

DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-6-962

УДК 633.11: 543.635.3: 631.53.027.3



Научная статья

## СОДЕРЖАНИЕ ЖИРНЫХ КИСЛОТ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОРОСТКОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ИЗ СЕМЯН, ОБРАБОТАННЫХ ОЗОНОМ

*И.С. Капустина, А.В. Лазукин, В.Н. Нурминский, О.И. Грабельных,  
Н.В. Озолина, В.В. Гурина, Е.В. Спиридонова*

**Обоснование.** В настоящее время в сельском хозяйстве идет подборка безопасных для окружающей среды технологий предпосевной обработки семян пшеницы. Озон, аллотропная форма кислорода, обладает высокой реакционной способностью, выступает как эффективный инсектицид, способствует оздоровлению семян, снижению зараженности почвы. Воздействие озоном на семена входит в группу перспективных технологий по повышению качества всходов. Известно, что полевая всхожесть озимой пшеницы в зависимости от окружающих условий может быть менее 50% и поэтому важно качество всходов.

**Цель.** Оценить влияние разных концентраций озона на морфологические показатели и синтез жирных кислот (ЖК) в проростках пшеницы озимой.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являлись семена мягкой озимой пшеницы сорта «Иркутская». Озонирование проводилось при концентрациях озона 2, 4, 6 и 8 г/м<sup>3</sup> и экспозициях 15, 30, 45 и 60 мин на каждой из концентраций. Проращивание обработанных и контрольных семян проводили в течение трех суток в темноте в термостате (24±1°C). На третьи сутки измеряли морфометрические характеристики. Экстракцию липидов из побегов и корней проводили по методу Bligh, Dyer [14]. Метиловые эфиры жирных кислот липидов анализировали методом хромато-масс-спектрометрии. Статистическая обработка данных проведена с помощью языка программирования R, программы SigmaPlot v. 12.5.

**Результаты.** Концентрации озона 2, 4, 6 г/м<sup>3</sup> оказывают стимулирующее действие – увеличивается длина побега и корня. При концентрации озона 8 г/м<sup>3</sup> длина побега и корня уменьшается.

*В содержании ЖК наблюдается общая тенденция, в побегах проростков идет снижение, а в корнях – увеличение ненасыщенности липидов.*

**Заключение.** Концентрации озона до 8 г/м<sup>3</sup> подходят для предпосевной обработки семян и улучшают показатели всходов.

**Ключевые слова:** жирные кислоты; озон; пшеница; предпосевная подготовка; семена

**Для цитирования.** Капустина И.С., Лазукин А.В., Нурминский В.Н., Грабельных О.И., Озолина Н.В., Гурина В.В., Спиридонова Е.В. Содержание жирных кислот и морфологические показатели проростков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) из семян, обработанных озоном // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Т. 15, №6. С. 125-147. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-6-962

Original article

## FATTY ACID CONTENT AND MORPHOLOGICAL INDICATORS OF WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) SEEDLINGS GROWN FROM SEEDS TREATED WITH OZONE

*I.S. Kapustina, A.V. Lazukin, V.N. Nurminsky, O.I. Grabelnykh, N.V. Ozolina, V.V. Gurina, E.V. Spiridonova*

**Background.** Presently, a selection of environmentally friendly technologies for pre-sowing treatment of wheat seeds is conducted in agriculture. Ozone, an allotropic form of oxygen, is highly reactive, acts as an effective insecticide, promotes seed improvement, and reduces soil contamination. The impact of ozone on seeds is one of the promising technologies to improve the quality of seedlings. It is known that the field germination of winter wheat may be less than 50%, depending on the environmental conditions, and therefore the quality of seedlings is very important.

**Purpose.** To evaluate the effect of different ozone concentrations on morphological parameters and synthesis of fatty acids (FA) in winter wheat seedlings.

**Materials and methods.** The object of the study was the seeds of soft winter wheat (variety Irkutskaya). The ozonation was conducted with ozone concentrations of 2, 4, 6 and 8 g/m<sup>3</sup> during 15, 30, 45 and 60 min. The germination of treated and control seeds was carried out for three days in the dark in a thermostat (24±1°C). On the third day, the morphometric characteristics were measured. The

*extraction of lipids from shoots and roots was carried out according to the method of Bligh, Dyer [14]. The methyl esters of lipid fatty acids were analyzed by chromatato-mass spectrometry. Statistical data processing was conducted with the use of R programming language and SigmaPlot v. 12.5.*

**Results.** *Ozone in concentrations of 2, 4, 6 g/m<sup>3</sup> has a stimulating effect on seedling germination, the length of the shoots and roots increases. At ozone concentration of 8 g/m<sup>3</sup>, the length of the shoots and roots decreases.*

*There is a general trend in the content of fatty acids, in the shoots of seedlings there is some decrease in lipid unsaturation, and in the roots - some increase in lipid unsaturation.*

**Conclusion.** *Ozone in concentrations up to 8 g/m<sup>3</sup> is suitable for pre-sowing seed treatment and improves seedling performance.*

**Keywords:** *ozone; wheat; fatty acids; pre-sowing preparation; seeds*

**For citation.** *Kapustina I.S., Lazukin A.V., Nurminsky V.N., Grabelnykh O.I., Ozolina N.V., Gurina V.V., Spiridonova E.V. Fatty Acid Content and Morphological Indicators of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings Grown from Seeds Treated with Ozone. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2023, vol. 15, no. 6, pp. 125-147. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-6-962*

## **Введение**

Озон, аллотропная форма кислорода, обладающая высокой реакционной способностью [16]. Достаточно легко получить высокие концентрации озона, обеспечить его разложение после обработки и все это делает технологии озонировки весьма перспективными на внедрение к решению широкого спектра задач. Особенное значение действию озона уделяют в пищевых технологиях и агротехнике: озон выступает как эффективный инсектицид, способствует оздоровлению семян, снижению зараженности почвы и фуража [12, 13, 16, 26]. Воздействие озоном на семена входит в группу перспективных технологий по повышению качества всходов [20]. В этой связи, необходимо представлять какая концентрация озона и экспозиция объекта при озонировании являются необходимыми для достижения желаемого эффекта. Эта задача также осложняется тем, что обработка озоном сорто-видо-специфична. В качестве объекта сравнительных исследований по предпосевной подготовке семян часто принимаются злаковые культуры. Это связано с их распространенностью по всему миру и социальной значимостью. Среди злаков озимая пшеница, в части ответа морфометрических показателей, демонстрирует заметную отзывчивость при воздействии озона [21]. Если рассматривать агротехнические преимущества, озимая пшеница

является важнейшей продовольственной культурой. Зерно озимой пшеницы богато клейковинными белками и другими ценными веществами, поэтому оно широко используется для продовольственных целей, а в особенности в хлебопечении и кондитерской промышленности [10].

