

**Селекция, семеноводство и биотехнология
сельскохозяйственных растений**

Научная статья

УДК 633.854.54:636:612.75:631.52

DOI: 10.25230/2412-608X-2023-2-194-3-12

**Разработка метода определения
слизеобразующей способности
семян льна обыкновенного как
нового селекционного признака**

**Сергей Викторович Зеленцов
Виктор Сергеевич Зеленцов
Елена Валентиновна Мошненко
Галина Михайловна Саенко
Лариса Григорьевна Рябенко**

ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК

Россия, 350038, г. Краснодар, ул. им. Филатова, д. 17
Тел.: (861) 275-78-45, факс: (861) 254-27-80
soya@vniimk.ru

Аннотация. Впервые предложена и реализована концепция визуализации и измерения линейных размеров слизевых капсул вокруг отдельных набухших семян масличного льна. Исследования проведены в 2020–2022 гг. на базе ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, г. Краснодар, на пяти сортах масличного льна собственной селекции. На этих сортах испытаны различные способы визуализации границ слизевых капсул вокруг увлажнённых семян масличного льна. Среди них выбран наиболее наглядный способ в виде замачивания сухих семян льна в буферном растворе с красителем, с последующей фиксацией размеров образовавшихся вокруг семян слизевых зон. Для математического описания формы семян масличного льна подобрана наиболее близкая по форме и пропорциям трёхмерная геометрическая фигура – эллипсоид, и соответствующие математические алгоритмы вычисления её объёма, поперечного и продольного сечений. Известный математический алгоритм по вычислению конфигурации продольного и поперечного сечений эллипсов оптимизирован для вычисления сечения придонных полуэллипсоидных форм слизевых капсул семян масличного льна при гравитационном стекании периферийных участков низкомолекулярной фракции слизи к плоской придонной поверхности. Подобран математический алгоритм для вычисления формы продольного и поперечного сечений слизевой капсулы вокруг семени масличного льна для случая компенсации деформирующего влияния гравитационного стекания. Практическое ис-

пользование выбранного математического алгоритма впервые позволило сформулировать понятие слизеобразующей способности семян и оценить формирование этого признака у пяти сортов масличного льна селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК. Результаты вычислений показали наличие значительного генотипического полиморфизма по новым для масличного льна признакам, таким как объём слизевой капсулы с включённым в неё семенем, чистый объём слизевой капсулы отдельного семени и общая слизеобразующая способность семени.

Ключевые слова: масличный лён, семена льна, набухшие семена льна, слизеобразующие полисахариды, семенные слизи льна, слизевые капсулы

Для цитирования: Зеленцов С.В., Зеленцов В.С., Мошненко Е.В., Рябенко Л.Г. Разработка метода определения слизеобразующей способности семян льна обыкновенного как нового селекционного признака // Масличные культуры. 2023. Вып. 2 (194). С. 3–12.

UDC 633.854.54:636:612.75:631.52

Development of the method for determination of the mucilage forming ability of flax seeds as a new breeding trait

Zelentsov S.V., head of the lab., chief researcher, corr.-member of RAS, doctor of agriculture

Zelentsov V.S., senior researcher, PhD in biology

Moshnenko E.V., leading researcher, PhD in biology

Saenko G.M., senior researcher, PhD in biology

Ryabenko L.G., head of the lab., PhD in agriculture

V.S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops

17 Filatova str., Krasnodar, 350038, Russia

Tel.: (861) 275-78-45, fax: (861) 254-27-80

soya@vniimk.ru

Abstract. The concept of visualization and measurement of linear dimensions of slime capsules around individual swollen seeds of oil flax was proposed and implemented for the first time. The studies were carried out in 2020–2022 on the basis of the Federal State Budgetary Research Center VNIIMK, Krasnodar on five varieties of oil flax of own breeding. Various methods of visualizing the boundaries of mucilage capsules around moistened oilseeds have been tested on these varieties. Among them, the most obvious method was chosen in the form of soaking of dry flax seeds in a buffer solution with a colorant, followed by fixing the size of the mucilage zones formed in the seed circle. For the mathematical description of the shape of oil flax seeds, the three-dimensional geometric shape – an ellipsoid, which is closest in shape and proportions, and the corresponding mathematical algorithms for calculating its volume, cross-section and longitudinal section have been selected. The well-known mathematical algorithms for calculating the configuration of the longitudinal

and cross-section of ellipses is optimized for calculating the cross-section of the bottom semi-ellipsoid forms of mucilage capsules of oil seeds during gravitational runoff of peripheral sections of low-molecular-weight slime to a flat bottom surface. A mathematical algorithm has been selected to calculate the shape of the longitudinal and cross-sections of the mucilage capsule around the seed of oil flax for the case of compensation for the deforming effect of gravitational runoff, forming a symmetrical appearance close to the shape of the mucilage capsules of oil flax seeds in the soil. The practical use of the chosen mathematical algorithms for the first time allowed us to formulate the concept of the mucilage-forming ability of seeds, and to evaluate the formation of this trait in five varieties of oil flax bred at VNIIMK. The results of the calculations showed the presence of significant genotypic polymorphism according to new features for oil flax, such as the volume of the mucilage capsule with the seed included in it, the net volume of the mucilage capsule of an individual seed and the total mucilage-forming ability of the seed.

Key words: oil flax, flax seeds, swollen flax seeds, mucilage-development polysaccharides, flax seed mucilage, mucilage capsules

Введение. Особенностью семян культурного и дикорастущих видов рода Лён (*Linum* L.) является образование на их поверхности в процессе налива и созревания гидрофильных слизеобразующих полисахаридов, которые во влажной почве или при замачивании в воде переходят в слизевидное гидроколлоидное состояние, формируя вокруг семян слизевые капсулы [1; 2; 3; 4].

