

ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧИСТОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ФОТОСИНТЕЗА, НИТРОГЕНАЗНОЙ АКТИВНОСТИ И ПОЛЕВОЙ ВСХОЖЕСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ СОИ И ИХ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ С ОСНОВНЫМИ ВЕГЕТАЦИОННЫМИ ИНДЕКСАМИ

М.А. Мартынов, научный сотрудник

А.А. Полухин, доктор экономических наук, профессор РАН

С.В. Кирюхин, кандидат сельскохозяйственных наук

ФГБНУ ФНЦ Зернобобовых и крупяных культур, Орёл, Россия

E-mail: office@vniizbk.ru

Ключевые слова: соя, чистая продуктивность фотосинтеза, селекционный процесс, нитрогеназная активность, полевая всхожесть, вегетационные индексы, фотосинтез, азотофиксация.

Реферат. В статье представлена часть опыта по изучению селекционного материала сои на полях Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур». Исследования проводились в годы, характеризующиеся контрастными (различными) метеословиями, а представленные в исследовании сорта и селекционные номера различались между собой по признакам типа роста, скороспелостью и ветвистостью. Отображены такие признаки, как чистая продуктивность фотосинтеза и нитрогеназная активность, исследованные в фазу образования бобов. Определены сортообразцы, имеющие в фазу образования бобов в 2022 и 2023 гг. наибольшие показатели чистой продуктивности фотосинтеза, а также отмечены селекционные номера с низкой чистой продуктивностью фотосинтеза. Определена нитрогеназная активность изучаемых сортообразцов в фазу образования бобов в 2022 и 2023 гг. Выявлены сортообразцы, обладающие наибольшей нитрогеназной активностью, а также селекционные номера, имеющие низкие значения данного показателя. Обнаружены генотипы сои, у которых нитрогеназная активность в фазу образования бобов имеет минимальную годовую вариацию, что в перспективе можно применить для дальнейшей селекции. Вычислены корреляционные зависимости между чистой продуктивностью фотосинтеза, нитрогеназной активностью, полевой всхожестью и вегетационными индексами (NDVI, NDRE, ClGreen, GNDVI, MCARI), а также определена фаза развития сои, при которой вегетационные индексы наиболее оптимально применимы для оценки всхожести.

STUDY OF NET PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY, NITROGENASE ACTIVITY AND FIELD GERMINATION FOR DIFFERENT SOYBEAN GENOTYPES AND THEIR CORRELATIONS WITH THE MAIN VEGETACINON INDICES

M.A. Martynov, researcher

A.A. Polukhin, Doctor of Economics, Professor of the Russian Academy of Sciences

S.V. Kiryukhin, Candidate of Agricultural Sciences

Federal State Budgetary Institution Federal Research Center of Leguminous and Cereal Crops, Orel, Russia

E-mail: office@vniizbk.ru

Keywords: soybean, net photosynthetic productivity, breeding process, nitrogenase activity, field germination, vegetation indices, photosynthesis, nitrogen fixation.

Abstract. The article presents part of the experience in the study of soybean breeding material in the fields of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Legumes and Groat Crops». The studies were conducted in years characterized by contrasting (different) weather conditions, and the varieties and breeding numbers presented in the study differed among themselves in the traits of growth type, precocity and branching. The traits such as net photosynthetic productivity and nitrogenase activity investigated in the bean formation phase were depicted. The cultivars with the highest net photosynthetic productivity at the bean formation phase in 2022 and 2023 were identified, and breeding numbers with low net photosynthetic productivity were noted. Nitrogenase activity of the studied cultivars in the phase of bean formation in 2022 and 2023 was

determined. Variety samples possessing the highest nitrogenase activity were identified, as well as selection numbers with low values of this indicator. Soybean genotypes with minimal annual variation of nitrogenase activity in the phase of bean formation were found, which can be used for further selection in the future. Correlations between net photosynthetic productivity, nitrogenase activity, field germination and vegetation indices (NDVI, NDRE, CIGreen, GNDVI, MCARI) were calculated, and the phase of soybean development at which vegetation indices are most optimally applicable for germination assessment was determined.

Увеличение производства сои в мире становится возможным благодаря более интенсивной работе в области селекции и семеноводства. В России усиление процессов, направленных на расширение производства сои, имеет лимитирующие факторы – контрастные погодные условия и необходимость внедрения новых перспективных сортов [1]. Фотосинтез считается одним из перспективных направлений в селекционной работе, являясь источником восполняемой энергии на земле, который обеспечивает жизнедеятельность растительных организмов [2, 3]. Фотосинтез предоставляет энергию для процесса азотификации, в то же время действие клубеньковых бактерий имеет влияние на интенсивность фотосинтетических процессов [4]. В связи с этим изучение симбиотической деятельности сои также важно в селекционном процессе [5]. Перспективным направлением в сельскохозяйственных исследованиях является использование вегетационных индексов, получаемых с помощью беспилотных летательных аппаратов [6, 7]. Определение полевой всхожести – достаточно трудоемкий процесс, требующий затрат времени и личного присутствия на поле. Изучение корреляционных зависимостей между индексами, полученными в различные фазы роста сои и полевой всхожестью, позволит в перспективе получить инструмент для более быстрой оценки этого параметра.

