

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 581.19:547.56:537.5/8:633.31/37

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-4-402-411>

Поступила в редакцию 29.04.2021

Received 29.04.2021

**Н. А. Копылова<sup>1</sup>, Н. А. Ламан<sup>1</sup>, Е. Л. Недведь<sup>1</sup>, Ж. Н. Калацкая<sup>1</sup>, И. И. Филатова<sup>2</sup>,  
В. А. Люшкевич<sup>2</sup>, С. В. Гончарик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ И РАДИОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН НА СОДЕРЖАНИЕ ИЗОФЛАВОНОВ В ЛИСТЬЯХ СОИ (*GLYCINE MAX* L.)**

**Аннотация.** Изучено влияние обработки семян высокочастотным (ВЧ) электромагнитным полем и ВЧ плазмой на качественный и количественный состав изофлавонов в листьях растений сои в фазы ветвления, цветения и налива семян.

Установлено, что обработка семян сои приводит к изменению количественного содержания агликонов изофлавонов в листьях, но не влияет на их качественный состав. Максимальное содержание даидзеина обнаружено в фазу цветения при обработке семян электромагнитным полем, генистеина – в фазу ветвления, при этом особенно высокое содержание этого компонента выявлено в растениях, семена которых были обработаны плазмой.

**Ключевые слова:** *Glycine max*, изофлавоны, генистеин, даидзеин, высокочастотная плазма, высокочастотное электромагнитное поле, высокоэффективная жидкостная хроматография

**Для цитирования:** Оценка влияния плазменной и радиоволновой обработки семян на содержание изофлавонов в листьях сои (*Glycine max* L.) / Н. А. Копылова [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. бйал. навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 402–411. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-4-402-411>

**Natalia A. Kopylova<sup>1</sup>, Nikolai A. Laman<sup>1</sup>, Helena L. Nedved<sup>1</sup>, Joanna N. Kalatskaya<sup>1</sup>, Irina I. Filatova<sup>2</sup>,  
Veronika A. Lyushkevich<sup>2</sup>, Svetlana V. Goncharik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## **ESTIMATION OF THE EFFECT OF PLASMA AND RADIO WAVE TREATMENT OF SEEDS ON THE CONTENT OF ISOFLAVONES IN SOYBEAN LEAVES (*GLYCINE MAX* L.)**

**Abstract.** The effect of treatment of seeds with a high-frequency (HF) electromagnetic field and HF plasma on the qualitative and quantitative composition of isoflavones in the leaves of soybeans in the phases of branching, flowering and seed filling has been studied.

It was found that the treatment of soybean seeds leads to a change in the quantitative content of isoflavone aglycones in the leaves, but does not affect their qualitative composition. The maximum content of daidzein was found in the flowering phase when the seeds were treated with an electromagnetic field, genistein – in the branching phase, while a particularly high content of this component was found in plants whose seeds were treated with plasma.

**Keywords:** *Glycine max*, isoflavones, genistein, daidzein, high-frequency plasma, high-frequency electromagnetic field, high-performance liquid chromatography

**For citation:** Kopylova N. A., Laman N. A., Nedved H. L., Kalatskaya J. N., Filatova I. I., Lyushkevich V. A., Goncharik S. V. Estimation of the effect of plasma and radio wave treatment of seeds on the content of isoflavones in soybean leaves (*Glycine max* L.). *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 402–411 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-4-402-411>

**Введение.** Одной из основных современных тенденций развития медицины и фармакологии является использование биологически активных веществ (БАВ) и лекарственных средств из растительного сырья. Особое место среди фармакологически активных веществ занимают изофлавоны, принадлежащие к обширному классу природных фитоэстрогенов. Изофлавоны обладают широким спектром биологической активности, в том числе эстрогенной, антиоксидантной, противовоспалительной, капилляроукрепляющей, антитромбогенной, иммуномодулирующей, антиаллергической, гипохолестеринемической, гепатопротекторной. Отмечена связь между употреб-

лением в пищу продуктов, богатых изофлавонами, и снижением риска онкологических, сердечно-сосудистых, урологических заболеваний, замедлением развития остеопороза [1–4].

Богатым природным источником фенольных соединений является соя, причем по содержанию изофлавонов это растение находится в числе лидеров среди других сельскохозяйственных культур и может рассматриваться как перспективное сырье для пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. Основными изофлавонами (агликонами) сои являются генистеин, даидзеин, глицитеин [5, 6].

Использование растительного сырья в промышленных масштабах предполагает наличие стабильно высокого содержания фармакологически ценных вторичных метаболитов. Имеющиеся многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что воздействие различных факторов, таких как ультрафиолет, ультразвук, электромагнитное поле (ЭМП), низкая температура, патогены и др., может влиять на синтез вторичных метаболитов в клетках растений [7, 8]. Это свидетельствует об активной реакции растительного организма, проявляющейся в изменениях качественного и количественного состава многих биологически активных соединений [9, 10]. Кроме того, установлено, что физические воздействия на семенной материал проявляются в долгосрочных эффектах, которые могут наблюдаться в течение нескольких вегетационных сезонов [11–14].

В ряде экспериментальных исследований показано стимулирующее влияние обработки семян ЭМП радиочастотного диапазона и низкотемпературной плазмой на метаболические процессы у растений различных видов, что позволяет повысить в 1,5–2 раза содержание некоторых лекарственных веществ в растительном сырье [12, 15–18].

В то же время закономерности и особенности влияния обработки семян низкотемпературной плазмой и ЭМП на качественный состав и количественное содержание наиболее фармакологически ценных индивидуальных соединений в растениях изучены пока недостаточно, что существенно сдерживает разработку способа целенаправленного повышения количества БАВ в растительном сырье, основанного на использовании способности растений стимулировать их синтез в ответ на действие физических факторов.