Способность слизеобразующих полисахаридов семян льна к набуханию в воде способствует увеличению объёмов поглощения воды семенами и их набуханию при прорастании, обеспечивает удержание в объёме слизи вокруг семени дополнительных запасов воды при подсыхании семенного ложа. Такое свойство семян льна вполне можно отнести к эволюционной адаптации к естественному произрастанию в аридных центрах происхождения культурного и дикорастущих видов льна [2; 5; 6; 7].

В отдельных работах показано, что образующаяся на поверхности семенной оболочки льна слизь может обладать фунгицидными свойствами, препятствуя развитию патогенной грибной микрофлоры,

в частности, грибов из рода *Fusarium* Link., в слизи в зоне вокруг набухающего семени льна в почве [8].

Поэтому исследование объёмов слизевых капсул, образующихся вокруг набухающих семян льна, представляет научный интерес как потенциальное направление селекции на повышение естественной защиты семян льна от патогенной почвенной микрофлоры за счёт увеличения содержания слизеобразующих полисахаридов. При этом определение объёмов семенной слизи в известных исследованиях ограничивалось замачиванием некоторого количества семян и отделением образовавшейся слизи для дальнейшего использования, иногда определением общего объёма слизи, полученного при набухании семян с фиксированной массой исходной навески [5; 9; 10; 11].

Однако прямые методы определения объёмов семенной слизи у отдельных семян льна, необходимые для оценки селекционного материала по этому признаку на начальных этапах селекции, в доступной литературе не обнаружены.

В связи с этим целью настоящего исследования была разработка метода определения объёмов семенной слизи, образующейся при набухании отдельных семян масличного льна.

Материалы и методы. Исследования проводили в 2020–2022 гг. в ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, г. Краснодар. Для изучения полиморфизма линейных размеров и объёмов сухих и набухших семян, размеров и формы слизевых капсул и общей слизеобразующей способности семян использовали сорта масличного льна РФН, Ы 117, ФЛИЗ, ВНИИМК 620 ФН и Снегурок. Для исследований в каждом сорте отбирали по 10 типичных семян в 4-кратной повторности. Семена изучаемых сортов индивидуально измеряли электронным штангенциркулем с точностью до двух знаков после запятой. Математической основой для вычисления объёма и эллипса продольного и

поперечного сечений семян изучаемых сортов масличного льна служили известные уравнения объёма трёхосного сплюснуто-вытянутого эллипсоида и эллипса [12; 13; 14].

Для визуализации объёмов слизевых капсул набухших семян льна использовали методы помещения набухших и ослизнённых семян льна на гидрофобную поверхность; помещения ослизнённых семян в гидрофобную жидкость (вазелиновое масло); помещения сухих семян льна в разработанную авторским коллективом в режиме «ноу-хау» буферную жидкость, окрашенную метиленовым синим красителем. Статистический анализ полученных результатов включал стандартные расчёты выборочных средних \bar{x} и коэффициентов вариации C_v .

Результаты и обсуждение. В связи с перспективностью селекции льна обыкновенного, включая масличные формы, на увеличение массовой доли семенных слизиобразующих полисахаридов необходима разработка метода определения слизиобразующей способности семян и сопутствующих параметров, таких как линейные размеры и объёмы слизевых капсул. А поскольку слизи образуются из слизиобразующих полисахаридов по всей поверхности семян, то наиболее вероятно, что форма слизиной капсулы будет повторять форму семени. Семя льна обыкновенного у подавляющего большинства коллекционных сортообразцов и сортов имеет округло-сжато-вытянутую эллипсоидную форму с небольшим изгибом в базальной части семени в зоне расположения фуникулуса (рубчика) и апикальной части первичного корешка под семенной оболочкой. Но в целом геометрическая проекция формы семени льна

при виде с любой стороны сохраняет визуальное подобие с эллипсом (рис. 1).

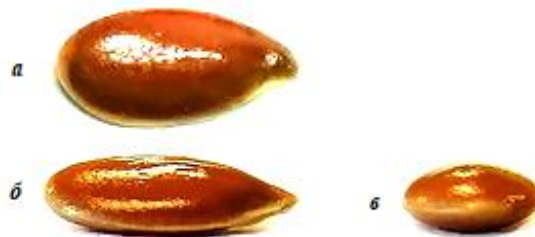


Рисунок 1 – Форма семени масличного льна, сорт ВНИМК 620 ФН:
а – вид сверху; б – продольный вид сбоку;
в – поперечный вид сбоку

В трёхмерном пространстве объёмным производным от эллипса является эллипсоид. Из всех типов эллипсоидов наиболее близок к форме семени льна трёхосный тип сплюснуто-вытянутого эллипсоида с неодинаковыми длинами полуосей a , b , c (рис. 2).

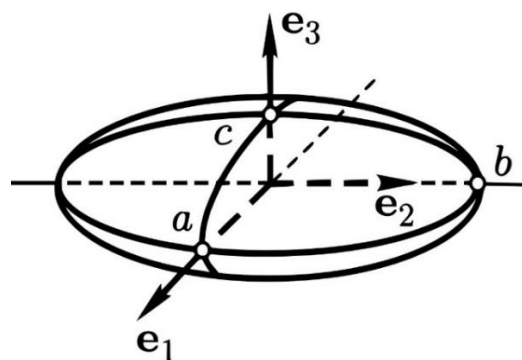


Рисунок 2 – Трёхосный эллипсоид в декартовой системе координат с векторами симметрии e_1 , e_2 , e_3 [12]:
 a – длина полуоси ширины от центра эллипсоида; b – длина полуоси длины; c – длина полуоси высоты от центра эллипсоида

Уравнение объёма V эллипсоида является производным от классического уравнения объёма шара Архимеда (1).

