

УДК 581.524:635.53

**КИНЕТИКА ПРОРАСТАНИЯ СЕМЯН.  
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ**А.Ф. БУХАРОВ<sup>1</sup>, Д.Н. БАЛЖЕЕВ<sup>1</sup>, А.Р. БУХАРОВА<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБНУ Всероссийский НИИ овощеводства<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный заочный университет)

*В работе изложены (на примере пастернака) основные характеристики, расчет и моделирование процесса прорастания семян. Величина, обратная средневзвешенному значению периода прорастания семян ( $1 / T_{cp}$ ), которая будет измеряться в сутки<sup>-1</sup> (или час<sup>-1</sup>), можно рассматривать как скорость процесса прорастания семян. Преимущество этого показателя заключается в том, что как для любой средней величины, для него можно рассчитать среднее квадратичное отклонение, дисперсию, коэффициент вариации, ошибку средней и т.д., показатели, которые будут нести свои смысловые нагрузки. Для прогнозирования и моделирования процесса прорастания использованы функции Гомперца, Вейбулла, логистические и другие с различным числом параметров. Для более адекватного прогнозирования и моделирования процесса прорастания пользуемся расчетом и построением лог-логистической регрессии с тремя параметрами. Кумулятивная кривая прорастания может быть преобразована в линейную зависимость. Это преобразование позволяет исследователю подвергнуть результаты математическому анализу (например, рассчитать доверительный интервал, крутизну наклона кривой и т.д.). Для того чтобы показать насколько быстро происходит процесс прорастания следует использовать относительные параметры (скоростные) признака - темп роста и коэффициент роста. Дружность прорастания семян можно в значительной степени охарактеризовать с помощью скоростных параметров, с которыми у нее, как правило, отмечена тесная корреляция. Показатели, представленные в исследованиях, представляют значительный интерес для использования в научно исследовательской работе при изучении качества семян, сравнении приемов стимулирующего и угнетающего воздействия внешних факторов, явлений покоя и долговечности семян, а также других опытах в практике семеноводения. Предложенные показатели и методы их расчета, могут быть использованы при сравнении эффективности технологических приемов в семеноводстве, изучении покоя, долговечности, качества семян и других явлений.*

**Ключевые слова:** семеноводение, прорастание семян, скоростные и временные параметры, пробит, логит, регрессия, моделирование.

В практике семеноводства и семеноведения сложилась стройная система семенного контроля, закреплённая в стандартах [5, 6] и Международных правилах определения качества семян [18], повсеместно используемая для анализа и оценки

качества семян. Важнейшими показателями, характеризующими качество семян, являются всхожесть и энергия прорастания. Эти показатели дают возможность быстро, информативно, а главное воспроизводимо охарактеризовать партии семян. Однако в научно исследовательской работе этих показателей, которые дают информацию только о числе проросших семян и только на определенную дату после постановки на проращивание, часто бывает недостаточно. В таких случаях процесс проращивания принято изучать в динамике, осуществляя учет числа проросших семян многократно через определенные равные промежутки времени. При этом выборочные совокупности, характеризующие те или иные признаки, группируются в динамические ряды или ряды развития. Статистическая обработка динамической изменчивости имеет свою специфику. Методы, при этом применяемые, направлены на выявление закономерностей именно процесса посредством расчета различных параметров, коэффициентов, формул и построения графиков, характеризующих его кинетику.

Понятие дружность прорастания семян применяют очень широко для характеристики качества посевного материала. Активно используя этот термин, многие авторы не всегда четко характеризуют его. Отмечая дружность прорастания той или иной партии семян, часто это утверждение не подкрепляется конкретными параметрами. Говоря о дружно прорастающих семенах, обычно указывают, что они отличаются высоким темпом развития, прорастают ускоренно, энергично, кучно, в короткие сроки и т.д., это свидетельствует о некоторой размытости понятия [12, 13]. Таким образом, дружность прорастания семян явление многогранное, но явно недостаточно изученное.

В настоящей статье обобщены данные об использовании системы временных и скоростных показателей для характеристики кинетики прорастания семян. Дано определение понятию дружность прорастания семян, приведены параметры, характеризующие данное явление. Проанализированы приведенные в различных публикациях методы расчета и практика применения различных показателей, характеризующих дружность прорастания семян [14–16, 19–21].

