DOI 10.54016/SVITOK.2023.29.77.002
УДК 633.854.54:631.526.32:001.53

Продуктивность и жирнокислотный состав масла льна масличного сорта Ермак в зависимости от условий возделывания

© 2023. В. Н. Бражников
ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», г. Тверь, Российская Федерация

Лён – одно из ценнейших сельскохозяйственных растений. По биологической ценности льняное масло занимает одно из первых мест среди других пищевых растительных масел. Различное соотношение жирных кислот позволяет использовать его на пищевые и технические цели. Цель исследований – изучить влияние гидротермических условий на урожайность, содержание и жирнокислотный состав масла семян льна масличного сорта Ермак, а также проанализировать связь биохимического состава масла с гидротермическими показателями основных фаз органогенеза. Эксперименты выполняли в ФГБНУ «Пензенский НИИСХ» в 2013–2017 гг. Материалом для исследования служил сорт Ермак, имеющий измененный ЖКС (жирнокислотный состав) масла. Работу выполняли согласно «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур». Идентификацию и определение содержания высокомолекулярных жирных кислот выполняли методом газожидкостной хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.1». Коэффициенты корреляции между урожайностью, масличностью семян, содержанием сырого протеина и гидротермическими условиями в отдельные межфазные периоды роста и развития льна варьировали в пределах r = -0,94–0,93. Определены жирные кислоты, содержание которых слабо изменялось в зависимости от метеоусловий: лигноцериновая кислота – 0,118 % (C_V = 1,6%), маргаринолеиновая – 0,040% (C_V = 4,8%), пальмитиновая – 5,506% (C_V = 5,9%), линолевая кислота – 39,971% (C_V = 5,4%), маргариновая – 0,060% (C_V = 7,4%), эйкозадиеновая – 0,043% (C_V = 8,2%) и стеариновая – 3,742% (C_V = 8,3%). Установлена зависимость содержания жирных кислот как между собой (r = -0,91–0,88), так и их сопряжение с гидротермическими условиями (r = -0,94–0,91). Наибольшее влияние на ЖКС масла (качество) оказали гидротермические условия периодов бутонизация–цветение и цветение–созревание (среднесуточная температура и сумма активных температур). Требуемый ЖКС масла получен во все годы исследований, что обусловлено геномом сорта Ермак. Создана математическая модель сорта. Установленные зависимости следует учитывать в селекционной работе, направленной на создание новых сортов льна масличного, а также в производстве для прогнозирования не только урожайности, но и масличности семян и ЖКС масла.

Ключевые слова: лён масличный, урожайность, масличность, жирнокислотный состав масла.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания Федерального научного центра лубяных культур (№ FGSS-2022-0008). Выражаем благодарность Бражниковой Ольге Фёдоровне, кандидату сельскохозяйственных наук, лаборанту-исследователю лаборатории селекционных технологий ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур».

Для цитирования: Бражников В.Н. Продуктивность и жирнокислотный состав масла льна масличного сорта Ермак в зависимости от условий возделывания. Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2023; 4(3):(17-29). DOI: 10.54016/SVITOK.2023.29.77.002.

Поступила: 21.11.2023 Принята к публикации: 05.12.2023 Опубликована: 27.12.2023

Productivity and fatty acid composition of flax oil of the Ermak oilseed variety depending on cultivation conditions

© 2023. V. N. Brazhnikov
Federal Research Center for Bast Fiber Crops
Tver, Russian Federation

Flax is one of the most valuable agricultural plants. In terms of biological value, flaxseed oil is one of the first among other edible vegetable oils. The different ratio of fatty acids allows it to be used for food and technical purposes. The aim of the research is to study the effect of hydrothermal conditions on the yield, content and fatty acid composition of the oil of flax seeds of the oilseed variety Ermak, and also to analyze the relationship between the biochemical composition of the oil and the hydrothermal indicators of the main phases of organogenesis. The experiments were carried out at the separate division of the Penza Research Institute of Agriculture Federal Research Center for Bast Fiber Cropsin 2013–2017. The material for the study was the Ermak variety, which has a modified FS (fatty acid composition) of the oil. The work was carried out according to the "Methodology for state variety testing of agricultural crops." The identification and determination of the content of high molecular weight fatty acids was performed by gas-liquid chromatography on a Kristall 5000.1 chromatograph. The correlation coefficients between the yield, seed oil content, crude protein content, and hydrothermal conditions in individual interfacial periods of flax growth and development varied within r = -0.94–0.93. Fatty acids were determined, the content of which slightly changed depending on meteorological conditions: lignoceric acid - 0.118% (CV = 1.6%), margarinoleic acid - 0.040% (CV = 4.8%), palmitic acid - 5.506% (CV = 5.9 %), linoleic acid - 39.971% (CV = 5.4%), margaric acid - 0.060% (CV = 7.4%), eicosadienic acid - 0.043% (CV = 8.2%) and stearic acid - 3.742% (CV = 8.3%). The dependence of the content of fatty acids both among themselves (r = -0.91–0.88) and their conjugation with hydrothermal conditions (r = -0.94–0.91) was established. The hydrothermal conditions of the budding – flowering and flowering – ripening periods (average daily temperature and the sum of active temperatures) had the greatest influence on the FS of the oil (quality). The oil required by the GSS was obtained in all the years of research, which is due to the genome of the Ermak variety. A mathematical model of the variety has been created. The established dependencies should be taken into account in breeding work aimed at creating new varieties of oil flax, as well as in production to predict not only the yield, but the oil content of seeds and the FS of oil.