Цель работы: изучить показатели чистой продуктивности фотосинтеза, нитрогеназной активности и полевой всхожести различных сортообразцов сои, найти корреляционные связи между изучаемыми признаками и основными вегетационными индексами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые опыты были заложены в селекционном севообороте Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур» (ФГБНУ ФНЦ ЗБК) на базе селекционно-семеноводческого центра сои в период с 2022 по 2023 гг. с таким предшественником, как чистый пар. Зяблевая вспашка проводилась в сентябре на глубину 23–25 см. Весной было проведено боронование средними боронами в два следа, культивация почвы – на глубину 6–8 см с последующим прикатыванием кольчато-шпоровыми катками, предпосевная культивация – на глубину 5–6 см.

Агрохимическая характеристика почвы: почвы тёмно-серые лесные тяжелосуглинистые среднеокультуренные. Содержание гумуса – 4,71 %, что соответствует среднему содержанию. Почвы среднекислые pH HCl – 4,9. Содержание подвижных форм фосфора и калия – 225,8 мг/кг (высокое содержание) и 112,2 мг/кг почвы (среднее содержание) соответственно.

Исходный материал для выявления лучших доноров ценных признаков для последующей селекции подбирался с опорой на основные принципы моделирования сорта [8] и включал в себя разнообразные морфотипы по длительности вегетационного периода, высоте растения, типу роста, характеру ветвистости и динамике развития. Объектом исследования являлись 39 сортообразцов сои. Условно они были разделены по скороспелости на три группы: 2-я – группа ультроскороспелые (000), с вегетационным периодом 91–100 дней; 3-я группа очень скороспелые (00), с вегетационным периодом 101–110 дней; 4-я группа скороспелые (0), с вегетационным периодом 111–120 дней. Внутри групп спелости шло деление по типу роста (детерминантный, индетерминантный), где, в свою очередь, проходило деление по характеру ветвистости (ветвистый, ограниченноветвистый). Сорта СК Дока, Белгородская 7, Зуша, ЕС Командор являлись полудетерминантными и в работе рассматривались в одних подгруппах с детерминантными сортообразцами (табл. 1).

Растения сои высевались широкорядным способом с междурядьями 45 см в четырехкратной повторности, методом систематизированного размещения. Площадь делянок – 10 м², норма высева всхожих семян – 600 тыс. шт./га. Посев осуществлялся сеялкой Клен-1,5. Опыт закладывался согласно методическим рекоменда-

циям Б.А. Доспехова [9]. Сев опытных делянок в 2022 г. проведен 26 мая, в 2023 г. – 11 мая.

Уход за посевами выполняли в соответствии с рекомендуемыми для региона мероприятиями.

Полевую всхожесть оценивали по методике проведения агротехнических исследований в опытах с масличными культурами [10].

Таблица 1

Характеристика опытного материала
Characteristics of the experimental material

Сортообразец	Год регистрации заявки на допуск	Год включения в реестр	Учреждение-оригинатор	Регион допуска
1	2	3	4	5
2-я группа спелости				
<i>Ветвистые индетерминанты</i>				
ОАК Пруденс	2011	2015	HURON COMMODITIES INC (Канада)	5, 7, 12
Мезенка	2012	2016	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	5, 10
СибНИИК 315	1987	1991	СФНЦА РАН	4, 7, 9, 10, 11
<i>Ограниченно ветвистые индетерминанты</i>				
ОАК Визион	–	–	SECAN ASSOCIATION (Канада)	–
Тайга	2015	2019	SEVITA GENETICS (Канада)	12
Кураж	2023	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	3, 5
<i>Ветвистые детерминанты/полудетерминанты</i>				
СК Дока	2017	2020	ООО КОМПАНИЯ «СОЕВЫЙ КОМПЛЕКС»	5, 6, 9, 10
Белгородская 7	2008	2011	ФГБОУ ВО БЕЛГОРОДСКИЙ ГАУ	5
Чера 1	2006	2009	ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока	4, 7
<i>Ограниченно ветвистые детерминанты</i>				
Алиса	2019	2022	ООО «АСТ»	3
Ланцетная	2001	2005	ФГБНУ ФНЦ ЗБК, ФГБОУ ВО БЕЛГОРОДСКИЙ ГАУ	3, 5
Орлея	2021	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	3, 5
3-я группа спелости				
<i>Ветвистые индетерминанты</i>				
Осмонь	2015	2018	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	5
ЭН Аргента	2017	2020	ООО «ЭКОНИВА-СЕМЕНА»	3, 5, 7
Зельда	–	–	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	–
Шатиловская 17	2017	2020	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	5
<i>Ограниченно ветвистые индетерминанты</i>				
Эльта	–	–	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	–
СГ 20	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–
<i>Ветвистые детерминанты</i>				
Аляска	2014	2017	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	5
Л 85	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–