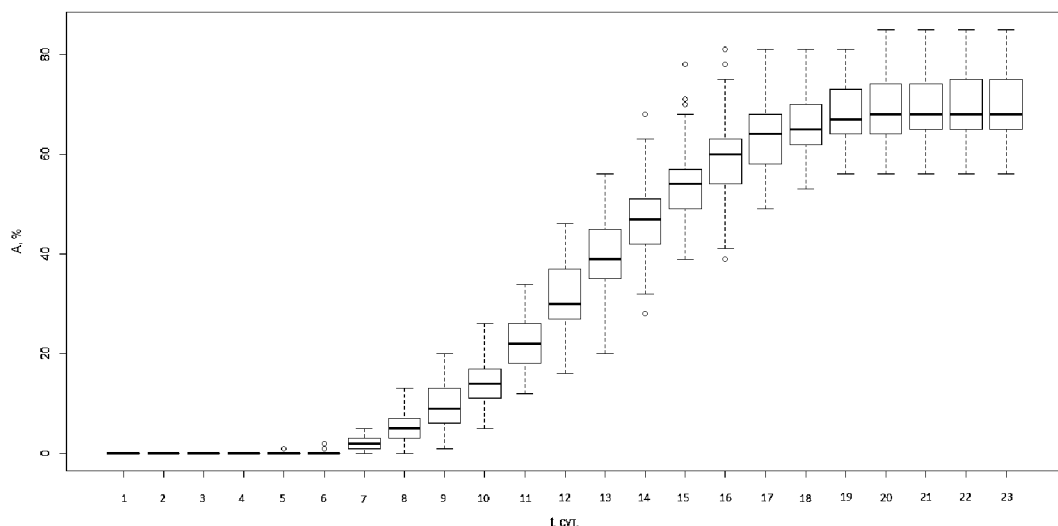
В статье использованы материалы наших исследований, выполненных в процессе изучения прорастания семян овощных зонтичных культур [1, 2].

### **Методика исследований**

Работа выполнена в ФГБНУ ВНИИО (ФАНО) и ФГОУ ВО РГАЗУ в 2011–2014 гг. Объектом исследований были семена пастернака (*Pastinaca sativa* L.) сорт Кулинар, полученные в естественных условиях в Московской области на базе ФГБНУ ВНИИО в 2011–2014 гг. Повторность опыта трехкратная по 100 шт. семян. Для каждой изучаемой культуры исследовалось 10–15 особей. Прорастание семян проводили при среднеоптимальной температуре проращивания ( $t = +20^{\circ}\text{C}$ ) [11] и освещении от 3 до 4 тыс. лк. Расчет статистических показателей и математического моделирования проведен с использованием R (v. 3.2.2) и [4].

### **Результаты и их обсуждение**

Любой процесс, в том числе и прорастание семян, характеризуется изменением абсолютной величины признака (показателя). При этом графическое изображение, с условием большого числа наблюдений, охватывающих весь процесс, выглядит как  $S$  —образная кривая (рис. 1).



**Рис. 1.** Абсолютная величина признака — доля проросших семян пастернака, %

Такая сигмовидная кривая, впервые выявленная Ю. Саксом, впоследствии признана характерной для большинства процессов роста и развития биологических объектов.

На рисунке 1 показано прорастание семян пастернака в динамике. При этом ход прорастания находился под контролем в течение всего периода исследования. Время отсчитывали с момента укладки семян на субстрат.

Показатель «начало прорастания» ( $T_H$ ) можно характеризовать как момент появления первого проросшего семени от момента укладки семян на субстрат. В данном случае это 5 сут.

Показатель «полное прорастание» ( $T_H$ ) или завершение процесса проращивания определяется сроком окончательного подсчета. Прорастание последнего жизнеспособного семени, после которого (в течение определенного времени) проросших семян не появляется можно определить как момент наступления «полного прорастания». Определенное значение имеет показатель  $T_H - T_H$  (промежуток времени между началом и полным прорастанием семян), который дает информацию о том, как долго длится процесс от начала до полного прорастания семян.

Г. Гаснер ввел в качестве критерия «числовой показатель прорастания», после публикаций Ф. Габерланда и особенно Х. Пипера этот показатель получил достаточно широкое распространение в научных исследованиях, в том числе в отечественной литературе [10]. Многие исследователи считали его даже более важным показателем, чем процент всхожести. Однако, название, под которым тот показатель практиковался — «скорость прорастания семян» явно было ошибочным [7]. Это заблуждение длительное время тиражировалось и сохранилось даже до настоящего времени. Кроме того этот показатель имел название «время прорастания одного семени», которое также является недостаточно точными. Логичнее называть его «средне взвешенное значение периода прорастания семян», которое достаточно точно отражает суть.