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (1)$$

где r – радиус шара.

Но для описания объёма эллипсоида с неодинаковыми длинами осей произведение трёх радиусов (r^3) в уравнении объёма шара преобразуется в произведение длин полуосей трёх векторов симметрии a, b, c . Тогда уравнение объёма эллипсоида (2) приобретает следующий вид [13]:

$$V = \frac{4}{3} \pi abc. \quad (2)$$

Уравнение объёма трёхосного сплюснuto-вытянутого эллипсоида (2) вполне пригодно для вычисления объёмов отдельных семян масличного льна. Результаты определения объёмов сухих и набухших семян пяти сортов масличного льна представлены в таблице 1.

Таблица 1

Линейные размеры сухих и набухших семян масличного льна

ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, г. Краснодар, 2022 г.

Количес- венные параметры семена	Сорт, при n = 40					Сред- нее по сор- там, x.	Коеф- фици- ент вариаци- и Cv, %
	РФН	Ы 117	ФЛИЗ	ВНИИМК 620 ФН	Сне- гурок		
Сухие семена							
Длина, мм	4,57	3,93	5,06	4,88	4,72	4,63	9,3
Ширина, мм	2,41	2,00	2,48	2,52	2,31	2,34	8,9
Высота, мм	1,05	0,89	1,11	1,07	0,88	1,00	10,7
Объём, мм ³	6,09	3,73	7,41	7,07	4,96	5,85	26,0
Набухшие семена							
Длина, мм	5,14	4,45	5,72	5,54	5,30	5,23	9,4
Ширина, мм	2,88	2,41	2,99	3,06	2,75	2,82	9,1
Высота, мм	1,29	1,13	1,40	1,35	1,08	1,25	11,1
Объём, мм ³	10,23	6,32	12,37	11,39	8,54	9,77	24,5
Отклонения линейных размеров и объёмов набухших семян от сухих, %							
Длина, мм	112,5	113,2	113,0	113,5	112,3	112,9	0,5
Ширина, мм	119,5	120,5	120,6	121,4	119,0	120,2	0,8
Высота, мм	122,9	127,0	126,1	126,2	122,7	125,0	1,6
Объём, мм ³	168,0	169,4	166,9	161,1	172,2	167,53	2,4

Анализ представленных в таблице 1 данных показывает, что у разных сортов масличного льна линейные размеры сухих семян заметно отличаются. Ещё более заметны различия между отдельными генотипами масличного льна по объёмам семян. К тому же эти данные обладают определённой научной новизной, поскольку показатели объёма семян у сортов масличного льна в более ранних публикациях не обнаружены.

Выявленные межсортовые различия по линейным размерам и объёмам сохраняются и у набухших семян. При этом отклонения линейных размеров набухших семян от аналогичных параметров сухих семян у всех изучаемых сортов сохраняются примерно на одном уровне с низкими коэффициентами вариации выборочных средних по длине – $113 \pm 0,5$ %; по ширине – $120 \pm 0,8$ %; по высоте – $125 \pm 1,6$ %. Такая стабильность различий линейных размеров между сухими и набухшими семенами масличного льна у пяти изучаемых сортов позволяет использовать полученные зависимости в качестве достаточно стабильных коэффициентов увеличения линейных размеров набухших семян без их прямых измерений при массовых анализах.

Поскольку объёмная форма семени льна близка к эллипсоиду, то для вычисления и визуализации продольного и поперечного сечений семян масличного льна вполне пригодно параметрическое уравнение эллипса (3) в канонической системе координат [14]:

$$\begin{cases} x = a \cos t \\ y = b \sin t \end{cases} \quad \text{при } 0 \leq t \leq 2\pi, \quad (3)$$

где x – координата точки по оси абсцисс;
 y – координата точки по оси ординат;
 a – длина большой полуоси (длины или ширины семени);
 b – длина малой полуоси (высоты семени);

t – параметр угла от 0 до 2π между направлением оси абсцисс и радиус-вектором не менее чем в $20 + 1$ точках по периметру эллипса (добавление координат 21-й точки, аналогичной координатам 1-й точки, позволяет замкнуть кривую эллипса на графике).

В зависимости от того эллипс продольного или поперечного сечения семени рассчитывали, за длину большой полуоси принимали, соответственно, половину длины или ширины семени. Для ускорения вычисления координатных точек эл-

липса по размерам длины и ширины семян льна использовали матрицу Excel2 [14].

Результаты вычисления эллипсов продольного и поперечного сечений сухого и набухшего семени масличного льна, на примере семени сорта ВНИИМК 620 ФН, представлены на рисунке 3.