1	2	3	4	5
<i>Ограниченноветвистые детерминанты</i>				
СГ 50 №3	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–
Лидер 1	2016	2019	ООО «АСТ»	5
Оникс 57	2022	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	
СГ 58 №2	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–
4-я группа спелости				
<i>Ветвистые индетерминанты</i>				
Слава	2022	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	5, 6
Сирелия	2016	2019	SOCIETE RAGT 2N S.A.S. (Франция)	5, 6
ЕС Навигатор	2014	2017	LIDEA FRANCE (Франция)	5, 12
<i>Ограниченно ветвистые индетерминанты</i>				
Лидер 10	2017	2020	ООО «АСТ»	5
Амадеус	2014	2017	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	5, 6, 12
СГ 39	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–
СГ 39 №2	–	–	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	–
Антигуа	–	–	SAATBAU LINZ (Австрия)	–
<i>Ветвистые детерминанты/полудетерминанты</i>				
Белгородская 48	1988	1992	ФГБОУ ВО БЕЛГОРОДСКИЙ ГАУ	5
Зуша	2011	2015	ФГБНУ ФНЦ ЗБК	5
Асука	2014	2017	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	5, 6, 12
<i>Ограниченно ветвистые детерминанты/полудетерминанты</i>				
ЕС Командор	2015	2018	LIDEA FRANCE (Франция)	5, 6
Максус	2013	2014	SEMENCES PROGRAIN INC (Канада)	5, 6
Припять	2003	2007	ООО «СОЯ–СЕВЕР КО» (Белоруссия)	2, 3, 5
Устя	2010	2015	ННЦ «Институт земледелия УААН» (Украина)	5

При оптической оценке растительного покрова сои использовали квадрокоптер DJI Matrice 200 v2 с установленной ГНСС L1/L2 антенной. Дрон с пыле- и влагозащитой способен осуществлять полеты при скорости ветра до 20 м/с. Квадрокоптер оснащен модифицированной камерой DJI X4S 20Mp (5 472 × 3 648) с трехосевым стабилизатором. Полеты осуществлялись с помощью мобильного приложения DJI Pilot. При помощи специального подвеса устанавливалась мультиспектральная камера MicaSense Altum с сенсором освещенности, имеющим встроенный GPS-приемник. Камера одновременно делает снимки в шести каналах: blue (B) (475 nm center, 32 nm bandwidth), green

(G) (560 nm center, 27 nm bandwidth), red (R) (668 nm center, 16 nm bandwidth), red edge (RE) (717 nm center, 12 nm bandwidth), near-IR (NIR) (842 nm center, 57 nm bandwidth) и LWIR (thermal infrared 8–14 μm). Разрешение спектральных каналов 3.2 MP (2 064 × 1 544) и термального 6 канала: 160 × 120.

Для получения высокоточных данных использовался мультиспектральный GNSS-приемник EMLID Reach RS2. Подключение происходило к базовой станции «OREL» в Орловской области, расположенной на расстоянии менее 20 км. Для проверки точности данных использовались десять контрольных точек (GCP) размером 50*50. GCP были равномерно расположены на поле

с учетом перепадов высот. Точные координаты контрольных точек были зафиксированы с помощью мультимастотного геодезического приемника EMLID Reach RS2 в режиме Survey. Мониторинг посевов осуществлялся на высоте 50 м. Фотограмметрическая обработка данных осуществлялась в программном обеспечении Pix4DMapper. Для обработки rgb-данных использовался шаблон 3D Maps, при обработке мультиспектральных данных использовали шаблон Ag Multispectral.

Фенологические наблюдения осуществляли, опираясь на методику проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами [11]. Отмечались фазы, начиная с появления всходов и заканчивая уборочной спелостью. Оценка велась каждые 2 дня.

Оценка морфологических и хозяйственных признаков проводилась в фазы бутонизации, цветения, образования бобов и полной спелости с помощью методики государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [12] и методических указаний по изучению коллекции зерновых бобовых культур [13].

Учет урожая зеленой массы и накопления сухого вещества выполнялся согласно методическим указаниям по проведению полевых опытов с кормовыми культурами [14].

Чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ) и фотосинтетический потенциал (ФП) рассчитывали согласно методике, предложенной А.А. Ничипоровичем с сотрудниками [15].

Нитрогеназную активность определяли этиленовым методом, предложенным Г.С. Посыпановым [16] с помощью хроматографа ФГХ-1.

Площадь ассимиляционной поверхности листьев определяли с помощью портативного измерителя площади листьев – LI-COR LI-3000C.

Содержание белка и жира семян определяли на приборе Infratec 1241 Grain Analyzer, работающем с цельным зерном без его размола с помощью инфракрасного сканирования.

Учёт урожайности осуществляли, опираясь на методику ВИР [17].

Уборку проводили в фазу уборочной спелости бобов комбайном Wintersteiger.

Лабораторный опыт по изучению особенности роста и развития растений сои в фазах VE и VC закладывался в климатической камере «Фитотрон ЛиА-2» методом рулонов, предусмотренным ГОСТ 12038–84 [18]. Опыт проводился в двух вариантах: оптимальных и стрессовых условиях. Первый вариант включал в себя проращивание семян и последующий рост растений при оптимальной температуре +20 °C в течение 14 сут. Второй вариант имитировал кратковременное похолодание: проращивание осуществлялось при температуре +20 °C, на 9-й день температура понижалась до +9,5 °C, на 12-й день вновь устанавливалось +20 °C. Дальнейший опыт длился до 14-го дня. Повторность трёхкратная. Температурные значения, а также продолжительность похолодания, используемые в опыте, были получены путем анализа средней десятилетней температуры в Орловской области в период сроков посева сои. Измерение длины побегов проводилось на 7-й и 14-й день.