Keywords: oil flax, yield, oil content, fatty acid composition of oil.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science under the State Assignment of the Federal State Budgetary Research Institution «Federal Research Center for Bast Fiber Crops» (No. FGSS-2022-0008). We express our gratitude to Olga Fedorovna Brazhnikova, Candidate of Agricultural Sciences, laboratory assistant-researcher of the Laboratory of breeding technologies Federal Research Center for Bast Fiber Crops.

For citation: Brazhnikov V.N. Productivity and fatty acid composition of flax oil of the Ermak oilseed variety depending on cultivation conditions. Technical crops. Scientific Agricultural journal. 2023; 4(3):(17-29). DOI: 10.54016/SVITOK.2023.29.77.002.

Received: 21.11.2023 Accepted for publication: 05.12.2023 Published: 27.12.2023

Введение. Лён масличный *(Linum usitatissimum L.)* – одна из наиболее востребованных масличных культур в мире. Современная селекция направлена на создание высокопродуктивных сортов с оптимальными биохимическими характеристиками семян, необходимыми для пищевого и промышленного производства. Важнейшим показателем в селекции масличных культур является содержание масла в семенах – основного продукта, ради которого их возделывают [14]. По биологической ценности льняное масло занимает первое место среди других пищевых растительных масел [1, 2]. В последние годы научными организациями России, Австралии и Канады начаты работы по созданию сортов с изменённым жирнокислотным составом масла [15]. В ФГБНУ ФНЦ ЛК выведен сорт Ермак, значительно превосходящий по продуктивности райо-

нированные сорта. В 2019 г. он передан на Государственное сортоиспытание. С 2022 г. сорт включен в Государственный реестр, допущенных к использованию селекционных достижений. Особенностью сорта является изменённый жирнокислотный состав масла: содержание линолевой кислоты составляет 39,97%, линоленовой – 33,90%. Такое соотношение жирных кислот позволяет использовать масло для технических и пищевых целей. Сорт награжден золотой медалью выставки Агрорусь 2022 г.

Содержание и жирнокислотый состав масла – генетически закреплённые признаки. Тем не менее, метеоусловия региона выращивания могут оказывать влияние на накопление масла и его состав. Связь масличности с продолжительностью вегетационного периода более или менее постоянна [15]. Связь урожайности семян с их масличностью, а также продолжительностью вегетационного периода - модификационная (временная) [14]. Установлена положительная корреляция между продолжительностью всего периода вегетации, межфазного периода всходы – цветение и содержанием насыщенных кислот (пальмитиновой, стеариновой). Большее накопление линолевой кислоты отмечено у образцов с более продолжительным вегетационным периодом (r = 0,583) [6]. Увеличению содержания линолевой и линоленовой кислот способствуют обильные осадки при температуре ниже 20°С. Сухая и жаркая погода способствует увеличению доли олеиновой кислоты [10]. Ее содержание отрицательно коррелирует с общей продолжительностью вегетационного периода (r = -0,622), продолжительностью периода всходы – цветение (r = -0,517) и цветение – созревание (r = -0,403) [6]. На проявление масличности семян у сортов и гибридов льна большое влияние оказывают внешние условия, складывающиеся в период маслообразовательного процесса [3].

Ранее проведенные исследования использовали в качестве объектов сорта с традиционным ЖКС масла, кроме того, все они велись в совершенно иных почвенно-климатических условиях. Новый перспективный сорт льна масличного Ермак имеет измененный ЖКС масла, что делает исследования по влиянию агроклиматических условий на продуктивность и ЖКС масла весьма актуальными.

Цель исследований – изучить влияние гидротермических условий на урожайность, содержание и жирнокислотный состав масла семян льна масличного сорта Ермак, а также проанализировать связь биохимического состава масла с гидротермическими показателями основных фаз органогенеза.

Методика исследований. Работу выполняли в ФГБНУ «Пензенский НИИСХ» в 2013–2017 гг. Почва опытного участка – чернозём выщелоченный мощный тяжелосуглинистый со следующими агрохимическими характеристиками: содержание гумуса – 4,63%, легкогидролизуемых форм азота – среднее, подвижного фосфора – высокое, обменного калия – повышенное, кислотность согласно $pH_{вод}$ – слабокислая, по $pH_{сол}$ – среднекислая.

Материалом для исследования служил лён масличный сорта Ермак. При выполнении исследований использовали «Методические указания по изучению мировой коллекции масличных культур» [8], «Методику Госкомиссии по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур» [7], «Методические указания по селекции льна-долгунца» [11], «Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов» [13].

Идентификацию и определение содержания высокомолекулярных жирных кислот (ВЖК) триацилглицеролов масла выполняли методом газожидкостной хроматографии по ГОСТ Р 51483–99 [4]. Разделение метиловых эфиров проводили на хроматографе «Кристалл 5000.1». Содержание масла в семенах льна определяли по методу Лебедянцева – Раушковского [12].

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову [5].

Результаты и их обсуждение. Метеорологические условия в годы исследований были разнообразны и достаточно полно отражали особенности лесостепной зоны Среднего Поволжья (табл. 1).

Таблица 1 – Гидротермические условия роста и развития льна по межфазным периодам (2013–2017 гг.)