В работах, посвященных улучшению качества всходов семян после озонирования, часто избирают морфометрические характеристики проростков во главу диагностических методов. Морфометрическое испытание является показательным способом прогноза полевой всхожести и силы всходов [9]. В их число входят количество нормально проросших семян, длина побега и длина индивидуальных корней [4]. Стимуляция длины побега и корневой системы в варианте, подвергнутом предпосевной обработке, по отношению к контрольному варианту, указывает на мобилизацию потенциальных генотипически обусловленных возможностей растений и, как следствие, это обеспечит повышение полевых всходов и урожайности [23].

Биохимические критерии более глубоко и точно позволяют прогнозировать развитие растения на начальном этапе онтогенеза. Ранее было показано, что при абиотических и биотических воздействиях в липидах мембран побегов и корней проростков растений изменяется состав жирных кислот [7]. Влияние озона относится к абиотическому воздействию, которое, отражается на клеточных мембранах. Изучение состава жирных кислот позволяет оценить текучесть клеточных мембран, которая влияет на функционирование мембранных белков. Правильная работа белков в свою очередь обеспечивает нормальное прорастание и развитие организма [19]. Повышение вязкости мембран сопровождается индукцией экспрессии генов, повышающих в клетке уровень ферментов-десатураз жирных кислот. Десатуразы жирных кислот ускоряют синтез полиненасыщенных жирных кислот [11]. В связи с этим, исследование активности десатураз жирных кислот весьма актуально [8, 17]. В настоящее время существует методика косвенной оценки активности этих ферментов на основании состава жирных кислот липидов [1].

Таким образом, с целью создания новой и эффективной технологии предпосевной обработки семян озимой пшеницы, впервые подобраны эффективные концентрации озона, на основании оценки морфологических и биохимических показателей, для повышения ростового потенциала семян.

### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследования являлись высококачественные семена мягкой озимой пшеницы сорта «Иркутская», полученные из коллекций ЦКП

«Биоресурсный центр» Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (Иркутск).

Озонирование проводилось следующим образом: проба семян (20-30 г) размещалась в пластиковом контейнере, объединенном в замкнутый газовый тракт, выполненный из озоностойких шлангов, с генератором озона на поверхностном барьерном разряде (OZ), проточным измерителем концентрации озона (OM) и перистальтическим насосом (PP). Озон, синтезируемый в OZ в слабом потоке воздуха (0.05-0.1 л/мин) продавливается по тракту через газораспределитель пластикового контейнера в пробу. При включении OZ и PP концентрация озона в тракте в течение 1-2 минут выходит на насыщение. После установления постоянной концентрации в тракте, начинается отсчет времени на экспозицию пробы. По окончании выдержки, озон прогоняется в разложитель. Озонирование проводилось при концентрациях озона 2, 4, 6 и 8 г/м<sup>3</sup> и экспозициях 15, 30, 45 и 60 минут на каждой из концентрации.

Проращивание проводилось следующим образом. Семена раскладывали в пластиковых контейнерах по 100 штук на повторность, не менее чем в трех повторностях на вариант, всего по 400 штук в индивидуальный контейнер, на расстоянии примерно 1 см друг от друга. Проращивание обработанных и контрольных семян проводили в течение трех суток в темноте в термостате (24±1°C) на двух слоях фильтровальной бумаги, смоченной дистиллированной водой, при влажности воздуха не менее 90%. Дополнительно фильтровальная бумага увлажнялась ежесуточно дистиллированной водой, контейнеры проветривались и переставлялись в термостате. На третьи сутки измеряли морфометрические характеристики (длина побега, длина индивидуальных корней). Одновременно брали навески по 1 г побегов и корней для экстракции из них липидов с целью дальнейшего определения качественного и количественного состава жирных кислот.

Экстракцию липидов из побегов и корней проводили по методу Bligh, Dyer [14]. Навеску растительной ткани 1 г растирали в жидком азоте, к полученной суспензии добавляли смесь хлороформ: метанол: вода в соотношении 2:1:0.8 (v/v). Смесь переносили в делительную воронку, оставляли на 2 часа, после разделения фаз отбирали хлороформенный слой (нижний). Концентрирование экстракта проводили в токе аргона. Вес липидов определяли гравиметрическим методом.

Метилловые эфиры жирных кислот получали следующим образом. Для получения метиловых эфиров жирных кислот после упаривания к экстракту липидов добавляли 1% метанольный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Полученную смесь

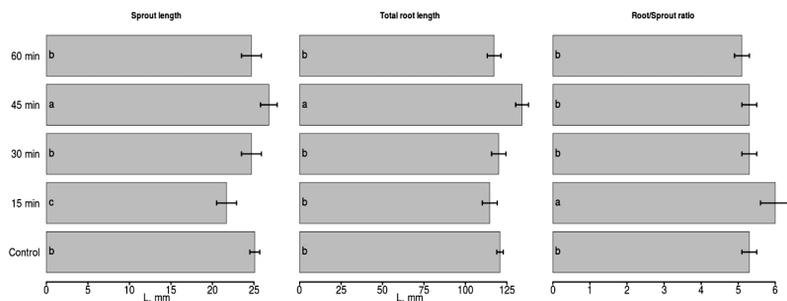
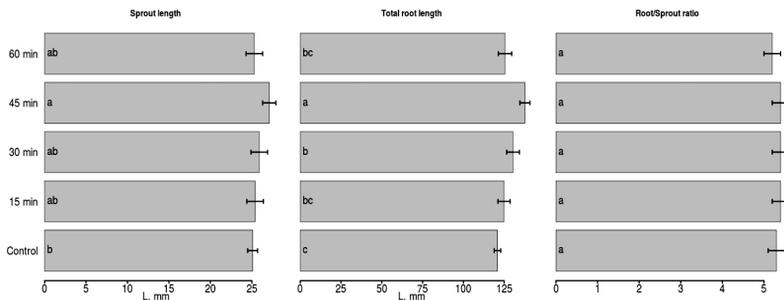
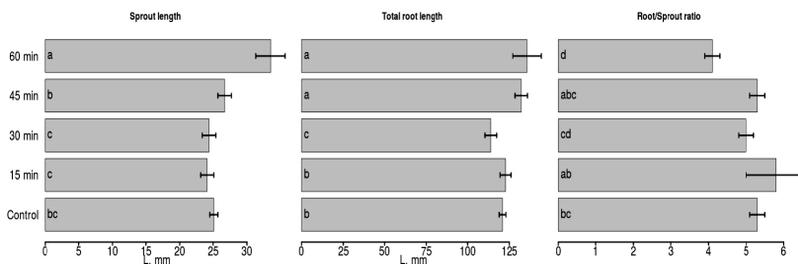
нагревали на водяной бане при температуре 85°C в течение 30 минут. После охлаждения метиловые эфиры жирных кислот трижды экстрагировали гексаном. Экстракт концентрировали в токе аргона. Далее метиловые эфиры жирных кислот липидов анализировали методом хромато-масс-спектрометрии на хромато-масс-спектрометре 5973 N/ 6890NMSD 6890N Agilent Technology (США). Для разделения использовали капиллярную колонку HP-INNOWAX (30 м x 250 мкм x 0.50 мкм). Неподвижная фаза – полиэтиленгликоль. Подвижная фаза: гелий; скорость потока газа – 1 мл/мин. Температура испарителя 250°C, источника ионов - 230°C, детектора - 150°C, температура линии, соединяющей хроматограф с масс-спектрометром - 280°C. Хроматографирование в изократическом режиме при 200°C. Для идентификации пиков метиловых эфиров жирных кислот использовали значение времени удерживания стандартов и индекс эквивалентной длины алифатической цепи (ECL) [15]. Оценку насыщенности жирных кислот в липидах образцов проводили при помощи индекса двойных связей [18]. Влияние озонирования на биосинтез ненасыщенных жирных кислот определяли по активностям ацил-липидных  $\omega$ 9-,  $\omega$ 6- и  $\omega$ 3-десатураз, участвующих в биосинтезе олеиновой, линолевой и  $\alpha$ -линоленовой кислот соответственно [7].