Дисперсионный, корреляционный и вариационный анализы экспериментальных данных были проведены с помощью современных компьютерных программ и с учетом методических рекомендаций Б.А. Доспехова [9]. Для 39 испытываемых сортообразцов уровень достоверности сильной степени корреляции ($r = 0,7$) составляет 0,000015, что значительно меньше уровня значимости 0,05 (при ошибке корреляции $Sr = 0,17$).

Годы исследования характеризовались контрастными (различными) метеоусловиями. Метеоусловия вегетационного периода летом 2022 г. были благоприятными для развития сои и слабозасушливыми (ГТК = 1,01), однако осенний период отличался низкими температурами, вследствие чего созревание большинства сортов сои, представленных в опыте, замедлилось, а посевные качества полученных семян снизились (табл. 2). Погодные условия вегетационного периода 2023 г. были засушливыми (ГТК = 0,74), но обильные осадки в предшествующий осенне-зимний период и весной способствовали накоплению максимального запаса влаги в почве (табл. 2).

Таблица 2

Метеорологические условия за вегетационный период сои 2022 г.
 Meteorological conditions for the soybean growing season 2022

Месяц	Температура, °C		Сумма осадков, мм	
	Средняя многолетняя	Среднемесячная	Средняя многолетняя	Среднемесячная
Май (с 20.05.2022)	15,8	12,2	17	25
Июнь	17,9	19,0	65	53
Июль	19,9	19,1	87	63
Август	18,5	21,7	55	32
Сентябрь	13,0	9,9	55	111
Октябрь (до 10.10.2022)	8,6	10,6	19	44

Таблица 3

Метеорологические условия за вегетационный период сои 2023 г.
 Meteorological conditions for the soybean growing season 2023

Месяц	Температура, °C		Сумма осадков, мм	
	Средняя многолетняя	Среднемесячная	Средняя многолетняя	Среднемесячная
Май (с 11.05.2023)	15,8	17,0	17	9
Июнь	17,9	17,1	69	56
Июль	19,8	19,2	87	77
Август	18,5	20,3	54	45
Сентябрь (до 21.09.2023)	13,0	15,2	55	0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В фазу образования бобов была проведена оценка чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ) у изучаемых сортообразцов (рис. 1). В 2022 г. сорта Тайга и ЕС Командор, а также линии СГ 50 № 3, СГ 39 № 2 и Л 85 показали высокие (>15 г/м² в сутки) параметры ЧПФ. Низкой ЧПФ (2–2,5 г/м² в сутки) были отмечены сорта СК Дока, Зельда, ЕС Навигатор и Кураж, а также линии СГ-20 и СГ-58.

Наибольшими показателями ЧПФ в 2023 г. (> 9 г/м² в сутки) отличились сорта Устя, Антигуа, ЭН Аргента и Эльта. Сорта ОАК Пруденс, Белгородская 48, ЕС Навигатор, Тайга, а также линия СГ 50 № 3 имели низкие показателями ЧПФ (1,25–3 г/м² в сутки).

Наименьшей годовой вариацией ЧПФ ($C_v < 0,15$) отличились сорта ЕС Навигатор,

СибНИИК 315, Чера 1, Аляска, Оникс 57, Эльта, а наибольшей ($C_v > 0,8$) – сорта ОАК Пруденс, Белгородская 48, Тайга и линия СГ 50 № 3.

Определена нитрогеназная активность изучаемых сортообразцов в фазу образования бобов. Результаты представлены на рис. 2. По данным 2022 г., наименьшая нитрогеназная активность в фазу образования бобов наблюдалась у сортов Белгородская 7, ЭН Аргента, а также у линий Л 85 и СГ 50 № 3. Наибольшая активность была выявлена у сортов Белгородская 48, Зуша и Припять.

В 2023 г. минимальную нитрогеназную активность имели сорта СК Дока, СибНИИК 315, Чера 1 и Белгородская 7. Сорт Белгородская 7 на протяжении двух лет исследований демонстрирует низкие значения исследуемого показателя. Высокой активностью отличились сорта Максус, Эльта, Лидер 10 и Командор.

