения N₄₅ и биопрепаратов повышало вынос азота урожаем яровой пшеницы на 47...55 %, соломой – на 20...42 %.

Воздействия биопрепаратов на содержание фосфора и калия в зерне и соломе не установлено. Изменения концентрации фосфора от 1,02 до 1,12 % и калия от 0,41 до 0,44 % в зерне и 0,26...0,36 и 1,36...1,46 % в соломе соответственно не превышали точности измерений. При внесении N₉₀ уменьшение концентрации этих элементов питания до уровня фонового значения и ниже объясняется ростовым разбавлением.

Табл. 2. Вынос элементов питания яровой пшеницей с урожаем зерна и соломы (средний за 2018–2020 гг.)

Вариант	Вынос, г/м ²					
	зерно			солома		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
P ₄₅ K ₄₅ (контроль) – фон 1	9,6	5,3	2,1	5,5	1,9	8,3
Фон 1 + Штамм КЛ-10	12,0	7,0	2,7	5,7	1,6	8,4
Фон 1 + Штамм 17-1	12,7	6,7	2,8	6,1	2,0	8,9
Фон 1 + Ризоагрин	12,0	6,4	2,6	5,9	1,6	9,0
N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ – фон 2	12,6	6,6	2,7	6,1	2,1	9,6
Фон 2 + Штамм КЛ-10	14,2	7,8	3,2	7,8	2,1	12,2
Фон 2 + Штамм 17-1	14,9	7,7	3,2	7,1	2,6	11,1
Фон 2 + Ризоагрин	14,1	7,6	3,1	6,6	2,8	9,7
N ₉₀ P ₄₅ K ₄₅	16,9	8,0	3,5	6,9	2,1	10,3
HCP ₀₅	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2

При внесении азотного удобрения в дозе N₄₅ вследствие увеличения урожайности вынос фосфора и калия возрастал на 40 % и 30 %, в дозе N₉₀ – на 50 % и 70 % соответственно. Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами способствовала повышению выноса фосфора и калия – на 20...30 %.

Выводы. В микрополевом опыте, проведенном в Ульяновской области на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом, установлено, что инокуляция семян яровой пшеницы новыми биопрепаратами на основе штаммов ассоциативных ризобактерий КЛ-10 и 17-1 оказывает положительное влияние на урожайность и качество зерна яровой пшеницы, увеличивает окупаемость азотных удобрений прибавкой урожая.

Литература

1. Шафран С. А. Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур. Сообщение 1. Азотные удобрения // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 27–35.
2. Алферов А. А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы. М.: Изд-во РАН, 2020. 184 с.
3. Завалин А. А., Соколов О. А. Потoki азота в агроэкосистеме: от идей Д. Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
4. Сычев В. Г., Шафран С. А. О балансе питательных веществ в земледелии России // *Плодородие*. 2017. № 1. С. 1–4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-balanse-pitatelnykh-veschestv-v-zemledelii-rossii?ysclid=lmsxyako4w524272666> (дата обращения: 05.06.2023).
5. Кудеяров В. Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 3–15.
6. Кудеяров В. Н., Семенов В. М. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // *Агрохимия*. 2014. № 10. С. 3–17.
7. Моргун В. В., Коць С. Я., Кириченко Е. В. Ростстимулирующие ризобактерии и их практическое применение // *Физиология и биохимия культурных растений*. 2009. Т. 41. № 3. С. 187–207.
8. Стимулирующие рост растений бактерии в регулировании устойчивости растений к стрессовым факторам / И. В. Максимов, С. В. Веселова, Т. В. Нужная и др. // *Физиология растений*. 2015. Т. 62. № 6. С. 763–775.
9. Биопрепараты на основе бактерий рода *Bacillus* для управления здоровьем растений / М. В. Штерниис, А. А. Беляев, В. П. Цветкова и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 284 с.
10. Salantur A., Ozturk A., Akten S. Growth and yield response of spring wheat to inoculation with rhizobacteria // *Plant Soil and Environ*. 2006. Vol. 52. No. 3. P. 111–118. doi:10.17221/3354-PSE.
11. Бактерии родов *Advenella*, *Bacillus* и *Pseudomonas* – перспективная основа биопрепаратов для растениеводства / Л. Ю. Кузьмина, Т. Н. Архипова, Г. Э. Актуганов и др. // *Биомика*. 2018. Т. 10. № 1. С. 16–19.
12. Павлюшин В. А., Новикова И. И., Бойкова И. В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438.
13. Эндofитные бактерии – основа комплексных микробных препаратов для сельского и лесного хозяйства / В. К. Чеботарь, А. В. Щербаков, С. Н. Масленникова и др. // *Агрохимия*. 2016. № 11. С. 65–70.
14. Алферов А. А., Чернова Л. С. Влияние азотных удобрений и биопрепаратов на продуктивность и качество зерна яровой пшеницы // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 3. С. 32–35.
15. Семенов, В. М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // *Агрохимия*. 1999. № 5. С. 25–33.
16. Бесалиев И. Н., Панфилов А. Л. Соотношение органов яровой пшеницы // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021. № 3. С. 19–24.
17. Гамзиков Г. П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО; НовосибирскГАУ, 2013. 790 с.

Поступила в редакцию 04.07.2023

После доработки 10.08.2023

Принята к публикации 01.09.2023

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ ГУМАТО-САПРОПЕЛЕВОЙ СУСПЕНЗИИ НА РОСТ, РАЗВИТИЕ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ БАЗИЛИКА (*Ocimum basilicum* L.) В СРАВНЕНИИ С ХИМИЧЕСКИМИ УДОБРЕНИЯМИ*

С. И. Лоскутов¹, Я. В. Пухальский¹, кандидат сельскохозяйственных наук,
А. С. Митюков², доктор сельскохозяйственных наук, Н. И. Воробьев³, кандидат технических наук
Р. И. Глушаков^{4,5}, доктор медицинских наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук, 191014, Санкт-Петербург, Литейный просп., 55
E-mail: puhalskiyan@gmail.com

²Институт озероведения – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова,

³Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3

⁴Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова МО РФ, 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6

⁵Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2, лит. В.

Исследования проводили с целью изучения влияния растворов солей гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК), извлеченных из ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии на рост, развитие растений и содержание микроэлементов в надземной части сортов базилика, культивируемого на лекарственные цели в условиях полевой светокультуры при слабой питательной обеспеченности питательной среды. Использовали среднеспелый сорт Грин Лардж и раннеспелые сорта Эмили, Лемона и Мариан. Растения выращивали в закрытом груннике в течение 50 дней. Семена высевали в почвосмесь, состоящую (по 50 %) из вермикулита и торфянисто-глеевой почвы с содержанием органического вещества 30,4 %, $N_{\text{общ}}$ – 1,4 %, подвижных форм P_2O_5 – 88,0, K_2O – 82,0 мг/кг, $pH_{\text{КС}}$ – 5,57. Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: контроль, соли ГК и ФК. В контроле использовали 1,0 н. питательный раствор Кнопа, в вариантах с солями их растворы концентрацией 0,01 % путем разового внесения под корень и опрыскивания листьев раз в неделю. По результатам морфометрического и химического анализов лучшие результаты получены на сорте Лемона, обработанные растения которого при слабой питательной обеспеченности питательной среды не отличались по высоте и биомассе от контрольных (29,75 и 29,00 мг соответственно). Эффективность фотосинтеза у обработанных растений этого сорта также снизилась несущественно, величина показателя оптического счетчика хлорофилла SPAD была равна в среднем 31,98 отн. ед. против 35,54 ед. в контроле. Это указывает на наличие сортовой специфики в реакции растений на применение такого приема. Наименьшие различия между вариантами с ГК или ФК и контролем у сорта Лемона свидетельствуют о способности обеих фракций гумусовых кислот мобилизовать микроэлементы для набора биомассы растений и изменения ее биохимического состава.

INFLUENCE OF VARIOUS FRACTIONS OF ULTRAFINE HUMATO-SAPROEL SUSPENSION ON THE GROWTH, DEVELOPMENT AND QUALITY OF BASIL (*Ocimum basilicum* L.) PRODUCTS IN COMPARISON WITH CHEMICAL FERTILIZERS

S. I. Loskutov¹, J. V. Pukhalskiy¹, A. S. Mityukov², N. I. Vorobyov³, R. I. Glushakov^{4,5}

¹All-Russia Research Institute for Food Additives – a branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbatova», Russia Academy of Sciences, 191014, Sankt-Peterburg, Liteiny prosp., 55
E-mail: puhalskiyan@gmail.com

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology, 196105, Sankt-Peterburg, ul. Sevastyanova, 9

³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, 196608 Sankt-Peterburg – Pushkin, sh. Podbelskogo, 3

⁴S.M. Kirov Military Medical Academy,

194044, Sankt-Peterburg, ul. Akademika Lebedeva, 6

⁵Saint Petersburg state pediatric medical university, 194100, Sankt-Peterburg, ul. Litovskaya, 2, lit. V

The paper presents the results of a study of the effect of various fractions of humic acids (humic and fulvic acids), extracted from ultrafine humato-sapropel suspension, on the growth and development of various varieties of basil used for medicinal purposes. The plants were grown in a closed grow box for 50 days, while maintaining a stable internal microclimate and an optimal level of insolation for the culture inside the working area. Four varieties of commercial use were chosen as objects for the study: Green Large (mid-ripening), Emily (early-ripening), Lemona (early-ripening) and Marian (early-ripening). A soil mixture consisting of 50 % vermiculite and 50 % peaty-gley soil was used as a solid substrate for sowing seeds: the total organic content was 30.4 %; N_{total} – 1.4 %; $pH_{\text{КС}}$ – 5.57; mobile forms P_2O_5 – 8.8 and K_2O – 8.2 mg/kg. Both fractions of humic acids were added as dilute solutions at a concentration of 0.01 %. The treatment of plants was carried out by alternating two methods: a single application of each fraction separately according to the options under the root, and a foliar method, when spraying the leaves once a week. In the control variant, 1.0 N water was used for irrigation during the entire growing season. Knop nutrient solution without humic acid additives. The results of morphometric and chemical analyzes showed that the Lemon variety proved to be the best candidate for further scientific research. The treated plants did not differ in height and biomass from the controls (average 29.75 mg in treatment versus 29.00 mg in control). The best organization in the diet, based on the calculation of element structural coherence indices, also resulted in a slight decrease in the efficiency of photosynthesis in this variety, which is indirectly indicated by the values of the SPAD chlorophyll optic counter (31.98 units on average during processing, against 35.54 units on the control). It is concluded that due to the introduction of organic additives, the variety spends the least amount of energy for its growth, even in a substrate depleted in elements.

Ключевые слова: базилик (*Ocimum basilicum* L.), сапропель, гуминовые кислоты, фульвокислоты, микроэлементы, хлорофилл, светокультура, индексы фрактальной когерентности.

Key words: basil (*Ocimum basilicum* L.), sapropel, humic acids, fulvic acids, trace elements, chlorophyll, light culture, fractal coherence indices.

*работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы FGUS 2022-0017 и FGUS 2022-0018).

Базилек (*Ocimum basilicum* L.) – однолетнее растение из семейства Яснотковых (*Lamiaceae*), или Губоцветных (*Labiatae*), произрастающее в тропических районах юго-восточной Азии и Африки, и включающее около 30 видов, сильно различающихся по морфологическим и химическим признакам. Это важная пряная культура, которая в обязательном порядке должна присутствовать в рационе здорового человека. В состав его сухой биомассы входит 4830...28770 мг/кг калия, 4600...17460 мг/кг кальция, 359...1500 мг/кг фосфора, 561...1590 мг/кг натрия.

Помимо кулинарии, базилик издавна применяют в традиционной медицине [1, 2], где более необходимо понимание особенностей аккумуляции в его зеленой биомассе эссенциальных микроэлементов. Многие болезни людей и животных, ранее считавшиеся неизлечимыми, сейчас поддаются терапии путем оптимизации баланса этих микроэлементов в живом организме [3, 4]. При этом содержание таких микроэлементов, как железо (Fe), медь (Cu), цинк (Zn), бор (B), марганец (Mn), хром (Cr) и никель (Ni) необходимо поддерживать в минимальных концентрациях, иначе из полезных они становятся токсичными. Среди особо опасных выделяют такие микроэлементы, как кадмий (Cd) и свинец (Pb), которые также могут накапливаться в растениях, при выращивании на различных субстратах.

В результате генетической модификации (редактировании генома) культурных растений, направленной на улучшение их продуктивности, возможно увеличение производства продукции в ущерб ее качественному, в том числе химическому составу. Морфологические признаки, обуславливающие возможности коммерческого использования, не всегда могут служить надежным индикатором при отборе новых сортов базилика для фармацевтической промышленности. Поэтому важно оценивать взаимосвязи между выходом биомассы и её биохимическим составом. В погоне за прибылью производители часто используют высокие дозы минеральных удобрений [5].

В рамках экологического земледелия, для частичной замены химических веществ, рекомендуется использование органических соединений, например, гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК), как наиболее распространенных биологически активных компонентов природных экосистем. Действуя как специфические сенсibiliзирующие агенты, они снижают кислотность среды и, способствуя увеличению проницаемости плазматических мембран, улучшают хелатирование биофильных макро- и микроэлементов из субстрата [7, 8]. Фракция ФК отличается более высокой общей кислотностью, адсорбционной и катионообменной способностью, а также числом карбоксильных групп, чем ГК. Вследствие меньших молекулярных размеров и атомной массы (всего несколько сотен Дальтон, в сравнении с несколькими тысячами у ГК), они способны лучше проникать сквозь микропоры биологических клеточных мембран (плазмолеммы) в растения без вторичных посредников. Кроме стимуляции роста, ФК обладают высокой антиоксидантной активностью, что позволяет использовать их в качестве природных биологически активных добавок для защиты растений от различных абиотических стрессов. ГК выступают больше как активаторы и стабилизирующие компоненты, но также могут служить источником питательных элементов для растений. При грамотном подходе к использованию обе фракции гумусовых кислот могут стать источником элементов питания для растений вместо химических удобрений.

Выделяют такие кислоты из почв, торфов, ископаемых углей и древесины. При этом соли ГК и ФК, экстрагированные из сапропеля – донных отложений пресноводных водоемов, представляющих собой многокомпонентные полидисперсные системы из остатков планктонных и бентосных организмов, еще не получили широкого распространения.

Цель исследования – оценить влияние растворов солей ГК и ФК, извлеченных из ультрадисперсной гумато-сапропелевой суспензии, на изменение физиологического состояния, продукционного процесса, а также степень консолидации микроэлементов в надземной части растений сортов базилика, культивируемого в условиях полной светокультуры при слабой нутриентной обеспеченности питательной среды.

Методика. Объектами для исследования служили четыре сорта базилика: Грин Лардж (среднеспелый), Эмили (раннеспелый), Лемона (раннеспелый) и Мариан (раннеспелый).

Эксперимент проводили осенью 2022 г. на базе ВНИИ пищевых добавок – филиала Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова (г. Санкт-Петербург). Растения культивировали в закрытом грубоксе (1,5 м × 1,5 м × 1,5 м) при полной светокультуре в течение 50 дней. Температуру внутри рабочей зоны днем поддерживали на уровне 20 °С, ночью – 16 °С, относительную влажность воздуха –

Табл. 1. Состав различных фракций гумусовых кислот, выделенных из сапропеля

Наименование	Гуминовые кислоты	Фульвокислоты
Минеральный элемент, мг/кг		
Al	3,5	1,8
Ca	11,1	13,9
K	1,7	4,5
Mg	5,6	5,5
Na	15,5	6,2
Sr	0,2	не обнаружено
Mn	0,6	0,4
P	1,9	2,0
Si	0,5	0,5
B	не обнаружено	4,7
Zn	0,1	0,2
Cu	не обнаружено	0,1
Ba	0,1	0,1
Fe	7,4	7,8
Органическая кислота, мг/л		
Фумаровая	0,22	0,00
Уксусная	14,70	31,40
Щавелевая	0,84	0,00
Винная	0,30	0,00
Лимонная	1,12	0,00
Янтарная	2,22	0,20
Галловая	0,01	0,00
Яблочная	1,29	0,00
Адипиновая	0,06	0,00
Аминокислота, мкг/л		
Метонин	0,27	0,60
Валин	16,28	3,14
Гистидин	4,15	0,50
Глицин	0,42	1,00
Глутаминовая	10,39	4,82
Серин	7,27	18,54
Лейцин	9,67	0,52
Изолейцин	7,00	0,10
Аспарагин	4,27	0,27
Аланин	0,39	1,00
Триптофан	0,14	0,01
Треонин	7,00	0,44
Лизин	17,00	0,16
Аргинин	15,00	10,00
Тирозин	0,08	0,00
Пролин	0,32	0,10
Цистеин	0,09	0,01
Фенилаланин	0,21	0,01

Табл. 2. Влияние растворов гумусовых кислот, на показатели роста, продуктивности и фотосинтетической активности листьев растений базилика

Показатель	Контроль	ГК	ФК	Контроль	ГК	ФК	
		Грин Лардж			Эмили		
Сырая биомасса побега, мг	276,00±3,64	237,50±3,87	242,50±4,21	318,50±3,56	260,00±3,64	202,40±4,21	
Сухая биомасса побега, мг	59,00±0,70	42,50±0,65	44,00±0,22	69,60±0,60	45,00±0,32	40,40±0,53	
Длина побега, см	28,40±2,00	24,40±1,30	23,60±1,90	21,30±2,70	17,40±1,70	19,60±1,40	
Показания SPAD, ед	32,55±0,55	26,08±0,22	26,99±1,01	38,00±0,82	24,67±0,62	28,54±0,55	
		Лемона			Мариан		
Сырая биомасса побега, мг	106,75±3,66	110,00±2,92	104,75±4,16	311,00±2,85	242,50±4,24	260,00±3,64	
Сухая биомасса побега, мг	29,00±0,41	32,00±0,52	27,50±0,50	68,60±0,76	48,00±0,62	45,00±0,32	
Длина побега, см	31,30±0,50	30,50±1,00	28,40±1,20	35,60±1,10	26,80±1,10	28,00±1,30	
Показания SPAD, ед	35,54±0,26	30,86±0,24	33,09±0,21	35,20±0,22	33,24±0,24	24,65±0,55	

65...70 %. Режимы освещения для базилика подобраны на основании литературных источников [9, 10, 11] – 36800 Лк (551,7 ммоль/м²/с), 16ч/8ч (день/ночь). Источником освещения служила LED-панель белого света с возможностью диммирования Zeus Pro 600W (Lumatek, Великобритания) [12, 13, 14].

Схема эксперимента предусматривала изучение следующих вариантов: контроль, соли ГК и ФК. Повторность опыта четырехкратная. В контроле использовали 1,0 н. питательный раствор Кнопа, в вариантах с солями их растворы концентрации 0,01 % путем разового внесения под корень и опрыскивания листьев 1 раз в неделю.

Семена высаживали по 2 шт. в пластиковые сосуды, заполненные питательным субстратом, объемом 2 л с дренажными отверстиями в днище. В качестве субстрата со слабой нутриентной обеспеченностью использовали почвенную смесь, на 50 % состоящую из бедной торфянисто-глеевой маломощной почвы со средней степенью разложения верхового торфа 25 % и зольностью 11,5 % (среднее содержание органического вещества – 30,4 %; N_{общ} – 1,4 %; рН_{KCl} – 5,57; подвижные формы P₂O₅ (по Кирсанову) – 88,0, обменные K₂O (по Масловой) – 82,0 мг/кг). Вторая половина почвосмеси состояла из нейтрального вермикулита (фракция 2...4 мм). Почвогрунт с высоким содержанием торфа был выбран, исходя из рекомендаций по выращиванию базилика [15].

Исходную ультрадисперсную гумато-сапропелевую суспензию (УДГСС) с измельчением до размеров частиц 86...89 нм получали путем ультразвуковой кавитации сухой сапропелевой массы из озер Псковской области (д. Ермолино). Соли ГК получали путем дальнейшей щелочной экстракции суспензии водным раствором, содержащим гидроксид калия и пиррофосфат калия [16]. Затем 0,1 н. раствором серной кислоты производили осаждение ФК. Композиционный состав элементного пула и низкомолекулярных органических соединений в обеих фракциях (табл. 1) определяли методами масс-спектрометрии высокого разрешения (ICP-MS) и жидкостной хроматографии (HPLC) с использованием приборов AT 7500 (Agilent Technologies, США) и ACQUITY (Waters, США).

В течение всего эксперимента вели учет динамики роста побегов. По окончании опыта в зеленых листьях измеряли содержание хлорофилла с использованием портативного оптического датчика SPAD 502 Plus (Minolta Camera Co, Ltd, Япония). Затем зеленую биомассу срезази, взвешивали, сушили, измельчали до состояния порошка, снова взвешивали, и проводили мокрое озоление с использованием азотной кислоты, для последующего элементного анализа методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) на приборе 5900 (Agilent Technologies, США) [17].

Статистическую обработку данных осуществляли согласно общепринятым методикам [18, 19].

Динамику распределения параметров количественных переменных осуществляли с использованием критерия Шапиро-Уилка. Для оценки корреляционных расстояний и группировки данных между сорто-вариантами в опыте использовали кластерный анализ с построением тепловой карты.

Индексы биосистемной детерминированности микроэлементов (IndVcom) рассчитывали с использованием оригинальной авторской программы для ЭВМ (Свидетельство № 2022662510), основанной на методике фрактальной оценки триплетных рядов чисел, соотносящихся между собой по логарифмическому закону. Чем выше значения IndVcom, тем полноценнее и в полном объеме проходят процессы использования элементов в режиме питания растений.

Результаты и обсуждение. При слабом уровне питания у всех сортов, за исключением сорта Лемона, отмечали достоверное снижение биомассы сухого вещества в среднем на 33 %, по сравнению с контролем (табл. 2). Одновременно происходило уменьшение эффективности фотосинтеза, показатели счетчика хлорофилла демонстрировали сокращение фотохимических процессов в среднем на 6,80 отн. ед., или 19 %, по сравнению с контролем.

У сорта Лемона различий по биомассе, по сравнению с контролем, не наблюдали. В варианте с добавлением ГК она была даже немного (на 3,25 г) выше. Отмечены также минимальные в опыте различия между вариантами с ГК и ФК по фотосинтетической деятельности. Высота растений сорта Лемона, в вариантах с обработкой разными фракциями гумусовых кислот была меньше, чем в контроле, в среднем только на 6 %, тогда как у остальных сортов она снижалась на 8...25 % (рис. 1).