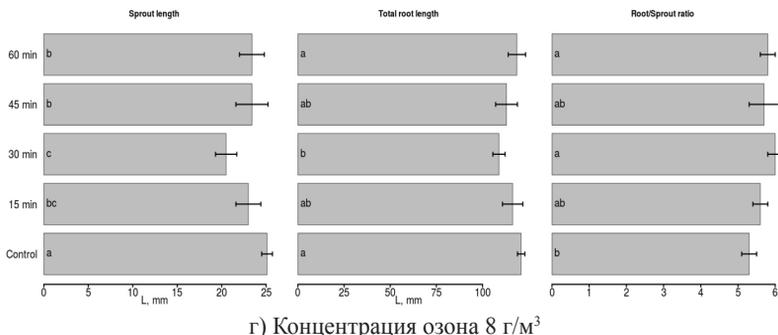
Морфометрические характеристики представлены в виде гистограмм, где указываются средние значения с обозначением 95% доверительных интервалов. Достоверность отличий между вариантами, при сравнении данных морфометрии подтверждалась по тесту множественных сравнений Тьюки. Столбцы, подписанные одинаковыми литерам, не имеют достоверных отличий. Статистическая обработка данных по морфологическим характеристикам проведена с помощью языка программирования R. Полученные данные по содержанию ЖК обрабатывали стандартными статистическими методами с помощью программы SigmaPlot v. 12.5. Содержание ЖК сравнивали с использованием непараметрического теста Манна–Уитни. Статистически значимым считали различие между сравниваемыми средними величинами со степенью доверительной вероятности выше 95% ( $p < 0.05$ ) или 99% ( $p < 0.01$ ). В таблицах представлены средние арифметические значения из 3-5-ти биологических повторностей и их стандартные отклонения.

### **Результаты исследования**

Морфологические исследования проростков после обработки озоном в сравнении с контролем, который не подвергался воздействию, представлены на рисунке 1 а-г.

На концентрации  $2 \text{ г/м}^3$  присутствует один режим со стимуляцией длины побега и корня – 45 минут экспозиции, один режим с ингибированием длины побега, но отличный по длине корня – 15 минут экспозиции. На концентрации  $4 \text{ г/м}^3$  присутствует один режим со стимуляцией длины побега и корня – 45 минут экспозиции, один режим со стимуляцией только длины корня – 30 минут. На концентрации  $6 \text{ г/м}^3$  наблюдается значительная стимуляция длины побега и корня при экспозиции 60 минут.

а) Концентрация озона  $2 \text{ г/м}^3$ б) Концентрация озона  $4 \text{ г/м}^3$ в) Концентрация озона  $6 \text{ г/м}^3$



г) Концентрация озона 8 г/м<sup>3</sup>  
**Рис. 1.** Длина побега, суммарная длина индивидуальных корней и отношение этих длин для различных концентрации озона и экспозиций.

В одном режиме стимулируется только длина корней – 45 минут, в одном режиме ингибируется длина корней – 30 минут экспозиции. На концентрации 8 г/м<sup>3</sup> наблюдается в одном режиме ингибирование длины побега и корня – 30 минут экспозиции. Во всех рассмотренных экспозициях длина побега ингибируется. В рассмотренном диапазоне концентрации и экспозиции не наблюдается каких-либо связей между увеличением экспозиции в рамках одной концентрации и ответом морфологических характеристик. Тем не менее, при росте концентрации ответ проростков становится все более негативным. Вариант обработки семян при экспозиции 45 минут с точки зрения оценки ЖК состава представлял наибольший интерес, так как в этом случае наблюдались как режимы, стимулирующие ростовые процессы (концентрации 2-6 г/м<sup>3</sup>), так и режим в котором наблюдается тенденция к уменьшению длины побега и корней (8 г/м<sup>3</sup>) (рис. 1). Результаты анализа состава ЖК липидов исследуемого объекта в контроле и в условиях опыта приведены в таблицах 1-2. Показано, что содержание ЖК является органоспецифичным. Качественный и количественный состав ЖК побегов озимой пшеницы после озонирования в сравнении с контрольными пробами представлены в таблице 1.

В исследуемых пробах были обнаружены насыщенные ЖК с 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22 углеродными атомами. Содержание каждой из них составляло менее одного процента. За исключением пальмитиновой кислоты (C 16:0), которая составляла более 80% от суммы насыщенных ЖК. В ЖК составе липидов побегов озимой пшеницы в контроле и в опыте относительное содержание насыщенных ЖК варьировало в пределах 25% (табл.1). Относительное содержание ненасыщенных ЖК изменялось в пределах 75% как в условиях озонирования, так и в контроле (табл. 1). В составе ненасыщенных

ЖК были определены моноеновые, диеновые и триеновые жирные кислоты. Моноеновые жирные кислоты представлены  $\omega$  7 (C16:1, C18:1);  $\omega$  9 (C16:1, C18:1, C20:1) и  $\omega$  11 (C22:1) жирными кислотами. Содержание моноеновых жирных кислот (сумма) варьировала от 16 % в контроле до 12% при обработке озоном 2 г/м<sup>3</sup>. Основной вклад в общее содержание моноеновых жирных кислот вносит олеиновая кислота (C18:1(n-9)). Содержание, которой достоверно увеличивалось при обработке озоном 6 и 8 г/м<sup>3</sup> с 8% в контроле до 9% после обработки. В варианте 2 г/м<sup>3</sup> отсутствует гондоевая (C22:1(n-11)) ЖК. Содержание этой кислоты достоверно снижается в опытных вариантах 4 и 6 г/м<sup>3</sup> по сравнению с контролем.

Таблица 1.