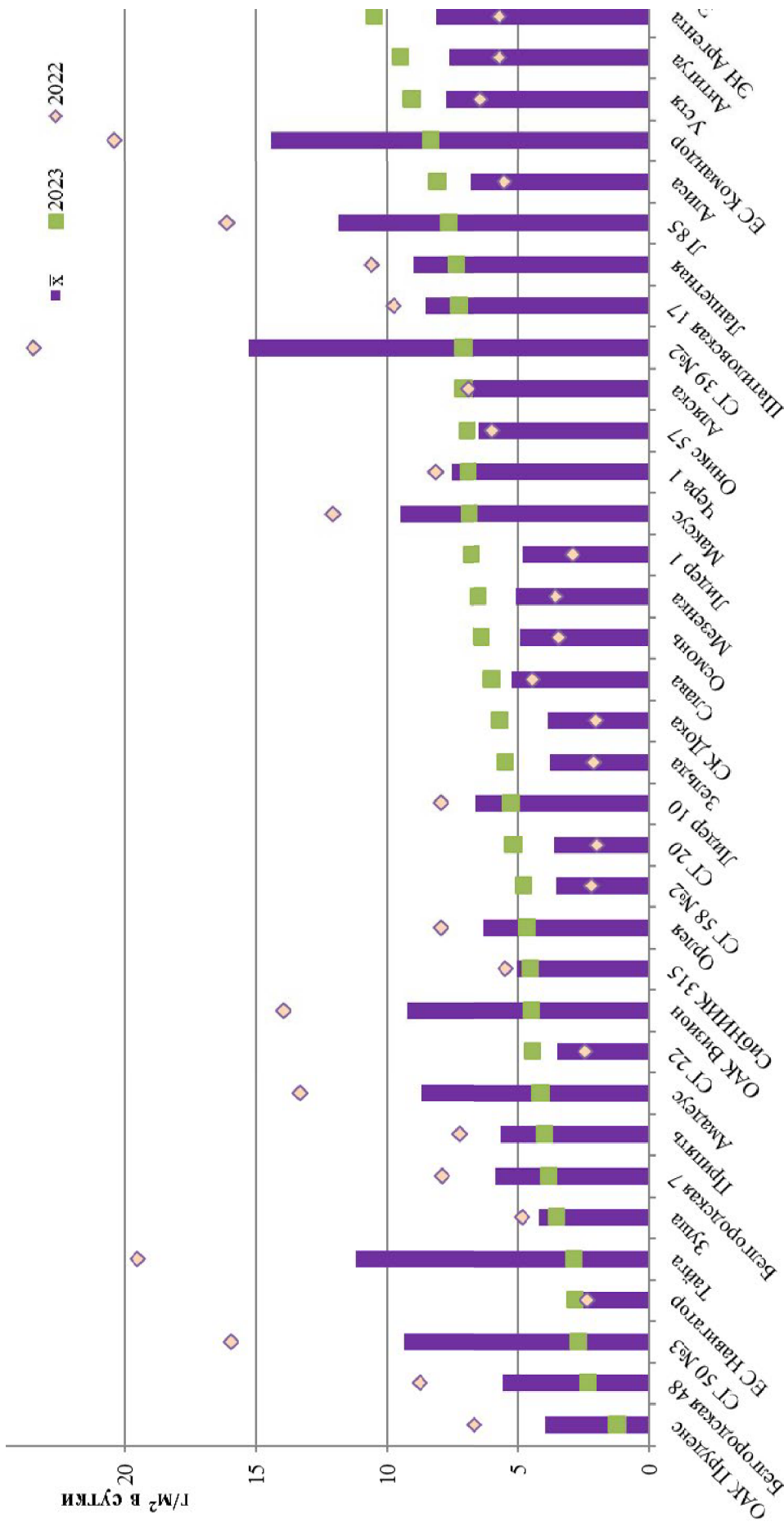


Рис. 1. Чистая продуктивность фотосинтеза изучаемых сортов бобов сои в фазу образования бобов
Net productivity of photosynthesis of the studied soybean varieties during the phase of bean formation