С целью изучения особенностей действия физических факторов на синтез соединений вторичного метаболизма в настоящей работе исследовано влияние обработки семян высокочастотным электромагнитным полем и высокочастотной плазмой на качественный и количественный состав изофлавонов в листьях растений сои.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследований служили растения сои (сорт Припять), семена которых подвергали обработке высокочастотной (ВЧ) ЭМП и ВЧ плазмой. В качестве контроля использовали необработанные семена. Посев семян проводили не ранее чем через 10 дней после их обработки. Растения выращивали в полевых условиях – в мелкоделяночном опыте на экспериментальной площадке Центрального ботанического сада НАН Беларуси. Для анализа брали листья растений сои в фазы ветвления, цветения и налива семян.

Обработку семян ВЧ ЭМП и плазмой ВЧ разряда (ВЧ плазма) проводили в Институте физики НАН Беларуси на экспериментальном стенде ВЧИ-63/5.28-ИГ-801, позволяющем возбуждать ВЧ ЭМП на частоте 5,28 МГц и ВЧ емкостной разряд [12]. При обработке ВЧ ЭМП (радиоволновым излучением) семена помещали в центральную зону трехвиткового индуктора ВЧ индукционной установки, воздействие осуществлялось в воздухе при атмосферном давлении в течение 10 мин. Обработку плазмой ВЧ емкостного разряда, возбуждаемого на частоте  $f = 5,28$  МГц, проводили в воздухе при давлении 200 Па. Чашку Петри с семенами (50–100 штук) помещали на нижний заземленный электрод разрядной камеры, образованной двумя медными электродами диаметром 120 мм, расположенными на расстоянии 20 мм друг от друга. Для создания рабочего давления производили откачку воздуха из камеры в течение 7 мин. Длительность воздействия плазмы составила 5 мин [12].

Анализ содержания изофлавонов (агликонов) методом ВЭЖХ проводили с помощью хроматографа UltiMate 3000 (Thermo Fisher Scientific, Германия), оснащенного насосом LPG-3400SD, автосамплером ACC-3000, детектором DAD-3000RS, колонкой Nucleodur C18 Gravity (4,6×250 мм), размер частиц 5 мкм (Macherey-Nagel, Германия). Для определения содержания изофлавонов

в листьях сои использовали метод обращенно-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме. Подвижная фаза представляла собой смесь ацетонитрила (А) и воды I типа, рН 3,0. Выбран наиболее оптимальный для наших условий градиент: 0–2 мин – 0 % А; 2–20 мин – 70 % А. Скорость потока составляла 1 мл/мин; температура колонки – 30 °С, объем инъекции – 20 мкл. Концентрацию даидзеина и генистеина определяли методом абсолютной калибровки. Калибровочную зависимость строили по 5 точкам, значение каждой точки определяли по результатам 5 измерений. Коэффициенты линейной регрессии составляли 0,9980 (даидзеин), 0,9999 (генистеин). Использованы аналитические стандарты для ВЭЖХ фирмы Sigma-Aldrich, чистота  $\geq 98$  %. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали программу Excel. Приведенные данные представляют собой средние значения из трех биологических повторностей с указанием стандартного отклонения.

**Результаты и их обсуждение.** Сравнительный анализ качественного состава экстрактов листьев сои при обработке семян ВЧ ЭМП и ВЧ плазмой. Методом ВЭЖХ выполнен анализ пиков хроматограмм экстрактов листьев сои в периоды ветвления, цветения и налива семян; идентифицированы даидзеин и генистеин.

Для фазы ветвления существенного различия по вариантам в количестве пиков на хроматограммах не обнаружено, т. е. на этом этапе воздействие физических факторов не вызывает заметных изменений в качественном составе экстрактов (55 пиков – контроль, 57 – обработка семян ВЧ плазмой (вариант плазма), 58 – обработка семян ВЧ ЭМП (вариант ЭМП)).

#### Пики хроматограмм экстрактов листьев сои различных вариантов в фазу цветения

#### The peaks of chromatograms of soybean leaf extracts of different variants in flowering phase

Номер пика	Контроль		Плазма		ЭМП	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин
1	2,143	0,0052	2,117	0,6131	2,117	1,7413
2	2,273	0,0205	2,263	1,0518	2,240	2,2636
3	2,403	0,0699	2,417	10,0031	2,393	14,7798
4	2,503	0,1361	2,563	2,4761	2,550	6,5825
5	2,610	1,0432	2,710	1,3120	2,710	1,9383
6	2,897	0,5620	2,903	17,5417	2,820	3,5425
7	2,993	11,6914	3,000	61,7008	2,913	49,1364
8	3,673	3,3183	3,587	16,1224	3,013	244,0305
9	4,110	2,7357	3,853	20,5859	4,487	31,8716
10	4,513	2,5606	4,493	10,5792	5,033	15,2435
11	5,353	13,2579	4,650	19,5146	5,520	17,7273
12	5,830	9,8441	5,520	11,3649	5,833	35,4962
13	5,907	17,5840	5,837	21,2030	5,927	75,1870
14	6,087	6,9633	5,917	46,9960	6,233	59,7493
15	6,547 (даидзеин)	37,6957	6,077	0,0048	6,547 (даидзеин)	17,3721
16	6,710	14,1771	6,550 (даидзеин)	41,7777	6,873	5,4406
17	7,030	2,6246	6,593	12,1055	7,183 (генистеин)	7,0014
18	7,177 (генистеин)	2,3883	6,877	3,7076	7,600	1,0970
19	7,333	1,3386	7,190 (генистеин)	4,0760	7,740	1,6874
20	7,433	1,2304	7,437	0,9357	7,910	1,8757
21	7,583	1,3315	7,563	1,5552	8,010	4,0761
22	7,740	1,3831	7,730	2,3073	8,673	0,7493
23	7,927	1,1986	7,957	2,8943	8,870	1,4142
24	8,180	2,1565	8,690	0,6330	9,353	0,5896
25	8,387	1,1652	8,843	1,1949	9,490	0,7288
26	8,667	1,2707	9,343	0,5202	9,953	0,4733
27	8,860	1,2709	9,593	0,6046	10,400	1,2210
28	9,347	0,9840	9,977	0,4039	11,107	1,0531
29	9,610	0,6441	10,393	1,1664	12,027	1,2885