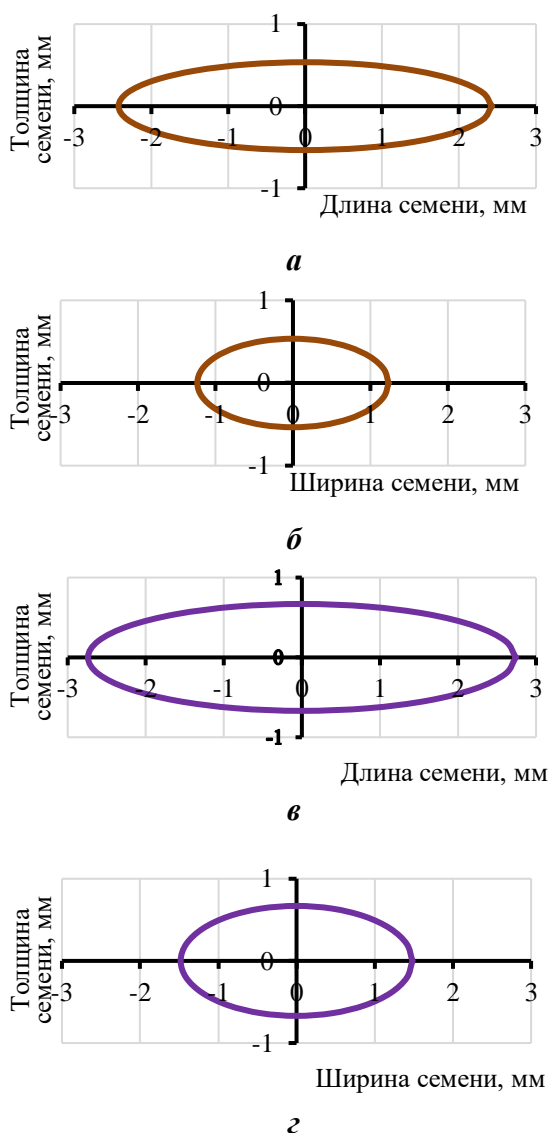


Рисунок 3 – Усреднённая (при $n = 40$) форма продольного и поперечного сечений сухого (а, б) и набухшего (в, г) семени масличного льна на примере сорта ВНИИМК 620 ФН

Однако прямые измерения линейных размеров слизевых капсул, в том

числе и с использованием уравнений (2) и (3), по аналогии с семенами, пока оказались невозможны из-за сложности фиксации границ раздела фаз между гидроколлоидными слизями и водным раствором. Усложняет задачу фиксации набухшей семенной слизи её неоднородный состав, включающий, как минимум, три фракции, отличающиеся разной скоростью гидратации, плотностью и вязкостью [6]. Самая низкомолекулярная фракция семенной слизи в течение нескольких минут после начала увлажнения переходит в раствор. Более вязкие средне- и высокомолекулярные слизевые фракции гидратируются позже и составляют основу слизевой капсулы.

Форма слизевой капсулы из этих фракций слизи на поверхности увлажнённых семян льна сохраняет свою эллипсоидную форму только в объёме раствора. Вне раствора, в силу пониженной вязкости и гравитации, периферийная часть слизевой капсулы стекает вниз и частично расплывается по нижерасположенной поверхности. Причём явление гравитационного стекания части слизи отмечается не только у семян масличного льна, оно свойственно и другим, неродственным видам растений (рис. 4).

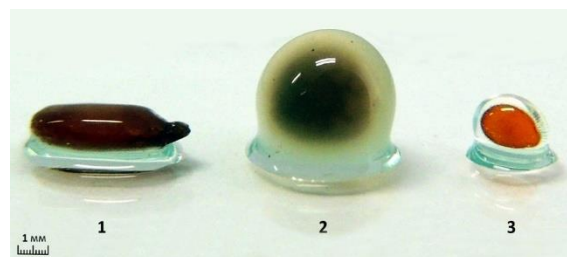


Рисунок 4 – Характер ослизнения семян некоторых видов цветковых растений после 3-минутной экспозиции в воде (цит. по: [8]):

- 1 – лён обыкновенный (*Linum usitatissimum* L., сем. Linaceae DC ex Perleb);
- 2 – шалфей мускатный (*Salvia sclarea* L., сем. Lamiaceae Mart.);
- 3 – рыжик посевной (*Camelina sativa* (L.) Crantz., сем. Brassicaceae Burn.)

Показанная на рисунке 4.1 слизь на поверхности семени льна представляет собой преимущественно низкомолекулярную фракцию с повышенной текучестью. При этом у шалфея мускатного (рис. 4.2) и рыжика посевного (рис. 4.3) наличие заметного слоя слизи в верхней части семян указывает на гидратацию более вязких фракций.

Модифицирует формирование слизевых капсул разная скорость гидратации фракций, составляющих семенную слизь. У семян масличного льна этот процесс завершается только через 8–9 ч после замачивания семян [6]. К этому времени большая часть низкомолекулярных фракций переходит в окружающую водную среду, в том числе в почвенный раствор, и может горизонтально или вертикально мигрировать на различные расстояния от семени под воздействием гравитации или возможных разнонаправленных микропотоков в водной среде. Поэтому в наших экспериментах легко растворимая, низкомолекулярная фракция слизи семян льна, как самая подвижная, не учитывалась.

Техническая задача достаточно надёжной фиксации границ слизевых капсул вокруг увлажнённых семян масличного льна практически не была решена до настоящего времени. Поэтому с целью определения способа визуализации слизевых капсул вокруг семян льна нами была проведена серия модельных экспериментов (рис. 5).

Наиболее наглядные результаты были получены путём помещения набухших и ослизнённых семян льна на гидрофобную поверхность (рис. 5а); путём помещения ослизнённых семян льна в гидрофобную жидкость (вазелиновое масло) (рис. 5б); путём ослизнения семян льна в буферной жидкости, окрашенной метиленовым синим красителем (рис. 5в).

Фиксация слизевых капсул вокруг увлажнённых семян льна на гидрофобной поверхности после их удаления из воды (см. рис. 5а) позволяет провести измерение их длины и ширины. Однако гравитационное стекание слабовязких слизей с верхней поверхности семян не позволяет объективно измерить толщину слизевых капсул.