Показатель	Год	Межфазный период					Вегетационный период
		посев – всходы	всходы – ёлочка	ёлочка – бутонизация	бутонизация – цветение	цветение – созревание	
Продолжительность, сут.	2013	8	6	33	8	53	100
	2014	11	9	23	9	54	95
	2015	5	8	22	8	54	92
	2016	10	5	34	8	44	91
	2017	9	7	30	5	60	102
Среднесуточная температура воздуха, ^{0}C	2013	18,5	16,3	18,7	22,5	18,6	18,8
	2014	13,7	20,3	19,6	14,7	20,4	19,6
	2015	13,1	18,0	21,4	23,4	20,6	20,8
	2016	16,5	13,7	19,0	20,9	22,9	20,8
	2017	13,2	12,3	17,4	16,6	20,3	18,7
Сумма активных температур, ^{0}C	2013	148,1	98,0	617,6	179,7	986,4	1881,7
	2014	151,1	183,1	449,9	132,2	1099,0	1864,3
	2015	65,7	143,6	470,4	187,4	1110,0	1911,0
	2016	164,8	68,5	645,7	167,0	1009,5	1890,7
	2017	118,8	86,2	522,7	82,8	1219,0	1911,0
Количество осадков, мм	2013	1,0	35,3	69,6	2,6	128,8	236,3
	2014	8,3	1,7	13,2	15,1	61,9	91,9
	2015	0,0	3,0	17,5	48,4	204,1	273,0
	2016	15,3	4,2	93,2	22,1	105,2	224,7
	2017	35,7	27,5	10,2	5,5	77,7	120,9
ГТК (по Селянинову)	2013	0,07	3,60	1,13	0,14	1,31	1,26
	2014	0,55	0,09	0,29	1,14	0,56	0,95
	2015	0,00	0,21	0,37	2,58	1,84	1,43
	2016	0,93	0,61	1,44	1,32	1,04	1,19
	2017	3,01	3,19	0,20	0,66	0,64	0,63

Посев льна осуществляли в 2013 г. – 14 мая, 2014 г. – 4 мая, 2015 г. – 13 мая, 2016 г. – 6 мая, 2017 г. – 18 мая. В целом, вегетация растений в условиях 2013 г. проходила в условиях обеспеченного увлажнения (ГТК = 1,26); в 2014 г. условия характеризовались как засушливые (ГТК = 0,95); в 2015 г. отмечали избыточное увлажнение (ГТК = 1,43); в 2016 г. – обеспеченное увлажнение (ГТК = 1,19); в 2017 г. наблюдали недостаток осадков (ГТК = 0,63). Продолжительность вегетационного периода варьировала от 91 дня в 2016 г. до 102 дней в 2017 г. Наименьшая сумма активных температур отмечена в 2014 г. (1864,3°С), наибольшая – в 2015 и 2017 гг. (1911,0°С). Самым сухим выдался 2014 г. – всего за вегетацию выпало 91,9 мм осадков, больше всего их было в 2015 г. – 273,0 мм. Все это оказало значительное влияние на рост, развитие и продуктивность льна.

В результате исследований установлено, что урожайность семян зависела от гидротермических условий. Среднее значение составило 1,71 т/га при величине коэффициента вариации (C_V=20,0%), что говорит о средней стабильности признака. Большая урожайность семян (2,20 т/га) получена в условиях избыточного увлажнения 2015 г., меньшее значение данного показателя (1,44 т/га) определено в более засушливом 2017 г. (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание основных жирных кислот в семенах льна масличного сорта Ермак

Показатель	Содержание, %						C_V, %	$НСР_{05}$
	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	среднее		
Миристиновая кислота (С 14:0)	0,036	0,038	0,035	0,045	0,041	0,039	10,4	
Пентодекановая кислота (С 15:0)	0,016	0,015	0,015	0,018	0,020	0,017	12,9	
Пальмитиновая кислота (С 16:0)	5,299	5,561	5,082	5,930	5,659	5,506	5,9	
Пальмитолеиновая кислота (С 16:1)	0,069	0,074	0,055	0,094	0,083	0,075	19,6	
Маргариновая кислота (С 17:0)	0,062	0,055	0,059	0,059	0,067	0,060	7,4	
Маргаринолеиновая кислота (С 17:1)	0,039	0,041	0,043	0,038	0,041	0,040	4,8	
Стеариновая кислота (С 18:0)	3,455	4,012	3,359	3,983	3,901	3,742	8,3	
Олеиновая кислота (С 18:1)	14,624	15,220	15,353	15,653	19,334	16,037	11,7	
Линолевая кислота (С 18:2)	36,667	39,076	40,699	41,601	41,812	39,971	5,4	
-линоленовая кислота (С 18:3)	0,015	0,015	0,016	0,021	0,018	0,017	15,0	
-линоленовая кислота (С 18:3)	39,197	35,336	34,701	31,965	28,315	33,903	12,0	
Арахиновая кислота (С 20:0)	0,098	0,111	0,101	0,115	0,122	0,109	9,1	
Эйкозеновая (Гондоиновая) кислота (С 20:1)	0,127	0,118	0,157	0,158	0,145	0,141	12,7	
Эйкозадиеновая кислота (С 20:2)	0,043	0,038	0,048	0,044	0,044	0,043	8,2	
Эйкозапентаеновая кислота (С 20:5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
Арахидоновая кислота (С 20:4)	0,081	0,030	0,036	0,023	0,024	0,039	62,3	
Бегеновая кислота (С 22:0)	0,105	0,126	0,096	0,136	0,121	0,117	13,8	
Эруковая кислота (С 22:1)	0,000	0,018	0,000	0,000	0,022	0,008	138,1	
Докозагексаеновая кислота (С 22:6)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,003	223,6	
Лигноцериновая кислота (С 24:0)	0,116	0,118	0,119	0,117	0,121	0,118	1,6	
Нервоновая (Селахолевая) кислота (С 24:1)	0,000	0,000	0,026	0,000	0,022	0,010	137,7	
Урожайность семян, т/га	1,49	1,94	2,20	1,48	1,44	1,71	20,0	2013-0,15 2014-0,14 2015-0,13 2016-0,12 2017-0,14 Ср-0,14