Окончание таблицы

Номер пика	Контроль		Плазма		ЭМП	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин	Время удерживания, мин	Площадь пика, мАУ·мин
30	9,967	0,3628	11,100	1,9919	13,650	0,9123
31	10,380	0,7460	13,663	1,0120	14,317	0,2678
32	10,713	0,5090	14,307	0,4825	14,577	0,2792
33	11,100	0,4232	15,740	0,5736	15,330	0,2276
34	11,423	0,4655	16,517	0,3231	15,730	0,4444
35	12,000	1,2115	18,303	0,0597	16,507	0,4521
36	13,657	0,6258	19,517	0,0141	18,340	0,1316
37	14,323	0,1923				
38	14,563	0,2130				
39	15,383	0,1111				
40	15,817	0,4541				
41	16,560	0,2089				
42	18,300	0,0612				
43	19,583	0,0094				

Для фазы цветения отмечено уменьшение количества определяемых диодно-матричным детектором компонентов: в контроле – 43 пика, в вариантах плазма и ЭМП – по 36 (см. таблицу). Сравнительный анализ пиков профиля элюции показал, что в вариантах плазма и ЭМП отсутствует ряд компонентов с временами удерживания в интервалах 11–12 и 14–15 мин. Эти соединения не идентифицированы нами, но, по-видимому, их можно отнести к классу более неполярных по сравнению с изофлавонами соединений, так как они выходят намного позже (время удерживания стандарта даидзеина – 6,50 мин, генистеина – 7,18 мин). Основные определяемые изофлавоны сои – даидзеин и генистеин – идентифицированы во всех вариантах.

В фазу налива семян в экстракте листьев сои наблюдалось изменение качественного состава компонентов в вариантах плазма и ЭМП – увеличение количества пиков в обоих опытных вариантах (контроль – 58, плазма – 65, ЭМП – 64), главным образом за счет компонентов с временем удерживания 17–18 мин, а в варианте ЭМП – 12–14 мин.

Полученные данные свидетельствуют о том, что качественный состав экстрактов листьев сои после обработки семян ВЧ плазмой и ВЧ ЭМП изменяется за счет увеличения доли компонентов с большей и меньшей степенью полярности, чем у изофлавонов. Судя по площади пиков, содержание данных неидентифицированных компонентов крайне мало. Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтверждают существование долговременной ответной реакции растений на обработку семян ВЧ плазмой и ВЧ ЭМП.

*Анализ количественного состава экстрактов листьев сои при обработке семян ВЧ плазмой и ВЧ ЭМП.* Данные количественного анализа содержания изофлавонов методом ВЭЖХ в экстрактах листьев сои из семян, подвергнутых плазменно-радиоволновой обработке, приведены на рис. 1, 2. Сложность метаболических процессов в растительных тканях и их изменение под влиянием физических факторов обуславливает неоднозначность полученных результатов.

Количественный анализ изофлавонов в экстрактах листьев сои в различные фазы вегетации позволил определить временные промежутки при исследованных режимах плазменно-радиоволновой обработки семян, когда содержание генистеина и даидзеина максимально. Согласно полученным данным, для всех вариантов максимальное содержание даидзеина наблюдали в фазу цветения при обработке семян ЭМП (124,5 % к контролю), генистеина – в фазу ветвления, при этом особенно высокое содержание этого компонента отмечено в варианте плазменной обработки семян (158 % к контролю, контроль принят за 100 %). Это крайне важно, учитывая выраженные биологическую активность и антиканцерогенные свойства этого изофлавона.

Выявлена характерная для всех вариантов, включая контроль, особенность – пониженное содержание даидзеина и генистеина в листьях в фазу налива семян. Минимальная концентрация генистеина наблюдалась также и в фазу цветения. Возможно, в эти периоды развития растений

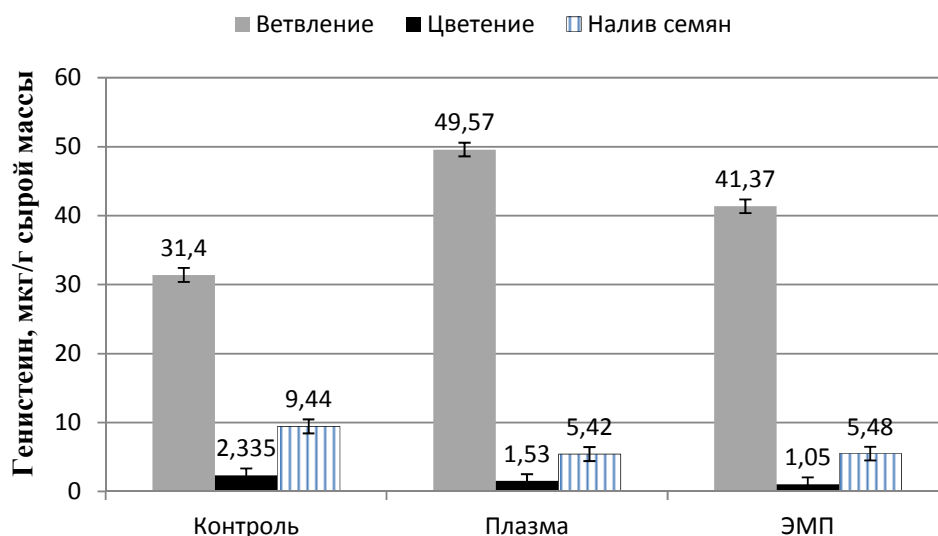


Рис. 1. Динамика содержания генистеина в листьях сои (фазы ветвления, цветения, налива семян), выращенной из семян, прошедших плазменно-радиоволновую обработку

Fig. 1. Dynamics of genistein content in soybean leaves (phases of branching, flowering, seed filling) grown from seeds that have undergone plasma-radio wave treatment

происходит регулируемая гормонами активация накопления даидзеина и генистеина в плодах при снижении их содержания в других органах (контроль). Другая причина наблюдаемого явления может быть связана с ослаблением стимулирующего действия плазменно-радиоволнового воздействия на поздних этапах онтогенеза, что требует дополнительных исследований. Полученные в рамках исследованных режимов плазменно-радиоволновой обработки семян экспериментальные данные позволяют сделать вывод о целесообразности сбора фармакологически ценного сырья именно в фазы ветвления и цветения растений.