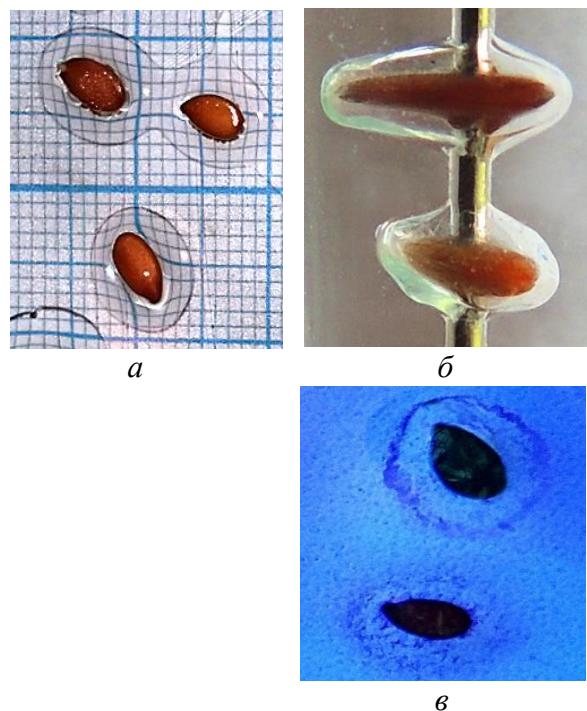


Рисунок 5 – Визуализация границ слизевых капсул вокруг увлажнённых семян масличного льна:
а – на гидрофобной поверхности;
б – в объёме вазелинового масла;
в – в окрашенном буферном растворе

Нанизывание на иглы семян льна, их полное ослизнение в воде и последующий перенос в вазелиновое масло позволяют визуализировать не только длину и ширину, но уже и толщину слизевых капсул (см. рис. 5б). Однако сквозные повреждения иглой боковых поверхностей семян льна с образованием выступов частей повреждённых оболочек в зонах укола вносят искажающие изменения в естественную конфигурацию и толщину слизевых капсул. Кроме этого, прокалывание иглой мелких семян нередко приводит к их раскалыванию. Также не всегда удаётся сделать проколы точно в центре семени, что влечёт за собой искажение формы слизевой капсулы непосредственно возле места прокола.

Ещё один способ визуализации слизевых капсул основан на помещении семян льна в разработанный нами буферный раствор, окрашенный метиленовым синим красителем. При этом краситель ме-

тиленовый синий частично вступает в реакцию с периферийными компонентами слизи, формируя на ее внешней границе тёмноокрашенный окаймляющий осадок, что позволяет визуализировать и определить размеры слизистой зоны (см. рис. 5в).

Средне- и высокомолекулярные фракции слизи, формирующие слизевую капсулу, окрашиваются метиленовым синим слабо, что позволяет зафиксировать её высоту и форму (рис. 6).

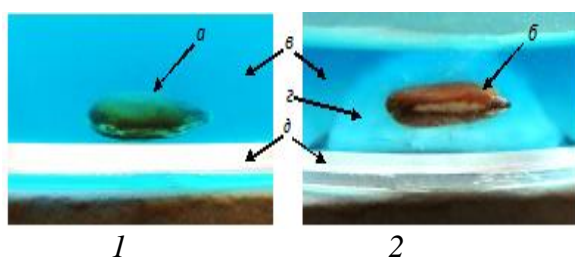


Рисунок 6 – Визуализация размеров и формы слизистой капсулы вокруг семени масличного льна в окрашенном буферном растворе на примере сорта ВНИИМК 620 ФН: 1 – положение ненабухшего семени в буферном растворе; 2 – положение набухшего и слизистой капсулы в буферном растворе; *a* – ненабухшее семя; *б* – набухшее семя; *в* – буферный раствор; *з* – слизевая капсула; *д* – дно ёмкости

Плотность сухих семян льна выше плотности воды, поэтому после смачивания всей поверхности они опускаются на дно ёмкости (см. рис. 6а). Семенные слизевые капсулы также начинают формироваться в придонном слое раствора. Но после полного ослизнения оболочки семя льна приподнимается над поверхностью дна ёмкости на высоту, близкую к толщине набухшего семени (см. рис. 6б). Визуально толщина слоя слизистой капсулы вокруг набухшего семени на рис. 5б также близка к его толщине.

Линейные размеры слизистой капсулы в окрашенном буферном растворе определяются так же, как и размеры семени льна – измерением длины и ширины области слизи, но в её проекции на поверхность в виде окаймлённой осадком зоны (рис. 7).

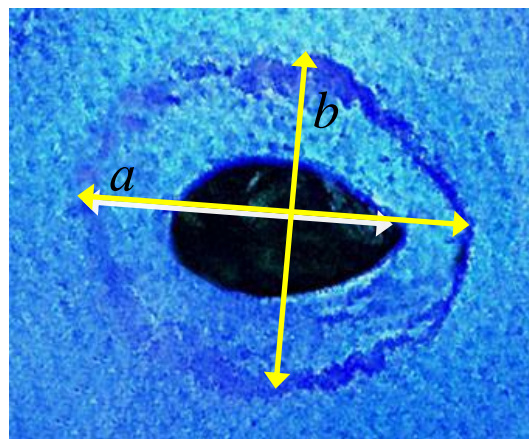


Рисунок 7 – Оси линейных измерений проекции слизистой капсулы в буферном растворе: *a* – длина; *b* – ширина

Поскольку в подавляющем большинстве случаев наших наблюдений видимая толщина слоя слизи по всем осям симметрии слизистой капсулы была примерно равна толщине набухшего семени (см. рис. 5б и 6б), для расчёта объёма слизистой капсулы с включенным семенем вполне подходит уравнение эллипсоида (2) в адаптированном к этому случаю виде (4):

$$V = \frac{3}{4} \pi a b (3C_{\text{набухш. семени}}), \quad (4)$$

где $C_{\text{набухш. семени}}$ – длина полуоси высоты набухшего семени, или как произведение длины полуоси высоты сухого семени на коэффициент увеличения линейного размера $k = 1,25$ (или 125 % к сухому семени) при набухании (см. табл. 1).