Урожайность льносоломы, т/га	3,15	6,19	6,79	5,07	8,38	5,92	33,0	2013-0,27 2014-0,46 2015-0,24 2016-0,35 2017-0,87 Ср-0,44
Масличность семян, %	45,02	44,45	44,71	45,32	43,67	44,63	1,4	
Сбор масла, кг/га	583,5	750,2	855,7	583,5	547,1	664,0	20,0	
Содержание протеина, %	22,88	24,26	27,51	23,78	27,01	25,09	8,2	
Сбор протеина, кг/га	296,6	409,5	526,4	306,2	338,4	375,4	25,4	

Урожайность семян в большей степени зависела от суммы активных температур периода от посева до созревания (r=-0,72), продолжительности, среднесуточной температуры воздуха, суммы активных температур и ГТК в период всходы–елочка, (r=0,75, 0,78, 0,81 и -0,71), продолжительности, среднесуточной температуры воздуха и суммы активных температур в период елочка–бутонизация (r=-0,94, 0,91 и -0,77), количества осадков и ГТК в период бутонизация–цветение (r=0,80, 0,81) (табл. 3).

Уравнения регрессии будут выглядеть следующим образом:

$Y=282,269-0,268\times X+0,0000641\times X^2$

$Y=11,190-0,644\times X_1+0,0106\times X_1^2$

$Y=8,654-0,926\times X_2+0,0292\times X_2^2$

$Y=13,299-0,040\times X_3+0,0000338\times X_3^2$

$Y=1,475-0,107\times X_4+0,0193\times X_4^2$

$Y=-0,034+0,135\times X_5-0,00161\times X_5^2$

$Y=0,0646+0,0230\times X_6-0,0000676\times X_6^2$

$Y=2,150-0,991\times X_7+0,230\times X_7^2$

$Y=1,483+0,00714\times X_8+0,000150\times X_8^2$

$Y=1,461+0,0672\times X_9+0,0842\times X_9^2$

где:

Y–урожайность семян, т/га;

X–сумма активных температур межфазного периода посев – созревание, °С;

X_1–продолжительность межфазного периода елочка–бутонизация, дней;

X_2–средняя температура межфазного периода елочка–бутонизация, °С;

X_3–сумма активных температур межфазного периода елочка–бутонизация, °С;

X_4–продолжительность межфазного периода всходы–елочка, дней;

X_5–средняя температура межфазного периода всходы–елочка, °С;

X_6–сумма активных температур межфазного периода всходы– елочка, °С;

X_7–ГТК межфазного периода всходы–елочка;

X_8–количество осадков межфазного периода бутонизация–цветение, мм;

X_9–ГТК межфазного периода бутонизация–цветение.

Решение данных уравнений путем подстановки указанных значений по мере прохождения фаз развития позволяет достаточно точно прогнозировать урожайность семян сорта Ермак не только в условиях конкретного года, но и, опираясь на долгосрочный метеопрогноз, предсказывать значения данного показателя в долгосрочной перспективе.

С урожайностью семян также сильно положительно сопряжены показатели сбор масла и сбор сырого протеина (r=1,00, 0,96) (табл. 4). Показатель «масличность семян сорта Ермак» в среднем составил 44,63% при значении коэффициента вариации C_V=1,4%, что свидетельствует о стабильности признака. Большая масличность (45,32%) определена в условиях обеспеченного увлажнения 2016 г., наименьшая (43,67%) – в сухом 2017 г. (табл. 2).

Таблица 3 – Матрица корреляции основных показателей сорта льна масличного Ермак с гидротермическими условиями вегетационного периода

Показатель	Жирная кислота, %					Урожайность семян, т/га	Масличность, %	Сбор масла, кг/га	Содержание протеина в семенах, %	Сбор протеина, кг/га
	пальмитиновая	стеариновая	олеиновая	линолевая	α-линоленовая					
Межфазный период посев–созревание										
Продолжительность, сут.	0,28	0,35	0,52	-0,25	-0,16	-0,66	-0,58	-0,69	-0,22	-0,64
Температура воздуха, °С	-0,23	-0,47	-0,71	-0,08	0,44	0,30	0,89	0,35	-0,21	0,22
Сумма активных температур, °С	0,13	-0,11	-0,25	-0,66	0,47	-0,72*	0,38	-0,69	-0,79	-0,82
Количество осадков, мм	-0,36	-0,71*	-0,34	0,01	0,24	0,07	0,60	0,11	0,07	0,13
ГТК (по Селянинову)	-0,38	-0,71*	-0,32	0,07	0,20	0,15	0,57	0,18	0,15	0,21
Межфазный период всходы–созревание										
Продолжительность, сут.	-0,06	-0,02	0,54	-0,30	-0,09	-0,53	-0,64	-0,57	0,01	-0,45
Температура воздуха, °С	0,02	-0,07	-0,40	0,43	-0,03	0,52	0,57	0,55	0,16	0,50
Сумма активных температур, °С	-0,19	-0,37	0,58	0,62	-0,56	0,01	-0,33	0,00	0,79	0,28
Количество осадков, мм	-0,45	-0,76*	-0,48	-0,11	0,38	0,17	0,67	0,22	0,00	0,19
ГТК (по Селянинову)	-0,53	-0,69	-0,82*	-0,33	0,66	0,47	0,80*	0,52	-0,18	0,37
Межфазный период посев–всходы										
Продолжительность, сут.	0,81*	0,91*	0,12	0,01	-0,20	-0,48	-0,06	-0,49	-0,55	-0,60
Температура воздуха, °С	0,12	-0,19	-0,50	-0,62	0,57	-0,57	0,69	-0,52	-0,85	-0,70
Сумма активных температур, °С	0,73*	0,65	-0,17	-0,26	0,11	-0,66	0,33	-0,64	-0,86	-0,82
Количество осадков, мм	0,64	0,62	0,94*	0,64	-0,90	-0,58	-0,68	-0,61	0,33	-0,39
ГТК (по Селянинову)	0,54	0,54	0,97*	0,60	-0,87	-0,54	-0,75	-0,59	0,39	-0,35
Межфазный период всходы–елочка										
Продолжительность, сут.	-0,46	-0,02	-0,01	-0,08	0,09	0,75*	-0,51	0,72	0,43	0,72