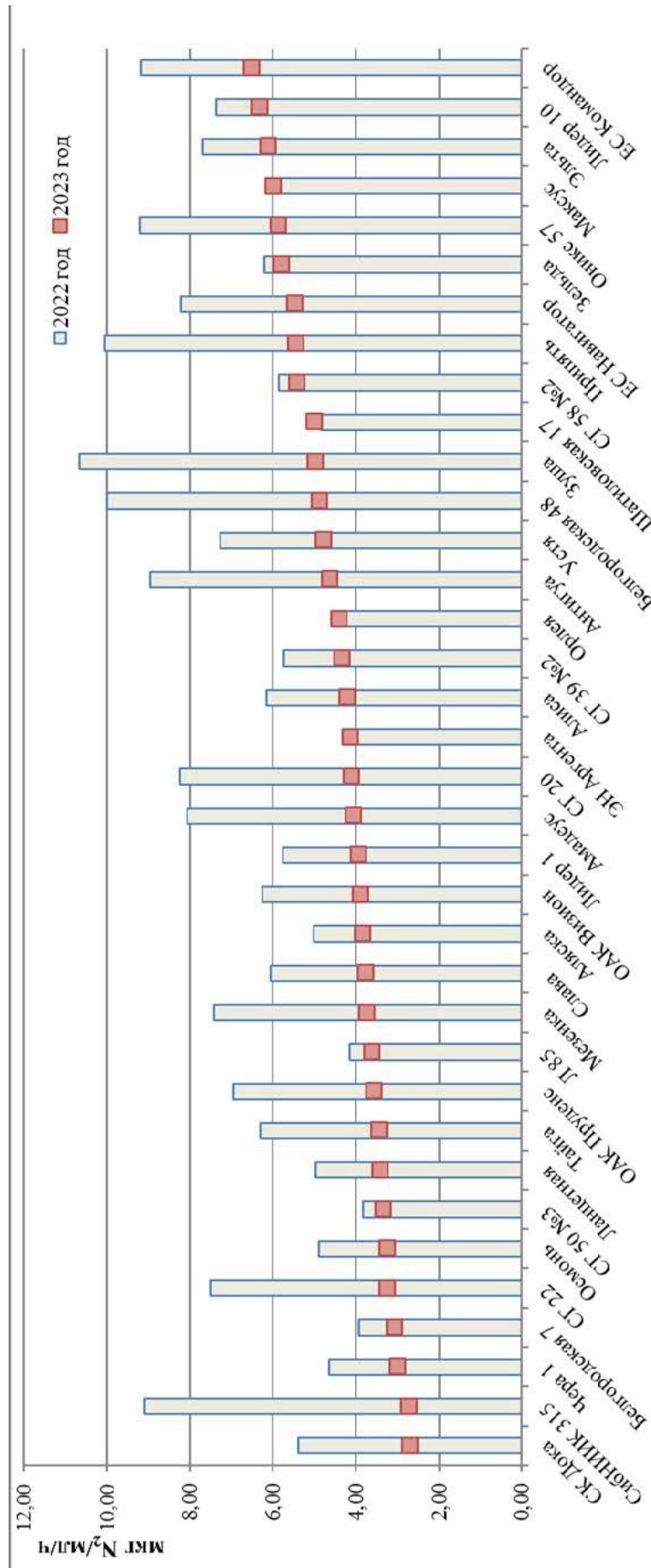


Рис. 2. Нитрогеназная активность сои в фазу образования бобов
Nitrogenase activity of soybeans during the bean formation phase

У изучаемого признака по годам наблюдалась средняя корреляция ($r = 0,45$). Наименьшая годовая вариация ($C_v < 0,1$) была отмечена у сортов ЭН Аргента, Орлея, Шатиловская 17, Зельда, Максус, а также у линий СГ 50 № 3, СГ 58 № 2 и Л 85.

По данным, полученным другими исследователями, симбиотические и фотосинтетические системы сои имеют тесную взаимосвязь. Вы-

сокие корреляции наблюдались между массой клубеньков, количеством клубеньков и ФП, фитомассой, содержанием хлорофилла [2]. После проведения корреляционного анализа изучаемых нами показателей, было обнаружено, что чистая продуктивность фотосинтеза и нитрогеназная активность имеют низкую зависимость ($-0,3-0,3$) (табл. 4).

Таблица 4

Корреляционная зависимость чистой продуктивности фотосинтеза от нитрогеназной активности
Correlation dependence of net photosynthetic productivity on nitrogenase activity

Нитрогеназная активность	ЧПФ 2022 г.	ЧПФ 2023 г.	ЧПФ $\bar{x}$
2022 г.	-0,14	-0,16	-0,19
2023 г.	0,07	0,24	0,16
$\bar{x}$	-0,07	-0,02	-0,07

Произведен корреляционный анализ между вегетационными индексами и различными показателями, полученными при проведении полевого опыта (чистая продуктивность фотосинтеза и нитрогеназная активность в фазе образования бобов, полевая всхожесть).

Показатели корреляционных зависимостей между вегетационными индексами и ЧПФ были незначительными ($-0,3-0,3$), за исключением индексов NDRE ($r = 0,36$), ClGreen ($r = 0,36$), GNVI ($r = 0,35$), Mscari ($r = -0,4$). Показатели были получены 11 августа, что совпадает с фазой налива зерна.

Между нитрогеназной активностью и вегетационными индексами корреляционная зависимость также была очень слабой ($-0,3-0,3$), за исключением индекса Mscari за 12 июля ($r = -0,36$) и 24 августа ($r = -0,38$).

Обнаружена сильная ($r > 0,7$) корреляция между полевой всхожестью и всеми вегетационными индексами, полученными 28 июня, что совпадает с фазой 3–4-го тройчатого листа сои, в то время как 16 июня (фаза 1-го тройча-

того листа) корреляционная зависимость была очень низкой ($r < 0,3$). К 12 июля наблюдается снижение корреляционной зависимости: по одним индексам (NDRE, ClGreen, GNDVI) она принимает среднее ($0,5 < r < 0,7$) значение, по другим (NDVI, Mscari) – низкое ($0,3 < r < 0,5$). Данная дата совпадает с фазой цветения сои, по ряду индексов ещё можно оценить полевую всхожесть, но менее точно, чем в предыдущую фазу. К 26 июля корреляции полевой всхожести и всех вегетационных индексов становятся слабыми ($0,3 < r < 0,5$) и очень слабыми ($r < 0,3$), соответствующая динамика сохраняется вплоть до 24 августа. Предположительно в фазу 1-го тройчатого листа съемка с дрона не позволяет оценить полевую всхожесть из-за разреженности посева на начальной стадии роста сои, в то время как начиная с фазы цветения посевы сои начинают загущаться, что также мешает оценке данного показателя. Следовательно, для оценки полевой всхожести можно использовать вегетационные индексы в фазу 3–4-го листа (табл. 5).