Известно, что метаболизм фенольных соединений отличается высокой пластичностью, которая может реализовываться через изменение качественного и количественного состава накапливаемых соединений [9, 10]. В связи с этим в работе исследован изофлавоновый профиль листовых экстрактов сои на различных стадиях развития растений, семена которых обработаны ВЧ ЭМП и плазмой ВЧ разряда.

Обнаружено изменение общего количества компонентов в экстрактах листьев сои, в то время как состав идентифицированных изофлавонов оставался неизменным. В работах, посвященных исследованию метаболизма различных мутантных растений, указывается, что появление новых, не характерных для исходной формы соединений может быть обусловлено двумя основными причинами: модификацией экспрессии генома и значительной перестройкой работы ферментных систем [19–23]. По-видимому, плазменно-радиоволновая обработка при исследованных режимах оказывает достаточно мягкое воздействие, которое не вызывает изменений качественного состава фракции изофлавонов.

Вместе с тем выявлены значительные количественные изменения содержания изофлавонов в фазы ветвления и цветения растений. Метаболизм изофлавонов определяется генотипическими и экологическими факторами, а также взаимодействием генотипа с окружающей средой, т. е. изофлавоновый профиль является важным показателем формирования толерантности к различным биотическим или абиотическим стрессам [24]. Многолетние исследования показали, что изофлавоны связаны с развитием фунгитоксичности и устойчивости к насекомым-вредителям при культивировании сои и других бобовых культур [25, 26]. В других работах отмечено, что растения с высоким уровнем изофлавонов в тканях имеют преимущества выживания в условиях засухи [27], обладают солеустойчивостью [28] и повышенным уровнем защиты от УФВ-индуцированного повреждения ДНК [29]. Более того, изофлавоны играют важную роль в системе антиоксидантной защиты и акклиматизации [30, 31].



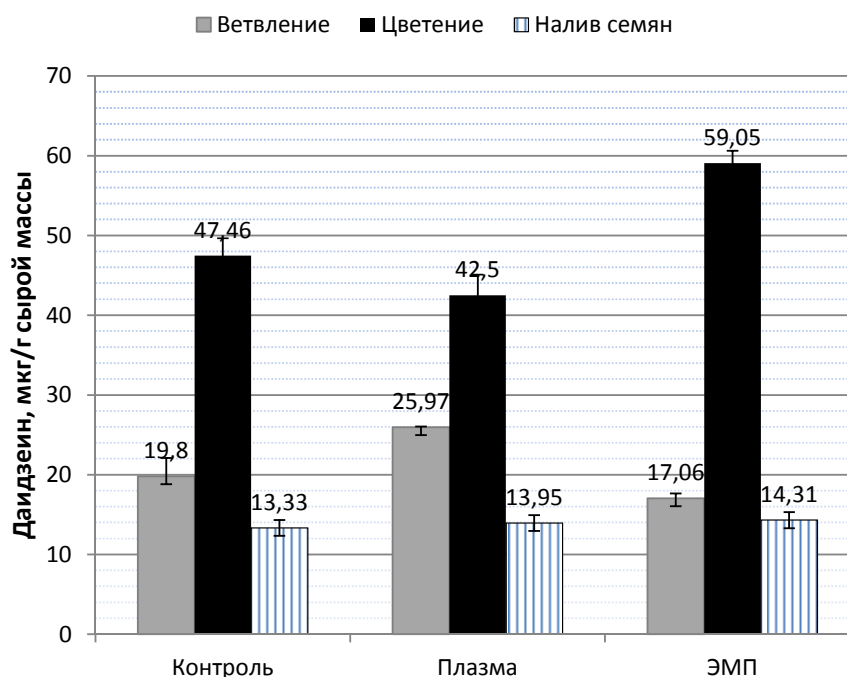


Рис. 2. Динамика содержания даидзеина в листьях сои (фазы ветвления, цветения, налива семян), выращенной из семян, прошедших плазменно-радиоволновую обработку

Fig. 2. Dynamics of daidzein content in soybean leaves (phases of branching, flowering, seed filling) grown from seeds that have undergone plasma-radio wave treatment

В экспериментах J. Liu и др., целью которых было исследование влияния неблагоприятных условий освещения на изофлавоновый профиль проростков сои, с помощью моделирования и многомерного статистического анализа показано увеличение количественного состава генистеина и других изофлавонов в ответ на экстремальные условия освещения (затенение). Кроме того, авторами установлено, что степень толерантности проростков сои к неблагоприятным условиям коррелировала именно с содержанием агликонов, а не с общей концентрацией изофлавонов [24]. Таким образом, агликоны изофлавонов рассматривают как ключевые соединения вторичного метаболизма растений семейства бобовых, ответственные за стрессоустойчивость, акклиматизацию и адаптацию [24, 32]. Их отличительной чертой являются антиоксидантные и хелатирующие свойства.

В настоящее время считают, что антиоксидантные способности определяются химической структурой антиоксиданта, а присутствие гидроксильных заместителей в флавоноидном ядре усиливает антиоксидантную активность. Так, высокая антиоксидантная активность генистеина связана с двумя активными гидроксигруппами [33, 34].

В наших экспериментах обнаружены наиболее выраженные изменения количественного содержания генистеина и даидзеина в опытных вариантах (ВЧ плазма и ВЧ ЭМП). Поскольку обработка семян плазмой и ЭМП рассматривается как умеренный стресс [35], то, возможно, именно этим обусловлено накопление наиболее активных соединений-антиоксидантов. В работе [12] показано, что при обработке семян плазмой и ЭМП повышается окислительно-восстановительный статус клеток; с помощью метода парамагнитного резонанса обнаружено увеличение концентрации парамагнитных центров в семенах многолетних растений.