Температура воздуха, °С	-0,53	-0,21	-0,69	-0,51	0,66	0,78*	0,18	0,79	-0,13	0,59
Сумма активных температур, °С	-0,47	-0,06	-0,36	-0,28	0,37	0,81*	-0,18	0,80	0,15	0,69
Количество осадков, мм	-0,12	-0,28	0,30	-0,43	0,12	-0,66	-0,26	-0,67	-0,19	-0,59
ГТК (по Селянинову)	-0,04	-0,20	0,39	-0,34	0,01	-0,71*	-0,30	-0,73	-0,16	-0,63
Межфазный период елочка–бутонизация										
Продолжительность, сут.	0,52	0,16	0,14	-0,10	-0,07	-0,94*	0,29	-0,92	-0,55	-0,93
Температура воздуха, °С	-0,61	-0,51	-0,64	-0,06	0,43	0,91*	0,41	0,93	0,24	0,84
Сумма активных температур, °С	0,44	0,03	-0,13	-0,12	0,08	-0,77*	0,59	-0,73	-0,61	-0,79
Количество осадков, мм	0,40	0,02	-0,43	-0,18	0,26	-0,54	0,83*	-0,48	-0,72	-0,63
ГТК (по Селянинову)	0,36	-0,01	-0,47	-0,21	0,31	-0,50	0,85*	-0,45	-0,73	-0,61
Межфазный период бутонизация–цветение										
Продолжительность, сут.	-0,20	-0,11	-0,94*	-0,49	0,74*	0,50	0,71*	0,54	-0,53	0,25
Температура воздуха, °С	-0,48	-0,80*	-0,46	-0,18	0,42	0,12	0,63	0,16	-0,02	0,14
Сумма активных температур, °С	-0,46	-0,64	-0,87*	-0,41	0,72*	0,37	0,87*	0,43	-0,32	0,24
Количество осадков, мм	-0,42	-0,40	-0,29	0,38	0,00	0,80*	0,26	0,82	0,54	0,84
ГТК (по Селянинову)	-0,34	-0,26	-0,18	0,48	-0,12	0,81*	0,14	0,82	0,61	0,87
Межфазный период цветение–созревание										
Продолжительность, сут.	-0,41	-0,16	0,58	-0,04	-0,21	0,11	-0,90*	0,06	0,57	0,25
Температура воздуха, °С	0,66	0,54	0,10	0,76*	-0,55	-0,03	0,30	-0,01	0,08	0,00
Сумма активных температур, °С	-0,01	0,22	0,84*	0,58	-0,72*	0,15	-0,94*	0,09	0,82	0,35
Количество осадков, мм	-0,73*	-0,88*	-0,37	-0,04	0,33	0,53	0,36	0,56	0,37	0,59
ГТК (по Селянинову)	-0,70*	-0,89*	-0,47	-0,14	0,43	0,46	0,48	0,49	0,22	0,49

Примечание: * – коэффициенты корреляции достоверны на уровне значимости 0,05.

Таблица 4 – Матрица корреляции основных показателей сорта льна масличного Ермак

Показатель	Жирная кислота, %					Урожайность семян, т/га	Масличность, %	Сбор масла, кг/га	Содержание протеина в семенах, %	Сбор протеина, кг/га
	пальмитиновая	стеариновая	олеиновая	линолевая	α-линоленовая					
Пальмитиновая кислота	1,00									
Стеариновая кислота	0,88*	1,00								
Олеиновая кислота	0,36	0,38	1,00							
Линолевая кислота	0,46	0,42	0,64	1,00						
α-линоленовая кислота	-0,57	-0,56	-0,88*	-0,91*	1,00					
Урожайность семян, т/га	-0,64	-0,38	-0,39	0,00	0,27	1,00				
Масличность, %	0,03	-0,22	-0,82*	-0,32	0,58	0,02	1,00			
Сбор масла, кг/га	-0,64	-0,39	-0,44	-0,02	0,31	1,00*	0,08	1,00		
Содержание протеина в семенах, %	-0,32	-0,21	0,58	0,64	-0,58	0,45	-0,63	0,41	1,00	
Сбор протеина, кг/га	-0,65	-0,41	-0,16	0,20	0,06	0,96*	-0,15	0,95*	0,68	1,00

*Примечание: * – коэффициенты корреляции достоверны на уровне значимости р 0,05.*

Гидротермические условия вегетационного периода оказали значительное влияние на содержание жира в семенах. Сильная корреляционная зависимость данного показателя определена с ГТК периодов посев–всходы, елочка–бутонизация, всходы–созревание (r=-0,75, 0,85, 0,80), количеством осадков периода елочка–бутонизация (r=0,83), суммой активных температур периодов бутонизация–цветение и цветение–созревание (r=0,87, -0,94) и их продолжительности (r=0,71, -0,90) (табл. 3).