**Содержание (% вес) и состав жирных кислот липидов побегов проростков озимой пшеницы, выращенных после обработки семян озоном**

Индексы ЖК	Контроль	Озон 2 г/м <sup>3</sup>	Озон 4 г/м <sup>3</sup>	Озон 6 г/м <sup>3</sup>	Озон 8 г/м <sup>3</sup>
C14:0	0.4 ± 0.04	0.54 ± 0.11**	0.44 ± 0.04	0.63 ± 0.09*	0.48 ± 0.04**
C15:0	0.08 ± 0.01	0.17 ± 0.02*	0.09 ± 0.03	0.11 ± 0.01**	0.09 ± 0.01
C16:0	22.2 ± 1.43	23.5 ± 1.88	22.6 ± 1.91	21.5 ± 0.66	22.7 ± 1.14
C17:0	0.07 ± 0.01	0.12 ± 0.01*	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.02*	0.09 ± 0.01
C18:0	1.12 ± 0.31	0.94 ± 0.1	1.15 ± 0.36	1.39 ± 0.16	1.33 ± 0.02
C20:0	0.17 ± 0.01	0.21 ± 0.03*	0.18 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.18 ± 0.02
C22:0	0.85 ± 0.07	0.95 ± 0.05	0.95 ± 0.07**	0.87 ± 0.02	0.99 ± 0.09**
C16:1(n-9)	0.16 ± 0.01	0.18 ± 0.01*	0.13 ± 0.02*	0.24 ± 0.03*	0.21 ± 0.04*
C16:1(n-7)	0.11 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.0*	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.01
C18:1(n-9)	8.7 ± 0.55	7.7 ± 0.04*	8.3 ± 0.91	9.34 ± 0.31	9.5 ± 0.2**
C18:1(n-7)	0.8 ± 0.06	0.68 ± 0.08**	0.75 ± 0.06	0.74 ± 0.02**	0.8 ± 0.06
C18:2(n-6)	31.8 ± 2.01	30.3 ± 1.31	31.7 ± 3.19	32.4 ± 0.31	29.3 ± 0.64
C18:3(n-3)	32.1 ± 1.67	33.9 ± 1.53	32.1 ± 1.56	30.0 ± 0.77	31.4 ± 1.07
C20:1(n-9)	1.3 ± 0.21	0.93 ± 0.03	1.1 ± 0.13	1.43 ± 0.1	1.61 ± 0.11*
C22:1(n-11)	1.3 ± 0.0	–	0.94 ± 0.08*	0.96 ± 0.06*	1.29 ± 0.05
Σ SFA	24.8 ± 1.69	24.8 ± 1.32	24.5 ± 1.81	24.8 ± 0.75	25.8 ± 1.33
Σ UFA	75.2 ± 0.96	73.7 ± 2.66	75.3 ± 1.91	75.2 ± 0.75	74.2 ± 1.33
ИДС	1.72	1.72	1.71	1.68	1.66
SDR	0.89	0.90	0.89	0.88	0.88
ODR	0.87	0.88	0.87	0.86	0.85
LDR	0.50	0.53	0.50	0.48	0.52

*Примечание.* Здесь и далее ΣSFA – насыщенные жирные кислоты, ΣUFA – ненасыщенные жирные кислоты, ИДС – индекс двойных связей, SDR – стеарил–десатуразное отношение, ODR– олеил–десатуразное отношение, LDR–линолеил–десатуразное отношение. Значимость различий рассчитана с помощью теста Манна-Уитни (\* - p<0.01, \*\* - p<0.05). n=5

Семейство диеновых жирных кислот представляла линолевая кислота (C18:2(n-6)). Содержание линолевой кислоты менялось в зависимости от варианта, но в основном оставалось на контрольном уровне. Из семейства триеновых жирных кислот была идентифицирована  $\alpha$  – линоленовая кислота (C18:3(n-3)). В опытных вариантах ее содержание колебалось в незначительных пределах 1% от контроля. Индекс двойных связей характеризует степень насыщенности липидов. Этот показатель учитывает не только содержание ненасыщенных жирных кислот, но и количество двойных связей в них. Значение индекса двойных связей (ИДС) ЖК липидов больше 1,0 говорит о высокой доле в составе липидов ненасыщенных жирных кислот, содержащих в своем составе кратные связи [6]. По показателю ИДС липидов побегов наблюдается тенденция к снижению после озонирования, с 1.72 в контроле до 1.66 после обработки озоном 8 г/м<sup>3</sup> (табл.1).

Значения десатуразных отношений (SDR, ODR, LDR) показывают активность соответствующих десатураз ( $\omega$  9, 6, 3). Показатели SDR, ODR в опытных вариантах оставались практически на уровне контроля (0.89-SDR; 0.87- ODR) и составляли 0.88-0.90 для SDR и 0.85-0.88 для ODR. Значение LDR в опытных вариантах варьировало (0.48-0.53) от значения контроля (0.53) (табл.1).

Качественный состав ЖК липидов побегов и корней до и после озонирования одинаков (табл. 1 и табл. 2). Однако содержание главных ЖК значительно отличается в контроле и в опытах. В липидах корней проростков озимой пшеницы содержание насыщенных ЖК больше, чем в побегах и составляет 26% в контроле, 27% при воздействии озоном в концентрациях 6 и 8 г/м<sup>3</sup>, 29 % при озонировании 2 и 4 г/м<sup>3</sup>. Такое варьирование происходит за счет изменения содержания главных насыщенных ЖК, пальмитиновой (C16:0) и стеариновой (C18:0) (табл. 2).

Основная доля от общего содержания, так же как и в липидах побегов, принадлежит ненасыщенным ЖК. Моноеновые ЖК представлены теми же семействами, что и в липидах побегов (табл.1 и табл.2). Итоговая сумма моноеновых ЖК снижается после обработки озоном 2, 6, 8 г/м<sup>3</sup> с 15% в контроле до 10-13 % после обработки.

Интересно, что в опытном варианте - озон 6 г/м<sup>3</sup> отсутствует гондоевая ЖК (C22:1(n-11)), она отсутствует и в составе ЖК побегов в варианте озон 2 г/м<sup>3</sup> (табл.1). В липидах корней в вариантах озон 2 и 4 г/м<sup>3</sup> идет достоверное увеличение содержание этой кислоты с 1.23 % в контроле до 1.43 и 2.42 % в опытных вариантах (табл.2).

Таблица 2.

**Содержание (% вес) и состав жирных кислот липидов корней проростков озимой пшеницы, выращенных после обработки семян озоном**