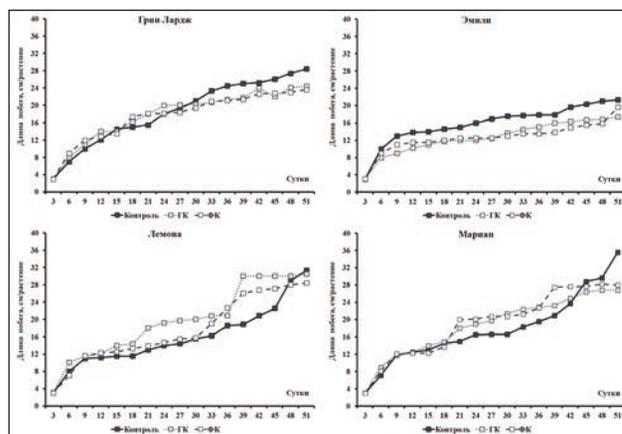


Рис. 1. Динамика роста растений сортов базилика в зависимости от обработки растворами гумусовых кислот.

Оценка результатов анализа выявила отсутствие значимых различий в суммарном накоплении элементов в надземной части между вариантами опыта (табл. 3).

Табл. 3. Элементный состав побегов базилика, в зависимости от обработки растворами гумусовых кислот, мг/кг

Микроэлемент	Контроль	ГК	ФК	Контроль	ГК	ФК	
		Грин Лардж			Эмили		
Fe	320,63±91,52	175,10±12,61	274,68±29,54	367,35±81,72	243,33±12,13	147,15±27,04	
Mn	170,85±23,84	162,10±36,15	73,53±4,52	86,68±3,34	92,15±6,60	128,88±15,02	
Cu	22,50±1,14	21,02±2,54	18,84±0,94	22,7±2,62	15,37±1,79	18,01±2,20	
Zn	58,71±4,34	52,71±4,97	49,24±1,99	56,27±8,60	36,13±1,80	123,85±8,85	
B	24,71±1,07	24,58±2,31	29,52±6,40	23,8±1,56	22,14±1,52	30,56±0,56	
Cd	0,24±0,04	0,17±0,02	0,35±0,03	0,17±0,03	0,16±0,02	0,21±0,03	
Co	3,39±0,60	2,52±0,54	2,15±0,08	2,10±0,09	2,15±0,12	2,8±0,21	
Cr	4,51±1,30	3,13±0,06	3,23±0,04	2,71±0,82	4,73±0,50	4,55±0,29	
Ni	7,36±3,59	2,50±0,58	1,61±0,07	2,41±0,33	2,71±0,19	3,44±0,25	
Pb	1,21±0,54	0,49±0,07	0,75±0,04	0,30±0,08	0,73±0,54	0,68±0,18	
Mo	6,08±1,72	4,18±1,42	6,12±1,10	7,38±1,05	7,65±1,04	7,49±1,06	
		Лемона			Марриан		
Fe	648,44±58,33	636,45±87,27	680,00±26,33	429,29±46,16	275,23±4,16	271,19±18,77	
Mn	99,00±10,85	113,55±4,93	87,63±3,40	105,86±11,54	58,76±16,74	74,07±14,58	
Cu	17,77±0,77	17,77±2,12	17,41±1,91	21,18±3,23	15,49±1,01	21,88±1,76	
Zn	56,12±5,45	71,06±0,83	54,68±2,29	81,86±4,86	47,71±4,05	65,71±13,60	
B	26,08±2,68	31,12±1,56	31,07±1,00	37,15±4,22	19,95±0,42	29,51±2,43	
Cd	0,21±0,05	0,26±0,07	0,24±0,01	0,15±0,03	0,23±0,06	0,22±0,02	
Co	2,13±0,27	2,43±0,11	2,58±0,09	2,01±0,24	1,74±0,17	2,45±0,15	
Cr	3,80±0,39	3,09±0,03	3,26±0,11	3,66±0,49	4,59±0,40	2,59±0,21	
Ni	1,97±0,42	2,50±0,19	2,68±0,16	3,00±0,70	1,59±0,08	2,49±0,16	
Pb	0,89±0,11	1,04±0,07	0,73±0,03	0,39±0,08	0,72±0,07	0,13±0,05	
Mo	3,94±1,30	3,30±0,84	4,20±0,66	2,43±0,21	2,85±0,77	3,03±0,30	

Обработка растений сорта Лемона растворами гумусовых кислот обеих фракций способствовала мобилизации и усилению транспорта питательных веществ из обедненного питательно субстрата, что выражается в примерно одинаковом содержании элементов в растениях контрольного и обработанных ГК и ФК вариантов. Вероятнее всего и сами кислоты выступали в качестве вспомогательного нутриентного источника для дополнительного поступления в надземную биомассу микроэлементов. Более эффективное поглощение питательных веществ растениями этого сорта при использовании ГК и ФК характеризует его как олиготрофа. По остальным сортам отмечали более низкую суммарную аккумуляцию микроэлементов в вариантах с обработкой растений растворами гумусовых кислот. Этим объясняется и более низкая их урожайность.

Отдельно следует выделить низкую концентрацию Fe в биомассе побегов (рис. 2). Железо вовлечено в образование антиоксидантных ферментов, участвующих в процессе дыхания, в частности каталазы и пероксидазы [20]. Кроме того, оно играет важную роль в синтезе и поддержании высокого уровня хлорофилла в листовом аппарате. Снижение его концентрации в хлоропластах сопряжено с уменьшением эффективности фотосинтеза у изученных сортов, на что косвенно указывают показания датчика SPAD.

Помимо Fe, в работе фотосинтетического аппарата принимает участие Mn. Он отвечает за образование порфириногена – пиррола, вовлечённого в дальнейшем в метаболизм предшественника хлорофилла – протопорфирина. Также он активирует такие ферменты как дегидрогеназа и карбоксилаза, играющие непосредственную роль в процессах предотвращения преждевременного разрушения зеленого пигмента на свету. Кроме того, Mn выступает важнейшим компонентом, участвующим в фотоокислении воды (реакция Хилла) [21]. Достоверное увеличение концентрации этого элемента отмечено при обработке ФК у сорта Эмили (в 1,5 раза) и при обработке ГК у сорта Лемона (в 1,2 раза), по отношению к контролю. В этих же вариантах у указанных сортов отмечено увеличение концентрации Zn (соответственно в 2,2 и 1,3 раза, по отношению к контролю), микроэлемент необходим для синтеза аминокислоты триптофана, которая затем превращается в фитогормон-ауксин, индуцирующий

рост растений. Похожие выводы были сформулированы в других работах [22, 23].

Из прочих особенностей, можно отметить, что у сорта Грин Лардж обработка гуминовыми кислотами существенно понизила концентрацию Ni в побегах, по сравнению с контрольными растениями, что может иметь положительное значение в условиях загрязнения среды этим элементом.

Содержание тяжелых металлов Cd и Pb в зеленой массе растений не превышало норм, регламентированных Санитарными правилами и нормами (СанПин), а также Государственной фармакопеей Российской Федерации (ГФ РФ) XIV издания.

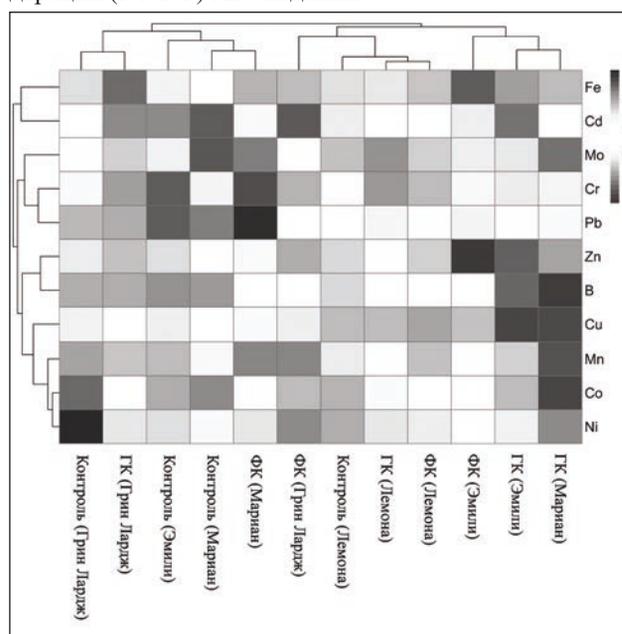


Рис. 2. Тепловая карта изменения уровня содержания микроэлементов в надземной части растений базилика под влиянием растворов фракций гумусовых кислот (темный цвет указывает на более высокую концентрацию каждого компонента).

У растений большинства сортов, обработанных растворами солей гумусовых кислот, отмечена тенденция

к повышению IndVcom в процессе питания (табл. 4), что свидетельствует о большей степени поступления и накопления биофильных элементов в надземной биомассе. Исключение составляет сорт Лемона, у которого величина этого показателя была практически одинаковой во всех вариантах.

Табл. 4. Показатель суммарного накопления (индекс биокомпозиции) микроэлементов в надземной биомассе растений сортов базилика при обработке гумусовыми кислотами

Сорт	Вариант	IndVcom
Грин Лардж	контроль	0,693
	ГК	0,732
	ФК	0,645
Эмили	контроль	0,658
	ГК	0,691
	ФК	0,776
Лемона	контроль	0,606
	ГК	0,608
	ФК	0,610
Мариан	контроль	0,665
	ГК	0,640
	ФК	0,685

Выводы. Использование различных фракций гумусовых кислот в условиях субстратов со слабой питательной обеспеченностью лучше всего проявилось на сорте базилика Лемона, что указывает на наличие сортовой специфики в реакции растений на применение такого приема. Наименьшие различия между вариантами с ГК или ФК и контролем у этого сорта свидетельствуют о способности обеих фракций гумусовых кислот мобилизовать микроэлементы для набора биомассы растений и изменения ее биохимического состава.

При выращивании базилика для последующей переработки на лекарственное сырье на бедных почвах оценку стимулирующего действия растворов солей ГК и ФК необходимо акцентировать на обогащении растений железом, марганцем и цинком.

Литература

1. *A Comprehensive review on chemical profile and pharmacological activities of Ocimum basilicum* / K. Dhama, K. Sharun, M. B. Gugjoo, et al. // *Food Reviews International*. 2021. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/87559129.2021.1900230?scroll=top&needAccess=true&role=tab> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.1080/87559129.2021.1900230.
2. *A comprehensive review on Ocimum basilicum* / B. Purushothaman, R. Prasanna Srinivasan, P. Suganthi, et al. // *Journal of Natural Remedies*. 2018. Vol. 18. No. 3. P. 71–85. doi: 10.18311/jnr/2018/21324.
3. *The potential effects of Ocimum basilicum on health: a review of pharmacological and toxicological studies* / P. Sestili, T. Ismail, C. Calabrini, et al. // *Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology*. 2018. Vol. 14. No. 7. P. 679–692. doi: 10.1080/17425255.2018.1484450.
4. *Shahrajabian M. H., Sun W., Cheng Q. Chemical components and pharmacological benefits of Basil (Ocimum Basilicum): a review* // *International Journal of Food Properties*. 2020. Vol. 23. No. 1. P. 1961–1970. doi: 10.1080/10942912.2020.1828456.
5. *Thakur A., Rawat A. K. Thakur T. Economic analysis of plant nutrient sources on sweet basil (Ocimum basilicum)* // *Economic affairs*. 2014. Vol. 59. Special Issue. P. 837–841.
6. *Sweet basil can be grown hydroponically at low phosphorus and high sodium chloride concentration: Effect on plant and nutrient solution management* / R. P. Germano,

7. *S. Melito, S. Cacini, et al. // Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 304. No. 15. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423822004459?via%3Dihub> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.1016/j.scienta.2022.111324.
7. *Physiological effects of humic substances on higher plants* / S. Nardi, D. Pizzeghello, A. Muscolo, et al. // *Soil Biology and Biochemistry*. 2002. Vol. 34. No. 11. P. 1527–1536. doi: 10.1016/s0038-0717(02)00174-8.
8. *El-Ziat R. A., Swaefy H. M., Esmail S. E. A. The response of red rubin basil plant to organic fertilizer and humic acid versus chemical fertilizers* // *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 740–751.
9. *Стеценко Л. А., Пашковский П. П. Изменение содержания пигментов в базилике при освещении растений светодиодными лампами* // *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2018. Т. 21. № 12. С. 50–53.
10. *Response of basil growth and morphology to light intensity and spectrum in a vertical farm* / D. H. Larsen, E. J. Woltering, C. C. S. Nicole, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2020. No. 11. doi: 10.3389/fpls.2020.597906.
11. *Effect of light intensity on the growth and antioxidant activity of sweet basil and lettuce* / R. Sutuliene, K. Laužikė, T. Pukas, et al. // *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 13. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/13/1709> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.3390/plants11131709.
12. *Growth and metabolism of basil grown in a new-concept microcosm under different lighting conditions* / L. d'Aquino, B. Lanza, E. Gambale, et al. // *Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 299. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423822001601> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.1016/j.scienta.2022.111035.
13. *Optimization of basil (Ocimum basilicum L.) production in LED light environments – a review* / L. Sipos, L. Balazs, G. Szekely, et al. // *Scientia Horticulturae*. 2021. № 289. P. 110486. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423821005938> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.1016/j.scienta.2021.110486.
14. *Growth and nutrient utilization in basil plant as affected by applied nutrient quantity in nutrient solution and light spectrum* / X. Ren, N. Lu, W. Xu, et al. // *Biology*. 2022. Vol. 11. No. 7. P. 991. URL: <https://www.mdpi.com/2079-7737/11/7/991> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.3390/biology11070991.
15. *Технологические приемы выращивания рассады зеленых овощных культур в условиях защищенного грунта* / И. Д. Еськов, Ю. К. Земскова, Е. В. Лялина и др. // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 10. С. 19–23.
16. *Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы. Справочник. Минералогические, органические и неорганические методы анализа. СПб.: Профессия, 2014. 800 с.*
17. *Validated fast procedure for trace element determination in basil powder* / M. E. Ghanjaoui, M. L. Cervera, M. E. Rhazi, et al. // *Food Chemistry*. 2011. Vol. 125. No. 4. P. 1309–1313. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.09.091.
18. *R Core Team. R. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2018. URL: https://www.R-project.org* (дата обращения: 01.08.2020).
19. *Weinberg S., Harel D., Abramowitz S. Statistics Using R: An Integrative Approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. 692 p. doi: 10.1017/9781108755351.*
20. *Бутюцкий Н. П. Микроэлементы высушенных растений. 2-е изд. СПб.: СПбГУ, 2020. 368 с.*
21. *Khater R. M., Abd-Allah W. H. A. Effect of some trace elements on growth, yield, and chemical constituents*

- of Ocimum basilicum plants // European Journal Of Development Research. 2017. Vol. 1. No. 67. P. 1–23. URL: https://ejdr.journals.ekb.eg/article_5842.html (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.21608/ejdr.2017.5842.*
22. Regina A., Glory J. R., Tulin A. B. Micronutrients biofortification (Zn, Fe, Cu, and Mn) improves the growth, yield, and chlorophyll contents of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) grown on a near neutral soil // *Science and Humanities Journal. 2021. Vol. 15. P. 70–86. doi: 10.47773/shj.1998.151.5.*
23. Production of basil (*Ocimum basilicum* L.) under different soilless cultures / E. S. Khater, A. Bahnasawy, W. Abass, et al. // *Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91986-7> (дата обращения: 05.12.2022). doi: 10.1038/s41598-021-91986-7.*

Поступила в редакцию 25.12.2022

После доработки 18.03.2023

Принята к публикации 13.06.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ «СОЛЕВОЙ КАЙМЫ» ПРИ КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ

Н. Н. Дубенок¹, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, **А. Е. Новиков**^{2,3}, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, **В. В. Алексеев**⁴, доктор технических наук, **С. А. Васильев**⁴, доктор технических наук, **В. П. Филиппов**⁴, кандидат физико-математических наук, **П. А. Михеев**¹, доктор технических наук

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49

²Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия,
400002, Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9

³Волгоградский государственный технический университет,
400005, Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28

⁴Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова,
428015, Чебоксары, Московский просп. 15

E-mail: vsa_21@mail.ru

Процесс фертигации, заключающийся в обеспечении растений минеральными веществами, содержащимися в поливной воде, широко распространен, несмотря на имеющийся ряд негативных эффектов. Подавляющее большинство исследований направлено на изучение пространственного распределения солей при поливах. В межполивные периоды и по окончании поливного сезона процессы миграции и концентрации солей в почве при снижении влажности (высыхании) практически не рассматриваются. Цель исследований – моделирование режимов высыхания светло- и темно серых лесных почв Чувашской Республики после фертигации. Работу выполняли с 2020 по 2023 гг. Поскольку состояние почвы до начала капельного орошения существенно влияет на процесс высыхания, в работе рассмотрены ситуации, позволяющие повлиять на него в плане снижения негативных эффектов. Моделирование перемещения почвенной влаги в процессе и после окончания капельного полива позволяет выявлять различные случаи образования солевой «каймы». Выявление возможных режимов позволяет, учитывая особенности начального распределения влаги, проводить предварительную подготовку почвы к фертигации. При высыхании соли в основном могут концентрироваться в областях с резким градиентом влажности, то есть на границах между сухой и увлажняющей почвой. Это связано с тем, что почвенная влага, из-за возникающего перепада давлений, попадает в область с уже повышенной концентрацией солей. Разработанная модель позволяет анализировать эффект образования солевой каймы по заданным начальным и граничным условиям в виде градиентов влажности, пористости, удельной поверхности почвы, интенсивности и продолжительности полива, концентрации солей.

SIMULATION OF THE MODES OF APPEARANCE OF «SALT FRAME» DURING DRIP IRRIGATION

N. N. Dubenok¹, **A. E. Novikov**^{2,3}, **V. V. Alekseev**⁴, **S. A. Vasiliev**⁴,
V. P. Filippov⁴, **P. A. Mikheev**¹

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
127550, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

²All-Russian Scientific Research Institute of Irrigated Agriculture,
400002, Volgograd, ul. Timiryazeva, 9

³Volgograd State Technical University,
400005, Volgograd, prosp. Lenina, 28

⁴Ulyanov Chuvash State University,
428015, Cheboksary, Moskovskii prosp., 15

E-mail: vsa_21@mail.ru

The process of fertigation, which consists in providing plants with minerals contained in irrigation water, is widespread, despite a number of negative effects. The overwhelming majority of studies are aimed at studying the spatial distribution of salts during irrigation, in the interirrigation periods and at the end of the irrigation season, the processes of migration and salt concentration in the soil with a decrease in moisture (drying) are practically not considered. The purpose of this work is to simulate the modes of drying of light and dark gray forest soils of the Chuvash Republic (Russia) after fertigation. The studies were carried out in the period from 2020 to 2023. Since the state of the soil before the start of drip irrigation significantly affects the drying process, the paper considers situations that allow it to be influenced in terms of reducing negative effects. Modeling the movement of soil moisture both during and after the end of drip irrigation makes it possible to identify both cases in which the formation of a salt «border» does not occur or the effect is least pronounced, and those in which the formation of areas with a high salt concentration takes place with high intensity. The identification of such regimes allows, taking into account the characteristics of the initial distribution of moisture, to carry out preliminary preparation of the soil for fertigation. The paper shows that during drying, salts can mainly concentrate in areas with a sharp moisture gradient, that is, at the boundaries between dry and moist soil. This is due to the fact that soil moisture, due to the resulting pressure drop, enters an area with an already increased salt concentration. The developed model makes it possible to analyze the effect of salt fringe formation according to given initial and boundary conditions in the form of moisture gradients, porosity, specific soil surface, irrigation intensity and duration, and salt concentration.

Ключевые слова: капельное орошение, фертигация, «солевая кайма», удельная поверхность почвы, объемная пористость почвы, основная гидрофизическая характеристика, функция влагопроводности, солеперенос

Key words: drip irrigation, fertigation, «salt fringe», specific surface area of the soil, bulk porosity of the soil, water retention curve, moisture conductivity, salt transfer

Одним из неоспоримых преимуществ капельного орошения выступает возможность обеспечения растений минеральными веществами с использованием поливной воды. Экономия, связанная с локализацией необходимых минеральных элементов в области корневой системы растения, делает этот процесс достаточно эффективным. В современной научной литературе имеется ряд разработок, позволяющих учесть пространственную неоднородность свойств почвы и организовать полив таким образом, чтобы свести к минимуму избыток или, наоборот, недостаток элементов питания в соответствии с биологическими особенностями растения [1, 2, 3]. В последние годы, практически все исследования направлены на изучение пространственного распределения солей при орошении [4, 5, 6]. Однако в реальных условиях нельзя ограничиваться изучением только процесса орошения [7], так как перераспределение влаги и солей продолжается и после окончания полива [8], а наиболее опасные для дальнейшего природопользования эффекты могут проявиться именно при высыхании почвы [9, 10].

Процесс высыхания почвы после удобрительного орошения практически не исследован в современной научной литературе. Наши наблюдения позволили обнаружить некоторые его особенности. По результатам экспериментов установлено, что соли преимущественно концентрируются на границе контура увлажнения – между сухой и увлажненной почвой. В их миграции основным влияющим фактором выступает пространственное распределение влаги в почве до начала полива. Орошение без учета этой особенности приводит к появлению так называемой «солевой каймы», которую можно увидеть даже невооруженным глазом при раскапывании почвы на экспериментальных участках.

Анализ научных работ свидетельствует о необходимости разработки адекватных численных методов моделирования миграции солей при высыхании почвы с образованием «солевой каймы» для прогнозирования мероприятий по рассолению и уменьшению неблагоприятных эффектов.

Цель исследований – моделирование режимов высыхания почвы после фертигации при различных начальных и граничных условиях для выявления случаев, при которых образование «солевой каймы» не происходит или эффект наименее выражен.

Методика. Известно, что в зависимости от степени увлажнения почвы, вода в ней проходит через ряд состояний, характеризующихся различными реологическими моделями. Для объяснения концентрации солей на границе контура увлажнения используем понятие прочно связанной воды. Она бывает химически связанной (входит в молекулы минералов в виде ионов), адсорбированной (молекулы ориентируются на поверхности почвенных частиц) и гигроскопической (поглощается из воздуха), и отличается от свободной воды диэлектрической проницаемостью, вязкостью, а также другими физическими свойствами, но главное, прочно связанная вода перестает растворять соли.