Уравнения регрессии принимают следующий вид:

$Y_1=44,752+0,532\times X-0,294\times X^2$

$Y_1=43,479+3,039\times X_1-1,287\times X_1^2$

$Y_1=38,893+10,085\times X_2-4,152\times X_2^2$

$Y_1=43,833+0,0331\times X_3-0,000194\times X_3^2$

$Y_1=40,00984+0,0572\times X_4-0,000165\times X_4^2$

$Y_1=32,424+0,029\times X_5-0,0000159\times X_5^2$

$Y_1=31,270+3,749\times X_6-0,254\times X_6^2$

$Y_1=31,980+0,603\times X_7-0,00680\times X_7^2$

где:

Y_1–масличность семян, %;

X–ГТК межфазного периода посев–всходы;

X_1–ГТК межфазного периода елочка–бутонизация;

X_2–ГТК межфазного периода всходы–созревание;

X_3–количество осадков межфазного периода елочка–бутонизация, мм;

X_4–сумма активных температур межфазного периода бутонизация–цветение, °С;

X_5–сумма активных температур межфазного периода цветение–созревание, °С;

X_6–продолжительность межфазного периода бутонизация–цветение, дней;

X_7–продолжительность межфазного периода цветение–созревание, дней.

Решение данных уравнений путем подстановки указанных значений по мере прохождения фаз развития позволяет прогнозировать масличность семян сорта Ермак.

Погодные условия вегетации и ее отдельных периодов оказывали влияние на содержание протеина, составившее 25,09%, коэффициент вариации C_V=8,2%. В избыточно увлажненном 2015 г. определено большее значение признака – 27,51%, меньшее в условиях обеспеченного увлажнения 2013 г. – 22,88%. Сильное сопряжение величины этого показателя определено с суммой активных температур за межфазные периоды, посев–всходы, посев–созревание и всходы–созревание (r=-0,86, -0,79 и 0,79), количеством осадков и значением ГТК периода елочка–бутонизация (r=-0,72, - 0,73), что описывают следующие уравнения:

$Y_2=26,136+0,0506\times X-0,000421\times X^2$

$Y_2=602,261-0,534\times X_1+0,000123\times X_1^2$

$Y_2=15677,267-16,651\times X_2+0,00443\times X_2^2$

$Y_2=27,764-0,127\times X_3+0,000888\times X_3^2$

$Y_2=28,033-7,161\times X_4+2,782\times X_4^2$

где:

Y_2–содержание протеина, %;

X–сумма активных температур межфазного периода посев–всходы, °С;

X_1–сумма активных температур межфазного периода посев–созревание, °С;

X_2–сумма активных температур межфазного периода всходы–созревание, °С;

X_3–количество осадков межфазного периода елочка–бутонизация, мм;

X_4–ГТК межфазного периода елочка–бутонизация.

В состав льняного масла входят насыщенные кислоты (пальмитиновая, стеариновая) и ненасыщенные (линолевая, линоленовая и олеиновая). Полезные свойства масла обусловлены его жирнокислотным составом. Более стабильно (C_V=1,6–8,3%) содержание лигноцериновой, маргаринолеиновой, пальмитиновой, линолевой, маргариновой, эйкозадиеновой и стеариновой кислот, которое составляло 0,118; 0,040; 5,506; 39,971; 0,060; 0,043 и 3,742% соответственно (табл. 2). Содержание докозагексаеновой, нервоновой и эруковой кислот сильно варьировало по годам (C_V=138,1–223,6%), из основных α- и γ-линоленовой (C_V=33,903, 0,017%) и олеиновой (C_V=16,037%) жирных кислот было среднестабильно (C_V=11,7–15,0%).

Лен масличный сорта Ермак имеет измененный ЖКС масла, основную часть которого составляют линолевая – 36,667–41,812% и α-линоленовая – 28,315–39,197% кислоты, что и определяет его основные свойства. Массовая доля линолевой кислоты сильно сопряжена со средней температурой периода цветение–созревание (r=0,76).

Это описывает уравнение регрессии:

$Y_3=-147,794+17,060\times X-0,384\times X^2$

где:

Y_3–содержание линолевой кислоты, %;

X–средняя температура межфазного периода цветение–созревание, °С.

Второй по процентному содержанию в масле данного сорта – 28,315–39,197%, а может быть и первой по значимости для свойств масла, является α -линоленовая кислота. Назначение использования льняного масла в большей степени определяется количеством α-линоленовой кислоты. Её содержание в семенах сорта Ермак, по данным ФАО, характеризуется как низкое и среднее [9]. Такое масло пригодно как на пищевые, так и технические, медицинские и парфюмерные цели. Установлена сильная отрицательная корреляционная зависимость между содержанием α-линоленовой, линолевой и олеиновой кислотами (r=-0,91, -0,88). Данные зависимости кислот описываются следующими уравнениями:

$Y_4=-306,844+19,204\times X-0,267\times X^2$

$Y_4=409,590-42,679\times X_1+1,187\times X_1^2$

где:

Y_4–содержание α-линоленовой кислоты, %;

X–содержание линолевой кислоты, %;

X_1–содержание олеиновой кислоты, %.

Сильное отрицательное сопряжение со-

держания α-линоленовой кислоты определено количеством осадков и ГТК периода посев – всходы (r=-0,90, -0,87) и суммой активных температур периода цветение–созревание (r=-0,72), и положительное с продолжительностью и суммой активных температур периода бутонизация–цветение (r=0,74, 0,72). Что описывают следующие уравнения:

$Y_5=37,111-0,312\times X+0,00175\times X^2$

$Y_5=37,162-5,380\times X_1+0,804\times X_1^2$

$Y_5=-6,700+9,917\times X_2-0,583\times X_2^2$

$Y_5=11,032+0,275\times X_3-0,000766\times X_3^2$

$Y_5=-100,428+0,277\times X_4-0,000140\times X_4^2$

где:

Y_5–содержание α-линоленовой кислоты, %;

X–количество осадков межфазного периода посев–всходы, мм;

X_1–ГТК межфазного периода посев–всходы;

X_2–продолжительность межфазного периода бутонизация–цветение, дней;

X_3–сумма активных температур межфазного периода бутонизация–цветение, ˚С;

X_4–сумма активных температур межфазного периода цветение –созревание, ˚С.