Полученные в настоящей работе данные являются косвенным свидетельством высокой чувствительности системы синтеза изофлавонов к воздействию ВЧ плазмы и ВЧ ЭМП, а активация синтеза и накопление наиболее мощных антиоксидантов свидетельствуют о проявлении защитной реакции растения.

Существует несколько механизмов, с помощью которых растения регулируют количественный состав фенольных соединений: регуляция экспрессии генома, активности ферментных систем,

постсинтетическая модификация [9]. Например, через изменение экспрессии генома у винограда регулируется активность флавонон-3'-гидроксилазы, флавонон-3'5'-гидроксилазы и цитохрома b5. Установлено, что ген, кодирующий флавонон-3'-гидроксилазу, начинает экспрессироваться еще до цветения, а после цветения работают уже три гена. Имеются данные о том, что на экспрессию генов ключевых ферментов влияют как сами фенольные метаболиты, так и другие внешние и внутренние факторы [10].

Известно, что физические и химические стрессовые факторы способны действовать на регуляторные механизмы экспрессии генов, ответственных за функционирование фенил-пропаноидного пути биосинтеза изофлавонов, на изменение активности ключевых ферментов и, следовательно, на регуляцию через концентрацию метаболитов конечных этапов биосинтеза [36].

В работах других авторов также можно встретить данные о сложном взаимном влиянии фитогормонов гиббереллинового типа и флавоноидов [37, 38]. Результаты взаимовлияния гиббереллиновых фитогормонов и фенольных соединений могут быть различны: аддитивный эффект, синергизм или взаимное ингибирование [38]. Мы предполагаем, что обработка семян сои ВЧ плазмой и ВЧ ЭМП может приводить к множественным эффектам, в том числе к изменению как окислительно-восстановительного статуса клеток, так и гормонального фона в организме растения, что в свою очередь влияет на активность ферментных систем, включая ключевые ферменты биосинтеза изофлавонов и других фенольных соединений.

**Заключение.** Проведенные нами эксперименты показали, что обработка семян сои приводит к изменению количественного состава агликонов изофлавонов и не влияет на их качественный состав. Согласно полученным данным, для всех вариантов максимальное содержание даидзеина наблюдали в фазу цветения при обработке семян ЭМП, генистеина – в фазу ветвления, при этом особенно высокое содержание этого компонента отмечалось при плазменной обработке семян. Экспериментальные результаты отражают пластичность метаболизма фенольных соединений, что делает возможным разработку приемов направленного влияния на синтез данных соединений.

### Список использованных источников

1. Psychological assessment of the effects of treatment with phytoestrogens on postmenopausal women: a randomized, double-blind, crossover, placebo-controlled study / M. L. Casini [et al.] // *Fertil Steril.* – 2006. – Vol. 85, N 4. – P. 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2005.09.048>
2. Messina, M. Insights gained from 20 years of soy research / M. Messina // *J. Nutr.* – 2010. – Vol. 140, N 12. – P. 2289S–2295S. <https://doi.org/10.3945/jn.110.124107>
3. Risks and benefits of dietary isoflavones for cancer / S. Andres [et al.] // *Crit. Rev. Toxicol.* – 2011. – Vol. 41, N 6. – P. 463–506. <https://doi.org/10.3109/10408444.2010.541900>
4. Soy isoflavone: the multipurpose phytochemical (review) / Q. Wang [et al.] // *Biomed. Reports.* – 2013. – Vol. 1, N 5. – P. 697–701. <https://doi.org/10.3892/br.2013.129>
5. Давыденко, О. Г. Соя для умеренного климата / О. Г. Давыденко, Д. В. Галюенко, В. Е. Розенцвейг. – Минск : Техналогія, 2004. – 173 с.
6. Петибская, В. С. Соя: химический состав и использование / В. С. Петибская. – Майкоп : ОАО «Полиграф-ЮГ», 2012. – 432 с.
7. Effect of UV-C radiation, ultra-sonication electromagnetic field and microwaves on changes in polyphenolic compounds in chokeberry (*Aronia melanocarpa*) / T. Cebulak [et al.] // *Molecules.* – 2017. – Vol. 22, N 7. – P. 1161. <https://doi.org/10.3390/molecules22071161>
8. Yu, J. High intensity ultrasound as an abiotic elicitor-effects on antioxidant capacity and overall quality of romaine lettuce / J. Yu, N. J. Engeseth, H. Feng // *Food Bioprocess Technol.* – 2016. – Vol. 9, N 2. – P. 262–273. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1616-7>
9. Вариабельность содержания вторичных метаболитов у *Juniperus sabina* L. в условиях Южного Урала / А. В. Щербаков [и др.] // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук.* – 2009. – Т. 11, № 1. – С. 198–204.
10. Bogs, J. Identification of the flavonoids from grapevine and their regulation during fruit development / J. Bogs // *Plant Physiol.* – 2006. – Vol. 140, N 1. – P. 279–291. <https://doi.org/10.1104/pp.105.073262>
11. Изучение эффективности предпосевого облучения семян гелиевой плазмой на рост и развитие льна / А. Р. Цыганов [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2009. – № 2. – С. 273–281.
12. Стимуляция метаболизма лекарственных растений с помощью обработки семян низкотемпературной плазмой и электромагнитным полем / В. А. Люшкевич [и др.] // *Докл. БГУИР.* – 2016. – № 7. – С. 188–191.
14. Плазменная технология обработки семян и плазменные семена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lana-pav.com/plazmennaya-texnologiya-obrabotki-semyan-i-lazmennye-semena.html>. – Дата доступа: 10.01.2020.