Индексы ЖК	Контроль	Озон 2 г/м <sup>3</sup>	Озон 4 г/м <sup>3</sup>	Озон 6 г/м <sup>3</sup>	Озон 8 г/м <sup>3</sup>
C14:0	0.47 ± 0.04	0.51 ± 0.06	0.49 ± 0.16	0.54 ± 0.03*	0.41 ± 0.11
C15:0	0.24 ± 0.01	0.27 ± 0.03	0.3 ± 0.12	0.21 ± 0.0*	0.23 ± 0.03
C16:0	23.3 ± 0.69	25.5 ± 0.57*	25.63 ± 2.75	23.22 ± 0.26	23.93 ± 0.48
C17:0	0.12 ± 0.03	0.14 ± 0.03	0.17 ± 0.12	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.01
C18:0	1.82 ± 0.16	2.1 ± 0.08**	2.05 ± 0.44	2.17 ± 0.07*	1.57 ± 0.14
C20:0	0.34 ± 0.05	0.32 ± 0.04	0.37 ± 0.11	0.23 ± 0.03*	0.2 ± 0.02*
C22:0	0.74 ± 0.12	0.88 ± 0.08	0.97 ± 0.23	0.67 ± 0.02	0.67 ± 0.04
C16:1(n-9)	0.43 ± 0.04	0.39 ± 0.03	0.43 ± 0.12	0.36 ± 0.03	0.33 ± 0.02*
C16:1(n-7)	0.43 ± 0.14	0.24 ± 0.02*	0.31 ± 0.03	0.58 ± 0.07	0.52 ± 0.05
C18:1(n-9)	10.1 ± 0.7	9.3 ± 0.37**	9.68 ± 0.94	7.62 ± 0.44*	7.9 ± 0.3*
C18:1(n-7)	1.17 ± 0.13	1.01 ± 0.1**	0.93 ± 0.11*	1.16 ± 0.02	1.2 ± 0.04
C18:2(n-6)	46.6 ± 1.6	46.5 ± 1.27	40.8 ± 2.19*	50.8 ± 0.23*	49.3 ± 0.73
C18:3(n-3)	11.4 ± 0.84	11.49 ± 0.64	12.2 ± 0.38	11.21 ± 0.18	11.86 ± 0.5
C20:1(n-9)	1.71 ± 0.17	1.5 ± 0.23	2.06 ± 0.04*	0.81 ± 0.08*	1.19 ± 0.15*
C22:1(n-11)	1.23 ± 0.11	1.43 ± 0.04*	2.42 ± 0.1*	-	0.61 ± 0.01*
∑ SFA	26.7 ± 0.81	29.3 ± 0.56*	29.8 ± 3.37	27.3 ± 0.26	27.1 ± 0.72
∑ UFA	73.4 ± 0.81	69.8 ± 1.26*	68.7 ± 3.59*	72.8 ± 0.26	72.9 ± 0.72
ИДС	1.42	1.41	1.34	1.46	1.46
SDR	0.86	0.83	0.83	0.80	0.85
ODR	0.83	0.85	0.83	0.87	0.87
LDR	0.20	0.20	0.23	0.18	0.20

*Примечание.* ∑SFA – насыщенные жирные кислоты, ∑UFA – ненасыщенные жирные кислоты, ИДС – индекс двойных связей, SDR – стероил-десатуразное отношение, ODR – олеил-десатуразное отношение, LDR – линолеил-десатуразное отношение. Значимость различий рассчитана с помощью теста Манна-Уитни (\* - p<0.01, \*\* - p<0.05). n=5

Наблюдается достоверное снижение содержания основной моноеновой кислоты (C18:1(n-9)-олеиновой) с 10 до 7%. Содержание линолевой кислоты (C18:2(n-6)) значительно варьировало, чего не наблюдалось в липидах побегов. Показано, что содержание этой кислоты достоверно снижается в варианте озон 4 г/м<sup>3</sup> с 46% до 40%. В вариантах озон 6 и 8 наблюдается достоверное увеличение содержания олеиновой кислоты. Полученные

значения для  $\alpha$  – линоленовой кислоты (C18:3(n-3)) в опытных вариантах оставались на уровне контроля 11%.

Варьирование содержание главных ЖК как насыщенных, так и ненасыщенных отражается на ИДС. Значения данного индекса в липидах корней показывают увеличение ненасыщенности липидов при обработке озоном 6 и 8 г/м<sup>3</sup>, показатели возрастают с 1.42 до 1.46. Уменьшение ненасыщенности липидов корней происходит при обработке озоном 2 и 4 г/м<sup>3</sup>, показатели уменьшаются с 1.42 до 1.41 и 1.34 соответственно (табл. 2).

Активность десатураз ( $\omega$  9, 6, 3) в корнях отличается от активности десатураз в побегах. В корнях более выражены изменения в величинах десатуразных отношений (SDR, ODR, LDR). Значение SDR снижается при обработке озоном с 0.86 до 0.80-0.85. Показатели ODR возрастают с 0.83 до 0.85-0.87 в вариантах озон 2, 6 и 8 г/м<sup>3</sup>. Величина LDR в опытных вариантах остается практически на уровне контрольного значения 0.20, за исключением варианта озон 4 г/м<sup>3</sup>-0.23 и варианта озон 6 г/м<sup>3</sup>-0.18.

Таким образом, при обработке семян пшеницы озоном (2, 4, 6, 8 г/м<sup>3</sup>) в разной степени изменяется содержание ЖК липидов в побегах и в корнях проростков. Однако более выраженные изменения наблюдаются в липидах корней проростков.

### Обсуждение

Целью данной работы было определить, как влияет обработка семян разными концентрациями озона на морфологические (длина корня, длина побега) и биосинтетические (биосинтез ЖК) процессы побегов и корней проростков озимой пшеницы. В нашем исследовании показано, что при небольшой концентрации озона увеличивается длина корней и побегов. При повышении концентрации озона до 8 г/м<sup>3</sup> наблюдается ингибирование морфологических показателей. Подобная зависимость наблюдается при выращивании озимой пшеницы на водных дисперсионных системах, содержащих наночастицы никеля [9].

Если обобщить реакции морфологических характеристик и интегральных показателей ЖК, то используемые концентрации озона оказывают различное влияние на каждый из показателей по сравнению с контролем:

- Озон 2 г/м<sup>3</sup>. Увеличивается длина побега и общая длина корневой системы. В побегах показатели LDR увеличиваются. В корнях значения SDR снижаются.

- Озон 4 г/м<sup>3</sup>. Увеличивается длина побега и общая длина корневой системы. Влияет только на корни. Показатели LDR увеличиваются, а SDR снижаются.

- Озон 6 г/м<sup>3</sup>. Тенденция к увеличению длины побега, увеличение общей длины корневой системы. В побегах и корнях показатели SDR, ODR, LDR уменьшались. За исключением ODR в корнях, там значения ODR увеличивались.

- Озон 8 г/м<sup>3</sup>. Тенденция к ингибированию длины побега и общей длины корневой системы. В побегах снизились показатели SDR, ODR и увеличились показатели LDR. В корнях значение SDR снизилось, ODR увеличилось, а LDR осталось на уровне контроля.

Известно, что обработка озоном семян риса приводит к повышению содержания в семенах липидов [22]. При этом не известно, каким образом изменение содержания липидов в обработанных семенах скажется на развитии и ЖК-составе выращенных из них проростков. Изменения в составе ЖК липидов обеспечиваются благодаря деятельности десатураз жирных кислот [8]. Биосинтез олеиновой (C18:1), линолевой (C18:2) и линоленовой (C18:3) кислот у большинства видов высших растений осуществляется с участием ацил-липидных десатураз, обеспечивающих образование двойных связей в углеводородных цепях ЖК типа C18. В этой связи оценка активности жирнокислотных десатураз с помощью стеароил- (SRD), олеил- (ORD) и линолеил- (LDR) десатуразных отношений позволяет в определенной мере судить о механизмах синтеза и роли, ненасыщенных ЖК, доминирующих в структуре липидов [1]. Считается, что гены ацил-липидной  $\omega$  9 десатуразы, обеспечивающей введение первой двойной связи всегда работают на одном постоянном уровне [1]. Данное утверждение уже не раз опровергалось рядом исследователей [5, 7]. В наших экспериментах так же не наблюдалось стабильной активности  $\omega$  9 десатураз. Во всех вариантах опыта значения SDR либо снижались, либо увеличивались.