Но в отличие от сохраняющего форму набухшего семени общая форма слизистой капсулы в придонной зоне ёмкости с буферным раствором вследствие гравитационного стекания приобретает форму полуэллипсоида с плоской нижней стороной (см. рис. 6з). Поэтому уравнение для расчёта координат при построении его сечения (3) требует небольшой модификации в части построения точек по оси ординат y . Конфигурацию продольного и поперечного сечений такой формы слизистой капсулы с включённым в её объём набух-

шим семенем можно описать модифицированным уравнением эллипса (5):

$$\begin{cases} x = a_{\text{слизев. капсулы}} \cos t_{(1-21)} & \text{при } 0 \leq t \leq 2\pi \\ y = b_{\text{слизев. капсулы}} \sin t_{(1-11)} & \text{при } 0 \leq t \leq \pi, \end{cases} \quad (5)$$

Где $a_{\text{слизев. капсулы}}$ – размер полуоси длины a или ширины b (см. рис. 7) проекции слизистой капсулы;

$b_{\text{слизев. капсулы}}$ – размер полуоси высоты слизистой капсулы, рассчитанной как переменная $Z_{\text{набухш. семени}}$ в уравнении (4);

$t_{(1-21)}$ – параметр угла от 0 до 2π между направлением оси абсцисс по полуоси a и радиус-вектором в 21 точке по периметру эллипса;

$t_{(1-11)}$ – параметр угла от 0 до π в 11 точках верхней половины периметра эллипса.

Полученные результаты расчёта продольного и поперечного сечений формы слизистой капсулы с учётом гравитационного стекания периферийных участков к плоской придонной поверхности и включённого в объём капсулы набухшего семени, сечение которого вычислено по уравнению (2), представлены на рисунке 8.

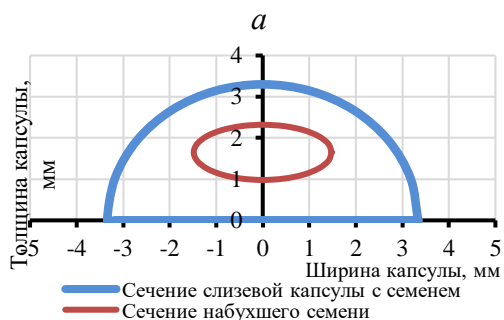
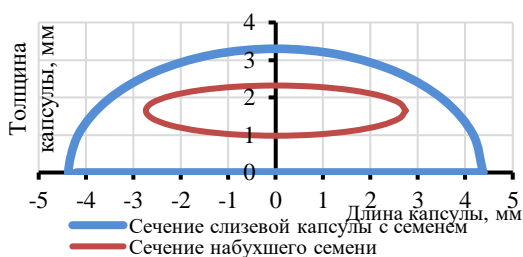


Рисунок 8 – Форма продольного и поперечного сечений слизистой капсулы семени масличного льна при придонном расположении в буферном растворе на примере сорта ВНИИМК 620 ФН a – продольное сечение; b – поперечное сечение

При этом для математической компенсации гравитационной деформации формы слизистой капсулы в буферном растворе для расчёта эллипса по измерениям длины и ширины достаточно применить классическое параметрическое уравнение эллипса (3). В результате внешний вид продольного и поперечного сечений слизевых капсул, полностью сохраняя расчётные величины объёма, приобретает симметричный эллиптический вид (рис. 9).

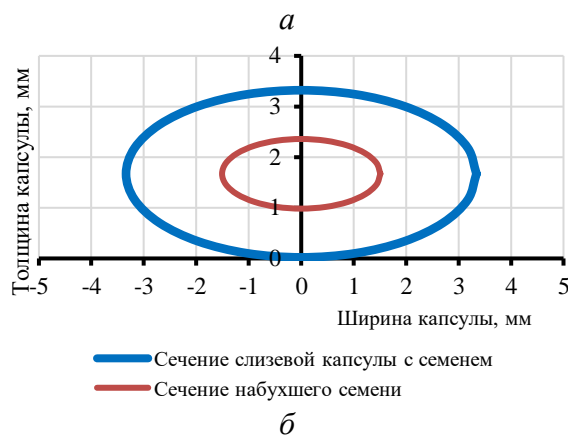
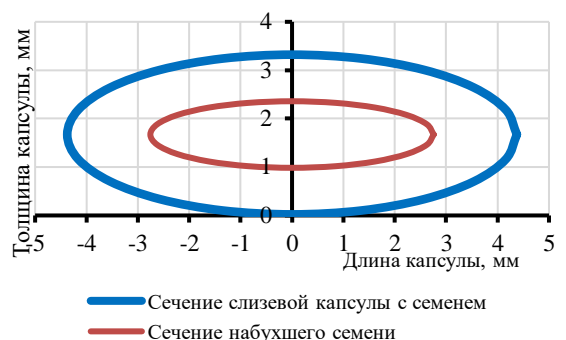


Рисунок 9 – Форма продольного и поперечного сечений слизистой капсулы вокруг семени льна при компенсации деформирующего влияния гравитационного стекания, сорт ВНИИМК 620 ФН: a – продольное сечение; b – поперечное сечение

В целом использование математических алгоритмов на основе уравнений трёхосного эллипсоида и эллипса впервые удалось установить форму и объём семян льна и их семенных слизевых капсул на примере пяти сортов масличного льна селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК.