15. Fungicidal effects of plasma and radio-wave pre-treatments on seeds of grain crops and legumes / I. I. Filatova [et al.] // *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security* / eds. : Z. Machala, K. Hensel, Y. Akishev. – Dordrecht, 2012. – P. 469–479.
16. Инновационная экологически безопасная (нано)технология возделывания амаранта / Н. Л. Воропаева [и др.] // *Эколог. вестн. Север. Кавказа*. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 26–30.
17. Усманов, И. Ю. Лекарственные растения: перспективы создания импортозамещающих производств / И. Ю. Усманов, А. В. Нафиков, Ю. А. Прочухан // *Экономика и управление*. – 2000. – № 2. – С. 5–9.
18. Changes in Norway spruce germination and growth induced by pre-sowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field: short-term and long-term effects / G. Pauzaitė [et al.] // *Plasma Process Polym.* – 2018. – Vol. 15, N 2. – P. 1700068. <http://doi.org/10.1002/ppap.201700068>
19. Pre-sowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field increases secondary metabolite content in purple coneflower (*Echinacea purpurea*) leaves / V. Mildaziene [et al.] // *Plasma Process Polym.* – 2018. – Vol. 15, N 2. – P. 1700059. <http://doi.org/10.1002/ppap.201700059>
20. Phenylalanine ammonia-lyase activity and phenolic compounds accumulation in nitrogen-deficient *Matricaria chamomilla* leaf rosettes / J. Kováčik [et al.] // *Plant Sci.* – 2007. – Vol. 172, N 2. – P. 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.10.001>
21. Redirection of flavonoid biosynthesis through the down regulation of an antocyanidin glucosyltransferase in ripening strawberry fruit / M. Griesser [et al.] // *Plant Physiol.* – 2008. – Vol. 146, N 4. – P. 1528–1539. <https://doi.org/10.1104/pp.107.114280>
22. Flavonoid accumulation in arabidopsis repressed in lignin synthesis affects auxin transport and plant growth / S. Besseau [et al.] // *Plant Cell.* – 2007. – Vol. 19, N 1. – P. 148–162. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.044495>
23. Wade, H. K. Arabidopsis ICX1 is a negative regulator of several pathways regulating flavonoid biosynthesis genes / H. K. Wade, A. K. Sohal, G. I. Jenkins // *Plant Physiol.* – 2003. – Vol. 131, N 2. – P. 707–715. <https://doi.org/10.1104/pp.012377>
24. Down-regulation of cinnamoyl-CoA reductase in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) induces dramatic changes in soluble phenolic pools / B. van der Rest [et al.] // *J. Exp. Botany.* – 2006. – Vol. 57, N 6. – P. 1399–1411. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj120>
25. Metabonomic tool to identify soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] germplasts with a high level of shade tolerance at the seedling stage / J. Liu [et al.] // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7, N 1. – Art. 42478. <https://doi.org/10.1038/srep42478>
26. Isoflavonoid accumulation in soybean hairy roots upon treatment with *Fusarium solani* / V. V. Lozovaya [et al.] // *Plant Physiol. Biochem.* – 2004. – Vol. 42, N 7–8. – P. 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2004.06.007>
27. Adesanya, S. A. Structure-related fungitoxicity of isoflavonoids / S. A. Adesanya, M. J. O'Neill, M. F. Roberts // *Physiol. Mol. Plant Pathol.* – 1986. – Vol. 29, N 1. – P. 95–103. [https://doi.org/10.1016/s0048-4059\(86\)80041-8](https://doi.org/10.1016/s0048-4059(86)80041-8)
28. Tian, F. Physiological regulation of seed soaking with soybean isoflavones on drought tolerance of *Glycine max* and *Glycine soja* / F. Tian, T. Jia, B. Yu // *Plant Growth Regul.* – 2014. – Vol. 74, N 3. – P. 229–237. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9914-z>
29. Comparative metabolic profiling reveals secondary metabolites correlated with soybean salt tolerance / W. Wu [et al.] // *J. Agric. Food Chem.* – 2008. – Vol. 56, N 23. – P. 11132–11138. <https://doi.org/10.1021/jf8024024>
30. Kootstra, A. Protection from UV-B-induced DNA damage by flavonoids / A. Kootstra // *Plant Mol. Biol.* – 1994. – Vol. 26, N 2. – P. 771–774. <https://doi.org/10.1007/bf00013762>
31. Modulation of isoflavonoid composition of *Rhizopus oryzae* elicited soybean (*Glycine max*) seedlings by light and wounding / S. Aisya [et al.] // *J. Agric. Food Chem.* – 2013. – Vol. 61, N 36. – P. 8657–8667. <https://doi.org/10.1021/jf4020203>
32. Isoprenoids and phenylpropanoids are key components of the antioxidant defense system of plants facing severe excess light stress / C. Brunetti [et al.] // *Environ. Exp. Botany.* – 2015. – Vol. 119. – P. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.007>
33. Lee, C. H. Relative antioxidant activity of soybean isoflavones and their glycosides / C. H. Lee // *Food Chem.* – 2005. – Vol. 90. – P. 735–741. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.034>
34. Recor, I. R. The antioxidant activity of genistein *in vitro* / I. R. Recor, I. E. Dreosti, J. K. McInerney // *J. Nutr. Biochem.* – 1995. – Vol. 6, N 9. – P. 481–485. [https://doi.org/10.1016/0955-2863\(95\)00076-c](https://doi.org/10.1016/0955-2863(95)00076-c)
35. Heim, K. E. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships / K. E. Heim, A. R. Tagliaferr, D. J. Bobilya // *J. Nutr. Biochem.* – 2002. – Vol. 13, N 10. – P. 572–584. [https://doi.org/10.1016/s0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/s0955-2863(02)00208-5)
36. Влияние плазменно-радиоволновой обработки семян кукурузы и последующего их хранения в неблагоприятных условиях на физиолого-биохимические особенности проростков / Ж. Н. Калацкая [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук*. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 7–19.
37. Effects of light treatment on isoflavone content of germinated soybean seeds / S. Phommalth [et al.] // *J. Agr. Food Chem.* – 2008. – Vol. 56, N 21. – P. 10123–10128. <https://doi.org/10.1021/jf802118g>
38. Ke, D. Plant hormone interaction and phenolic metabolism in the regulation of russet spotting in iceberg lettuce / D. Ke, M. E. Saltveit // *Plant Physiol.* – 1988. – Vol. 88, N 4. – P. 1136–1140. <https://doi.org/10.1104/pp.88.4.1136>