То есть, определив величины, соответствующие влажности, при которой вода переходит в прочно связанное состояние, можно проводить численное моделирование процесса образования «солевой каймы».

Минеральные вещества перемещаются в растворенном виде с поливной водой в соответствии с законами гидрофизики. Кривая водоудержания почвы (1) и функция влагопроводности показывают, как влага с растворенными питательными веществами будет перемещаться по почве под действием градиента давления [11]. В нашем случае при рассмотрении энергии

почвенной влаги будем учитывать ψ' – потенциал, обусловленный взаимодействием влаги с твердой фазой почвы, ψ'' – потенциал, обусловленный взаимодействием влаги с почвенным воздухом, ψ''' – потенциал, связанный с наличием осмотического давления из-за растворенных в воде минеральных элементов. Тогда зависимость потенциала влажности почвы ψ от объемной влажности w можно записать в следующем виде [12]:

$$\psi = \psi' + \psi'' + \psi''' = \frac{A\Omega_0^2}{\rho w^3} + \frac{\Omega_0 \sigma_{lg}}{\rho} D(w, P_0) + \frac{RT}{\rho} \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; σ_{lg} – коэффициент поверхностного натяжения (вода – воздух), Дж/м²; Ω_0 – объемная удельная поверхность, м²/м³; w – объемная влажность, м³/м³; A – постоянная, Дж; P_0 – пористость сухого образца, м³/м³; $D(w, P_0)$ – безразмерная функция, учитывающая гранулометрический состав почвы; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)); T – температура, К.

При низкой влажности почвенная влага представлена в виде тонких пленок (4...5 мономолекулярных слоев толщиной $\sim 10^{-9}$ м), а ее молекулы достаточно тесно и упорядоченно расположены на поверхности почвенных частиц. В силу своей строгой пространственной ориентации она не может растворять соли. При увеличении толщины пленки воды до влажности $h + \Delta h \sim 10^{-8}$ м появляется переходный слой Δh , растворимость которого увеличивается до нормального значения. Определить влажность w_0 , соответствующую слою h , можно различными способами. Один из них заключается в пропускании электрического тока через образец грунта до тех пор, пока сила тока не станет равной нулю, поскольку чистая вода выступает диэлектриком ($\epsilon = 81$).

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) – специфичная для каждого типа почвы (характеризует структуру порового пространства почвы, гранулометрический и минералогический состав) зависимость между давлением почвенной влаги и влажностью. Используя ОГХ также можно определить w_0 . Для этого необходимо составить и решить систему уравнений, одно из которых определяет кривую водоудержания почвы $p(w)$, а второе $p = 5,2 + 3w$ – характеризует максимальную адсорбционную способность [12]. Получаемые при этом решения для различных типов почв, например, Чувашской Республики [13, 14] заметно различаются (рис. 1). Кривая водоудержания ОГХ рассчитана и представлена в стандартной графической форме как зависимость давления от влажности (для давления p используется логарифмическая шкала pF).

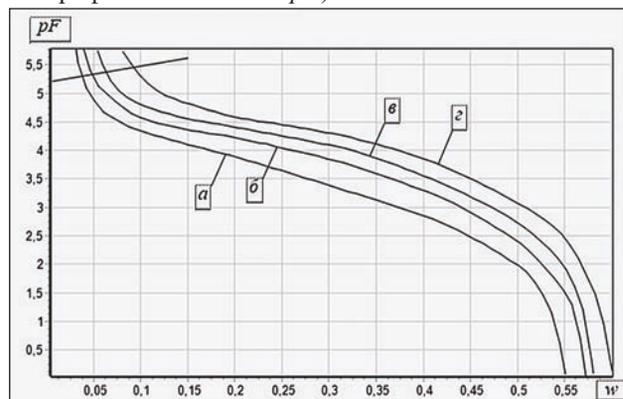


Рис. 1. Кривые ОГХ: а – дерново-подзолистая почва, б – светло-серая лесная почва, в – темно-серая лесная почва, г – чернозем выщелоченный; w – объемная влажность, м³ воды/м³ почвы; pF – всасывающее давление.

Если в почвенной влаге при объемной влажности w имеется некоторое количество соли, то по мере того, как влажность уменьшается до критического значения, часть соли начинает выпадать в осадок. Давление почвенной влаги при этом ослабевает, поскольку из-за снижения концентрации соли, уменьшается и величина компонента ψ''' в формуле (1) и процесс приостанавливается.

По мере дальнейшего высыхания объем влаги уменьшается на Δw , давление почвенной влаги вновь достигает критического уровня и процесс повторяется. Величина p возрастает с уменьшением содержания влаги (см. рис. 1). Это означает, что почвенная влага из соседних слоев будет еще сильнее притягиваться к рассматриваемому участку с повышенной концентрацией солей. С поступающей влагой переносится и растворенная соль, которая затем выпадает в осадок. В итоге ее общая масса возрастает, а скорость этого процесса постепенно снижается, что обусловлено падением как объемной влажности, так и влагопроводности почвы. Замедление поступления влаги с соседних участков почвы приводит к постепенной остановке рассмотренного процесса. Представленный подход позволяет провести численное моделирование перераспределения соли в почве по окончании полива и высыхания. При этом могут учитываться как начальные, так и граничные условия в виде профиля увлажнения по глубине, изменения пористости и удельной поверхности грунтов. Поскольку при моделировании процессов солепереноса используют достаточно производительные современные вычислительные машины, можно реализовать вычисления, задав малые интервалы времени между рассматриваемыми состояниями почвы. Такой подход позволяет отказаться от дифференциальных уравнений Ричардса и использовать метод конечных разностей без больших затрат времени [1, 11].

Равномерная сеточная функция, используемая в алгоритме при задании всех трех координат, имеет $N/N/N$ узлов, учитываемых в расчетах на каждой итерации (повторении расчетов для следующего временного интервала), где N – это количество точек расчета вдоль каждой координаты. При вычислениях применяется следующий алгоритм: в определенные узлы сетки, представляющие собой кубы с длиной ребер $\Delta x = 0,001$ м, подается определенное количество влаги в соответствии с заданными начальными условиями. После этого, согласно законам гидрофизики, пропорционально задаваемому итерацией интервалу времени, определяли перераспределение объемов жидкости между ячейками. Расчет объемов влаги, протекающей между соседними узлами в слоях, основывался на совместном учете величины давления почвенной влаги, полученной из основной гидрофизической характеристики почв и функции влагопроводности. Объемная влажность почвы w – это объем воды в единице объема почвенного пространства. С каждым циклом пересчета эта величина меняется на w^* . В первом приближении ее можно рассматривать как сумму объема уже находящейся в почве воды w_0 с концентрацией хлорида натрия C_0 и объема влаги, поступающей извне w^* с другой концентрацией хлорида натрия C^* .

Для моделирования режимов возникновения «солевой каймы» использовали водный раствор хлорида натрия в дозировке 50 г на 1 л воды. Такой раствор обеспечивает увеличение плотности на 5 %, вязкости – на 2...4 %, осмотического давления – на 13...27 % (по мере высыхания), снижение коэффициента поверхностного натяжения на десятки процентов [15]. При этом все изменения показателей оперативно измеряли стандартными физическими методами и учитывали в основной гидрофизической характеристике и функции влагопроводности.

Табл. 1. Качественные показатели воды*

Наименование		Величина
Органолептические	мутность	ниже чувствительности метода
	цветность	1,82 град
Обобщенные	жесткость	5,7 град Ж
	общая минерализация	431 мг/дм ³
	окисляемость	0,11 мг/дм ³
Неорганические	нитриты	0,0063 мг/дм ³
	нитраты (по NO ₃)	3,02 мг/дм ³
	бор	0,19 мг/дм ³
	железо	0,03 мг/дм ³
	кадмий, свинец, медь, цинк	ниже чувствительности метода
	фториды	0,21 мг/дм ³
	хлороформ	0,0013 мг/дм ³

*по данным ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Чувашской Республике».

Подача воды (табл. 1) с растворенным хлоридом натрия с заданной интенсивностью (фактор, наряду с почвенными характеристиками, влияющий на форму контура увлажнения от параболоида до эллипсоида при капельном орошении) составляла 4 л/ч, время полива – 10 ч. За процессом высыхания наблюдали каждые 2 ч.

Потенциалы почвенной влаги, обусловленные капиллярным и пленочным давлением – ψ' и ψ'' , подходят для описания слабозасоленных почв с общим содержанием водорастворимых солей менее 0,4 %. Однако добавление в формулу (1) компонента ψ''' , обусловленного осмотическим давлением, позволяет устранить это ограничение. Рассмотренный подход позволяет моделировать процессы солепереноса для широкого ряда почв. В нашем исследовании результаты расчета продемонстрированы на примере темно-серых лесных почв (Чебоксарский район, Чувашия, табл. 2).

Табл. 2. Характеристика образцов почвы

Показатель	Величина
Плотность почвы, г/см ³	1,199±0,010
Влажность устойчивого завядания, см ³ воды/см ³ почвы	0,308±0,022
Наименьшая влагоемкость, см ³ воды/см ³ почвы	0,464±0,017
Полная влагоемкость, см ³ воды/см ³ почвы	0,548±0,004
Коэффициент фильтрации, мм/ч	2,773±0,119
Доступная влага, см ³ воды/см ³ почвы	0,156±0,005
Глина, %	52,350±3,255
Ил, %	42,867±3,321
Песок, %	4,783±1,133

Результаты и обсуждение. Пористость и удельная поверхность почвы до глубины 0,5 м изменялись соответственно с 0,63 до 0,52 м³/м³ и с 42 до 46 м²/г в зависимости от слоя. В естественном состоянии (без предварительного полива) профиль влажности обычно таков, что она увеличивается с глубиной. Такое монотонное изменение, без резких границ перехода к более сухим областям, формирует условия, при которых «солевая кайма» не образуется. При этом в горизонтальных направлениях можно найти границы областей переходов от влажной к пересушенной почве. В таких областях прогнозируемо можно ожидать появление «солевой каймы».

Рассмотрим движение поливной воды в радиальных направлениях вдоль поверхности почвы, покрытой коркой, под углом $\theta = (0...5)^\circ$ относительно горизонтальной плоскости (рис. 2). После завершения капельного полива распределение влаги происходит в поле сил тяжести и градиентов давления почвенной влаги. В ходе этого перераспределения образуются области с критическим значением влажности. Здесь происходит «выделение» соли из почвенной влаги, величина объ-

емной влажности при этом снижается, что приводит к уменьшению влагопроводности и увеличению потенциала почвенной влаги.

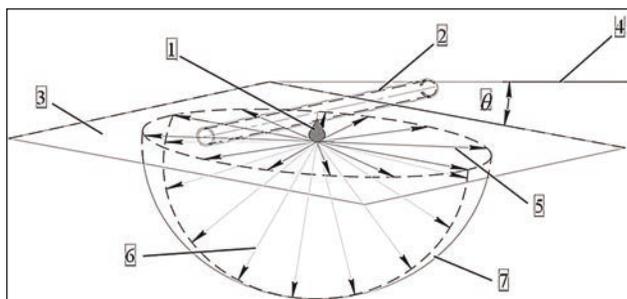


Рис. 2. Схема распределения поливной воды при капельном поливе: 1 – капля воды; 2 – трубка капельницы; 3 – поверхность почвы; 4 – горизонтальная плоскость; 5 – радиальные направления распространения влаги вдоль поверхности почвы; 6 – направления распространения влаги вглубь почвы; 7 – огибающий контур.

Смоделированный процесс солепереноса после капельного полива при $\theta = (0...5)^\circ$, когда формируются области с повышенной концентрацией соли (рис. 3), хорошо согласуется (значения коэффициентов детерминации 0,71...0,83) с ранее полученными результатами экспериментов по изучению влияния начального профиля влажности на объемное распределение солей при удобрительном орошении (фертигации) [11, 12] и на образование области с повышенной концентрацией соли на расстоянии 0,65...0,70 м от места каплевания (локальный участок почвы, соприкасающийся с каплей воды).

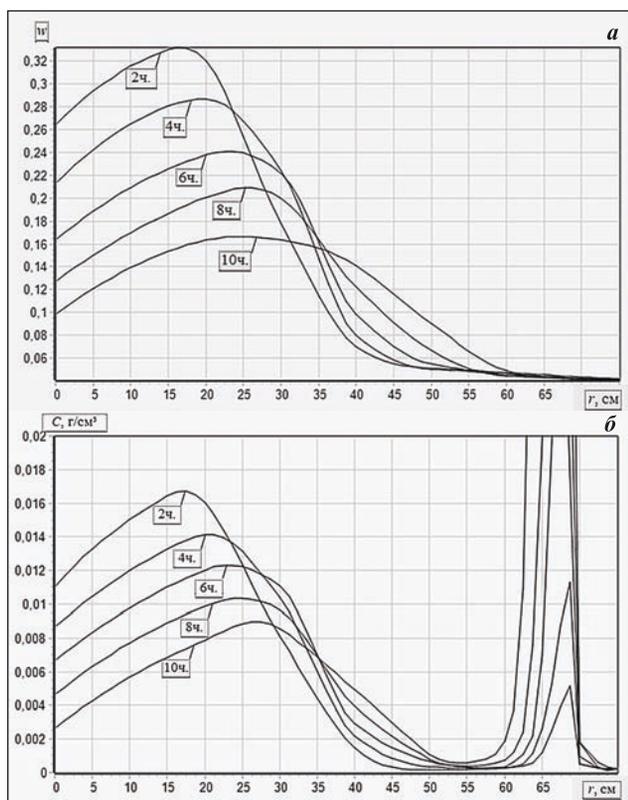


Рис. 3. Формирование «солевой каймы» после капельного полива при $\theta = (0...5)^\circ$: а – зависимость объемной влажности почвы от расстояния места каплевания; б – зависимость концентрации соли от расстояния места каплевания.

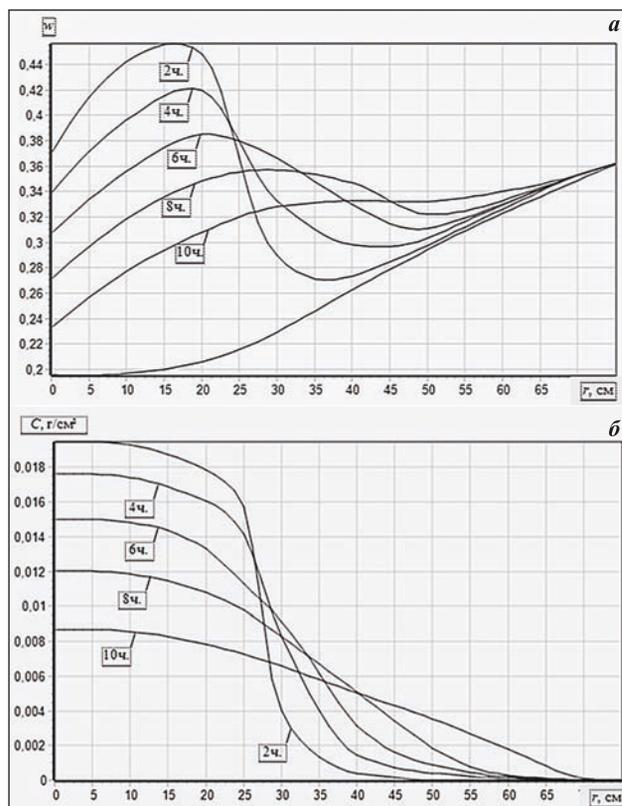


Рис. 4. Отсутствие формирования эффекта «солевой каймы» после капельного полива при $\theta = (10...90)^\circ$: а – зависимость объемной влажности почвы от расстояния места каплевания; б – зависимость концентрации соли от расстояния места каплевания.

Не меняя начальных условий (интенсивность подачи воды с растворенным хлоридом натрия 4 л/ч и временем полива 10 ч), смоделируем солеперенос при распределении воды в радиальных направлениях вдоль поверхности почвы под углом $\theta = (10...90)^\circ$ относительно горизонтальной плоскости (рис. 4). В связи с тем, что поливная вода попадала в изначально более влажную почву, перепады концентраций имеют меньшие градиенты и эффекта образования насыщенной солями области нет.

Выводы. Появление или отсутствие эффекта образования «солевой каймы» определяют условия высыхания почвы, зависящие от начального распределения в ней влаги. Особенности высыхания почвы после удобрительного полива таковы, что соли в основном концентрируются на границе между сухой и влажной почвой – на участке с наибольшим градиентом влажности. Процесс формирования области с повышенной концентрацией соли – «солевая кайма» – заключается в том, что почвенная влага, благодаря возникающему перепаду давления, закачивается в область с уже повышенной концентрацией солей.

Литература

1. Моделирование влияния удобрений на динамику контуров увлажнения при капельном орошении / И. А. Успенский, И. В. Фадеев, В. В. Алексеев и др. // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31. № 1. С. 97–108. doi: 10.15507/2658-4123.031.202101.097-108.
2. Водно-физические свойства каштановых почв при разных способах обработки почвы / Н. Н. Дубенок, А. Е. Новиков, А. А. Поддубский и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия:

- Агрономия и животноводство*. 2023. Т. 18. № 1. С. 45–58.
3. Капиллярно-сорбционные эффекты в почве после чизелевания и внесения нетрадиционных удобрений-мелиорантов / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, В. Н. Штепа и др. // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2016. № 3 (43). С. 252–257.
 4. Юсупов М., Аминов С. М., Саидов У. М. Численное моделирование задачи солепереноса в почвогрунтах // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. 2020. № 1 (25). С. 85–93.
 5. Кравченко Е. И., Хитров Н. Б., Горохова И. Н. Распределение засоленных орошаемых почв в район Сарпинской ложбины Прикаспийский низменности // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*. 2021. Вып. 106. С. 5–48. doi: 10.19047/0136-1694-2021-106-5-48.
 6. Properties of sod-podzolic soil in European Russia with drip irrigation of the fruit nursery / N. N. Dubenok, A. V. Gemonov, A. V. Lebedev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 012108. URL: https://www.researchgate.net/publication/360034690_Properties_of_sod-podzolic_soil_in_European_Russia_with_drip_irrigation_of_the_fruit_nursery (дата обращения: 20.09.2023). doi: 10.1088/1755-1315/1010/1/012108.
 7. Кизяев Б. М., Максименко В. П., Губин В. К. Водосберегающие технологии промывки засоленных почв // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2016. № 4. С. 38–43.
 8. Попова В. П., Фоменко Т. Г., Макарова А. А. Оценка влияния капельного орошения минерализованными водами на изменение свойств чернозема обыкновенного и состояние насаждений яблони // *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021. № 67 (1). С. 226–241. doi: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-226-241.
 9. Цифровая фитоиндикация засоления почв в сухой степи (республика Калмыкия) / К. О. Прокопьева, М. В. Конюшкова, Н. М. Новикова и др. // *Аридные экосистемы*. 2021. Т. 27. № 2 (87). С. 68–81. doi: 10.24411/1993-3916-2021-10152.
 10. Кравченко Е. И., Хитров Н. Б., Горохова И. Н. Двумерное распределение засоления орошаемых почв рядом с оросительным каналом на участке «Червленое» Светлярской оросительной системы // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*. 2018. Вып. 94. С. 19–37. doi: 10.19047/0136-1694-2018-94-19-37.
 11. Влияние фертигации на засоление почвы / Б. Г. Зиганишин, И. Г. Галиев, Р. К. Хусаинов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 15. № 4 (60). С. 67–70.
 12. Modeling the transfer of potassium monophosphate with irrigation water in drip irrigation and sprinkling / V. Alekseev, R. Alexandrov, S. Vasiliev et al. // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science*. 2020. 05010. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2020/25/mateconf_icmtmte2020_0501.pdf (дата обращения: 20.09.2023). doi: 10.1051/mateconf/202032905010.

Поступила в редакцию 01.06.2023

После доработки 14.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Агрочоведение и агроэкология

УДК 631.452

DOI: 10.31857/S2500262723050101, EDN: PNNVIN

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ НА ПЛОДОРОДИЕ ОРОШАЕМОЙ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ ОМСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ**Ю. В. Аксенова¹**, кандидат биологических наук, **В. С. Бойко²**, доктор сельскохозяйственных наук
А. Ю. Тимохин², кандидат сельскохозяйственных наук¹Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина,
644008, Омск, Институтская пл., 1
E-mail: yuv.aksenova@omgau.org²Омский аграрный научный центр,
644012, Омск, просп. Королева, 26
E-mail: boiko@anc55.ru

Исследования проводили с целью установления влияния бобово-злаковых травосмесей на плодородие орошаемой лугово-черноземной почвы в зависимости от продолжительности их возделывания. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: травосмесь (фактор А) – коострец безостый + люцерна посевная 6 г.ж.; коострец безостый + козлятник восточный + свербига восточная 12 г.ж.; коострец безостый + козлятник восточный 21 г.ж.; минеральные удобрения (фактор В) – без удобрений, N₆₀P₆₀. Азотные удобрения вносили под каждый укос, фосфорные – в запас. Количество агрономически ценных агрегатов и их устойчивость к размывающему действию воды в слое 0...20 см возрастало с 48 % под травосмесью 6 г.ж. до 69 и 79 % под травосмесями 12 и 21 г.ж. При внесении удобрений доля агрономически ценных агрегатов под травостоем 12 и 21 г.ж. снижалась на 7...9 %, по отношению к вариантам без удобрений. Содержание гумуса под травами в слое 0...20 см достигало 6,7...7,1 % в удобренных вариантах и 7,5...7,8 % без их использования. В составе гумуса доля углерода гуминовых кислот составляла 1,9...2,4 и 2,6...2,7 % соответственно, реакция среды – 5,8 и 6,8 ед. рН водной суспензии. В составе обменных катионов 70...87 % приходилось на кальций. В почве без удобрений содержание подвижного фосфора (по Чирикову) составляло 55...90 мг/кг, при внесении удобрений оно увеличилось в слоях 0...20 и 20...40 см на 68...95 и 40...70 мг/кг соответственно. Показатели химических и физико-химических свойств почвы достигали оптимальных параметров через 6 лет возделывания бобово-мятликовой травосмеси, поэтому увеличение срока их выращивания с этой целью (до 12 и 21 года) нецелесообразно.