Таблица 5

Корреляционная зависимость полевой всхожести от вегетационных индексов
Correlation dependence of field germination on vegetation indices

Индекс	Дата					
	16 июня	28 июня	12 июля	26 июля	11 августа	24 августа
1	2	3	4	5	6	7
NDVI	0,11	0,73	0,34	0,12	0,10	0,21

1	2	3	4	5	6	7
NDRE	0,15	0,75	0,62	0,22	0,11	0,16
CIGreen	0,22	0,77	0,60	0,25	0,12	0,15
GNDVI	0,15	0,75	0,54	0,18	0,11	0,15
Mcarl	0,26	0,71	0,36	0,13	0,09	0,39

ВЫВОДЫ

1. Наибольшие показатели чистой продуктивности фотосинтеза в фазу образования бобов в 2022 г. имели сорта Тайга и ЕС Командор, а также линии СГ 50 № 3, СГ 39 № 2 и Л 85; в 2023 г. – сорта Устя, Антигуа, ЭН Аргента и Эльта. Низкой чистой продуктивностью фотосинтеза в фазу образования бобов в 2022 г. обладали сорта СК Дока, Зельда, ЕС Навигатор и Кураж, а также линии СГ-20 и СГ-58; в 2023 г. – сорта ОАК Пруденс, Белгородская 48, ЕС Навигатор, Тайга и линия СГ 50 № 3. Наименьшую годовую вариацию признака имели сорта ЕС Навигатор, СибНИИК 315, Чера 1, Аляска, Оникс 57, Эльта, а наибольшую – сорта ОАК Пруденс, Белгородская 48, Тайга и линия СГ 50 № 3.

2. Обнаружены генотипы сои, у которых нитрогеназная активность в фазу образования бобов имеет минимальную годовую вариацию: ЭН Аргента, Орлея, Шатиловская 17, Зельда, Максус, СГ 50 №3, СГ 58 № 2 и Л 85.

3. Значительных корреляций между показателями нитрогеназной активности и ЧПФ обнаружено не было.

4. Корреляционная зависимость между показателями ЧПФ и нитрогеназной активностью с вегетационными индексами колебалась на уровне слабой и очень слабой.

5. Между полевой всхожестью и вегетационными индексами, полученными в фазу 3–4-го листа, обнаружена высокая корреляция ($r > 0,7$), что в перспективе можно использовать для оценки всхожести с помощью беспилотных летательных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Создание высокопродуктивного сорта сои классическими методами селекции* / В.В. Толоконников, Т.С. Кошкарлова, Г.О. Чамурлиев [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 2 (62). – С. 87–93. – DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-09. – EDN ISIPGP.
2. *Зотиков В.И., Головина Е.В.* Взаимосвязь интенсивности азотфиксации и фотосинтеза у новых сортов сои северного экотипа // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2011. – № 3 (30). – С. 5–8. – EDN PONLOH.
3. *Quantifying high-temperature stress on soybean canopy photosynthesis: The unique role of sun-induced chlorophyll fluorescence* / H. Kimm, K. Guan, B. Peng [et al.] // Global Change Biology. – 2021. – Vol. 27, N 11. – P. 2403–2415. – DOI: 10.1111/gcb.15603. – EDN GHSEIQ.
4. *Интенсивность фотосинтеза листьев у сортов сои в зависимости от фазы роста и ярусного расположения* / А.В. Амелин, Е.И. Чекалин, В.В. Заикин [и др.] // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2017. – № 4 (24). – С. 53–58. – EDN ZWNYIH.
5. *Exploring Potential Soybean Bradyrhizobia from High Trehalose-Accumulating Soybean Genotypes for Improved Symbiotic Effectiveness in Soybean* / A. Bharti, H. S. Maheshwari, Sh. Garg [et al.] // Social Science Research Network. – 2022. – DOI: 10.2139/ssrn.4247386. – EDN KYZJCO.
6. *Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы* / С.Д. Вилунов, В.И. Зотиков, В.С. Сидоренко [и др.] // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2022. – № 3 (43). – С. 73–83. – DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83. – EDN MXTNXP.
7. *Kurbanov R. Zakharova N.* Justification and selection of vegetation indices to determine the early soybeans readiness for harvesting // E3S Web of Conferences : 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021, Rostov-on-Don, 24–26 февраля 2021 года. Vol. 273. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. – P. 01008.