## References

1. Casini M. L., Marelli G., Papaleo E., Ferrari A., D'Ambrosio F., Unfer V. Psychological assessment of the effects of treatment with phytoestrogens on postmenopausal women: a randomized, double-blind, crossover, placebo-controlled study. *Fertility and Sterility*, 2006, vol. 85, no. 4, pp. 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2005.09.048>
2. Messina M. Insights gained from 20 years of soy research. *Journal of Nutrition*, 2010, vol. 140, no. 12, pp. 2289S–2295S. <https://doi.org/10.3945/jn.110.124107>



3. Andres S., Abraham K., Appel K. E., Lampen A. Risks and benefits of dietary isoflavones for cancer. *Critical Reviews in Toxicology*, 2011, vol. 41, no. 6, pp. 463–506. <https://doi.org/10.3109/10408444.2010.541900>
4. Wang Q., Ge X., Tian X., Zhang Y., Zhang J., Zhang P. Soy osoflavone: the multipurpose phytochemical (review). *Biomedical Reports*, 2013, vol. 1, no. 5, pp. 697–701. <https://doi.org/10.3892/br.2013.129>
5. Davydenko O. G., Goloenko D. V., Rozentsveig V. E. *Soybeans for a temperate climate*. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2004. 173 p. (in Russian).
6. Petibskaya V. S. *Soy: chemical composition and use*. Maikop, Poligraf-YuG Publ., 2012. 432 p. (in Russian).
7. Cebulak T., Oszmiański J., Kapusta J., Lachowicz S. Effect of UV-C radiation, ultra-sonication electromagnetic field and microwaves on changes in polyphenolic compounds in chokeberry (*Aronia melanocarpa*). *Molecules*, 2017, vol. 22, no. 7, p. 1161. <https://doi.org/10.3390/molecules22071161>
8. Yu J., Engeseth N. J., Feng H. High intensity ultrasound as an abiotic elicitor – effects on antioxidant capacity and overall quality of romaine. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 262–273. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1616-7>
9. Shcherbakov A. V., Buskunova G. G., Amineva A. A., Ivanov S. P., Usmanov I. Yu. Variability of secondary metabolites content in *Achillea nobilis* L. in the South Urals. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2009, vol. 11, no. 1, pp. 198–204 (in Russian).
10. Bogs J. Identification of the flavonoids from grapevine and their regulation during fruit development. *Plant Physiology*, 2006, vol. 140, no. 1, pp. 279–291. <https://doi.org/10.1104/pp.105.073262>
11. Tsyganov A. R., Gordeev Yu. A., Poddubnaya O. V., Kovaleva I. V., Poddubnyi O. A. Study of efficiency of the preseed irradiation of seeds helium-plasma on growth and flax development. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil science and agrochemistry], 2009, no. 2, pp. 273–281 (in Russian).
12. Lyushkevich V. A., Filatova I. I., Zhukova E. E., Pauzhaite G. Stimulation of the metabolism of medicinal plants using seed treatment with low-temperature plasma and electromagnetic field. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2016, no. 7, pp. 188–191 (in Russian).
14. *Plasma seed treatment technology and plasma seeds*. Available at: <http://www.lana-pav.com/plazmennaya-tekhnologiya-obrabotki-semyan-i-lazmennye-semena.html> (accessed 10.01.2020) (in Russian).
15. Filatova I., Azharonok V., Shik A., Antoniuk A., Terletskaia N. fungicidal effects of plasma and radio-wave pre-treatments on seeds of grain crops and legumes. *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security*. Dordrecht, 2012, pp. 469–479.
16. Voropaeva N. L., Belonozhkina T. G., Karpachev V. V., Naumov E. V., Vasil'ev M. M., Petrov O. F. Innovative environmentally friendly (nano)technology of amaranth cultivation. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza* [Ecological bulletin of the North Caucasus], 2015, vol. 11, no. 1, pp. 26–30 (in Russian).
17. Usmanov I. Yu., Nafikov A. V., Prochukhan Yu. A. Medicinal plants: prospects for creating import-substituting industries. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and management], 2000, no. 2, pp. 5–9 (in Russian).
18. Pauzaite G., Malakauskiene A., Nauciene Z., Zukiene R., Filatova I. I., Lyushkevich V., Azarko I., Mildaziene V. Changes in Norway spruce germination and growth induced by pre-sowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field: short-term and long-term effects. *Plasma Processes and Polymers*, 2018, vol. 15, no. 2, p. 1700068. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700068>
19. Mildaziene V., Pauzaite G., Naucienė Z., Malakauskiene A., Zukiene R., Januskaitiene I., Jakstas V., Ivanauskas I., Filatova I. I., Lyushkevich V. A. Pre-sowing seed treatment with cold plasma and electromagnetic field increases secondary metabolite content in purple coneflower (*Echinacea purpurea*) leaves. *Plasma Processes and Polymers*, 2018, vol. 15, no. 2, p. 1700059. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700059>
20. Kováčik J., Klejduš B., Bačkor M., Repčák M. Phenylalanine ammonia-lyase activity and phenolic compounds accumulation in nitrogen-deficient *Matricaria chamomilla* leaf rosettes. *Plant Science*, 2007, vol. 172, no. 2, pp. 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.10.001>
21. Griesser M., Hoffmann T., Bellido M. L., Rosati C., Fink B., Kurtzer R., Aharoni A., Muñoz-Blanco J., Schwab W. Redirection of flavonoid biosynthesis through the down regulation of an antocyanidin glucosyltransferase in ripening strawberry fruit. *Plant Physiology*, 2008, vol. 146, no. 4, pp. 1528–1539. <https://doi.org/10.1104/pp.107.114280>
22. Besseau S., Hoffmann L., Geoffroy P., Lapierre C., Pollet B., Legrand M. Flavonoid accumulation in arabidopsis repressed in lignin synthesis affects auxin transport and plant growth. *Plant Cell*, 2007, vol. 19, no. 1, pp. 148–162. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.044495>
23. Wade H. K., Sohal A. K., Jenkins G. I. Arabidopsis ICX1 is a negative regulator of several pathways regulating flavonoid biosynthesis genes. *Plant Physiology*, 2003, vol. 131, no. 2, pp. 707–715. <https://doi.org/10.1104/pp.012377>
24. van der Rest B., Danoun S., Boudet A.-M., Rochange S. F. Down-regulation of cinnamoyl-CoA reductase in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) induces dramatic changes in soluble phenolic pools. *Journal of Experimental Botany*, 2006, vol. 57, no. 6, pp. 1399–1411. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj120>
25. Liu J., Hu B., Liu W., Qin W., Wu H., Zhang J. [et al.]. Metabolomic tool to identify soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] germplasts with a high level of shade tolerance at the seedling stage. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, art. 42478. <https://doi.org/10.1038/srep42478>
26. Lozovaya V. V., Lygin A. V., Zernova O. V., Li S., Hartman G. L., Widholm J. M. Isoflavonoid accumulation in soybean hairy roots upon treatment with *Fusarium solani*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2004, vol. 42, no. 7–8, pp. 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2004.06.007>
27. Adesanya S. A., O'Neill M. J., Roberts M. F. Structure-related fungitoxicity of isoflavonoids. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 1986, vol. 29, no. 1, pp. 95–103. [https://doi.org/10.1016/s0048-4059\(86\)80041-8](https://doi.org/10.1016/s0048-4059(86)80041-8)