Активность  $\omega$  6 десатураз более стабильна в вариантах озон 2 и 4 г/м<sup>3</sup>. В вариантах озон 8 и 6 г/м<sup>3</sup> значения ODR либо меньше, либо больше контрольных. Дополнительные двойные связи, обеспечивающие более высокую степень ненасыщенности ЖК, необходимы в условиях стресса. При воздействии, которых клеткам необходимо восстанавливать текучесть мембран [24, 17]. Видимо концентрация озона 8 и 6 г/м<sup>3</sup> вызывает нарушение текучести мембран. В результате чего клеткам проростков необходимо активировать работу  $\omega$  6 десатураз. Кроме этого, высокие значения от 0.7 свидетельствуют, что олеиновая кислота активно конвертируется ацил-липидной  $\omega$  6 десатуразой в линолеовую кислоту. Это говорит об адаптации клеток к стрессам [7]. В наших экспериментах вычисленные значения ODR были более 0.8.

Величины леноил-десатуразного отношения (LDR) может варьировать от 0.03 до 0.85 [5, 7]. Наши исследования показали, что  $\omega$  3 десатуразы органоспецифичны, так как значения LDR для побега были в пределах 0.5, а для корней в пределах 0.2. При этом наблюдалось изменение активности  $\omega$  3 десатуразы во всех вариантах опыта. Ранее исследователи показали, что ацил-липидная  $\omega$  3 десатураза катализирует превращение линолевой кислоты в линоленовую. В связи, с чем меняются величины LDR, отражающих активность  $\omega$  3 десатуразы [25, 1].

Несмотря на разнонаправленное действие озона, на содержание ЖК состав липидов наблюдается одна общая тенденция, в побегах проростков идет снижение ненасыщенности липидов, а в корнях идет увеличение за исключением варианта озон 4 г/м<sup>3</sup>. В варианте озон 2 г/м<sup>3</sup> как в побегах, так и в корнях, не наблюдается изменения ненасыщенности липидов.

Следует отметить, что максимальное содержание ненасыщенных ЖК в липидах обеспечивает поддержание жидкого фазового состояния мембран, необходимого для нормального функционирования клетки [6].

Известно, что фазовое состояние (текучесть) мембран поддерживается на оптимальном уровне за счет активности десатураз жирных кислот (ЖК). Текучесть мембран считается важной детерминантой клеточного метаболизма. Клеточные мембраны быстро и обратимо реагируют на экзогенные воздействия через усиление или уменьшение текучести, что может быть триггером, запускающим трансдукцию сигналов и способствующим тем самым адаптации растений [3, 19].

В наших экспериментах показано, что в корнях проростков после озонирования идет увеличение ненасыщенности липидов. Возможно, это является неспецифической реакцией липидов корней на действие озона. Такая реакция свойственна корням проростков других растений подвергнутых стрессу. В побегах проростков, наблюдалось обратное, происходило снижение ненасыщенности, чего не наблюдалось в побегах проростков растений подвергнутых температурному стрессу и влиянию электромагнитного поля [2, 7]. В связи с чем, можно сказать, что в побегах проростков озимой пшеницы после озонирования возникла специфическая реакция липидов в ответ на воздействие озоном.

### **Заключение**

Все использованные в работе концентрации озона не оказывают значительного влияния на качественный состав ЖК липидов как побегов, так и корней проростков объекта исследования. На количественный состав ЖК

липидов побегов и корней озонирование оказывало разнонаправленное действие, что повлекло за собой ответные специфические и неспецифические реакции, связанные с насыщенностью липидов. Если оценивать концентрационные эффекты (повышение концентрации в рамках одной экспозиции от 2 до 8 г/м<sup>3</sup>), то они в полной мере проявляются только в рамках оценки ИДС. Также не было выявлено однозначного соответствия между ответом морфологических характеристик и ЖК составом, хотя в рамках оценки морфологических характеристик наблюдались как стимулирующие, так и ингибирующие последствия. При этом практически во всех обработках ответ в длине побега и длине корневой системы являлся равнозначным.

**Информация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** В работе использовано оборудование ЦКП «Биоаналитика» СИФИБР СО РАН (г. Иркутск). ЦКП «Биоресурсный центр» Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (Иркутск).

**Информация о спонсорстве.** Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук № МК-666.2020.11.

### *Список литературы*

1. Алаудинова Е. В., Миронов П. В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* ledeb., *Picea obovata* L. и *Pinus sulvestris* L. // Химия растительного сырья. 2009. Т. 2. С. 71–76.
2. Влияние низких температур на жирнокислотный состав контрастных температур по холодоустойчивости видов злаков / Макаренко С. П., Дударева Л. В., Катышев А. И., Коненкина Т. А., Назарова А. В., Рудиковская Е. Г., Соколова Н. А., Черникова В. В., Константинов Ю. М. // Биологические мембраны. 2010. № 27. С. 482–488.
3. Гималов Ф. Р. Восприятие растениями холодового сигнала, или как устроен растительный «Термометр» // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 19–24. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2018-0-2-19-24>
4. Демиденко Г.А. Морфометрические особенности проростков семян разных сортов яровой пшеницы при использовании азотных удобрений

- // Вестник КрасГАУ. 2020. № 6. С. 20–27. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-6-20-27>
5. Динамика сезонных изменений жирнокислотного состава, степени насыщенности жирных кислот и активности ацил-липидных десатураз в тканях некоторых лекарственных растений, произрастающих в условиях предбайкалья / Граскова И. А., Дударева Л. В., Живетьев М. А., Столбикова, А. В., Соколова Н. А., Войников В. К. // Химия растительного сырья. 2011. № 4. С. 223–230.
  6. Жирнокислотный состав фракций суммарных липидов почек растений рода *Betula L.* по фазам распускания / Морозова И. В., Чернобровкина Н. П., Ильинова М. К., Робонен Е. В., Цыдендамбаев В. Д., Пчёлкин В. П. // Физиология растений. 2021. Т. 68. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.31857/S0015330321010139>
  7. Кондратенко Е. П., Соболева О. М., Сухих А.С. Влияние электромагнитного поля СВЧ на жирнокислотный состав *hordeum sativum* // Химия растительного сырья. 2017. № 3. С. 93–99. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031792>
  8. Лось Д.А. Десатуразы жирных кислот. М. Научный мир, 2014. 370 с.
  9. Морфофизиологические особенности проростков пшеницы (*Triticum aestivum L.*) при воздействии наночастиц никеля / Зотикова А. П., Астафурова Т. П., Буренина А. А., Сучкова С.А., Моргалев Ю.Н. // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 3. С. 578–586. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.3.578rus>
  10. Семинченко Е.В., Солонкин А.В. Влияние климатических факторов на урожай озимой пшеницы и ярового ячменя в условиях сухой степи Нижнего Поволжья // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14. № 3. С. 58-74. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-58-74>
  11. Сидоров Р. А., Цыдендамбаев В. Д. Биосинтез жирных масел у высших растений // Физиология растений. 2014. Т. 61. С. 3–22.
  12. Allen B., Wu J., Doan H. Inactivation of Fungi Associated with Barley Grain by gaseous ozone // Journal of Environmental Science and Health. 2003, Part B, vol. 38, no. 5, pp. 617-630. <https://doi.org/10.1081/PFC-120023519>
  13. Application of ozone in grain processing / Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O’Donnell C.P. // Journal of Cereal Science. 2010, vol. 51, no. 3, pp. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>
  14. Bligh E. G., Dyer W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification // Can. J. Biochem. Physiol. 1959, vol. 37, pp. 911–917.