8. Кумаков В.А. Принципы разработки оптимальных моделей (идеатипов) сортов растений // Сельскохозяйственная биология. – 1980. – № 2 (15). – С. 180–197.
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
10. Методика проведения агротехнических исследований в опытах с масличными культурами (Сообщение 1. Исследования в опытах с соей) / В.М. Лукомец, Н.М. Тишков, М.В. Трунова [и др.] // Масличные культуры. – 2023. – № 1 (193). – С. 33–52. – DOI: 10.25230/2412-608X-2023-1-193-33-52. – EDN RVQJGH.
11. Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами / под общ. ред. В.М. Лукомца, чл.-кор. РАСХН, д-ра с.-х. наук Гос. науч. учреждение Всерос. науч.-исслед. ин-т масличных культур им. В.С. Пустовойта РАСХН. – 2-е изд., перераб. и доп. Краснодар, 2010. – 327 с.
12. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / Гос. комис. по сортоиспытанию с.-х. культур при М-ве сел. хоз-ва СССР. – М.: [б.и.], 1985.
13. Методические указания по изучению коллекции зерновых бобовых культур / Н.И. Корсаков, О.А. Адамова, В.И. Будакова [и др.]. – Л.: ВИР, 1975. – 59 с.
14. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами / Ю.К. Новосёлов, В.Н. Киреев [и др.]. – М.: РАСХН, 1997. – 156 с.
15. Ничипорович А.А. Методические указания по учету и контролю важнейших показателей процессов фотосинтетической деятельности растений в посевах // Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина. Отд. растениеводства и селекции. Науч. совет по фотосинтезу АН СССР. – М.: [б.и.], 1969. – 94 с.
16. Посыпанов Г.С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. – М.: Агропромиздат, 1991. – 299 с.
17. Методика ВИР: Изучение мировой коллекции / ВИР. – Л.: ВИР, 1988. – 30 с.
18. ГОСТ 12038–84. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – М., 2011. – 31 с.

REFERENCES

1. Tolokonnikov V.V., Koshkarova T.S., Chamurliiev G.O. [i dr.], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2021, No. 2 (62), pp. 87–93, DOI: 10.32786/2071-9485-2021-02-09, EDN ISIPGP. (In Russ.)
2. Zotikov V.I., Golovina E.V., *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2011, No. 3 (30), pp. 5–8, EDN PONLOH. (In Russ.)
3. Kimm H., Guan K., Peng B. [et al.], Quantifying high-temperature stress on soybean canopy photosynthesis: The unique role of sun-induced chlorophyll fluorescence, *Global Change Biology*, 2021, Vol. 27, No. 11, pp. 2403–2415, DOI: 10.1111/gcb.15603, EDN GHSEIQ.
4. Amelin A.V., Chekalin E.I., Zaikin V.V. [i dr.], *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*, 2017, No. 4 (24), pp. 53–58, EDN ZWNYIH. (In Russ.)
5. Bharti A., Maheshwari H. S., Garg Sh. [et al.], Exploring Potential Soybean Bradyrhizobia from High Trehalose-Accumulating Soybean Genotypes for Improved Symbiotic Effectiveness in Soybean, *Social Science Research Network*, 2022, DOI: 10.2139/ssrn.4247386, EDN KYZJCO.
6. Vilyunov S.D., Zotikov V.I., Sidorenko V.S. [i dr.], *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*, 2022, No. 3 (43), pp. 73–83, DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83, EDN MXTNXP. (In Russ.)
7. Kurbanov R. Zakharova N. Justification and selection of vegetation indices to determine the early soybeans readiness for harvesting, *E3S Web of Conferences: 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness*, Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021, pp. 01008.
8. Kumakov V.A., *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 1980, No. 2 (15), pp. 180–197. (In Russ.)
9. Dospekhov B.A., *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* (Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)), Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
10. Lukomets V.M., Tishkov N.M., Trunova M.V. [i dr.], *Maslichnye kul'tury*, 2023, No. 1 (193), pp. 33–52, DOI: 10.25230/2412-608X-2023-1-193-33-52, EDN RVQJGH. (In Russ.)

11. *Metodika provedeniya polevykh agrotekhnicheskikh opytov s maslichnymi kul'turami* (Methodology for conducting field agrotechnical experiments with oilseeds), Krasnodar, 2010, 327 p.
12. *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* (Methodology for state variety testing of agricultural crops), Moscow: [b.i.], 1985.
13. Korsakov N.I., Adamova O.A., Budakova V.I. [i dr.], *Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu kollektsii zernovykh bobovykh kul'tur* (Guidelines for studying the collection of grain legumes), Leningrad: VIR, 1975, 59 p.
14. Novoselov Yu.K., Kireev V.N. [i dr.], *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu polevykh opytov s kormovymi kul'turami* (Guidelines for conducting field experiments with forage crops), Moscow: RASKhN, 1997, 156 p.
15. Nichiporovich A.A., *Metodicheskie ukazaniya po uchetu i kontrolyu vazhneyshikh pokazateley protsessov fotosinteticheskoy deyatel'nosti rasteniy v posevakh* (Guidelines for recording and monitoring the most important indicators of the processes of photosynthetic activity of plants in crops), Moscow: [b.i.], 1969, 94 p.
16. Posypanov G.S., *Metody izucheniya biologicheskoy fiksatsii azota vozdukha* (Methods for studying the biological fixation of air nitrogen), Moscow: Agropromizdat, 1991, 299 p.
17. *Metodika VIR: Izuchenie mirovoy kollektsii* (VIR Methodology: Study of the World Collection), Leningrad: VIR, 1988, 30 p.
18. *GOST 12038–84. Mezhgosudarstvennyy standart. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti* (GOST 12038–84. Interstate standard. Agricultural seeds. Methods for determining germination), Moscow, 2011, 31 p.