INFLUENCE OF PERENNIAL GRASSES USAGE DURATION ON FERTILITY OF IRTYSK OMA MEADOW-BLACK EARTH SOIL**Yu. V. Aksenova¹, V. S. Boiko², A. Yu. Timokhin²**¹Omsk State Agrarian University,
644008, Omsk, Institutskaya pl., 1
E-mail: yuv.aksenova@omgau.org²Omsk agrarian scientific center,
644012, Omsk, prosp. Korolova, 26
E-mail: boiko@anc55.ru

Studies were carried out in order to establish the influence of legume-cereal grass mixtures on the fertility indicators of irrigated meadow-chnozem soil, depending on the duration of their cultivation in grain-grass crop rotation. Two factors were studied in the experiment: A – grass mixture: 1) awnless brome + alfalfa 6 years old, 2) awnless brome + eastern goat's rue + eastern goat's rue 12 years old, 3) awnless brome + eastern goat's rue 21 years old; B – mineral fertilizers: 1) without fertilizers. Nitrogen fertilizers were applied for each of the two mowings, and phosphorus fertilizers were applied as reserves. The dependence of the amount of agronomically valuable aggregates and their resistance to water erosion action on the age of legume-bluegrass grass mixtures was revealed. With an increase in the age of herbs, the number of these aggregates in the soil layer 0...20 cm increased from 48 % under the grass mixture of 6 years of life to 69 % under the grass mixture of 12 years, reaching 79 % under the grass mixture of 21 years of life. When introducing nitrogen-phosphorus fertilizers, a decrease in fractions of agronomically valuable aggregates under the grass stand of 12 and 21 years of life was established by 7...9 % in relation to options without fertilizers. With the increase in the age of grass stand, the content of humus and humic acids in its composition, exchange cations and the reaction of the medium did not change significantly, to a greater extent the changes are associated with the influence of mineral fertilizers. The amount of humus under the herbs in the soil layer 0...20 cm was high and reached 6.7...7.1 % in fertilized versions and 7.5...7.8 % in versions without fertilizers. In the composition of humus, the share of humic acid carbon accounted for from 1.9...2.4 to 2.6...2.7 %, respectively, options. The reaction of the medium in the test variants varied from 5.8 to 6.8 units of pH the aqueous suspension. In the composition of exchangeable cations, calcium accounted for 70 to 87 %. In the experimental variants without fertilizers, the content of mobile phosphorus (according to Chirikov) in the soil was 55...90 mg/kg; when applying fertilizers, its amount increased by 68...95 mg/kg in a layer of 0...20 cm and by 40...70 mg/kg in a layer of 20...40 cm. Indicators of the chemical and physicochemical properties of the soil reached optimal parameters after 6 years of cultivating the legume-poa grass mixture, so further use (12 and 21 years) of the soil under grass is not practical.

Ключевые слова: многолетние травы, органическое вещество, плодородие, агрегатный состав почвы, водоустойчивость агрегатов**Key words:** perennial grasses, organic matter, fertility, soil aggregate composition, water resistance of aggregates

Основные посевные площади в Омской области занимают зерновые культуры, выгодные с экономической точки зрения. Ежегодное их возделывание и преобладание в севооборотах приводит к постепенной утрате почвами плодородия [1, 2, 3].

Эффективное сохранение и воспроизводство плодородия пахотных почв в сочетании с выращиванием высококачественной сельскохозяйственной продукции возможно только в условиях интенсивного использования удобрений, мелиорантов, химических и биологических средств защиты растений от болезней и вредителей [4, 5, 6]. После резкого сокращения в 90-х гг. применения агрохимикатов большинство сельскохозяйственных товаропроизводителей осуществляло земледелие на фоне естественного почвенного плодородия или низких объемов применяемых средств химизации и органических удобрений. Это привело к уменьшению запасов элементов питания и гумуса, а также к снижению производительной способности почв в целом.

В современной экономической обстановке на фоне высокой стоимости минеральных удобрений и осложняющейся с каждым годом проблемы сохранения плодородия пахотных почв, одним из высокоэффективных приемов по повышению их устойчивости к антропогенным нагрузкам и воспроизводству естественного плодородия выступает введение в севообороты многолетних трав [7, 8, 9]. Хорошо развитая корневая система этих растений защищает верхний слой почвы от негативного воздействия воды и ветра, предотвращая его разрушение. Посевы бобово-мятликовых травсмесей многолетних трав имеют значительные преимущества, в сравнении с одновидовыми фитоценозами, оказывая не только комплексное воздействие на почвенное плодородие, но и повышая урожайность последующих культур и продуктивность севооборотов. Бобовые компоненты травсмеси способствуют накоплению азота [10, 11], а мятликовые – формируют и оставляют в почве большую массу пожнивных и корневых остатков, продукты разложения которых, положительно влияют на структурное состояние почвы, баланс углерода и элементов минерального питания [10, 12]. Эффективная защита пахотных почв от негативного воздействия природных и антропогенных факторов возможна только при сбалансированном соотношении многолетних трав в структуре посевных площадей.

Цель исследования – установить влияние многолетних трав на показатели плодородия орошаемой почвы в зависимости от продолжительности их возделывания в выводных полях зернотравяного севооборота.

Методика. Работу выполняли в 2016–2020 гг. в многолетних полевых опытах ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», заложенных в 1977–1978 гг. Объект исследования – лугово-черноземная среднелесная среднегумусная тяжелосуглинистая почва, орошаемая с 1977 года водами реки Омь. Средняя поливная норма составляла 300 м³/га, на многолетних травах – 450 м³/га. В зависимости от гидротермических условий в период вегетации проводили от 3 до 5 поливов.

Исследования выполняли в выводных полях многолетних трав зернотравяного севооборота. Почвенные пробы отбирали из слоев 0...20 и 20...40 см в пятикратной пространственной повторности. В опыте изучали два фактора: травосмесь (фактор А) – коострец безостый + люцерна посевная 6 года жизни (г.ж.), коострец безостый + козлятник восточный + свербига восточная 12 г.ж., коострец безостый + козлятник восточный 21 г.ж.; минеральные удобрения (фактор В) – без удобрений, N₆₀P₆₀.

Посев травосмеси коостреца и люцерны проводили под широкорядный покров горохоовсяной смеси, коостреца и козлятника, а также коостреца с козлятником и свербигой – беспокровно. Азотные удобрения (аммиачная селитра) вносили локально сеялкой СЗП-3,6 в дозе 60 кг д.в. на 1 га под каждый из двух укосов многолетних трав, фосфорные (аммофос) – в запас до посева трав в дозе 250 кг д.в. в расчете на ежегодный вынос 50 кг д.в. на 1 га в первые пять лет использования травосмесей и последствие удобрений в дальнейшем.

Учет урожайности трав осуществляли два раза за вегетацию в фазе начала цветения бобового компонента вручную скашиванием с площадок 1 м² в каждом варианте опыта. Площадь делянки 360 м². Расположение делянок систематическое. Сплошную уборку травостоя проводили кормоуборочным комбайном.

Плодородие почвы оценивали по следующим показателям: содержание органического вещества (методом Тюрина И. В. в модификации Симакова В. Н.); фракционно-групповой состав гумуса (методом Пономаревой В. В. и Плотниковой Т. А.); содержание нитратного азота (по ГОСТ 26488-85), подвижного фосфора и калия (методом Чирикова, ГОСТ 26204-91); агрегатный состав и водоустойчивость агрегатов (методом Саввинова Н. И.); рН водной суспензии (потенциометрическим методом); содержание обменного кальция, магний (комплексометрическим методом) и натрия (пламенно-фотометрическим методом). Статистическую обработку полученных результатов проводили методом дисперсионного анализа.

Результаты и обсуждение. Значимость многолетних трав определяется не только их кормовой ценностью, но и способностью формировать большое количество растительной биомассы, участвующей в воспроизводстве почвенного плодородия. Урожайность зависела от состава травосмесей и уровня обеспеченности элементами минерального питания. В первый год жизни травосмесей на фоне азотно-фосфорных удобрений ее величина была выше, чем в неудобренных вариантах опыта, в среднем на 3,6...10,5 т/га (рис. 1).

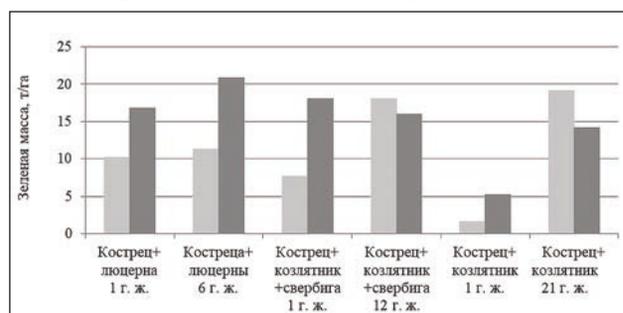


Рис. 1. Урожайность зеленой массы многолетних травосмесей разного возраста: ■ — без удобрений, ■ — N₆₀P₆₀

Низкая урожайность коостреца и козлятника 1 года жизни (г.ж.) связана с беспокровным посевом многолетних трав весной. Летом скашивали сорную растительность на высоком срезе (15...20 см), не затрагивая точку роста бобовой культуры. Осенью убирали сформированную в небольшом объеме надземную массу растений. Более высокая урожайность травосмеси коостреца с люцерной 1 г.ж. обусловлена зеленой массой покровной культуры (до 90 % в 1 укосе), в урожайности коостреца с козлятником и свербигой 1 г.ж. определенную долю вносили розеточные листья свербиги восточной. Снижение урожайности старовозрастных травостоев

12 и 21 г. ж. этих смесей в удобренных вариантах соответственно на 2,08 и 4,91 т/га, по сравнению с неудобренными, объясняется преобладанием в них мятликового компонента – костреца безостого, формирующего более «легкую» зеленую массу. В вариантах без удобрений преобладает бобовая культура – козлятник восточный, более толерантная к низкому содержанию подвижных форм фосфора, формирующая более плотную массу. Люцерно-кострецовая смесь 6 г. ж., как и в более молодом возрасте, в аналогичных условиях положительно реагировала на оптимизацию питания фосфором.

Накопление органического вещества зависит от объемов и качества поступающей в почву биомассы, скорости ее разложения и закрепления новообразованных гумусовых веществ минеральными компонентами. Максимальное его содержание отмечено в почвах целинных или залежных территорий, на которых биомасса не отчуждается, а в виде наземного и корневого опада поступает на поверхность почвы и в ее толщу.

Исследованиями, проведенными в Сибири, установлено, что в среднем за три года козлятник восточный накапливал до 4,82 т/га растительных остатков (сухое вещество), свербига восточная – 4,27 т/га, масса корневых остатков (сухое вещество) под этими культурами в слое 0...40 см достигала 14,78 и 14,15 т/га соответственно [13]. При возделывании люцерны на 4...6 годы ее использования в пахотном слое накапливалось до 11,6...13,7 т/га сухой массы корней и пожнивных остатков [14]. Поступая в почву, корневые и пожнивные остатки растений подвергаются биохимическим превращениям, обогащая ее гумусом.

Во всех вариантах опыта почва в слоях 0...20 и 20...40 см соответствовала сильногумусированной (градации пахотных почв РФ по степени гумусированности). Верхняя часть гумусового слоя (0...20 см) характеризовалась достоверно более высоким (на 0,40 % на неудобренных и до 0,60 % на удобренных фонах) содержанием гумуса (табл. 1), чем нижняя (20...40 см), так как на этой глубине сосредоточена основная масса корневых растений.

При характеристике состояния почв необходимо учитывать фракционно-групповой состав гумуса, в частности содержание подвижных гуминовых кислот (свободных и связанных с подвижными полуторными оксидами) и гуматов кальция (прочно связанных с каль-

цием). Первые участвуют в питании растений и структурообразовании, их накопление в почве зависит от уровня развития земледелия, севооборота, применяемых доз органических и минеральных удобрений. На фоне высокого содержания в почвенно-поглощающем комплексе катионов кальция происходит закрепление подвижных гуминовых кислот в виде гуматов кальция, что предохраняет их от деструкции и утилизации почвенной биотой, а также приводит к увеличению содержания гумуса и гуминовых кислот в почвах.

Во всех вариантах опыта в составе гумуса преобладали гуминовые кислоты, определяя его гуматный тип. В отношении свободных гуминовых кислот не было выявлено зависимости их накопления от состава травосмеси, года жизни и применения минеральных удобрений. Количество свободных гуминовых кислот в слоях 0...20 и 20...40 см почвы под травосмесями, возделываемыми без применения удобрений, составляло 0,42...0,66 %, в вариантах с их внесением – 0,36...0,69 %. Максимальное в опыте содержание гуминовых кислот, связанных с кальцием отмечено в вариантах опыта без удобрений. Под травосмесью костреца и козлятника 21 г. ж. величина этого показателя в слое 0...20 см достигала 1,68 %, в слое 20...40 см – 1,58 %, под травосмесью костреца, козлятника и свербиги 12 г. ж. – соответственно 1,53 и 1,32 %, под люцерной и кострецом – 1,51 и 1,63 %. При внесении азотно-фосфорных удобрений отмечено снижение фракции гуминовых кислот, связанных с кальцием в слое 0...20 см до 1,27...1,38 %, в слое 20...40 см – 1,25...1,39 %.

Процесс гумификации органических остатков протекал в благоприятных условиях: реакции среды близкой к нейтральной, на фоне очень высокого содержания щелочноземельных катионов – кальция и магния. Во всех вариантах опыта реакция среды в слоях почвы 0...20 и 20...40 см находилась в интервале 5,8...6,8 ед. рН. Некоторое подкисление почвенного раствора под травосмесями 12 и 21 г. ж. связано с накоплением фульвокислот и угольной кислоты, образующейся при выделении углекислого газа, как корневой системой многолетних трав, так и в процессе разложения органических остатков. Количество обменного кальция в гумусовом слое почвы (0...20 и 20...40 см) было очень высоким независимо от состава травосмеси и года ее жизни и варьировало от 23,8 до 29,8 смоль(+) кг⁻¹, обменного магния – от 6,2 до 8,2 смоль(+) кг⁻¹, натрия – от 0,5 до 1,8 смоль(+) кг⁻¹.

В качестве источника питания растения и микроорганизмы используют и фракцию фульвокислот, свободных и связанных с подвижными полуторными оксидами. Ее содержание под травосмесями костреца, козлятника и свербиги 12 г. ж., а также костреца и козлятника 21 г. ж. изменялось по слоям в интервале от 0,19 до 0,28 %, под люцерной и кострецом – достигала 0,27...0,37 %. Поскольку фульвокислоты растворимы в воде и легко мигрируют по почвенному профилю с поливными водами и атмосферными осадками, их содержание в большей степени зависело от количества влаги, поступившей в почву в год исследований, чем от возраста трав.

Во всех вариантах опыта содержание гумуса, гумусовых кислот и обменных катионов в слое почвы 20...40 см изменялось в более широком диапазоне, чем в слое 0...20 см. Это связано не только с размерами их образования и накопления под травами разного года жизни, но и с пространственным варьированием из-за языковатой границы перехода гумусового горизонта в нижележащий горизонт.

Табл. 1. Показатели гумусного состояния почвы под бобово-мятликовыми травосмесями разного возраста

Травосмесь (фактор А)	Минеральные удобрения (фактор В)	Слой, см	Гумус, %	C _{гк} * / C _{фк}		C _{гк} :C _{фк}
				% к массе почвы		
Кострец + люцерна 6 г. ж.	без удобрений	0...20	7,60	2,62	0,87	3,00
		20...40	7,20	2,65	0,84	3,20
		N ₆₀ P ₆₀	0...20	7,10	2,40	0,78
Кострец + козлятник + свербига 12 г. ж.	без удобрений	0...20	7,50	2,70	0,95	2,90
		20...40	7,10	2,66	0,82	3,10
		N ₆₀ P ₆₀	0...20	6,70	2,57	0,86
Кострец + козлятник 21 г. ж.	без удобрений	0...20	7,80	2,72	0,89	3,00
		20...40	7,40	2,58	0,77	3,50
		N ₆₀ P ₆₀	0...20	7,30	2,20	1,08
НСР ₀₅	А	0...20	7,00	2,23	0,79	3,00
		20...40	0,25	0,27	0,20	-
		20...40	0,23	0,34	0,21	-
	В	0...20	0,20	0,22	0,16	-
		20...40	0,18	0,28	0,17	-
		для частных различий	0...20	0,34	0,37	0,28
20...40	0,32	0,48	0,30	-		

* C_{гк} – углерод гуминовых кислот, C_{фк} – углерод фульвокислот.

За период вегетации многолетние мятликовые и бобовые травы наращивают мощную корневую систему, которая участвует в формировании почвенной структуры и ее водоустойчивости [16]. Стержневая корневая система бобовых трав (козлятник восточный, свербига восточная, люцерна посевная), глубоко проникая в подпахотные слои, разрыхляет ее и дренирует на большую глубину, что снижает плотность сложения почвы. Мочковатая корневая система (кострец безостый) пронизывает почвенную массу, крошит ее на более мелкие структурные отдельные – почвенные агрегаты и чем мощнее и разветвленнее корневая система, тем выше содержание структурных агрегатов [13].

В наших исследованиях отмечено увеличение доли агрегатов агрономически ценных фракций (10...0,25 мм) и снижение – глыбистых агрегатов (>10 мм) с возрастом травостоя. Максимальное в опыте содержание агрономически ценных фракций установлено под травосмесью козлятника и костреца 21 г. ж. (табл. 2). В варианте без внесения удобрений их доля в слое почвы 0...20 см достигала 79,2 % (НСР₀₅ 3,2), на глубине 20...40 см (НСР₀₅ 3,5) – 76,1 %, в варианте с внесением минеральных удобрений отмечено снижение агрономически ценных агрегатов до 71,7 (НСР₀₅ 3,8) и 71,2 (НСР₀₅ 3,7) % соответственно слоям. Количество глыбистой фракции (> 10 мм) не превышало 30 % и находилось на оптимальном уровне. Структурное состояние пахотного слоя почвы оценивалось как хорошее, коэффициент структурности изменялся от 2,5 до 3,8.

Хорошее структурное состояние почвы было отмечено и под травосмесью костреца, козлятника и свербиги 12 г. ж. Коэффициент структурности в пахотном слое был ниже (1,5...2,3), чем под травосмесью 21 г. ж. вследствие более высокого содержания глыбистых агрегатов (на 3...14 %) и пониженного количества (на 5...10 %) агрономически ценных фракций. При возделывании травосмеси без применения удобрений на долю последних приходилось до 69,1 % в слое 0...20 см и до 66,6 % в слое 20...40 см. В варианте с применением удобрений доля агрономически ценных агрегатов в слое 0...20 см снижалась до 60,1 %, а в слое 20...40 см оставалась на уровне 65,9 %.

Независимо от применения удобрений почва под травосмесью костреца и люцерны 6 г. ж. в слое 0...20 см имела удовлетворительное структурное состояние вследствие низкого количества агрономически ценных фракций, доля которых составляла 47,3...48,1 %, и высоко

кого содержания глыбистых агрегатов (37,5...39,6 %). В слое 20...40 см доля глыбистой фракции находилась на оптимальном уровне (19,0...23,9 %), а агрономически ценных агрегатов достигала 61,3...62,7 %, что обеспечило хорошее структурное состояние горизонта. Коэффициент структурности пахотного слоя был минимальным в опыте и составлял 0,9...1,7.

Соотношение глыбистой фракции и агрономически ценных агрегатов зависит от состояния почвы, при котором была проведена ее обработка сельскохозяйственной техникой. При крошении пласт подвергается разному рода деформациям, которые разрушают внутренние связи. Высококачественное крошение почвы и минимальное ее распыление происходит при содержании влаги от 40 до 50 % от полной влагоемкости, то есть в состоянии физической спелости [17].

Одним из основных критериев оценки структурных агрегатов служит их устойчивость к размывающему воздействию воды, которая зависит от качества материала, склеивающего механические частицы в агрегаты. Многолетние травы оказали положительное влияние на формирование устойчивости структурных агрегатов к разрушающему воздействию воды. Во всех вариантах опыта без применения удобрений в слое 0...20 см она была выше (на 7...34 %), чем в вариантах с их внесением независимо от времени взаимодействия с водой (рис. 2). Отличной водоустойчивостью характеризовались агрегаты почвы под травосмесями 6, 12 и 21 г. ж. как при кратковременном (10...60 мин.), так и при длительном (24 ч) взаимодействии с водой.

В вариантах с внесением азотно-фосфорных удобрений максимальной в опыте (отличной) водоустойчивостью обладали агрегаты почвы под травосмесью костреца и козлятника 21 г. ж., их количество при 24-часовом взаимодействии с водой снизилось на 38 % от исходного.

Агрегаты почвы под травосмесью костреца, козлятника и свербиги 12 г. ж. характеризовались отличной водоустойчивостью. Но при длительном взаимодействии с водой доля водоустойчивых агрегатов снизилась, по отношению к исходному уровню, на 43 % и качество агрегатов оценили как хорошее. Минимальной в опыте устойчивостью к размывающему действию воды обладали агрегаты почвы под травосмесью костреца и люцерны 6 г. ж. При увеличении времени воздействия водой она снижалась с хорошей до неудовлетворительной, а количество водоустойчивых агрегатов уменьшилось на 64 %.