15. Christie W. W. Equivalent chain lengths of methyl ester derivatives of fatty acids on gas chromatography: a reappraisal // *J. Chromatogr.* 1988, vol. 447, pp. 305–314.
16. Isikber A. A., Athanassiou C. G. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products // *Journal of Stored Products Research.* 2015, vol. 64, pp. 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.06.006>
17. Lim G. H., Singhal R., Kachroo A., Kachroo P. Fatty Acid – and Lipid-Mediated Signaling in Plant Defense // *Annu. Rev. Phytopathol.* 2017, vol. 55, pp. 505–536. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035406>
18. Lyons J. M., Wheaton T. A., Pratt H. K. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plant // *Plant Physiology.* 1964. vol. 39, pp. 262–268.
19. Niu Y., Xiang Y. An Overview of Biomembrane Functions in Plant Responses to High-Temperature Stress // *Front. Plant Sci.* 2018, vol. 9, pp. 915. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00915>
20. Rifna E.J., Ratish Ramanan K., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination // *Trends in Food Science & Technology.* 2019, vol. 86, pp. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
21. The Effect of Surface Barrier Discharge Plasma Products on the Germination of Cereals / Lazukin A.V., Grabel'nykh O. I., Serdyukov Yu. A., Pobezhimova T. P., Nurminskii V. N., Korsukova A. V., Krivov S. A. // *Tech. Phys. Lett.* 2019, vol. 45. no 1, pp. 16–19. <https://doi.org/10.1134/S1063785019010292>
22. The response of rice grain quality to ozone exposure during growth depends on ozone level and genotype / Frei M., Kohno Y., Tietze S., Jekle M., Hussein M. A., Becker T., Becker K. // *Environmental Pollution.* 2012, vol. 163, pp. 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.039>
23. Treatment of spring wheat seeds by ozone generated from humid air and dry oxygen / Lazukin A., Serdukov Y., Pinchuk M., Stepanova O., Krivov S., Lyubushkina, I. // *Res. Agr. Eng.* 2018, vol. 64, pp. 34-40. <https://doi.org/10.17221/106/2016-RAE>
24. Upchurch R. G. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress // *Biotechnol Lett.* 2008, vol. 30. no. 6, pp. 967–977. <https://doi.org/10.1007/s10529-008-9639-z>
25. Wu Q., Liu T., Liu H., Zheng G. Unsaturated fatty acid: Metabolism, synthesis and gene regulation // *African Journal of Biotechnology.* 2009, vol. 8. no, 9. pp. 1782–1785.

26. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry* // 2018, vol. 264, pp. 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>

### References

1. Alaudinova E. V., Mironov P. V. Lipidy meristem lesoobrazuyushchikh khvoynykh porod tsentral'noy Sibiri v usloviyakh nizkotemperaturnoy adaptatsii. 2. Osobennosti metabolizma zhirnykh kislot fosfolipidov meristem Larix sibirica Ledeb., Picea obovata L. i Pinus sulvestris L. [Lipids of meristems of forest-forming conifers of Central Siberia under conditions of low-temperature adaptation. 2. Features of fatty acid metabolism of phospholipids of meristems of Larix sibirica Ledeb., Picea obovata L. and Pinus sulvestris L.]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2009, vol. 2, pp. 71-76.
2. Makarenko S. P., Dudareva L. V., Katyshev A. I., Konenkina T. A., Nazarova A. V., Rudikovskaya E. G., Sokolova N. A., Chernikova V. V., Konstantinov Yu. M. Vliyaniye nizkikh temperatur na zhirnokislotnyy sostav kontrastnykh temperatur po kholodoustoychivosti vidov zlakov [The effect of low temperatures on fatty acid composition of crops with different cold resistance]. *Biochemistry (Moscow) Supplement Series A: Membrane and Cell Biology*, 2010, no. 27, pp. 482-488.
3. Gimalov F. R. Vospriyatiye rasteniyami kholodovogo signala, ili kak ustroen rastitel'nyy «Termometr» [Perception of cold signal by plants, or how the plant “thermometer” is set up]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, no. 2, pp. 19–24. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2018-0-2-19-24>
4. Demidenko G.A. Morfometricheskie osobennosti prorostkov semyan raznykh sortov yarovoy pshenitsy pri ispol'zovanii azotnykh udobreniy [Morphometric features of seed seedlings of different varieties of spring wheat when using nitrogen fertilizers]. *Vestnik KrasGAU*, 2020, no. 6, pp. 20–27. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-6-20-27>
5. Graskova I. A., Dudareva L. V., Zhivetiev M. A., Stolbikova A. V., Sokolova N. A., Voinikov V. K. Dinamika sezonnykh izmeneniy zhirnokislotnogo sostava, stepeni nenasyshchennosti zhirnykh kislot i aktivnosti atsil-lipidnykh desaturaz v tkanyakh nekotorykh lekarstvennykh rasteniy, proizrastayushchikh v usloviyakh predbaykal'ya [Dynamics of seasonal changes in fatty acid composition, degree of unsaturation of fatty acids and activity of acyl-lipid desaturases in tissues of some medicinal plants growing in the pre-Baikal region]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2011, no. 4, pp. 223–230.
6. Morozova I. V., Chernobrovkina N. P., Ilinova M. K., Robonen E. V., Tsyden-dambayev V. D., Pchelkin V. P. Zhirnokislotnyy sostav fraktsiy summarnykh lipidov pochk rasteniy roda Betula L. po fazam raspuskaniya [Fatty acid com-