28. Tian F., Jia T., Yu B. Physiological regulation of seed soaking with soybean isoflavones on drought tolerance of *Glycine max* and *Glycine soja*. *Plant Growth Regulation*, 2014, vol. 74, no. 3, pp. 229–237. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9914-z>
29. Wu W., Zhang Q., Zhu Y., Lam H.-M., Cai Z., Guo D. Comparative metabolic profiling reveals secondary metabolites correlated with soybean salt tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, vol. 56, no. 23, pp. 11132–11138. <https://doi.org/10.1021/jf8024024>
30. Kootstra A. Protection from UV-B-induced DNA damage by flavonoids. *Plant Molecular Biology*, 1994, vol. 26, no. 2, pp. 771–774. <https://doi.org/10.1007/bf00013762>
31. Aisya S., Gruppe H., Madzora B., Vincken J. P. Modulation of isoflavonoid composition of *Rhizopus oryzae* elicited soybean (*Glycine max*) seedlings by light and wounding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, vol. 61, no. 36, pp. 8657–8667. <https://doi.org/10.1021/jf4020203>
32. Brunetti C., Guidi L., Sebastiani F., Tattini M. Isoprenoids and phenylpropanoids are key components of the antioxidant defense system of plants facing severe excess light stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, vol. 119, pp. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.007>
33. Lee C. H. Relative antioxidant activity of soybean isoflavones and their glycosides. *Food Chemistry*, 2005, vol. 90, no. 4, pp. 735–741. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.034>
34. Recor I. R., Dreosti I. E., McInerney J. K. The antioxidant activity of genistein *in vitro*. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 1995, vol. 6, no. 9, pp. 481–485. [https://doi.org/10.1016/0955-2863\(95\)00076-c](https://doi.org/10.1016/0955-2863(95)00076-c)
35. Heim K. E., Tagliaferri A. R., Bobilya D. J. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2002, vol. 13, no. 10, pp. 572–584. [https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(02)00208-5)
36. Kalatskaya Zh. N., Laman N. A., Filatova I. I., Frolova T. V., Lyushkevich V. A., Chubrik N. I., Goncharik S. V. Influence of plasma-radio wave treatment of corn seeds and their subsequent storage in unfavorable conditions on the physiological and biochemical characteristics of seedlings. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–19 (in Russian).
37. Phommalth S., Jeong Y.-S., Kim Y.-H., Dhakal K. H., Hwang Y.-H. Effects of light treatment on isoflavone content of germinated soybean seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, vol. 56, pp. 10123–10128. <https://doi.org/10.1021/jf802118g>
38. Ke D., Saltveit M. E. Plant hormone interaction and phenolic metabolism in the regulation of russet spotting in iceberg lettuce. *Plant Physiology*, 1988, vol. 88, no. 4, pp. 1136–1140. <https://doi.org/10.1104/pp.88.4.1136>

## Информация об авторах

*Копылова Наталия Александровна* – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: natal.kopylova.68@mail.ru

*Ламан Николай Афанасьевич* – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: laman.nikolai@gmail.com

*Недведь Елена Леонардовна* – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nedved\_e@tut.by

*Калацкая Жанна Николаевна* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kalatskayaj@mail.ru

*Филатова Ирина Ивановна* – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: filatova@presidium.bas-net.by

*Люшкевич Вероника Александровна* – науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: verolyu@tut.by

*Гончарик Светлана Васильевна* – науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pppt-3@imaph.bas-net.by

## Information about the authors

*Natalia A. Kopylova* – Ph. D. (Biol.), Senior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: natal.kopylova.68@mail.ru

*Nikolai A. Laman* – Academician, D. Sc. (Biol.), Professor, Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolai.laman@gmail.com

*Helena L. Nedved* – Ph. D. (Biol.), Senior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nedved\_e@tut.by

*Joanna N. Kalatskaya* – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kalatskayaj@mail.ru

*Irina I. Filatova* – Ph. D. (Phys. and Math.), Leading Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filatova@presidium.bas-net.by

*Veronika A. Lyushkevich* – Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk Republic of Belarus). E-mail: verolyu@tut.by

*Svetlana V. Goncharik* – Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pppt-3@imaph.bas-net.by