Табл. 2. Агрегатный состав почвы под бобово-мятликовыми травосмесями разного возраста, %

Травосмесь (фактор А)	Минеральные удобрения (фактор В)	Слой, см	Размер фракций почвенных агрегатов, мм									
			> 10	7...10	5...7	3...5	2...3	1...2	0,5...1	0,25...0,5	< 0,25	
Кострец + люцерна 6 г. ж.	без удобрений	0...20	37,5	7,0	5,6	6,3	5,3	9,9	5,9	8,1	14,6	
		20...40	19,0	6,9	6,8	9,0	8,4	11,1	8,2	12,3	18,3	
	N ₆₀ P ₆₀	0...20	39,6	6,0	5,4	6,6	5,7	10,0	5,9	7,7	13,0	
		20...40	23,9	6,6	6,4	9,2	7,7	13,9	7,7	9,8	14,8	
Кострец + козлятник + свербига 12 г. ж.	без удобрений	0...20	15,8	8,7	12,2	15,1	8,8	12,8	3,5	8,0	15,1	
		20...40	17,6	8,1	10,7	13,4	7,7	14,1	4,1	8,4	15,8	
	N ₆₀ P ₆₀	0...20	25,7	8,8	9,7	10,9	7,0	12,5	3,9	7,3	14,1	
		20...40	15,6	7,1	8,3	11,3	8,7	16,4	3,7	9,3	18,4	
Кострец + козлятник 21 г. ж.	без удобрений	0...20	10,7	6,9	11,9	19,9	12,8	17,8	3,5	6,5	10,1	
		20...40	11,0	7,6	11,9	16,5	11,2	17,9	3,6	7,4	12,9	
	N ₆₀ P ₆₀	0...20	11,6	5,4	6,2	11,6	11,2	21,7	4,8	10,7	16,7	
		20...40	12,4	6,9	7,9	11,2	10,7	19,6	5,1	10,0	16,3	
НСР ₀₅	А	0...20	2,7	-	-	-	-	-	-	-	1,6	
		20...40	2,4	-	-	-	-	-	-	-	1,4	
		0...20	3,3	-	-	-	-	-	-	-	1,9	
		20...40	3,0	-	-	-	-	-	-	-	1,7	
для частных различий	В	0...20	4,6	-	-	-	-	-	-	-	2,7	
		20...40	4,2	-	-	-	-	-	-	-	2,4	

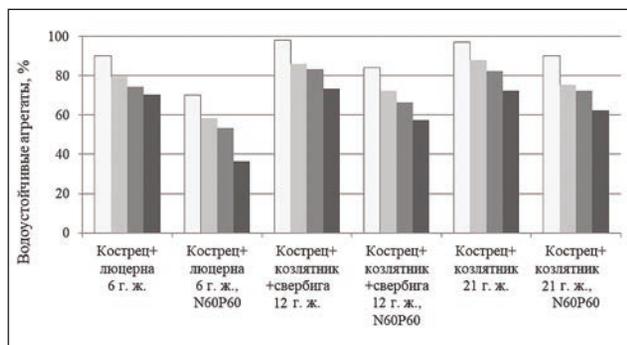


Рис. 2. Водоустойчивость агрегатов почвы в слое 0...20 см под травосмесями разного возраста:

■ — 10 мин., ■ — 30 мин., ■ — 60 мин., ■ — 24 ч.

Мощная хорошо развитая корневая система многолетних трав способна усваивать рассеянный в почвенной толще атмосферный азот, который передается от бобовых компонентов травосмесей к мятликовым [13, 15]. Имея мочковатую корневую систему с высокой катионообменной способностью, мятликовые травы лучше поглощают из почвы одновалентные катионы [18]. Бобовые травы имеют стержневую корневую систему, которая позволяет им извлекать фосфор, калий, кальций и влагу из труднорастворимых соединений подпахотных горизонтов, а также обогащать элементами питания верхние горизонты почвы [13, 15].

В наших исследованиях содержание в почве нитратного азота во всех вариантах опыта как в период отрастания трав (весной), так и после второго укоса (осенью) было низким и очень низким (табл. 3), что связано с невысокими дозами внесения азотных удобрений и интенсивным использованием этого элемента питания растениями.

Количество подвижного фосфора было дифференцировано по вариантам опыта. В неудобренных вариантах величина этого показателя в слоях 0...20

Табл. 3. Содержание подвижных форм элементов питания в почве под бобово-злаковыми травосмесями разного возраста (второй укос), мг/кг

Травосмесь (фактор А)	Минеральные удобрения, кг д. в./га (фактор В)	Возраст травосмеси, лет	Слой, см	Элемент питания		
				N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
Кострец + люцерна	без удобрений	1	0...20	6,0	75	250
			20...40	3,1	70	200
	N ₆₀ P ₆₀	6	0...20	3,4	60	259
			20...40	2,9	55	202
		1	0...20	8,8	200	250
			20...40	4,0	158	175
Кострец + козлятник + свербига	без удобрений	1	0...20	2,0	135	190
			20...40	2,0	95	184
	N ₆₀ P ₆₀	12	0...20	5,0	90	225
			20...40	4,4	75	200
		1	0...20	3,4	85	204
			20...40	0,4	73	202
Кострец + козлятник	без удобрений	1	0...20	3,0	200	200
			20...40	4,2	138	175
	N ₆₀ P ₆₀	12	0...20	1,0	185	142
			20...40	0,4	145	160
		21	0...20	0,2	90	250
			20...40	0,2	78	225
1	0...20	2,0	70	205		
	20...40	0,4	70	192		
	20...40	3,0	205	225		
	20...40	2,2	144	150		
21	0...20	1,9	158	292		
	20...40	0,4	145	139		

и 20...40 см находилось на стабильно среднем уровне (55...90 мг/кг почвы). На фоне применения фосфорных удобрений и их последствий содержание фосфора возросло до повышенного, высокого и очень высокого уровня (95...205 мг/кг). Во всех вариантах опыта количество подвижного калия находилось на высоком и очень высоком уровне. В удобренных вариантах под травосмесями 6 и 12 г. ж. отмечено снижение величины этого показателя на 58...70 мг/кг в слое почвы 0...20 см.

Выводы. Выявлена зависимость формирования агрономически ценных агрегатов и их устойчивости к размывающему действию воды от возраста бобово-мятликовых травосмесей. Под травосмесью 21 г. ж. оструктуренность пахотного слоя почвы была выше, чем под травосмесью 12 г. ж., на 10...12 %, а по сравнению с травосмесью 6 г. ж. на 13...31 %. Агрегаты обладали высокой устойчивостью к размывающему действию воды во всех вариантах опыта, но максимальной (97...98 %) она была для агрегатов под травосмесями 12 и 21 г. ж. При внесении азотно-фосфорных удобрений отмечено снижение фракций агрономически ценных агрегатов (на 2...9 % к неудобренным вариантам) и их водоустойчивости (на 7...34 % к неудобренным вариантам), но качественная и количественная зависимость показателей от возраста трав сохранялась. Химические и физико-химические свойства почвы с возрастом травосмесей существенно не изменились. Возделывание трав как в течение 6 лет, так и 12 и 21 года способствовало накоплению в почве гумуса в удобренных вариантах до 6,7...7,1 %, в вариантах без удобрений – до 7,5...7,8 %.

Под действием азотно-фосфорных удобрений количество подвижного фосфора в почве в слое 0...20 см увеличилось на 68...95 мг/кг, 20...40 см – на 40...70 мг/кг. Содержание нитратного азота оставалось стабильно очень низким и низким, а подвижного калия – уменьшилось в слое 0...20 см на 58...70 мг/кг. Для воспроизводства почвенного плодородия достаточно возделывать травосмеси в течение 6 лет, так как к этому сроку показатели химических и физико-химических свойств почвы достигали оптимальных параметров или приближались к ним, а с увеличением возраста травостоя до 12 и 21 года жизни существенно не менялись.

Литература

- Поляков Д. Г. *Обработка почвы и прямой посев: агрофизические свойства черноземов и урожайность полевых культур* // *Земледелие*. 2021. № 2. С. 37–43. doi: 10.24411/0044-3913-2021-10208.
- Урожайность озимой пшеницы и плодородие почвы в условиях Центрально-Чернозёмного региона / И. И. Гуреев, Л. Б. Нитченко, В. А. Лукьянов и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 5. С. 22–27.
- Перфильев Н. В., Вьюшина О. А. *Валовое содержание элементов питания в темно-серой лесной почве при различных системах основной обработки* // *Земледелие*. 2022. № 3. С. 23–27. doi: 10.24412/0044-3913-2022-3-23-27.
- Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility / A. Cai, M. Xu, B. Wang, et al. // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 189. P. 168–175..
- Микробиологический препарат для ускорения деградации соломы и повышения плодородия почвы / Е. В. Кузина, Г. Ф. Рафикина, С. Р. Мухаматдырова и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 9. С. 32–36.

6. Roba T. B. Review on: The effect of mixing organic and inorganic fertilizer on productivity and soil fertility // *Open Access Library Journal: electronic scientific journal*. 2018. No. 6. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=85548> (дата обращения: 13.09.2007).
7. Козлова Л. М., Свечников А. К. Влияние многолетнего использования кормовых бобово-злаковых травосмесей на урожайность культур в агрофитоценозах // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 3. С. 15–22.
8. Гусейнов А. А. Срок распапки пласта люцерны под озимую пшеницу в Западном Прикаспии // *Земледелие*. 2022. № 1. С. 26–29. doi: 10.24412/0044-3913-2022-1-26-29.
9. Несмеянова М. А., Дедов А. В., Коротких Е. В. Влияние комплекса приемов биологизации на основные свойства почвы и урожайность кукурузы // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 4. С. 72–76.
10. Alfalfa monocultures promote soil organic carbon accumulation to a greater extent than perennial grass monocultures or grass-alfalfa mixtures / Q. Li, D. Zhou, M. D. Denton, et al. // *Ecological Engineering*. 2019. Vol. 131. P. 53–62. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157765.
11. Combining perennial grass-legume forages and liquid dairy manure contributes to nitrogen accumulation in a clayey soil / E. D'Amours, M. H. Chantigny, A. Vanasse, et al. // *Canadian Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 101. No. 3. P. 378–388. doi:10.1139/CJSS-2020-0132.
12. Soil organic carbon and nitrogen status under fallow and cereal-legume species in a Tunisian semi-arid conditions / M. Mechri, S. B. Patil, W. Saidi, et al. // *European Journal of Earth and Environment: electronic scientific journal*. 2016. No. 1. URL: <https://www.idpublications.org/wp-content/uploads/2016/02/Full-Paper-SOIL-ORGANIC-CARBON-AND-NITROGEN-STATUS-UNDER-FALLOW.pdf> (дата обращения: 13.09.2007).
13. Фитомелиорация почв в органическом земледелии Предбайкалья: научно-практические рекомендации / Ш. К. Хуснидинов, Р. В. Замашников, Н. Н. Дмитриев и др. Молодежный: Иркутский ГАУ, 2021. 51 с.
14. Часовских В. П. Продуктивность люцерны и основные требования к водообеспеченности и минеральному питанию в лесостепной зоне алтайского края // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2012. № 6 (92). С. 32–35.
15. Турусов В. И., Пискарева Л. А., Бочарникова Е. Г. Влияние минеральных удобрений на микробиологическую активность почвы и урожайность озимой пшеницы // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2020. № 4 (36). С. 117–123. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11213.
16. The impact of growing legume plants under conditions of biologization and soil cultivation on chernozem fertility and productivity of rotation crops / A. Mukhametov, N. Bekhorashvili, A. Avdeenko, et al. // *Legume Research-An International Journal*. 2021. Vol. 44. No. 10. P. 1219–1225. doi: 10.18805/LR-573.
17. Бартенов И. М. Ударное разрушение и активный оборот почвенного пласта при вспашке // *Лесотехнический журнал*. 2013. № 1. С. 98–110.
18. Лазарев Н. Н., Кухаренкова О. В., Куренкова Е. М. Люцерна в системе устойчивого кормопроизводства // *Кормопроизводство*. 2019. № 4. С. 18–25.

Поступила в редакцию 15.07.2023

После доработки 21.08.2023

Принята к публикации 10.09.2023

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.3.082

DOI: 10.31857/S2500262723050113, EDN: PRDQCO

**СОПРЯЖЕННОСТЬ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПОЛЕЗНЫХ ПРИЗНАКОВ ТАБУННЫХ ЛОШАДЕЙ
(*Equus caballus*) ЗАБАЙКАЛЬСКОЙ ПОРОДЫ****Т. Н. Хамируев**, кандидат сельскохозяйственных наук, **С. М. Дашинимаев**, кандидат сельскохозяйственных наук, **Б. З. Базарон**, кандидат сельскохозяйственных наук*Научно-исследовательский институт ветеринарии Восточной Сибири –
филиал Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН,
672010, Забайкальский край, Чита, ул. Кирова, 49
E-mail: tnik0979@mail.ru*

Исследования проводили с целью изучения экстерьерно-конституциональных особенностей, фенотипической корреляции живой массы с промерами тела и индексами телосложения у табунных лошадей забайкальской породы, для повышения эффективности селекции. Работу проводили в условиях Забайкальского края. Материалом для исследований служили жеребцы-производители (n=7), кобылы (n=20) и жеребчики при рождении и в возрасте 6, 18 и 30 месяцев (n=48). Жеребцы-производители по живой массе превосходили стандарт породы на 27,2 %, кобылы – на 19,3 %. Высота в холке у жеребцов была выше, чем у стандарта породы, на 3,2 %, кобыл – на 2,5 %; косая длина туловища – соответственно на 2,2 и 2,4; обхват груди – на 8,7 и 4,6, обхват пясти – на 7,9 % и 8,9 %. Животные характеризуются выраженными мясными формами, при этом самцы отличаются более сбитым, широкотелым и растянутым телосложением крепкой конституции. Средняя масса тела жеребчиков до 30-месячного возраста увеличилась в 8,0 раз, высота в холке – на 47,1 %, косая длина туловища – в 2,1 раза, обхват груди – в 1,9 раза, обхват пясти – на 55,6 %. По индексам телосложения жеребцы и кобылы забайкальской породы характеризуются как животные с выраженными мясными формами и находятся ближе к тяжеловозным породам. У жеребцов-производителей отмечена положительная взаимосвязь живой массы с обхватом пясти (r=0,922) и обхватом груди (r=0,716). У кобыл наблюдали только низкие корреляции между изучаемыми признаками. У молодняка выявлена положительная разнотипная сопряженность живой массы со всеми основными промерами статей тела при рождении. При этом наиболее тесная связь отмечена с обхватом груди (r=0,719).

**ASSOCIATION OF ECONOMICLY USEFUL FEATURES OF HERD HORSES (*Equus caballus*)
OF THE TRANSBAIKAL BREED****T. N. Khamiruev, S. M. Dashinimaev, B. Z. Bazaron***Research Institute of Veterinary Science of Eastern Siberia –
branch Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
672010, Zabaikal'skii krai, Chita, ul. Kirova, 49
E-mail: tnik0979@mail.ru*

The studies were carried out to study the exterior-constitutional characteristics, phenotypic correlation of live weight with body measurements and body composition indices in herd horses of the Transbaikal breed, to increase the efficiency of selection. The work was carried out in the conditions of the Trans-Baikal Territory. The material for the research was stud stallions (n=7), mares (n=20) and foals at birth and at the age of 6, 18 and 30 months (n=48). Stallions exceeded the breed standard in live weight by 27.2 %, mares – by 19.3 %. The height at the withers of stallions was higher than that of the breed standard by 3.2 %, in mares by 2.5 %; oblique body length – 2.2 and 2.4, respectively; chest girth – by 8.7 and 4.6, pastern girth – by 7.9 % and 8.9 %. The animals are characterized by pronounced meat shapes, while mares are distinguished by a more knitted, wide-bodied and elongated physique of a strong constitution. The average body weight of stallions up to 30 months of age increased by 8.0 times, height at the withers – by 47.1 %, oblique body length – by 2.1 times, chest girth – by 1.9 times, pastern girth – by 55.6 %. According to body indexes, stallions and mares of the Transbaikal breed are characterized as animals with pronounced meat forms and are closer to heavy breeds. In stud stallions, there was a positive relationship between live weight and pastern girth (r=0.922) and chest girth (r=0.716). In mares, only low correlations between the studied traits were observed. In young animals, a positive correlation of varying degrees between live weight and all the main body measurements at birth was revealed. At the same time, the closest relationship was noted with chest circumference (r=0.719).

Ключевые слова: табунная лошадь (*Equus caballus*), забайкальская порода, живая масса, экстерьер, промер, индекс телосложения, корреляция

Key words: herd horse (*Equus caballus*), Transbaikal breed, live weight, exterior, measurement, body index, correlation

Табунное коневодство играет важную роль в сельском хозяйстве и считается наиболее древним способом выращивания лошадей [1]. Отрасль развивается по многим направлениям и обеспечивает сельское хозяйство, перерабатывающую промышленность и население рабочими, племенными и продуктивными лошадьми, сырьем и продуктами питания [2].

В Государственный племенной регистр селекционных достижений, допущенных к использованию,

в Российской Федерации включено 49 пород и внутрипородных типов лошадей, из них 23 относятся к местным породам. За последние 20 лет в табунном коневодстве созданы три породы и четыре типа лошадей [3].

В последние годы поголовье лошадей в России в целом увеличилось, при этом распределение по сферам их использования неравномерно. Табунные лошади (продуктивное направление) по численности занимают второе место [4]. При этом основное их поголовье

(97,3 %) сосредоточено в десяти субъектах Российской Федерации: Республики Саха (Якутия), Калмыкия, Башкортостан, Горный Алтай, Бурятия, Тыва, Хакасия, Алтайский и Забайкальский края, Астраханская область [5].

Местные породы лошадей обладают уникальными адаптивными качествами, способны использовать скудные пастбища, малодоступные другим видам сельскохозяйственных животных, тебеневать в зимний период и выживать в суровых условиях с минимальным участием человека [6, 7].

На сегодняшний день особое значение приобретает селекция сельскохозяйственных животных по экстерьерно-конституциональным особенностям, среди которых важное место занимают промеры статей тела и индексы телосложения [8, 9, 10]. В скотоводстве разработан новый способ определения экстерьерно-конституциональных типов животных, основанный на измерении удельно-массового коэффициента с использованием 4 основных промеров статей тела и живой массы животного [11].

Знание коррелятивных зависимостей между отдельными признаками дает возможность при проведении отбора по одному или нескольким признакам предусматривать изменение других, что имеет важное значение для успешной селекционной работы.

Поскольку основным и наиболее доступным показателем для оценки мясной продуктивности остается живая масса, а величина корреляции между признаками может варьировать в зависимости от породы, пола, возраста, условий внешней среды и других факторов, целью наших исследований – изучить сопряженность селекционных признаков табунных лошадей забайкальской породы для повышения эффективности селекции.

Методика. Материалом для исследований служили полновозрастные жеребцы (♂, n=7) и кобылы (♀, n=20), а также жеребчики забайкальской породы при рождении (n=12) и в возрасте 6 (n=12), 18 (n=12) и 30 (n=12) мес. Работу выполняли на базе племенного завода СПК – Племязавод им. Калинина Агинского района Забайкальского края.

Живую массу (ЖМ) определяли путем взвешивания на электронных весах Элефант-2000–5 с точностью до 0,5 кг. Для оценки экстерьерно-конституциональных особенностей по общепринятой методике были взяты основные промеры статей тела (см): высота в холке (ВХ), косая длина туловища (КДТ), обхват груди (ОГ) и пясти (ОП).

Абсолютные величины промеров позволяют сравнивать развитие отдельных статей у животных, но не характеризуют пропорций их телосложения (габитуса). На основании полученных результатов были рассчитаны следующие индексы телосложения (%): растянутости или формата (ИРТ) – отношение косой длины туловища к высоте в холке, характеризует развитие туловища в длину; массивности или обхвата груди (ИМС) – отношение обхвата груди к высоте в холке, служит показателем силы и работоспособности животного; сбитости или компактности (ИСБ) – отношение обхвата груди к косой длине туловища, показатель развития массы тела; костистости (ИКТ) – отношение обхвата пясти к высоте в холке, характеризует крепость костяка.

Для сравнительной оценки роста и развития лошадей использовали показатели стандарта (1 класс) забайкальской породы [12].

Коэффициенты корреляции (r) рассчитывали между значениями сопряженных признаков с использованием программ Microsoft Excel и PAST version 3.25 (2001).

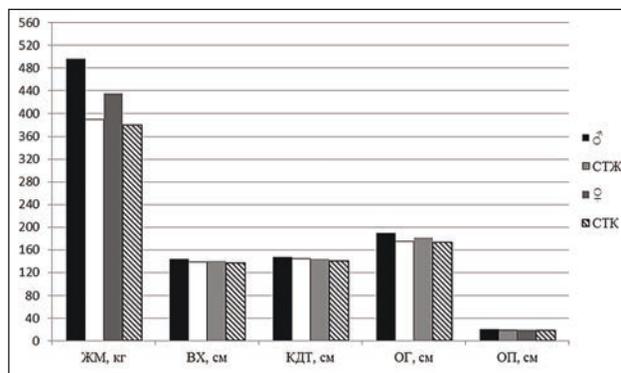


Рис. 1. Живая масса и промеры статей тела полновозрастных лошадей (СТЖ – стандарт для жеребцов, СТК – стандарт для кобыл).

Результаты исследований обрабатывали методом вариационной статистики [13].

Результаты и обсуждение. Основная цель взятия промеров животных заключается в более точной оценке каждой особи и устранении, таким образом, субъективизма, который возможен при глазомерной оценке. К числу наиболее важных относят стати тела, которые дают представление об изменениях пропорций тела животного в процессе роста и развития.

По живой массе и промерам статей тела как жеребцы, так и кобылы исследованной популяции превосходили стандарт породы. Разница по живой массе производителей составляла 27,2 %, кобыл – 19,3 %; по высоте в холке – 3,2 и 2,5; по косой длине туловища – 2,2 и 2,4; по обхвату груди – 8,7 и 4,6; по обхвату пясти – 7,9 % и 8,9 % соответственно (рис. 1).

Аборигенные породы лошадей Забайкалья (зabayкальскую и бурятскую) разводят на территории с разнообразными природно-кормовыми условиями (степная, лесостепная, горно-таежная), в результате чего у них сформировались своеобразные отродья, обладающие специфическими хозяйственно-полезными качествами [14]. Калашников И. А. и Назарова Е. Н. предлагают выделить в бурятской породе лошадей, в зависимости от экологической зоны разведения, 2 типа: массивный и основной [15].

Исходя из этой классификации, лошадей забайкальской породы племенного завода СПК – Племязавод им. Калинина по живой массе и промерам статей тела можно условно отнести к массивному типу I экологической зоны.

Результаты анализа динамики роста и развития жеребчиков в период от рождения до 30-месячного возраста свидетельствует о том, что их средняя масса тела увеличилась в 8 раз, высота в холке – на 47,1 %, косая длина туловища – в 2,1 раза, обхват груди – в 1,9 раза, обхват пясти – на 55,6 % (табл. 1).