- position of fractions of total lipids of buds of plants of the genus *Betula* L. by phases of budding]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2021, vol. 68, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.31857/S0015330321010139>
7. Kondratenko E. P., Soboleva O. M., Sukhikh A. S. Vliyanie elektromagnitnogo polya SVCh na zhirkokislotnyy sostav hordeum sativum [Influence of microwave electromagnetic field on the fatty acid composition of seedlings hordeum sativum]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2017, no. 3, pp. 93–99. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031792>
  8. Los D. A. *Desaturazy zhirnykh kislot* [Fatty acid desaturases]. Moscow, Russia: Scientific world, 2014, 370 p.
  9. Zotikova A. P., Astafurova T. P., Burenina A. A., Suchkova S.A., Morgalev Yu.N. Morfofiziologicheskie osobennosti prorostkov pshenitsy (*Triticum aestivum* L.) pri vozdeystvii nanochastits nikelya [Morphophysiological features of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) under the influence of nickel nanoparticles]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2018, vol. 53, no. 3, pp. 578–586. <https://doi.org/10.15389/agrobiologiya.2018.3.578rus>
  10. Semenchenko E.V., Solonkin A.V. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na urozhay ozimoy pshenitsy i yarovogo yachmenya v usloviyakh sukhoy stepi Nizhnego Povolzh'ya [The influence of climatic factors on the yield of winter wheat and spring barley in the conditions of the dry steppe of the Lower Volga region]. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 58–74. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-58-74>
  11. Sidorov R. A. & Tsydendambaev V. D. *Biosintez zhirnykh masel u vysshikh rasteniy* [Biosynthesis of fatty oils in higher plants]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2014, vol. 61, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1134/S1021443714010130>
  12. Allen B., Wu J., Doan H. Inactivation of Fungi Associated with Barley Grain by gaseous ozone. *Journal of Environmental Science and Health*, 2003, Part B, vol. 38, no. 5, pp. 617–630. <https://doi.org/10.1081/PFC-120023519>
  13. Application of ozone in grain processing. Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O' Donnell C.P. *Journal of Cereal Science*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.007>
  14. Bligh E. G., Dyer W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol*, 1959, vol. 37, pp. 911–917.
  15. Christie W. W. Equivalent chain lengths of methyl ester derivatives of fatty acids on gas chromatography: a reappraisal. *J. Chromatogr*, 1988, vol. 447, pp. 305–314.
  16. Isikber A. A., Athanassiou C. G. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products. *Journal of Stored Products Research*, 2015, vol. 64, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.06.006>

17. Lim G. H., Singhal R., Kachroo A., Kachroo P. Fatty Acid – and Lipid-Mediated Signaling in Plant Defense. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 2017, vol. 55, pp. 505–536. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035406>
18. Lyons J. M., Wheaton T. A., Pratt H. K. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plant. *Plant Physiology*, 1964. vol. 39, pp. 262–268.
19. Niu Y., Xiang Y. An Overview of Biomembrane Functions in Plant Responses to High-Temperature Stress. *Front. Plant Sci.*, 2018, vol. 9, pp. 915. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00915>
20. Rifna E.J., Ratish Ramanan K., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, vol. 86, pp. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
21. The Effect of Surface Barrier Discharge Plasma Products on the Germination of Cereals / Lazukin A.V., Grabel'nykh O. I., Serdyukov Yu. A., Pobezhimova T. P., Nurminskii V. N., Korsukova A. V., Krivov S. A. *Tech. Phys. Lett.*, 2019, vol. 45, no. 1, pp. 16–19. <https://doi.org/10.1134/S1063785019010292>
22. The response of rice grain quality to ozone exposure during growth depends on ozone level and genotype / Frei M., Kohno Y., Tietze S., Jekle M., Hussein M. A., Becker T., Becker K. *Environmental Pollution*, 2012, vol. 163, pp. 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.039>
23. Treatment of spring wheat seeds by ozone generated from humid air and dry oxygen / Lazukin A., Serdukov Y., Pinchuk M., Stepanova O., Krivov S., Lyubushkina, I. *Res. Agr. Eng.*, 2018, vol. 64, pp. 34-40. <https://doi.org/10.17221/106/2016-RAE>
24. Upchurch R. G. Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress. *Biotechnol Lett.*, 2008, vol. 30, no. 6, pp. 967–977. <https://doi.org/10.1007/s10529-008-9639-z>
25. Wu Q., Liu T., Liu H., Zheng G. Unsaturated fatty acid: Metabolism, synthesis and gene regulation. *African Journal of Biotechnology*, 2009, vol. 8, no. 9, pp. 1782–1785.
26. Zhu F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry*, 2018, vol. 264, pp. 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

The authors contributed equally to this article.

**ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ**

**Капустина Ирина Сергеевна**, к.б.н., старший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук*  
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
[nirinka24@mail.ru](mailto:nirinka24@mail.ru)

**Лазукин Александр Вадимович**, к.т.н., старший преподаватель

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»*  
ул. Красноказарменная, 14, стр. 1, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, г. Москва, 111250, Российская Федерация  
[lazukin\\_av@mail.ru](mailto:lazukin_av@mail.ru)

**Нурминский Вадим Николаевич**, к.б.н., старший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук*  
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
[cell@sifibr.irk.ru](mailto:cell@sifibr.irk.ru)

**Грабельных Ольга Ивановна**, д.б.н., зав. лабораторией

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук*  
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
[grolga@sifibr.irk.ru](mailto:grolga@sifibr.irk.ru)

**Озолина Наталья Владимировна**, д.б.н., зав. лабораторией

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук*  
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
[ozol@sifibr.irk.ru](mailto:ozol@sifibr.irk.ru)

**Гурина Вероника Валериевна**, к.б.н., младший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук*

*ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
nichka.g@bk.ru*

**Спиридонова Екатерина Владимировна**, к.б.н., научный сотрудник  
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Си-  
бирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского  
отделения Российской академии наук  
ул. Лермонтова, 132, г. Иркутск, 664033, Российская Федерация  
yatakol@mail.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Irina S. Kapustina**, Cand. Sc. (Biology), Senior Researcher  
*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Phys-  
iology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
nirinka24@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5159-9816>  
SPIN-code: 5302-4690  
Scopus Author ID: 57221051987  
ResearcherID: HKO-5137-2023*

**Alexander V. Lazukin**, Cand. Sc. (Technology), Senior Lecturer  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“National Research University “MPEI”  
14, building 1, Krasnokazarmennaya Str., Lefortovo, 111250, Moscow,  
Russian Federation  
lazukin\_av@mail.ru  
Scopus Author ID: 56436793700  
SPIN-code: 7197-1789  
Researcher ID: F-5112-2017*

**Vadim N. Nurminsky**, Cand. Sc. (Biology), Senior Researcher  
*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Phys-  
iology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
cell@sifibr.irk.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1265-1639>  
Scopus Author ID: 6505600003  
Researcher ID: J-6618-2018*

**Olga I. Grabelnykh**, D.Sc. (Biology), Head Laboratory

*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
grolga@sifibr.irk.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-6608>*

*Scopus Author ID: 56465955400*

*Researcher ID: R-5190-2016*

**Natalia V. Ozolina**, D.Sc. (Biology), Head Laboratory

*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
ozol@sifibr.irk.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0436-8166>*

*Scopus Author ID: 6603589496*

*Researcher ID: J-6387-2018*

**Veronika V. Gurina**, Cand. Sc. (Biology), Junior Researcher

*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
nichka.g@bk.ru*

*Scopus Author ID: 54781473600*

*Researcher ID: CAA-0522-2022*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-0818>*

*SPIN-code: 9450-2258*

**Ekaterina V. Spiridonova**, Cand. Sc. (Biology), Researcher

*Federal State Budgetary Institution of Science Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
132, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation  
yatakol@mail.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7440-5658>*

*Researcher ID: J-7334-2018*

Поступила 12.04.2023

После рецензирования 30.04.2023

Принята 05.05.2023

Received 12.04.2023

Revised 30.04.2023

Accepted 05.05.2023