Олеиновая кислота является третьей по процентному содержанию в масле данного сорта – 14,624–19,334%. Установлена сильная отрицательная корреляционная зависимость между содержанием олеиновой, α-линоленовой кислотами и масличностью семян (r=-0,88, -0,82) (табл. 4):

$Y_6=6363,807-283,069\times X+3,155\times X^2$

где:

Y_6–содержание олеиновой кислоты, %;

X–масличность, %.

Сильное отрицательное сопряжение величины этого показателя связано с ГТК периода всходы–созревание, продолжительностью и суммой активных температур периода бутонизация–цветение (r=-0,82, -0,94, -0,87) и положительно с количеством осадков, ГТК периода посев–всходы и суммой активных температур периода цветение–созревание (r=0,94, 0,97, 0,84). Уравнения, описывающие данные зависимости, приведены ниже:

$Y_6=33,855-31,438\times X+13,00577\times X^2$

$Y_6=40,054-5,875\times X_1+0,346\times X_1^2$

$Y_6=32,998-0,222\times X_2+0,000684\times X_2^2$

$Y_6=15,026-0,018\times X_3+0,00388\times X_3^2$

$Y_6=14,990+0,278\times X_4+0,388\times X_4^2$

$Y_6=160,708-0,281\times X_5+0,000136\times X_5^2$

где:

Y_6–содержание олеиновой кислоты, %;

X–ГТК межфазного периода всходы–созревание;

X_1–продолжительность межфазного периода бутонизация–цветение, дней;

X_2–сумма активных температур межфазного периода бутонизация–цветение, ˚С;

X_3–количество осадков межфазного периода посев–всходы, мм;

X_4–ГТК межфазного периода посев–всходы;

X_5–сумма активных температур межфазного периода цветение–созревание, ˚С.

Большее содержание олеиновой кислоты (19,334%) определено в сухом 2017 году при 120,9, 77,7 мм осадков и ГТК – 0,63, 0,64 за периоды всходы–созревание, цветение–созревание, что в 1,32 раза превышало ее содержание в условиях обеспеченного и избыточного увлажнения 2013 года, при 236,3, 128,8 мм осадков и ГТК–1,26, 1,31 соответственно.

Пальмитиновая кислота является предшественником других длинноцепочечных жирных кислот, таких как стеариновая, олеиновая, эйкозатриеновая и архидоновая. Это единственная основная жирная кислота, содержание которой сильно положительно коррелирует со стеариновой кислотой (r=0,88) и описывается следующим уравнением:

$Y_7=-26,919+16,710\times X-2,138\times X^2$

где:

Y_7–содержание пальмитиновой кислоты, %;

X–содержание стеариновой кислоты, %.

Ее массовая доля сильно положительно сопряжена с продолжительностью и суммой активных температур периода посев–всходы (r=0,81, 0,73) и отрицательно с количеством осадков и ГТК периода цветение–созревание (r=-0,73, -0,70).

$Y_7=4,699+0,00652\times X-0,00000212\times X^2$

$Y_7=3,781+0,317\times X_1-0,0128\times X_1^2$

$Y_7=5,405+0,00619\times X_2-0,0000388\times X_2^2$

$Y_7=5,168+1,203\times X_3-0,694\times X_3^2$

где:

Y_7–содержание пальмитиновой кислоты, %;

X–сумма активных температур межфазного периода посев–всходы, ˚С;

X_1–продолжительность межфазного периода посев–всходы, дней;

X_2–количество осадков межфазного периода цветение–созревание, мм;

X_3–ГТК межфазного периода цветение–созревание.

Максимальное содержание пальмитиновой кислоты определено в 2016 году при

сумме активных температур данного периода 164,8°С – 5,930%, что в 1,16 раза превышало показатели 2015 года (сумма активных температур – 65,7°С).

Содержание стеариновой кислоты (3,359–4,012%) было среднестабильным по годам (V – 8,3%). Определена сильная отрицательная корреляционная зависимость ее содержания с количеством осадков и ГТК периодов посев–созревание, всходы–созревание, цветение–созревание (r=-0,71, -0,71, -0,76, -0,69, -0,88, -0,89) и среднесуточной температурой воздуха периода бутонизация–цветение (r=-0,80), а также положительная с продолжительностью периода посев–всходы (r=0,91). В засушливых условиях вегетационного периода 2014 года (ГТК–0,95) содержание стеариновой кислоты в 1,19 раза превышало данный показатель в избыточно увлажненный 2015 год (ГТК – 1,43).

Во все годы исследований получен необходимый ЖКС масла, что обусловлено геномом сорта Ермак.

Тем не менее, наиболее оптимальное содержание основных жирных кислот получено в сухих условиях 2017 года (ГТК периодов всходы–созревание, цветение–созревание – 0,63, 0,64), при среднесуточной температуре периода цветение–созревание – 20,3°С, сумме активных температур – 1219,0°С и его значении – 82,8°С в период бутонизация–цветение при его продолжительности 5 суток. Более всего от наиболее оптимального ЖКС масла отклонялся в условиях достаточного увлажнения 2013 года (ГТК периодов всходы–созревание, цветение–созревание – 1,26, 1,31) при среднесуточной температуре периода цветение–созревание – 18,6°С, сумме активных температур – 986,4°С и его значении – 179,7°С в период бутонизация–цветение при его продолжительности 8 суток, т. е. наибольшее влияние на ЖКС масла оказали гидротермические условия периодов бутонизация–цветение и цветение–созревание (продолжительность, сумма активных температур и среднесуточная температура). Следует отметить, что больший сбор семян с гектара получен в условиях избыточного увлажнения 2015 года (ГТК – 1,43, 1,84), а масличность в условиях обеспеченного увлажнения 2016 и 2013 годов (ГТК – 1,19, 1,04 и 1,26, 1,31) периодов всходы–созревание и цветение–созревание.