Табл. 1. Живая масса (кг) и промеры статей тела (см) жеребчиков

Возраст, мес.	ЖМ	ВХ	КДТ	ОГ	ОП
При рождении	41,1±2,54	95,2±1,42	68,1±1,31	82,6±1,56	11,7±0,32
6	181,0±5,80	118,9±1,31	116,4±1,88	127,6±2,57	14,8±0,49
18	286,9±12,15	130,2±3,98	131,2±2,48	147,3±5,51	17,3±0,33
30	330,5±19,70	140,0±2,58	142,7±2,31	159,9±4,39	18,2±0,26
абсолютный прирост					
0...6	139,9	23,7	48,3	45,0	3,1
6...18	105,9	11,3	14,8	19,7	2,5
18...30	43,6	9,8	11,5	12,6	0,9
0...30	289,4	44,8	74,6	77,3	6,5

Молодые особи наиболее интенсивно развиваются в молочный период. Так, к 6-месячному возрасту у жеребчиков масса тела увеличивается в 4,4 раза, высота в холке – на 24,9 %, косая длина туловища – на 70,9, обхват груди – на 54,5 и обхват пясти – на 26,5 %. С возрастом интенсивность роста и развития несколько снижается и в период от 18 до 30 месяцев живая масса увеличилась на 15,2 %; высота в холке – на 7,5; косая длина туловища – на 8,8; обхват груди – на 8,6 и обхват пясти – на 5,2 %.

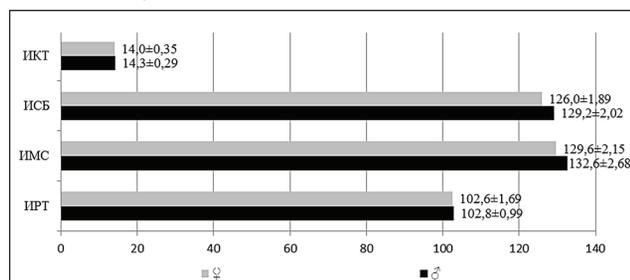


Рис. 2. Индексы телосложения полновозрастных лошадей, %.

По индексам телосложения аборигенные жеребцы и кобылы забайкальской породы характеризуются выраженными мясными формами. При этом самцы обладают более сбитым (+9,1 %), массивным (+3,4 %) и менее растянутым (-4,9 %) телом с крепким костяком (рис. 2). Схожие результаты получены в исследованиях на табунных лошадях якутской породы [16]. У жеребцов при средней живой массе 482 кг индекс растянутости составил 109,4 %, широкотелости – 136,6 и сбитости – 127,4 %, у кобыл – соответственно 442,0 кг, 108,3, 134,9 и 124,6 %.

Табл. 2. Индексы телосложения жеребчиков, %

Возраст, мес.	ИРТ	ИМС	ИСБ	ИКТ
При рождении	71,5±0,79	86,7±0,71	121,3±1,56	12,2±0,38
6	97,9±1,61	107,3±2,09	109,6±2,23	12,4±0,46
18	100,8±3,07	113,1±3,45	112,3±2,56	13,3±0,34
30	101,9±1,79	114,2±2,72	112,1±2,61	13,0±0,31
прирост				
0...6	26,4	20,6	-22,9	0,2
6...18	2,9	5,9	2,7	0,9
18...30	1,1	1,1	-0,2	-0,3
0...30	30,4	27,5	-9,2	0,8

В процессе роста и развития индексы телосложения закономерно увеличиваются, за исключением индекса сбитости (компактности). Так, индекс растянутости стал больше на 30,4 %, массивности – на 27,5, костистости – на 0,8 %, при этом индекс сбитости уменьшился на 9,2 % (табл. 2). Следует отметить, что с возрастом происходит неравномерное развитие отдельных статей телосложения. При рождении жеребенок имеет короткое компактное туловище, к 30-месячному возрасту происходит интенсивное развитие тела в длину (70,9 %) и в объеме (54,5 %).

У жеребцов-производителей отмечена положительная взаимосвязь высокой и средней силы (рис. 3) между

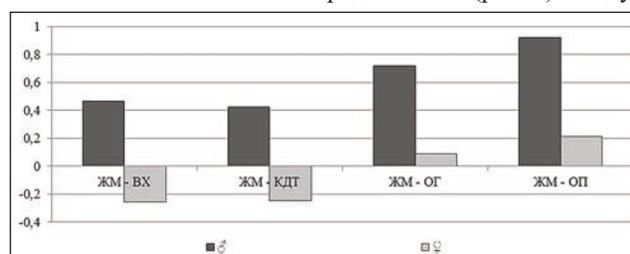


Рис. 3. Коэффициент корреляции между живой массой и промерами статей тела полновозрастных лошадей.

живой массой и обхватом пясти ($r=0,922$), обхватом груди ($r=0,716$), высотой в холке ($r=0,464$) и косой длиной туловища ($r=0,424$). При этом у кобыл живая масса слабо коррелировала с рассматриваемыми параметрами.

Аналогичные результаты представлены в работах других исследователей. Так, самая высокая сопряженность у лошадей бурятской породы желательного типа и казахских кобыл типа жабе отмечается между живой массой и обхватом пясти ($r=0,680$ и $r=0,351$) [17, 18]. У табунных лошадей таджикской породы отмечена сильная связь живой массы с обхватом груди ($r=0,809$) и косой длиной туловища ($r=0,696$), средняя – с высотой в холке ($r=0,463$) и обхватом пясти ($r=0,327$) [19].

Табл. 3. Коэффициент корреляции между живой массой и промерами статей тела жеребчиков

Возраст, мес.	ЖМ - ВХ	ЖМ - КДТ	ЖМ - ОГ	ЖМ - ОП
При рождении	0,673	0,543	0,719	0,311
6	0,239	0,225	0,207	-0,047
18	-0,086	0,584	0,324	0,073
30	0,362	0,591	0,229	-0,353

У молодняка лошадей забайкальской породы выявлена положительная разная степени сопряженность живой массой со всеми основными промерами статей тела при рождении. При этом тесная связь отмечена с высотой в холке, косой длиной туловища и обхватом груди (табл. 3). У 18 и 30-месячных особей высокая сопряженность установлена с косой длиной туловища ($r=0,584$ и $r=0,591$).

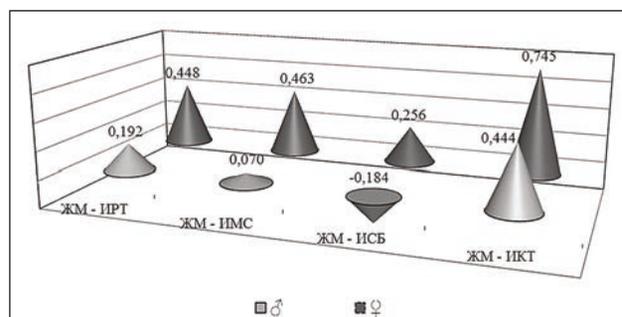


Рис. 4. Коэффициент корреляции между живой массой и индексами телосложения полновозрастных лошадей.

У жеребцов-производителей положительная корреляция живой массы выявлена со всеми индексами телосложения (рис. 4), при этом более высокая связь установлена с индексом костистости ($r=0,745$). У кобыл тесной сопряженности живой массы с индексами телосложения не выявлено.

Табл. 4. Коэффициент корреляции между живой массой и индексами телосложения жеребчиков

Возраст, мес.	ЖМ - ИРТ	ЖМ - ИМС	ЖМ - ИСБ	ЖМ - ИКТ
При рождении	0,054	0,447	0,241	-0,078
6	0,064	0,084	0,023	-0,112
18	0,591	0,476	-0,141	0,111
30	0,167	-0,013	-0,130	-0,540

Анализ полученных данных (табл. 4) свидетельствует о наличии наиболее сильной корреляции между живой массой и индексом массивности у жеребчиков при рождении и в возрасте 18 мес. В 6 и 30-месячном возрасте сопряженность между изучаемыми признаками практически отсутствует. Кроме того, в возрасте 18 мес. отмечена тесная положительная связь между живой массой и индексом растянутости ($r=0,591$), а также отрицательная в возрасте 30 мес. с индексом костистости ($r=-0,540$) что необходимо учитывать в селекционной работе с табунными лошадьми забайкальской породы.

Выводы. Таким образом, у жеребцов-производителей выявлена положительная взаимосвязь живой массой с обхватом пясти ($r=0,922$) и обхватом груди ($r=0,716$), а также с индексом костистости ($r=0,745$), тогда как у кобыл существенных связей между всеми рассматриваемыми признаками не установлено. У жеребчиков при рождении живая масса тесно коррелирует с высотой в холке ($r=0,673$), косой длиной туловища ($r=0,543$) и обхватом груди ($r=0,719$), в возрасте 18 мес. – с косой длиной туловища и индексом растянутости ($r=0,584$ и $0,591$), в 30 месячном возрасте – с косой длиной туловища ($r=0,591$).

Оценка морфометрических особенностей экстерьера на основании обмера особей и расчета индексов телосложения даст возможность прогнозировать эффективность селекции по живой массе, что необходимо учитывать в дальнейшей селекционно-племенной работе по совершенствованию продуктивных качеств табунных лошадей забайкальской породы.

Литература.

1. *Формирование мясной продуктивности казахских лошадей адайского отродья* / М. Т. Каргаева, Ю. А. Юлдашбаев, К. Ж. Исхан и др. // *Аграрная наука*. 2021. № 9. С. 47–51. doi: 10.32634/0869-8155-2021-352-9-47-51
2. *Научное обоснование основных параметров для эффективного производства мяса лошадей* / А. Л. Сидорова, В. А. Колесников, Т. В. Мурзина и др. // *Вестник Красноярского ГАУ*. 2021. № 12(177). С. 212–218. doi: 10.36718/1819-4036-2021-12-212-218
3. *Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. «Породы животных» (официальное издание)*. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. Т. 2.229 с.
4. *Коневодство в сельском хозяйстве и за его пределами* // *Аграрная наука*. 2019. № 2. С. 44–45.
5. *Зубаирова Л. А., Герасимова С. А. Конина – ценное мясное сырьё в Башкортостане* // *Вестник Таджикской академии сельскохозяйственных наук*. 2021. № 3(69). С. 82–85.
6. *Морфологические и генетические особенности пород лошадей Якутии* / Н. П. Филиппова, Н. П. Степанов, В. В. Додохов и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 4. С. 60–64. doi:10.31857/S2500262720040146
7. *Variability of mitochondrial DNAD-loop sequences in Zabaikalskaya horse breed* / L. A. Khrabrova, N. V. Blohina, B. Z. Bazaron et al. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021. № 25(5). С. 486–491. doi 10.18699/VJ21.055
8. *Контэ А. Ф., Карликова Г. Г. Генетическая изменчивость показателей продуктивности и оценки экстерьера голитинских коров в зависимости от типа телосложения* // *Аграрный вестник Урала*. 2021. № 09 (212). С. 53–62. doi: 10.32417/1997-4868-2021-212-09-53-62.
9. *Возрождение татарской породы лошадей* / Р. А. Хартдинов, М. А. Сушенцова, И. Н. Камалдинов и др. // *Зоотехния*. 2023. № 1. С. 22–25. doi:10.25708/ZT.2022.33.52.006
10. *Иолчиев Б. С., Волкова Н. А., Силантьева А. О. Особенности роста и развития межвидовых гибридов домашних овец и архара* // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. № 9. С. 75–79. doi:10.53859/02352451.2022.36.9.75
11. *Новый метод определения типов конституции животных* / М. Б. Улимбаев, З. М. Айсанов, Е. Р. Гостева и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 2. С. 48–52. doi:10.31857/S2500-26272019248-52
12. *Порядок и условия проведения бонитировки племенных лошадей забайкальской породы*. М.: Изд-во ГНУ ВНИИ коневодства, 2012. 18 с.
13. *Яковенко А. М., Антоненко Т. И., Селионова М. И. Биометрические методы анализа качественных и количественных признаков в зоотехнии*. Ставрополь: АГРУС. 2013. С. 54–61.
14. *Анганов В. В., Цыбикова Р. Н. Особенности экстерьера лошадей восточно-сянского экотипа бурятской породы* // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2016. № 3(250). С. 35–40.
15. *Калашиников И. А., Назарова Е. Н. Особенности племенной работы при сохранении и совершенствовании лошадей местных пород* // *Вестник Бурятской ГСХА имени В. Р. Филиппова*. 2021. № 3(64). С. 38–46.
16. *Додохов В. В., Воронцова В. В. Зоотехническая характеристика лошадей якутской породы СХПК им. И. Я. Строда* // *Академический вестник Якутской ГСХА*. 2021. № 6(23). С. 26–31.
17. *Калашиников И. А., Назарова Е. Н. Зоотехническая оценка и методические основы подготовки к апробации линий бурятской породы лошадей* // *Вестник Бурятской ГСХА имени В. Р. Филиппова*. 2021. № 2(63). С. 44–50.
18. *Продуктивность казахских лошадей типа жабе разной популяции* / Д. А. Баймуканов, А. Р. Акимбеков, Х. А. Аубакиров и др. // *Эффективное животноводство*. 2017. № 6(36). С. 48–51.
19. *Изменчивость основных хозяйственно-полезных признаков таджикской породы лошадей* / А. Г. Шамсиев, Г. Н. Мирзоева, И. С. Беков и др. // *Кишоварз*. 2018. № 3. С. 52–55.

Поступила в редакцию 30.04.2023

После доработки 25.06.2023

Принята к публикации 29.08.2023

ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЦИТОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕРМАТОЗОИДОВ ПЕТУХОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ*

Ю. Л. Силукова, Е. С. Федорова, кандидат биологических наук,
О. И. Станишевская, доктор биологических наук

Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста
196625, Санкт-Петербург, Тярлево, Московское ш., 55а
E-mail: svadim33@mail.ru

Проблема снижения фертильности семени петухов в цикле «нативная сперма – разбавление – кратковременное и длительное хранение (криоконсервация)» остро актуальна. Цель исследования – определить влияние различных способов подготовки (центрифугирование или фильтрация) семени петухов на его качественные характеристики с учетом способа снижения числа микробных тел, а также оценить изменение состава цитозоля сперматозоидов нативной спермы под влиянием разбавления и при кратковременном хранении. Использовали семя петухов (n=22) русской белой породы. Сперму делили на 3 части (образца): I разводили синтетической криозащитной средой ЛКС в соотношении 1:1, II фильтровали разведенное средой семя (диаметр пор мембраны 0,2 мкм), III центрифугировали (при 3000 об/мин в течение 10 мин). Оценивали нативную и заморожено/оттаянную сперму по показателям поврежденности мембран, хроматина и акросом сперматозоидов. Определяли состав углеводов и полиолов сперматозоидов нативной спермы под влиянием разбавления и после хранения (3 ч). Отмечено преимущество фильтрации, как способа технологической подготовки семени, по сравнению с центрифугированием, по показателю прогрессивной (прямолинейно-поступательное движение) подвижности сперматозоидов (41,0 % против 27,0 %) и поврежденности хроматина (43,4 % против 66,4 %). Аналогичное преимущество отмечено у заморожено/оттаянного семени, профильтрованного перед замораживанием, по показателю прогрессивной подвижности (25,5 % против 5,5 %) и поврежденности хроматина (16,5 % против 33,6 %). Фильтрация семени, как способ технологической обработки семени петухов, может быть эффективным дополнительным этапом его подготовки для искусственного осеменения и/или краткосрочного хранения. Основной компонент в составе цитозоля нативных сперматозоидов при оценке содержания углеводов и полиолов – инозитол (73,7 % от суммы углеводов и полиолов). Технологические факторы хранения семени петухов в различных режимах (кратковременное при температуре 5 °С и длительное при температуре –196 °С) оказывают значительное влияние на соотношение компонентов цитозоля сперматозоидов (углеводов и полиолов). Значительное (в 2,5 раза) снижение относительного содержания инозитола в составе цитозоля заморожено/оттаянных сперматозоидов, по сравнению с показателями нативного семени, позволяет рекомендовать введение этого антиоксиданта в состав криозащитных сред для семени петухов.

CHANGES IN KINETIC PARAMETERS AND CYTOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ROOSTER SPERMATOZOA UNDER THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS

Yu. L. Silyukova, E. S. Fedorova, O. I. Stanishevskaya

Russian Research Institute of Farm Animal Genetics and Breeding –
Branch of the L. K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry,
196625, Sankt-Peterburg, Tyarlevo, Moskovskoe sh., 55a
E-mail: svadim33@mail.ru

The problems of fertility reducing of rooster semen in the cycle «native sperm-equilibration-short-term and long-term storage (cryopreservation)» are urgent. The purpose of this study was to determine the effect of different methods of preparation (centrifugation or filtration) of rooster semen on its quality characteristics, depending on the method of removing possible pollutions; to evaluate the change in the composition of the cytosol of spermatozoa of native sperm under the influence of dilution and during short-term storage. Materials and methods. Semen of roosters (n=22) of the Russian white breed was used. Experiment 1: semen was divided into 3 aliquots: I – diluted with synthetic cryoprotective medium LCM in a ratio of 1:1, II – filtered semen diluted with medium (membrane pore diameter 0.2 μm), III – centrifuged (at 3000 rpm in for 10 minutes). Native and frozen/thawed sperm were evaluated in terms of damage to spermatozoa membranes, chromatin, and acrosomes. The composition of carbohydrates and polyols of native spermatozoa was assessed under the influence of dilution and after storage (3 h). The advantage of filtration as a method of technological preparation of semen compared to centrifugation in terms of progressive motility (with rectilinear-translational movement) of sperm (41.0 % versus 27.0 %) and chromatin damage (43.4 % versus 66.4 %) has been shown. The same advantage was observed in frozen/thawed sperm filtered before freezing in terms of progressive motility (25.5 % vs. 5.5 %) and chromatin damage – 16.5 % vs. 33.6 %, respectively. Semen filtration, as a method of technological processing of rooster semen, can be an effective additional step in the preparation of semen for artificial insemination and/or short-term storage. The main component in the composition of the cytosol of native spermatozoa, according to the content of carbohydrates and polyols, was inositol – 73.7 % of Σ carbohydrates and polyols. The level of inositol decreased during storage by 6.5 times (from 0.030 mg/ml to 0.007 mg/ml). The data obtained let us suppose the role of inositol as the main antioxidant in the cytosol of spermatozoa. Technological factors of storing rooster semen in various modes (short-term at a temperature of 5°C and long-term at a temperature of –196°C) have a significant impact on the ratio of sperm cytosol components (carbohydrates and polyols). A significant, 2.5-fold decrease in the relative content of inositol in the cytosol of frozen/thawed spermatozoa, compared with the indicators of native semen, allows us to recommend the introduction of the antioxidant inositol into the composition of cryoprotective media for rooster semen.

Ключевые слова: сперма, хранение семени, петухи, фильтрация, цитозоль, инозитол, синтетические разбавители.

Key words: sperm, semen storage, roosters, filtration, cytosol, inositol, synthetic diluents.

* работа осуществлена в рамках темы Государственного задания Минобрнауки России № 121052600357–8 «Изучение биологических механизмов формирования продуктивных и адаптационных признаков домашних кур (Gallus gallus domesticus) с использованием физиолого-биохимических, цитологических, генетических и вирусологических методов исследований с целью создания новых селекционных форм».

Современные методы оценки качества семени предполагают определение следующих параметров: объем эякулята (мл); концентрация сперматозоидов (млрд/мл); общая подвижность (ОП) и прогрессивная подвижность (ПП) сперматозоидов (%) с использованием системы CASA (Computer-Assisted Sperm Analysis); жизнеспособность (целостность мембран), целостность хроматина, морфологическая полноценность, целостность акросом с использованием микроскопических методов. Могут быть проведены и более глубокие исследования семени по таким показателям, как митохондриальный потенциал репродуктивной клетки, концентрация активных форм кислорода (АФК), степень перекисного окисления липидов (ПОЛ), общая антиоксидантная емкость (ОАК) и ферментативная активность супероксиддисмутазы (СОД) [1].

В практическом, рутинном процессе искусственного осеменения наиболее применимыми оценочными характеристиками по-прежнему остаются объем эякулята, концентрация сперматозоидов, доля сперматозоидов с прямолинейно-поступательным движением и их морфологическая полноценность [2, 3]. При оценке качества заморожено/оттаянного семени наиболее значимы такие критерии, как прогрессивная подвижность сперматозоидов, жизнеспособность (поврежденность мембран клеток), степень фрагментации хроматина и целостность акросом [4, 5].

В связи с особенностями строения полового аппарата петухов необходимо уделять большое внимание микробиологическим показателям получаемого эякулята, поскольку существует вероятность его загрязнения следами мочи и/или помета, а также соматическими клетками (эритроцитами, лимфоцитами, эпителиальными, микробными и другими). Загрязненная сперма имеет, как правило, более низкую оплодотворяющую способность, кроме того, это сопряжено высоким риском распространения инфекции в области половых путей, поскольку загрязненная/зараженная сперма попадает непосредственно в яйцевод курицы. Негативное влияние загрязнения семени петухов выражается в снижении подвижности сперматозоидов, увеличении числа и объемов их агрегированных конгломератов, нарушении целостности мембран клеток и ДНК из-за усиления степени перекисного окисления липидов и высокого уровня АФК (активных форм кислорода) [5, 6]. В условиях производственного процесса такие риски недопустимы.

Возможный способ снижения степени микробиологического загрязнения в семени – центрифугирование, то есть полное удаление загрязненной семенной плазмы с последующей заменой ее на полноценную по составу синтетическую среду. Кроме того, возможно санирование семени петухов с использованием противомикробных препаратов, что в большинстве случаев приводит к снижению оплодотворяющей способности сперматозоидов и повышению резистентности микрофлоры к используемым противомикробным препаратам [6].

В опубликованных материалах исследователи расходятся во мнении о значимости семенной плазмы как для искусственного осеменения, так и для протокола криоконсервации семени петухов. Семенная плазма – ключевая биологическая жидкость, которая модулирует функцию сперматозоидов у всех видов животных, но ее роль в хранении спермы птиц *in vitro* остается до конца не изученной, поскольку обнаружено как положительное, так и отрицательное влияние на результативность искусственного осеменения [6]. Поскольку для семени петухов свойственны активные аэробные процессы при ее транспорте от самца к половым путям самки, семенная плазма имеет ряд природных защитных

механизмов, способных нейтрализовать избыточное образование АФК [7]. Исследования состава семенной плазмы петухов выявили наличие специфических белков – овотрансферрина и галлинацина-9, которые несут антибактериальную функцию [8, 9].