На основании проведённых исследований и полученных результатов предложен новый признак – слизеобразующая способность семян льна обыкновенного, и выведено его уравнение (6):

$$M = \frac{V_{\text{слизев.капсулы}} - V_{\text{набух.семени}}}{V_{\text{набух.семени}}} 100, \quad (6)$$

где $V_{\text{слизев.капсулы}}$ – объём слизистой капсулы с набухшим семенем;

$V_{\text{набухш. семени}}$ – объём набухшего семени;

M – слизеобразующая способность семян льна (от лат. «mucus» – слизь).

Результаты исследований показывают наличие значительного генотипического полиморфизма по таким новым для масличного льна признакам, как объём слизистой капсулы с семенем, чистый объём слизи отдельного семени, общая слизеобразующая способность семени (табл. 2).

Таблица 2

Оценка слизеобразующей способности семян сортов масличного льна селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК с использованием нового метода

ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, 2022 г.

Сорт масличного льна	Объём семени, мм ³		Размеры слизевых капсул с семенами, мм, мм ³				Чистый объём слизи, мм ³ /семя	Слизеобразующая способность семени, М, %
	сухо-го	набухшего	длина	ширина	толщина	объём		
РФН	6,09	10,23	9,21	7,35	3,18	106,89	96,56	944
Ы 117	3,73	6,32	8,32	6,62	2,72	74,22	67,88	1075
ФЛИЗ	7,41	12,37	10,22	7,87	3,39	132,36	119,80	968
ВНИИМК 620 ФН	7,07	11,39	9,01	7,00	3,30	95,76	83,74	735
Снегурок	4,96	8,54	9,54	7,38	2,62	89,42	81,08	949

Как следует из данных, представленных в таблице 2, из пяти изучаемых сортов масличного льна максимальный объём слизевых капсул с семенами формировался у коричневосемянного сорта ФЛИЗ – 132,36 мм³/семя; минимальный – у жёлтосемянного сорта Ы 117 – 74,12 мм³/семя.

Максимальный и минимальный чистый объём слизи в расчёте на одно семя также зафиксирован у этих сортов – 119,99 и 67,88 мм³ соответственно. Максимальная общая слизеобразующая способность семян (M), как отношение чистого объёма слизи к объёму набухшего семени, отмечена у сорта Ы 117 – $M = 1074$ %, отличающегося самым низким объёмом слизевых капсул. А лучший по чистому объёму слизи сорт ФЛИЗ по показателю слизеобразующей способности семян хотя и оказался на втором месте ($M = 970$ %), но заметно отстал от лидера – на 104 %.

Исследования по изучению слизеобразующей способности семян масличного льна продолжают с целью выявления коррелятивных связей этого показателя с другими хозяйственно ценными признаками.

Заключение. Впервые предложена и реализована концепция визуализации и измерения линейных размеров слизевых капсул вокруг отдельных набухших семян масличного льна.

При разработке этой концепции для математического описания формы семян масличного льна подобраны наиболее близкая по форме и пропорциям трёхмерная геометрическая фигура – эллипсоид, и соответствующие математические алгоритмы вычисления её объёма, поперечного и продольного сечений.

Предложены и испытаны различные способы визуализации границ слизевых капсул вокруг увлажнённых семян масличного льна. Среди них выбран наиболее наглядный способ: замачивание сухих семян льна в буферном растворе с красителем с последующей фиксацией размеров образовавшихся вокруг семян слизевых зон.

Для вычисления сечения придонных полуэллипсоидных форм слизевых капсул семян масличного льна при гравитационном стекании периферийных участков низкомолекулярной фракции слизи к плоской придонной поверхности применён модифицированный алгоритм на основе параметрического уравнения эллипса.

Практическое использование выбранного математического алгоритма впервые позволило определить слизеобразующую способность семян у пяти сортов маслич-

ного льна селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК. Результаты вычислений показали наличие значительного генотипического полиморфизма по новым для масличного льна признакам, таким как объём слизи капсулы с включённым в неё семенем, чистый объём слизи капсулы отдельного семени и общая слизеобразующая способность семени.