Оптимальными для льна масличного сорта Ермак являлись следующие гидротермические условия: низкое значение показателя «сумма активных температур» за периоды посев–созревание, елочка–бутонизация (урожайность семян), высокие значения показателей «продолжительность» «среднесуточная температура» и «сумма активных температур» за период всходы–елочка при низком значении ГТК, малая «продолжительность» при высокой среднесуточной температуре и низком значении показателя «сумма активных температур» за период елочка–бутонизация (урожайность семян), большая «продолжительность» и «сумма активных температур» за период бутонизация–цветение (масличность), высокая «среднесуточная температура» периода бутонизация–цветение (линолевая кислота).

Выводы. В результате проведенных исследований впервые в условиях Средневолжского региона математически описано влияние агроклиматических условий межфазных периодов органогенеза на продуктивность семян и жирнокислотный состав масла сорта Ермак. Установлены взаимозависимости урожайности, масличности семян и содержания сырого протеина.

Определена зависимость урожайности, масличности семян, содержания сырого протеина, сбора масла от гидротермических условий межфазных периодов роста и развития льна (r=-0,94–0,93).

Выявлены наиболее стабильные жирные кислоты: лигноцериновая, маргаринолеиновая, пальмитиновая, линолевая, маргариновая, эйкозадиеновая и стеариновая. Определена зависимость содержания жирных кислот как между собой (r=-0,91–0,88), так и их сопряжение с гидротермическими условиями (r=-0,94–0,91).

Наибольшее влияние на ЖКС масла (качество) оказали гидротермические условия периодов бутонизация–цветение и цветение–созревание (среднесуточная температура и сумма активных температур). Требуемый ЖКС масла получен во все годы исследований, что обусловлено геномом сорта.

Определены оптимальные для сорта гидротермические условия как в целом за вегетационный период, так и в отдельные межфазные периоды.

Приведенные уравнения относительно точно описывают реакцию льна масличного сорта Ермак на факторы внешней среды.

Установленные зависимости следует учитывать в селекционной работе, направленной на создание новых сортов льна масличного, а также в производстве для прогнозирования как урожайности, так и масличности семян и ЖКС масла.

Список использованной литературы

1. Бражников В.Н., Бражникова О.Ф., Прахова Т.Я., Прахов В.А. Результаты селекции и жирно-кислотный состав масла льна масличного // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2015. – № 6. – С. 23-27.
2. Бражников В.Н., Бражникова О.Ф. Результаты селекции льна масличного // Материалы научно-практической конференции: Научно-практические аспекты технологий возделывания и переработки масличных культур». – Рязань: ФГБОУ Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева», 2013. – С. 50-53.
3. Галкин Ф.М., Хатнянский В.И., Тишков Н М., Пивень Т.В., Шафоростов В.Д. Лён масличный: селекция, семеноводство, технология возделывания и уборки. – Краснодар: РАСХН, ГНУ ВНИИМК, 2008. – 191 с.
4. ГОСТ Р 51483–99 Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров индивидуальных жирных кислот к их сумме. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 7 с.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Книга по Требованию, 2012. – 352 с.
6. Маслинская М.Е., Андроник Е.В., Иванова Е.В. Оценка селекционных сортообразцов льна масличного по продолжительности основных фаз вегетации и жирнокислотному составу масла // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 4. – С. 66-72.
7. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур // Под общ. ред. М.А. Федина. – М.: Сельхозиздат, 1983. – 183 с.
8. Методические указания по изучению мировой коллекции масличных культур // Под ред. Г.Г. Давидян. – Л.: ВИР, 1976. – 21 с.
9. Минжасова А., Лошкомойников И. Селекция льна масличного на качественный состав масла // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2016. – № 3. – С. 33-35.
10. Носевич М.А., Айиссотоде Й.З., Рощин В.И., Ведерников Д.Н. Оценка качества масла и волокна льна масличного в зависимости от генетических особенностей и условий его произрастания // Известия Санкт-Петербургскоко государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (46). – С. 15-20.
11. Павлова Л.Н., Александрова Т.А., Марченков А.Н., Рожмина Т.А., Лошакова Н.И., Кудрявцева Л.П., Крылова Т.В., Герасимова Е.Г. Методические указания по селекции льна-долгунца. – М.: Россельхозакадемия, 2004. – 43 с.
12. Раушковский С.С. Методы исследований при селекции масличных растений по содержанию масла. – М.: Пищепромиздат, 1959. – 46 с.
13. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов // Под ред. И.М. Скурихина, В.А. Тутельяна. – М.: «Браденс–Медицина», 1998. – С. 84-93.
14. Руководство по семеноводству масличных культур // Под общ. ред. акад. В. С. Пустовойта. – М.: Колос, 1967. – 351 с.
15. Скляров С.В. Жирно-кислотный профиль и оксистабильность масла низколиноленовых сортообразцов льна масличного // Масличные культуры. –2012. – № 2 (151-152). – С. 91-95.

Сведения об авторе

Бражников Владимир Николаевич, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», 17/56, Комсомольский проспект, г. Тверь, Российская Федерация, 170041, ORCID: orcid.org/0000-0002-3186-5993, e-mail: v.brazhnikov.pnz@fnclk.ru

Vladimir N. Brazhnikov, PhD in Agricultural Sciences, leading researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops, 17/56 Komsomolsky pr., Tver, Russian Federation, 170041, ORCID: orcid.org/0000-0002-3186-5993, e-mail: v.brazhnikov.pnz@fnclk.ru