В состав семенной плазмы в качестве энергетических и пластических компонентов входят углеводы и полиолы. Установлено, что нарушение фертильности сперматозоидов петухов может быть связано с изменением содержания углеводных компонентов [5], роль которых в поддержании фертильности при краткосрочном и долговременном хранении хорошо исследована [10, 11, 12]. Однако, кроме знания состава семенной плазмы, необходимо понимание изменений в составе цитозоля сперматозоидов под влиянием таких технологических факторов, как разбавление семенной плазмы или ее полное замещение после центрифугирования, которые до сих пор изучены недостаточно.

Цель исследования – определить влияние различных способов подготовки (центрифугирование или фильтрация) и сроков хранения семени петухов на его качественные характеристики.

Методика. Проведение исследований было согласовано и утверждено этической комиссией ВНИИГРЖ (протокол № 11/2023 от 07.02.2023) в соответствии с принятыми принципами биоэтики ст. 5 часть 2 European Convention for the Protection of Vertebrate Animals for Experimental and Other Scientific Purposes (ETS 123 1986).

Работу проводили на петухах породы русская белая яичного направления продуктивности ($n=22$), 60...64 недели жизни биоресурсной коллекций «Генетическая коллекция редких и исчезающих пород кур» Всероссийского научно-исследовательского института генетики и разведения сельскохозяйственных животных – филиал Федерального исследовательского центра животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста. Режим содержания и кормления соответствовал принятой в коллекционарию технологии. Нативное семя оценивали по следующим показателям: объем (мл), концентрация (млрд/мл), общая подвижность (%) в соответствии с ГОСТ 27267-2017 [2]. Анализ общей и прогрессивной (клетки с прямолинейно-поступательным движением) подвижности сперматозоидов проводили с использованием визуализирующей системы CASA (АргусСофт, Россия). Для проведения экспериментов были отобраны петухи со следующими показателями качества семени: общая подвижность сперматозоидов в сперме – не менее 60,0 % (CV 12,1 %), поврежденность мембран – не более 30,0 % (CV 23,2 %). В среднем в нативном семени петухов породы русская белая ($n=22$) общая подвижность (ОП) сперматозоидов составляла $84,3 \pm 2,2$ %; прогрессивная подвижность (ПП) – $66,5 \pm 2,5$ %; поврежденность мембран – $27,1 \pm 5,6$ %; поврежденность хроматина – $18,9 \pm 1,0$ %.

Для более полного понимания процессов, происходящих в сперматозоидах на субклеточном уровне под влиянием ряда технологических воздействий, был изучен состав цитозоля клеток. Ввиду отсутствия значимых различий по поврежденности плазматических мембран сперматозоидов нативного семени, установленных на первом этапе исследований, между вариантами, состав цитозоля сперматозоидов оценивали для нативного семени, разбавленного семени после хранения в течение 3 ч и заморожено/оттаянного семени.

Индивидуальные эякуляты объединяли и разделяли на 3 части (аликваты) для последующих операций: хранение в течение 3 ч (обычная продолжительность использования семени в производственном процессе искус-

Показатели качества семени в зависимости от способа технологической подготовки

Показатель	Нативное семя после хранения в течение 3 ч при температуре 5 °С			Заморожено/оттаянное семя		
	I (разбавление)	II (фильтрация)	III (центрифугирование)	I (разбавление)	II (фильтрация)	III (центрифугирование)
Подвижность, %:						
общая	80,0±1,5 ^c	79,8±0,6 ^c	69,5±0,8 ^d	44,7±5,2 ^{ab}	52,2±2,3 ^a	30,4±3,6 ^b
прогрессивная	39,2±1,5 ^c	41,0±1,6 ^c	27,0±1,2 ^d	21,4±0,9 ^a	25,5±2,5 ^a	5,5±0,4 ^b
Поврежденность, %:						
мембран	34,8±0,1	41,4±0,1	40,8±0,0	73,2±0,4 ^a	59,9±1,7 ^b	66,6±2,6 ^b
хроматина	69,1±4,1 ^c	43,4±0,8 ^d	66,4±2,9 ^c	9,6±6,3 ^a	16,5±7,5 ^a	33,6±2,1 ^b
акросом	1,5±0,3	3,7±0,5	1,9±0,3	31,8±1,1 ^a	31,3±3,1 ^a	43,1±2,0 ^b

^{c,d} различия между показателями, обозначенными разными буквами, достоверны при $p < 0,01$, ^{a,b} — при $p < 0,001$.

ственного осеменения кур) и замораживание. Аликвота I – семя, разбавленное в соотношении 1:1 криопротекторной средой ЛКС (ленинградская криозащитная среда) [13, 14], аликовта II – семя, профильтрованное и разбавленное средой ЛКС (при фильтрации использовали многообразные фильтрующие мембранные насадки с диаметром пор 0,2 мкм, SWINNEX® (China), размер которых был подобран с учетом размеров сперматозоидов петухов и непатогенных микробных тел, присутствующих в семени). При подготовке аликовты III семя центрифугировали при 3000 об/мин в течение 10 мин, объем удаленной семенной плазмы измеряли градуированной пипеткой, доводили разбавителем ЛКС до первоначального, после чего семя разбавляли в соотношении 1:1 криопротекторной средой ЛКС. Все этапы эксперимента выполняли в 3 повторностях. Семя замораживали, хранили в течение 10...15 дней и оттаивали по протоколу, разработанному для гранул [15]. Образцы для хроматографической оценки готовили по протоколу, изложенному Stanishevskaya, et al. (2021) [11]. Хроматографический анализ углеводов и полиолов цитозоля сперматозоидов проводили по адаптированной методике [16], содержание каждого из этих компонентов определяли в процентах от сухой биомассы (СБ) их суммы. В качестве маркеров использовали глицерин, глюкозу, инозитол, трегалозу и маннит (Sigma, США); оценку выполняли дважды.

Микроскопический анализ поврежденности мембран сперматозоидов осуществляли по протоколу эозин/нигрозин, визуализировали на Axio Imager 1.0 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия, 1000x под иммерсией) [17]. В каждом образце оценивали не менее 200 клеток. Клетки, окрашенные в розовый цвет, считали поврежденными. Сохранность хроматина определяли с использованием протокола Toluidine Blue (ТВ) [18]; сперматозоиды с интактным хроматином были окрашены в голубой цвет, сперматозоиды с поврежденным хроматином – в темно-синий. В каждом образце оценивали не менее 200 клеток с использованием фазово-контрастного оптического микроскопа (Motic BA410E, Китай, увеличение x40). Интактность акросом сперматозоидов определяли по протоколу Coomassie [19, 20]: интактными считали акросомы сперматозоидов, окрашенные в синий цвет, поврежденными – не окрашенные. Оценивали 5–6 микроскопических полей, всего не менее 200 клеток. Степень агрегирования в семени определяли по соотношению числа агрегированных сперматозоидов в конгломерате к общему числу сперматозоидов в поле зрения при увеличении x100 с использованием системы CASA (ArgusSoft, Россия); оценивали не менее 5 полей зрения. Сравнение показателей жизнеспособности, подвижности, целостности хроматина и акросом между свежими и заморожено/оттаянными сперматозоидами проводили с использованием парных t-тестов, различия между выборками оценивали по методу Стьюдента. Результаты выражены как Mean ± SEM. Для статистического анализа было проведено по 3 повторности каждого испытания.

Результаты и обсуждение. Фильтрация и центрифугирование, как способы технологической подготовки семени, снижали концентрацию сперматозоидов соответственно на 6,0 % и 33,4 %.

Способ технологической подготовки семени оказал значительное влияние на качественные показатели семени после 3 ч хранения (см. табл.). При использовании фильтрации общая и прогрессивная подвижности сперматозоидов были выше, чем после центрифугирования, соответственно на 10,3 % и 14,0 %, а поврежденность хроматина сперматозоидов меньше на 23,0 % ($p < 0,001$). По поврежденности мембран и акросом сперматозоидов преимуществ фильтрации не установлено.

В результате оценки показателей заморожено/оттаянного семени отмечено достоверное ($p < 0,01$) преимущество предварительной фильтрации, по сравнению с центрифугированием, по общей подвижности сперматозоидов на 21,8 %, по прогрессивной подвижности – на 20,0 %, по поврежденности хроматина – на 17,1 %, поврежденности акросом – на 11,8 %.



Рис. 1. Целостность хроматина (окрашивание ТВ) сперматозоидов под влиянием различных способов подготовки в протоколе замораживания/оттаивания: а) семя разбавленное, хранение 3 ч; б) семя разбавленное размороженное, в) семя размороженное профильтрованное, г) семя размороженное центрифугированное (стрелки 1 – интактный хроматин, стрелки 2 – поврежденный хроматин).

При микроскопической оценке степени поврежденности хроматина сперматозоидов нативного и заморожено/оттаянного семени было визуально отмечено изменение плотности окрашивания хроматина в клетках и интенсивности его окрашивания (рис. 1) в зависимости от способа технологической подготовки семени. У интактных и поврежденных сперматозоидов, не прошедших предвари-

тельную обработку (хранение 3 ч, рис. 1а) и оттаянных (разбавление, рис. 1б) отмечено наличие нечетких контуров, рыхлость и фрагментарность хроматина. Заморожено/оттаянные сперматозоиды в варианте с фильтрацией (рис. 1в) отличаются высокой сохранностью хроматина (светлые клетки с интактным хроматином имеют ровные четкие контуры, без рыхлости и фрагментарности). При использовании центрифугирования отмечено значительное количество сперматозоидов с поврежденным хроматином (темные клетки, рис. 1г).

Известно, что агглютинация сперматозоидов может возникать под влиянием нескольких факторов, в том числе присутствия инородных микрочастиц в эякуляте, а также при изменении электрического потенциала мембран сперматозоидов в результате их повреждений [21, 22]. В наших исследованиях поврежденность мембран заморожено/оттаянных сперматозоидов при использовании фильтрации была ниже (см. табл.), чем при других технологических способах, что, вероятно, способствовало сохранению электрического потенциала мембран сперматозоидов. Можно предположить, что при фильтрации семени происходит более эффективное удаление возможных инородных микрочастиц, чем при других технологических способах, в результате отмечено достоверное ($p < 0,01$), в два и более раза, снижение степени агглютинации при использовании этого метода (рис. 2).

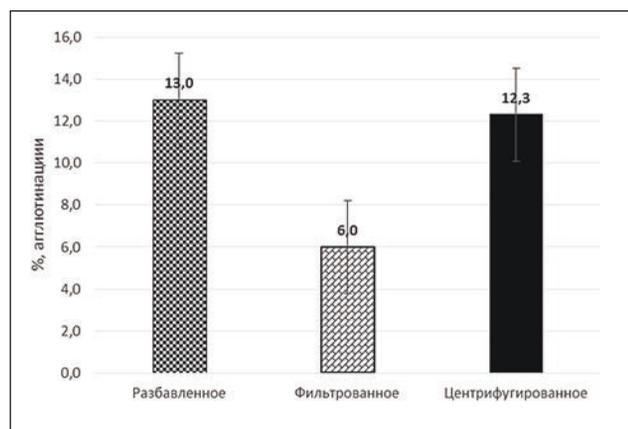


Рис. 2. Показатели степени агглютинации заморожено/оттаянного семени в зависимости от его технологической подготовки.

Важные энергетические и структурные компоненты плазматической мембраны и цитозоля сперматозоидов – углеводы и полиолы. По результатам хроматографического анализа было установлено, что в нативном неразбавленном семени их сумма в цитозоле составила 0,040 % от СБ, в образце семени после хранения с разбавителем ЛКС – 0,096 % от СБ, в заморожено/оттаянном семени – 0,024 % от СБ. Amaral A. (2022) [23] при изучении динамики общего содержания углеводов и полиолов доказал их связь с метаболизмом и энергетическим расходом клеток. Эти процессы происходят при использовании экзогенных и/или эндогенных субстратов для эффективного производства АТФ [23]. Наблюдаемая в нашем исследовании динамика содержания углеводов и полиолов в цитозоле клеток у разбавленного семени при хранении, вероятно, объясняется составом криопротекторного разбавителя ЛКС, содержащего фруктозу; у заморожено/оттаянного семени – разрушением части клеток при низкотемпературном воздействии и выходе содержимого цитозоля за пределы мембран.

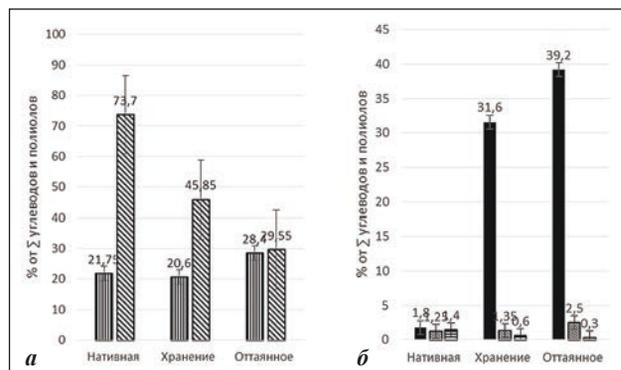


Рис. 3. Динамика состава цитозоля (нативное семя, хранение в течение 3 ч, заморожено/оттаянное семя) сперматозоидов петухов, % от суммы углеводов и полиолов: а) полиолы (■ — глицерин, ▨ — инозитол); б) углеводы (■ — фруктоза, ▨ — глюкоза, ▩ — маннит).

В нативном семени преобладали глицерин (73,7 % от суммы углеводов и полиолов) и инозитол (21,8 %) содержание углеводов было значительно меньше (1,2...1,8 %). Основные изменения в составе цитозоля, произошедшие в результате хранения и замораживания/оттаивания семени, выражались в уменьшении относительного содержания инозитола соответственно на 27,8 % и 44,2 % от суммы углеводов и полиолов (рис. 3). Такое значительное снижение, вероятно, объясняется расходом клетками инозитола в качестве антиоксиданта в течение хранения и замораживания/оттаивания семени [24]. Увеличение концентрации фруктозы в цитозоле сперматозоидов до 31,6 % от суммы углеводов и полиолов произошло под влиянием разбавителя ЛКС в результате транспорта молекул фруктозы через плазматическую мембрану сперматозоидов, который может осуществляться путем простой диффузии при хранении семени. Рост величины этого показателя до уровня 39,2 % от суммы углеводов и полиолов при замораживании/оттаивании клеток может быть обусловлен снижением общего содержания углеводов и полиолов в СБ в результате повышения поврежденности мембран сперматозоидов (на 38,4 %) и изменения баланса углеводов и полиолов цитозоля.

Выводы. Фильтрация, как способ технологической обработки семени петухов, может быть эффективным дополнительным этапом подготовки семени для искусственного осеменения и/или краткосрочного хранения, а также долговременного хранения в условиях ультранизких температур. Его использование позволяет снизить поврежденность мембран заморожено/оттаянных сперматозоидов на 13,3 %, степень их агглютинации – в 2 раза и повысить прогрессивную подвижность на 4,1 %, по сравнению с разбавленным заморожено/оттаянным семенем без применения фильтрации. Центрифугирование при подготовке семени к замораживанию не оказывает значимого влияния на степень агглютинации сперматозоидов, но значительно снижает уровень их общей и прогрессивной подвижности (соответственно на 14,3 и 15,9 %), а также целостность хроматина на 24,0 %, поэтому его использование нецелесообразно для использования в технологии криоконсервации семени петухов.

Технологические факторы хранения семени петухов в различных режимах (кратковременное при температуре 5 °С и долговременное при температуре –196 °С) оказывают значительное влияние на соотношение компонентов цитозоля сперматозоидов (углеводов и полиолов).

Снижение относительного содержания инозитола в составе цитозоля заморожено/оттаянных сперматозоидов, по сравнению с показателями нативного семени, в 2,5 раза позволяет рекомендовать введение в состав криозащитных сред для семени петухов антиоксиданта инозитола.

Представленные результаты имеют не только научно-теоретическое значение в плане изучения динамических изменений кинетических и морфологических параметров сперматозоидов, но и способствуют решению практических задач в племенном промышленном птицеводстве – повышению эффективности применения технологии искусственного осеменения кур.

Литература

- Zrimšek P., Manafi M. E. Evaluation of a new method and diagnostic test in semen analysis // *Artificial insemination in farm animals* / ed. M. E. Manafi. Rijeka, Croatia, InTech. 2011. P. 131–152.
- ГОСТ 27267-2017 Средства воспроизводства. Сперма петухов и индюков неразбавленная свежесполученная. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 9 с.
- Коноплева А. П., Андреева А. А., Трохолис Т. Н. Разбавители спермы и их влияние на эффективность искусственного осеменения // *Сборник научных трудов ВНИТИП. Сергиев Посад: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства*, 2010. Т. 85. С. 25–29.
- Целютин К. В., Тур Б. К. Криоконсервация спермы птиц – как инструмент сохранения генофонда // *Генетика и разведение животных*. 2015. № 1. С. 50–52.
- Peláez J., Bongalhardo D. C., Long J. A. Characterizing the glycocalyx of poultry spermatozoa: III. Semen cryopreservation methods alter the carbohydrate component of rooster sperm membrane glycoconjugates // *Poultry science*. 2011. Vol. 90. No. 2. P. 435–443.
- The Impact of in vitro inoculation and dietary supplementation with *Bacillus subtilis* on sperm quality of aged White Leghorn roosters / M. N. Dos Santos, R. Ramachandran, K. Wamsley, et al. // *Journal of Applied Poultry Research*. 2018. No. 27. P. 304–315.
- Negative correlation between presence of reactive oxygen species and Sperm Motility Index in whole semen samples of infertile males / S. Kuroda, Y. Yumura, K. Mori, et al. // *Revista Internacional de Andrología*. 2017. Vol. 15. No. 3. P. 84–89.
- Intact cell MALDI-TOF MS on sperm: A molecular test for male fertility diagnosis / L. Soler, V. Labas, A. Thélie, et al. // *Molecular & Cellular Proteomics*. 2016. Vol. 15. No. 6. P. 1998–2010.
- Santiago-Moreno J., Blesbois E. Functional aspects of seminal plasma in bird reproduction // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21. No. 16. P. 5664. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/16/5664> (дата обращения: 16.04.2023)
- Seminal plasma proteome as an indicator of sperm dysfunction and low sperm motility in chickens / Y. Li, Y. Sun, A. Ni, et al. // *Molecular & Cellular Proteomics*. 2020. Vol. 19. No. 6. P. 1035–1046.
- Michailidis G., Avdi M. Transcriptional profiling of gallinacins antimicrobial peptides in the chicken reproductive tract and embryos // *Journal of Biological Research*. 2010. No. 14. P. 211–218.
- Role of mono- and disaccharide combination in cryoprotective medium for rooster semen to ensure cryoresistance of spermatozoa / O. Stanishevskaya, Y. Silyukova, N. Pleshanov, et al. // *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 19. P. 5920. URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/19/5920> (дата обращения: 10.04.2023)
- Целютин К. В., Тур Б. К. Искусственное осеменение и криоконсервация спермы сельскохозяйственной птицы (петухи, индюки, гусаки, селезни). СПб.-Пушкин: ГНУ ВНИИГРЖ Россельхозакадемии, 2013. 87 с.
- Авторское свидетельство № 1130339 А1 СССР, МПК А61D 7/02. Среда для низкотемпературной консервации спермы птиц: № 3434811: заявл. 18.03.1982: опубл. 23.12.1984 / А. Д. Курбатов, Л. Е. Нарубина, Г. Б. Бубляева и др.; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт разведения и генетики сельскохозяйственных животных.
- Эффективность использования комбинаций сахаридов в средах для криоконсервации спермы петухов / Ю. Л. Силукова, О. И. Станисhevская, Н. В. Плешанов и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 6. С. 1148–1158.
- Effects of Trehalose Supplementation on Lipid Composition of Rooster Spermatozoa Membranes in a Freeze/Thaw Protocol / O. I. Stanishevskaya, Y. Silyukova, E. Fedorova, et al. // *Animals*. 2023. Vol. 13. No. 6. P. 1023. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/6/1023> (дата обращения: 10.04.2023). doi: 10.3390/ani13061023
- Pintado B., de la Fuente J., Roldan E. R. S. Permeability of boar and bull spermatozoa to the nucleic acid stains propidium iodide or Hoechst 33258, or to eosin: accuracy in the assessment of cell viability // *Journal of Reproduction and Fertility*. 2000. Vol. 118. No. 1. P. 145–152. doi: 10.1530/reprod/118.1.145.
- Beletti M. E., Mello M. L. S. Comparison between the toluidine blue stain and the Feulgen reaction for evaluation of rabbit sperm chromatin condensation and their relationship with sperm morphology // *Theriogenology*. 2004. Vol. 62. No. 3–4. P. 398–402.
- Trehalose as a Stabilizer of the Lipid Composition of Membranes and the Composition of the Cytosol of Frozen/Thawed Rooster Spermatozoa / O. Stanishevskaya, Y. Silyukova, V. Tereshina, et al. // *Agriculture*. 2023. No. 13. P. 1387. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/7/1387> (дата обращения: 12.04.2023). doi: 10.3390/agriculture13071387.
- Evaluation of the acrosomal status in Lama glama sperm incubated with acrosome reaction inducers / M. I. Carretero, F. G. Fumuso, D. M. Neild, et al. // *Animal reproduction science*. 2015. No. 160. P. 1–11. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378432015001451?via%3Dihub> (дата обращения: 12.04.2023)
- Characteristics and possible role of bovine sperm head-to-head agglutination / K. Umezū, S. Kurata, H. Takamori, et al. // *Cells*. 2020. Vol. 9. No. 8. P. 1865. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4409/9/8/1865> (дата обращения: 10.04.2023).
- Penicillamine prevents ram sperm agglutination in media that support capacitation / T. Leahy, J. P. Rickard, R. J. Aitken, et al. // *Reproduction*. 2016. Vol. 151. No. 2. P. 167–177.
- Amaral A. Energy metabolism in mammalian sperm motility // *WIREs Mech. Dis*. 2022. No 114. e1569. URL: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wsbm.1569> (дата обращения: 14.04.2023) doi: 10.1002/wsbm.1569
- Oxidative stress and male fertility: role of antioxidants and inositols / M. N. De Luca, M. Colone, R. Gambioli, et al. // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10. No. 8. C. 1283. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3921/10/8/1283> (дата обращения: 14.04.2023)

Поступила в редакцию 05.05.2023
После доработки 10.07.2023
Принята к публикации 15.08.2023

ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЕСТЕСТВЕННЫХ АНТИТЕЛ, ОБЩИХ ИММУНОГЛОБУЛИНОВ И ИММУНОКОМПЕТЕНТНЫХ КЛЕТОК КРОВИ ОВЕЦ В ПРОЦЕССЕ ПОСТВАКЦИНАЛЬНОГО ИММУННОГО ОТВЕТА

И. Ю. Ездакова, доктор биологических наук, О. В. Капустина, доктор ветеринарных наук,
А. Г. Григорьев, В. М. Ковайкина

Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук,
109428, Москва, Рязанский просп., 24/1
E-mail: ezdakova.i@viev.ru

Врожденный иммунитет играет важную роль в защите организма от патогенных микроорганизмов. Сегодня широко обсуждаются значение его структур при вакцинации. Цель исследования – изучение динамики иммунологических показателей в процессе иммунного ответа на различные типы вакцин. Для проведения анализа уровней естественных антител в сыворотке крови овец и возможных корреляций их параметров с показателями врожденного иммунитета в процессе поствакцинального иммунного ответа после забора крови (фон), животных иммунизировали вакциной против бешенства (n=5) и сибирской язвы (n=5). В первые сутки иммунного ответа в крови овец опытных групп произошло небольшое увеличение tot-Ig, возросло количество нейтрофилов, а число лимфоцитов уменьшилось. На 7-е сутки концентрация tot-Ig, в состав которых входят специфические антитела к антигенам вакцин против бешенства и сибирской язвы, увеличилась в 2 раза, по сравнению с фоновыми значениями. Однако концентрация NAb немного повысилась только в первые сутки иммунного ответа на вакцину против сибирской язвы. У животных вне зависимости от введенной вакцины постоянно сохранялась отрицательная корреляция между числом лимфоцитов и нейтрофилов ($r = -0,88 \pm 0,02$). Как и в контроле ($r = -0,48$), сохранялась отрицательная корреляция между показателями Nф/NAb ($r = -0,52$; $r = -0,76$) у опытных групп, что указывает на несинхронность активации фагоцитов и синтеза естественных антител. Установлена корреляционная взаимосвязь Лф/NAb в процессе иммунного ответа на вакцину против бешенства ($r = 0,5$) и сибирской язвы ($r = 0,7$), и ее отсутствие в контроле ($r = 0,16$), что свидетельствует о реакции естественных антител на чужеродный антиген. Корреляции Лф/NAb ($r = 0,7$) и Лф/tot-Ig ($r = 0,8$) были выше в динамике иммунного ответа на вакцину против сибирской язвы, чем против бешенства ($r = 0,5$). По всей видимости, сывороточные NAb к KLH, которые включают различные изоформы Ig, могут отражать врожденную гуморальную иммунную компетентность.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE INDICATORS OF NATURAL ANTIBODIES, TOTAL IMMUNOGLOBULINS AND IMMUNOCOMPETENT BLOOD CELLS OF SHEEP IN THE PROCESS OF POST-VACCINATION IMMUNE RESPONSE

I. Yu. Ezdakova, O. V. Kapustina, A. G. Grigoriev, V. M. Kovaikina

Federal Research Center – All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary Medicine named K. I. Scriabin and
Ya. R. Kovalenko of the Russian Academy of Sciences,
109428, Moskva, Ryazanskii prosp., 24/1
E-mail: ezdakova.i@viev.ru

Innate immunity plays an important role in protecting the body from pathogenic microorganisms. The significance of its structures in vaccination is currently widely discussed. The purpose of the research was to study the dynamics of immunological parameters during the immune response to various types of vaccines. The paper analyzes the levels of natural antibodies in the blood serum of sheep and considers possible correlations with indicators of innate immunity during the post-vaccination immune response. After blood sampling (background), the animals were immunized with rabies (n=5) and anthrax (n=5) vaccines. On the first day of the immune response in the blood of the sheep of the experimental groups, there was a slight increase in tot-Ig, the number of neutrophils increased, and the number of lymphocytes decreased. It was found that on the seven day the concentration of tot-Ig, which also includes specific antibodies to the antigens of vaccines against rabies and anthrax, increased by 2 times compared to the background values. However, the NAb concentration slightly increased only on the first day of the immune response to the anthrax vaccine. In animals, regardless of the vaccine administered, a negative correlation between the number of lymphocytes and neutrophils was constantly maintained ($r = -0.88 \pm 0.02$). As well as in the control ($r = -0.48$), the negative correlation between neutrophils /NAb ($r = -0.52$; $r = -0.76$) remained, which indicates the activation of phagocytes and the synthesis of natural antibodies. On the other hand, a correlation relationship between lymphocytes/NAb was established during the immune response to the vaccine against rabies ($r = 0.5$) and anthrax ($r = 0.7$), and the absence of this relationship in the control ($r = 0.16$), which indicates the reaction of natural antibodies to a foreign antigen. The correlations of lymphocytes/NAb ($r = 0.7$) and lymphocytes/tot-Ig ($r = 0.8$) were higher in the dynamics of the immune response to the anthrax vaccine than to the rabies vaccine ($r = 0.5$). It appears that serum anti-KLH NAbs, which include various Ig isotypes, may reflect innate humoral immune competence.

Ключевые слова: естественные антитела, овцы, иммуноглобулины, вакцины, иммунный ответ, корреляции.

Key words: natural antibodies, sheep, immunoglobulins, vaccines, immune response, correlations.

Врожденный иммунитет играет важную роль не только в предотвращении инфекции, но и в поствакцинальном иммуногенезе. Один из основных гуморальных компонентов врожденной иммунной системы – естественные антитела (NAb) [1]. На сегодняшний день накоплен большой материал о важной роли естественных антител в иммунных реакциях организма [2, 3]. NAb реагируют с ДНК, фософлипидами, гистонами, различ-

ными компонентами клеток. Исследования взаимосвязи между уровнями NAb и приобретенным иммунным ответом у животных продемонстрировали положительную корреляцию между уровнями NAb и специфических антител (SpAb) [4].

Естественные антитела представляют собой полиреактивные иммуноглобулины (Ig), которые синтезируются В-клетками на антигены собственного организма, и такие

филогенетически консервативные структуры микроорганизмов, как патоген-ассоциированные молекулярные паттерны (РАМР) [5]. К важным РАМР относят липополисахариды, липотейхоевая кислота и пептидогликан, присутствующие на грамотрицательных и грамположительных бактериях. Но в действительности довольно трудно различить NAb от SpAb, так как и те и другие антитела взаимодействуют с РАМР микроорганизмов. Поэтому для определения естественных антител в сыворотке крови овец обычно используют гемоцианин гемолимфы морского моллюска *Megathura crenylata* (KLH), с которым животные ранее не встречались.

NAb могут быть различных изотипов, но в основном они представлены IgM, которые продуцирует субпопуляция В1-клеток. Взаимодействие естественных антител с антигеном приводит к опсонизации патогена, активизации фагоцитоза, индукции антигенозависимой клеточной цитотоксичности, активации комплемента по классическому пути и лизису. Эффекторная активность антител связана с передачей сигнала с V- на С-домены Ig, что индуцирует связывание Fc-фрагмента с Fc-рецептором клетки [6]. С другой стороны, специфические антитела синтезируются субпопуляцией В2-клеток в ответ на определенный чужеродный антиген и распознают только его. В отличие от них, NAb характеризуются широким репертуаром специфичности, включая собственные и чужеродные структуры, такие как углеводы и гликолипиды, обычно с низкой аффинностью [7]. Специфические антитела высокоаффинны, но более ограничены в распознавании антигенов, чем NAb. Благодаря своей полиреактивности NAb играют уникальную роль в иммунной системе. Их высокие уровни в сыворотке крови связаны с повышенной выживаемостью кур-несушек и овец, а у коров концентрация NAb в молоке положительно связана с устойчивостью к маститу. Высокие уровни полиреактивных NAb в сыворотке и слизистой оболочке млекопитающих и птиц свидетельствуют о важных эффекторных и регуляторных иммунных функциях. Результаты исследований свидетельствуют, что NAb выступают в качестве первой линии защиты от патогенов и их оценка представляет собой потенциальный маркер состояния здоровья животных [8, 9]. Понимание роли NAb во врожденных и адаптивных реакциях иммунной системы организма может иметь решающее значение для производства эффективных вакцин, разработки новых методов иммунодиагностики.

Вместе с тем, по данным Sinyakov M. S. et al (2006), что уровень специфических антител может отрицательно коррелировать с уровнями NAb. Естественные антитела могут связываться со специфическим антигеном и препятствовать специфическому взаимодействию, которое более эффективно из-за аффинности SpAb. Следствием этого может быть неэффективность вакцины, которая связана с использованием определенных антигенов, на которые уже в организме существуют естественные антитела.

Ранее мы установили, что поствакцинальный иммунный ответ на различные по молекулярной структуре антигены значительно отличается в количественной динамике показателей иммунокомпетентных клеток крови и сывороточных иммуноглобулинов [10, 11]. Сведения о динамике NAb и их взаимосвязи с общими иммуноглобулинами (tot-Ig) в печати крайне малочисленны.

Цель исследования – изучение динамики естественных и общих иммуноглобулинов в циркулирующей крови овец и их взаимосвязи с показателями иммунокомпетентных клеток врожденного (нейтрофилы) и адаптивного (лимфоциты) иммунитета в процессе поствакцинального иммунного ответа на различные типы вакцин для поиска новых диагностических критериев оценки формирования механизмов иммунного ответа.

Методика. После забора крови (фон) животных иммунизировали. Овцам романовской породы (n=5) первой опытной группы подкожно вводили антирабическую вакцину (по 3,0 мл), второй (n=5) – вакцину против сибирской язвы (1,0 мл). Особям контрольной группы вводили физиологический раствор. На 1-е, 3-и, 5-е, 7-е, 9-е сутки после инъекции определяли относительное содержание иммунокомпетентных клеток крови и уровень NAb и tot-Ig в сыворотке крови. Животные содержались в соответствии с ГОСТ 33215-2014.

Уровни NAb определяли методом непрямого ТФ ИФА. Планшеты для микротитрования сенсibilизировали антигеном, против которых овцы иммунологически наивны. В качестве антигена использовали Keyhole Limpet Hemocyanin (KLH) гемоцианин гемолимфы морского моллюска *Megathura crenylata* (MP Biomedicals, Solon, OH). Исследуемые сыворотки овец вносили в разведении 1:200. В качестве вторичных антител использовали конъюгированные с пероксидазой хрена IgG кролика против Ig овец. Для эксперимента были отобраны животные, у которых оптическая плотность (ОП₄₀₅) NAb в сыворотке крови была в пределах 1,3...1,5.

Общий уровень иммуноглобулинов (tot-Ig) определяли в реакции простой радиальной иммунодиффузии, относительное количество лейкоцитов в крови овец – по стандартной методике. Для изучения функциональных связей в процессе поствакцинального иммунного ответа использовали корреляционный анализ показателей иммунокомпетентных клеток крови и уровня сывороточных иммуноглобулинов (tot-Ig, NAb). Ход и порядок исследования был одобрен Комиссией по биотехнике ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН (протокол № 3 от 23.01.2023 г.).

Результаты и обсуждение. В первые сутки иммунного ответа количество нейтрофилов в крови животных опытных групп возрастало, а число лимфоцитов уменьшалось (см. табл.). Этот процесс может быть связан с перераспределением лимфоцитов из системной циркуляции в лимфоидные органы, где происходит дифференцировка В-лимфоцитов в плазматические клетки.

Количественная характеристика иммунологических показателей в процессе поствакцинального иммунного ответа

Показатель	фон	1-е сутки	3-и сутки	5-е сутки	7-е сутки	9-е сутки
1 группа (антирабическая вакцина)						
tot-Ig, мг/мл	12,0±0,4	16,0±1,0	10,0±0,8	12,0±1,5	24,5±1,9*	24,5±1,3*
Нейтрофилы, %	34,7±1,4	51,0±10,2	38,0±7,7	39,0±10,0	45,6±5,4	38,3±5,3
Лимфоциты, %	62,3±1,7	35,7±9,3	48,3±6,3	57,0±9,0	37,0±4,5	45,6±0,6
2 группа (вакцина против сибирской язвы)						
tot-Ig, мг/мл	10,0±1,2	12,0±3,0	12,0±1,4	24,5±6,5*	24,5±4,0*	24,5±2,5*
Нейтрофилы, %	38,6±6,0	62,3±9,7	67,3±4,6	47,6±8,8	52,6±3,3	52,0±5,1
Лимфоциты, %	59,0±6,2	31,3±9,3	23,6±5,8*	45,0±7,5	34,0±3,5	39,6±4,7

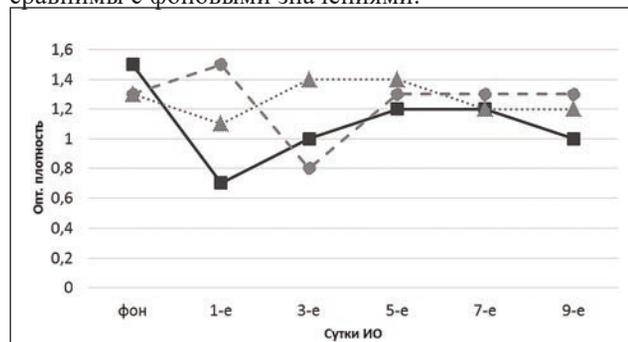
*различия, по сравнению с фоновым значением, достоверны $p < 0,05$.

Одновременно у животных опытных групп произошло небольшое увеличение tot-Ig, что связано с активацией всех компонентов иммунной системы в ответ на введение чужеродного антигена. Далее в опытных группах овец наблюдали увеличение концентрации tot-Ig в сыворотке крови, но во второй группе ее повышение зарегистрировано на 5-е сутки, а в первой группе только на 7-е сутки поствакцинального иммунного ответа. В контрольной группе в крови овец количество нейтрофилов в течение 10 суток наблюдений не превышало 36,0 %, лимфоцитов – не опускалось ниже 55,0 %. Уровень общих иммуноглобулинов в контрольной группе был сравним с фоновыми показателями в опытных группах овец.

Так как естественные антитела играют важную роль в первой линии защиты животных от патогенов, попавших в организм, показатели NAb могут отражать состояние естественной резистентности. Естественные антитела, связывающиеся с KLN, не будут непосредственно защищать от бактериальных и вирусных инфекций, но как показывают эксперименты, их уровень коррелирует с устойчивостью животных к заболеваниям [2]. Здоровые особи, как правило, не обладают одинаковой устойчивостью к инфекциям. Различия в показателях естественных антител у отдельных животных могут быть вызваны факторами окружающей среды (условия содержания, включая рацион питания, воздействие бактерий), а также эндогенными факторами, такими как генетический фон.

Известно, что в процессе иммунного ответа на экзоантиген уровень специфических антител повышается в течение 7...14 дней, а затем снижается. В результате проведенных исследований установлено, что концентрация tot-Ig, в состав которых входят и специфические антитела к антигенам вакцин против бешенства и сибирской язвы, к 9-м суткам иммунного ответа увеличилась в 2 раза, по сравнению с фоновыми значениями (см. табл.).

Однако концентрация NAb немного повысилась только на первые сутки иммунного ответа на вакцину против сибирской язвы. После введения инактивированной вакцины против бешенства на первые сутки иммунного ответа уровень NAb уменьшился в 2 раза, затем немного повысился, но до фоновых показателей так и не поднялся (см. рисунок). Показатели естественных антител после введения живой вакцины против сибирской язвы (штамм 55) на первые сутки иммунного ответа увеличились на 15 %, однако на 3-и сутки величина этого показателя уменьшилась на 50 %. Затем параметры NAb сывороток крови овец, иммунизированных вакциной против сибирской язвы, стали сравнимы с фоновыми значениями.



Динамика NAb в процессе поствакцинального иммунного ответа: ■ — бешенство; ■ — сибирская язва; ▲ — контроль.

Иммунная система состоит из огромного количества структурных компонентов, постоянно обменивающихся информацией для эффективной защиты организма. В этой связи следует отметить, что корреляции между иммунологическими показателями, определяемые как сильные устойчивые, показывают степень защитного ответа на поступающие чужеродные внешние сигналы [12].

В результате проведенных исследований установлено, что у животных в процессе поствакцинального иммунного ответа вне зависимости от введенной вакцины постоянно сохранялась отрицательная корреляция между числом лимфоцитов и нейтрофилов ($r = -0,88 \pm 0,02$). Это конституционные константы, то есть обязательное условие нормального функционирования иммунной системы, изменение величины и направленности корреляционных пар нейтрофилов/лимфоциты (Нф/Лф) свидетельствуют о нарушении иммунорегуляции в организме. Иммунизация не привела к уменьшению коэффициента корреляции Нф/Лф, по сравнению с контролем, что может служить критерием прогноза эффективности вакцинации. Так, введение вакцины против бешенства ($r = -0,81$) и сибирской язвы ($r = -0,95$) привело к увеличению константы Нф/Лф, по сравнению с контрольными значениями ($r = -0,79$). В процессе поствакцинального иммунного ответа, как и в контроле ($r = -0,48$), сохранялась отрицательная корреляция Нф/NAb ($r = -0,52$; $r = -0,76$), что указывает на несинхронность активации фагоцитов и синтеза естественных антител. С другой стороны, установлена корреляционная взаимосвязь Лф/NAb в процессе иммунного ответа на вакцину против бешенства ($r = 0,5$) и сибирской язвы ($r = 0,7$), при отсутствии такой связи в контроле ($r = 0,16$), что свидетельствует о реакции естественных антител на чужеродный антиген.

Взаимосвязь между показателями естественных антител в сыворотке крови овец 1 и 2 группы была незначительной ($r = 0,27$), а между общими иммуноглобулинами коэффициент корреляции составлял 0,58. Корреляции Лф/NAb ($r = 0,7$) и Лф/tot-Ig ($r = 0,8$) были выше в динамике иммунного ответа на вакцину против сибирской язвы, чем на вакцину против бешенства ($r = 0,5$).

Это подтверждает различные пути антителообразования после вакцинации и согласуется с известными данными о приоритете гуморальной защиты при бактериальных инфекциях. По всей видимости, сывороточные NAb к KLN, которые включают изотипы M, G и A, могут отражать врожденную гуморальную иммунную компетентность, а также различные эффекторные функции антител. Дальнейшие исследования должны показать, является ли вариабельность показателей естественных антител прогностической для оценки уровня иммунокомпетентности организма.

Выводы. Синтез естественных антител увеличивался только в первые сутки иммунного ответа на живую вакцину, что показывает быструю реакцию NAb на этот антиген. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о ареактивности естественных антител в ответ на антигенную стимуляцию инактивированной вакциной. Положительные корреляции между показателями естественных антител, общих иммуноглобулинов и лимфоцитов ($r = 0,8$), а также отрицательные функциональные взаимосвязи между параметрами нейтрофилов и лимфоцитов ($r = -0,95$) в крови овец могут служить диагностическим ориентиром в оценке поствакцинального иммунного ответа. На основании результатов исследования можно констатировать, что уровень NAb и корреляционные константы (Нф/Лф) могут служить прогностическими параметрами для оценки состояния иммунной системы и механизмов формирования иммунного ответа при разработке новых вакцин.

Литература.

1. Зиганишина М.М., Бовин Н. В., Сухих Г. Т. Естественные антитела как ключевой элемент механизма поддерживающего гомеостаз в иммунной системе // *Иммунология*. 2013. № 5. С.277–282.
2. Cecchini S., Rufrano D., Caputo A. R. Natural antibodies and their relationship with total immunoglobulins and acquired antibody response in goat kid (*Capra hircus*, L. 1758) serum//*Vet. Immunol. Immunopathol.* 2019. Vol.211. P. 38–43. doi:10.1016/j.vetimm.2019.04.004.
3. Bovine natural antibodies in antibody-dependent bactericidal activity against *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* and risk of mastitis/S.E.C. van Altena, M. A. Peen, F.H. van der Linden, et al. // *Vet. Immunol. Immunopathol.* 2016. Vol. 171. P. 21–27. doi:10.1016/j.vetimm.2016.01.009
4. Thompson-Crispi K. A., Miglior F., Mallard B. A. Genetic parameters for natural antibodies and associations with specific antibody and mastitis in Canadian Holsteins// *J. Dairy Sci.* 2013. Vol. 96. P. 3965–3972. doi:10.3168/jds.2012-5919
5. Субпопуляции В-лимфоцитов: функции и молекулярные маркеры/ А. А. Лушова, Э. А. Жеремян, Е. А. Астахова и др. // *Иммунология*. 2019. № 40(6). С. 63–76. doi: 10.24411/0206-4952-2019-16009
6. Мяжкова М. А., Морозова В. С., Петроченко С. Н. Роль естественных аутоантител в норме и при патологии// *Имунопатология, аллергология, инфектология*. 2016. № 1. С. 20–26. doi: 10.14427/jipai.2016.1.20
7. Gualandi C. Relation between redox potential and natural antibody levels in goat kid serum// *Veterinary Immunology and Immunopathology*. 2022. Vol. 254. P. 110517. doi: 10.1016/j.vetimm.2022.110517
8. Relationship between natural antibodies and postpartum uterine health in dairy cows/ V. S. Machado, M.L.S. Bicalho, R. O. Gilbert et al. // *J. Dairy Sci.* 2014. Vol. 97. P. 7674–7678. doi:10.3168/jds.2014-8393.
9. Effects of dry period length and dietary energy source on inflammatory biomarkers and oxidative stress in dairy cows/ N. Mayasari, J. Chen, A. Ferrari et al.// *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. P. 4961–4975. doi:10.3168/jds.2016-11857.
10. Ассоциации между показателями уровня IgG быков-производителей и естественного иммунитета их дочерей/ И. Ю. Ездакова, А. М. Гулюкин, М. А. Еремина и др.// *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 2. С. 68–72. doi: 10.31857/S2500262721020149
11. Еремина М. А., Ездакова И. Ю. Динамика естественных антител у коров в зависимости от срока стельности и происхождения// *Молочное и мясное скотоводство*. 2017. № 2. С. 34–36.
12. Отрицательная корреляция между естественными антителами человека, направленными к гликограммам Galβ1–3GlcNAc и Galβ1–4GlcNAc/ Н. В. Шилова, И. М. Рыжов, М. М. Зиганишина и др.// *Биоорганическая химия*. 2020. 46. № 6. С. 746–752. doi: 10.31857/S0132342320060299

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 22.08.2023