Список литературы

1. *Флора СССР*. Том XIV. Льновые – Linaceae Dumort / Под ред. Б.К. Шишкина и Е.Г. Боброва. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – С. 86–146.
2. *Жуковский П.М.* Культурные растения и их сородичи. Систематика, география, цитогенетика, иммунитет, экология, происхождение, использование. – Л.: Колос, 1971. – С. 416, 462–464.
3. *Вехов В.Н., Губанов И.А., Лебедева Г.Ф.* Культурные растения СССР. – М.: Мысль, 1978. – С. 193.
4. *Diederichsen A., Yong-Bi Fu.* Flax genetic diversity as the raw material for Future Success // Proc. of Intern. Conf. on Flax and Other Bast Plants, 2008. – P. 270–280.
5. *Fedeniuk R.W., Biliaderis C.B.* Composition and physicochemical properties of linseed (*Linum usitatissimum* L.) mucilage // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 1994. – Vol. 42. – P. 240–247.
6. *Зеленцов С.В., Мошненко Е.В.* Количественная и качественная оценка слизей семян масличных сортов льна *L. usitatissimum* L. // Масличные культуры. Науч.-тех. бюл. ВНИИМК. – 2012. – Вып. 2 (151–152). – С. 95–102.
7. *Yang X., Baskin C.C., Baskin J.M., Liu G., Huang Z.* Seed mucilage improves seedling emergence of a sand desert shrub // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7. – Is. 4. DOI: 10.1371/journal.pone.0034597.
8. *Лукомец В.М., Зеленцов С.В., Саенко Г.М., Мошненко Е.В., Зеленцов В.С.* Фунгицидная активность слизиобразующих полисахаридов льна обыкновенного *Linum usitatissimum* L. // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 2. – С. 21–24.
9. *Cui S.W.* Polysaccharide gums from agricultural products: Processing, structures & functionality. – Technomic Publishing, Lancaster, 2001. – 269 p.
10. *Оленников Д.Н., Танхаева Л.М.* Исследование процесса экстракции полисахаридов семян льна (*Linum usitatissimum* L.) // Химия растительного сырья. – 2007. – № 4. – С. 79–83.
11. *Naran R., Chen G., Carpita N.C.* Novel rhamnogalacturonan I and arabinoxylan polysaccharides of flax seed mucilage // Plant Physiology. – 2008. – Vol. 148. – P. 132–141.
12. *Беклемисhev Д.В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – С. 124.
13. *Эллипсоид*. – 2022: [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эллипсоид> (дата обращения: 02.03.2023).
14. *Эллипс и окружность* в Excel – 2015: [Электронный ресурс]. – URL: https://excel2.ru/articles/ellips-i-okruzhnost-v-ms-excel?utm_source=organic_file&utm_medium=file&utm_campaign=file_download (дата обращения: 02.03.2023).

References

1. Flora SSSR. Tom XIV. L'novye – Linaceae Dumort / Pod red. B.K. Shishkina i E.G. Bobrova. – M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1949. – S. 86–146.
2. Zhukovskiy P.M. Kul'turnye rasteniya i ikh sorodichi. Sistematika, geografiya, tsitogenetika, immunitet, ekologiya, proiskhozhdenie, ispol'zovanie. – L.: Kolos, 1971. – S. 416, 462–464.

ya, proiskhozhdenie, ispol'zovanie. – L.: Kolos, 1971. – S. 416, 462–464.

3. *Vekhov V.N., Gubanov I.A., Lebedeva G.F.* Kul'turnye rasteniya SSSR. – M.: Mysl', 1978. – S. 193.
4. *Diederichsen A., Yong-Bi Fu.* Flax genetic diversity as the raw material for Future Success // Proc. of Intern. Conf. on Flax and Other Bast Plants, 2008. – P. 270–280.
5. *Fedeniuk R.W., Biliaderis C.B.* Composition and physicochemical properties of linseed (*Linum usitatissimum* L.) mucilage // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 1994. – Vol. 42. – P. 240–247.
6. *Zelentsov S.V., Moshnenko E.V.* Kolichestvennaya i kachestvennaya otsenka slizey semyan maslichnykh sortov l'na *L. usitatissimum* L. // Maslichnye kul'tury. Nauch.-tekh. byul. VNIIMK. – 2012. – Vyp. 2 (151–152). – S. 95–102.
7. *Yang X., Baskin C.C., Baskin J.M., Liu G., Huang Z.* Seed mucilage improves seedling emergence of a sand desert shrub // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7. – Is. 4. DOI: 10.1371/journal.pone.0034597.
8. *Lukomets V.M., Zelentsov S.V., Saenko G.M., Moshnenko E.V., Zelentsov V.S.* Fungitsidnaya aktivnost' slizeobrazuyushchikh polisakharidov l'na obyknovennogo *Linum usitatissimum* L. // Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka. – 2020. – № 2. – S. 21–24.
9. *Cui S.W.* Polysaccharide gums from agricultural products: Processing, structures & functionality. – Technomic Publishing, Lancaster, 2001. – 269 p.
10. *Olennikov D.N., Tankhaeva L.M.* Issledovanie protsessa ekstraktsii polisakharidov semyan l'na (*Linum usitatissimum* L.) // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2007. – № 4. – S. 79–83.
11. *Naran R., Chen G., Carpita N.C.* Novel rhamnogalacturonan I and arabinoxylan polysaccharides of flax seed mucilage // Plant Physiology. – 2008. – Vol. 148. – P. 132–141.
12. *Beklemishev D.V.* Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebrы. — SPb.: Izd-vo «Lan», 2015. – S. 124.
13. *Ellipsoid*. – 2022: [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ellipsoid> (data obrashcheniya: 02.03.2023).
14. *Ellips i okruzhnost' v Excel* – 2015: [Elektronnyy resurs]. – URL: https://excel2.ru/articles/ellips-i-okruzhnost-v-ms-excel?utm_source=organic_file&utm_medium=file&utm_campaign=file_download (data obrashcheniya: 02.03.2023).

Сведения об авторах

С.В. Зеленцов, зав. отд., гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук, чл.-корр. Рос. акад. наук

В.С. Зеленцов, ст. науч. сотр., канд. биол. наук

Е.В. Мошненко, вед. науч. сотр., канд. биол. наук

Л.Г. Рябенко, зав. лаб., вед. науч. сотр., канд. с.-х. наук

Получено/Received

13.04.2023

Получено после рецензии/Manuscript peer-reviewed

17.04.2023

Получено после доработки/Manuscript revised

18.04.2023

Принято/Accepted

26.04.2023

Manuscript on-line

30.06.2023