Этот числовой показатель является частным от деления суммы всех отдельных произведений процента проросших семян и соответствующего числа дней от начала до завершения их прорастания на суммарный процент всхожести семян за весь срок испытания.

$$T_{cp} = \frac{\sum(t \times n)}{\sum n} \quad (1)$$

где  $T_{cp}$  — средневзвешенное значение периода прорастания семян;  $t$  — время в сутках, начиная с 0 дня (день постановки опыта);  $n$  — количество проросших семян в отдельные сутки;  $\sum n$  — общее количество проросших семян.

Поскольку измеряется этот показатель в единицах времени, он никак не может быть скоростью. Другое дело, величину, обратную этому показателю ( $1 / T_{cp}$ ), которая будет измеряться в сут. <sup>-1</sup> (или час <sup>-1</sup>), можно рассматривать как скорость процесса прорастания семян.

Преимуществом этого показателя является то, что как для любой средней величины, для нее можно рассчитать среднее квадратичное отклонение, дисперсию, коэффициент вариации, ошибку средней и т.д., показатели, которые будут нести свои смысловые нагрузки. Так коэффициент вариации, показывающий насколько изменчиво среднее значение периода прорастания, можно использовать в качестве критерия дружности прорастания.

Еще один расчетный временной показатель прорастания — это время, за которое прорастает определенная доля популяции семян. В исследованиях для прогнозирования влияния различных веществ (ингибиторов или стимуляторов) или факторов воздействия (температура, свет, патоген и т.д.) на выживание особей используется, пробит или логит регрессия.

Однако у этого показателя имеются некоторые недостатки. Для получения максимальной точности определяемого показателя необходимо, чтобы в опыте число всхожих семян достигало, а желательнее и превышало 50%. Иначе вычисленный показатель  $T_{50}$  может достигать очень больших значений и будет чисто теоретической величиной, поскольку если часть семян нежизнеспособна, то никакое дополнительное время не вызовет их прорастание. В таких случаях предпочтительнее воспользоваться для сравнения вариантов значениями  $T_{25}$  или  $T_{20}$  (табл. 1). Исключением являются опыты, в которых изучается явление покоя, и доля проросших семян обусловлена действием факторов, направленных на его преодоление.

Эти расчетные показатели прорастания представляют собой время, за которое прорастает соответствующая доля популяции семян. Их рассчитывают, с помощью пробит регрессии (пробит анализа), который широко используется в различных исследованиях, в том числе для прогнозирования влияния воздействий на прорастание семян. Пробит статистический (нелинейный) метод анализа, основанный на нормальном распределении. Пробит — модель позволяет оценить вероятность того, что анализируемая (зависимая) переменная примет

Т а б л и ц а 1

**Время, необходимое для прорастания 10, 20, 50 и 90 % популяции семян пастернака, сут.**

Параметры	Оценка	Ст. ошибка
$t_{10}$	8,8	0,4
$t_{20}$	10,0	0,4
$t_{50}$	12,5	0,4
$t_{90}$	17,6	0,9

определенное значение при заданных значениях фактора (в данном случае времени прорастания). Частота особей реагирующих на действие фактора выражается  $S$  образной кривой. С помощью пробит анализа эта криволинейная зависимость трансформируется в прямолинейную, которая позволяет легко выявлять закономерности (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Пробит-модель прорастания популяции семян пастернака:  
 $p = y + xt$  (AIC: 176.61)

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t критерий	Pr(> t )
y	-2,63	0,096	-27,29	<2,0×10 <sup>-16***</sup>
x	0,16	0,006	25,88	<2,0×10 <sup>-16***</sup>

0 \*\*\*\* 0.001 \*\*\* 0.01 \*\* 0.05 ' 0.1 ' ' 1.

Для прогнозирования и моделирования процесса прорастания можно использовать функции Гомперца, Вейбулла, логистические и д.р. с различным числом параметров. Для более адекватного прогнозирования и моделирования процесса прорастания воспользуемся расчетом и построением log-логистической регрессии с тремя параметрами (рис. 2, табл. 3).

Кумулятивная кривая прорастания может быть преобразована в линейную зависимость путем её построения в координатах log — пробит (время прорастания представляется в логарифмах, выраженность ответной реакции — в пробитах). Это преобразование позволяет исследователю подвергнуть результаты математическому анализу (например, рассчитать доверительный интервал, крутизну наклона кривой и т.д.).

Для того, чтобы показать насколько быстро происходит процесс следует использовать относительные параметры (скоростные) признака — темп роста ( $T_p$ ) (2) и коэффициент роста ( $K_p$ ) (3).

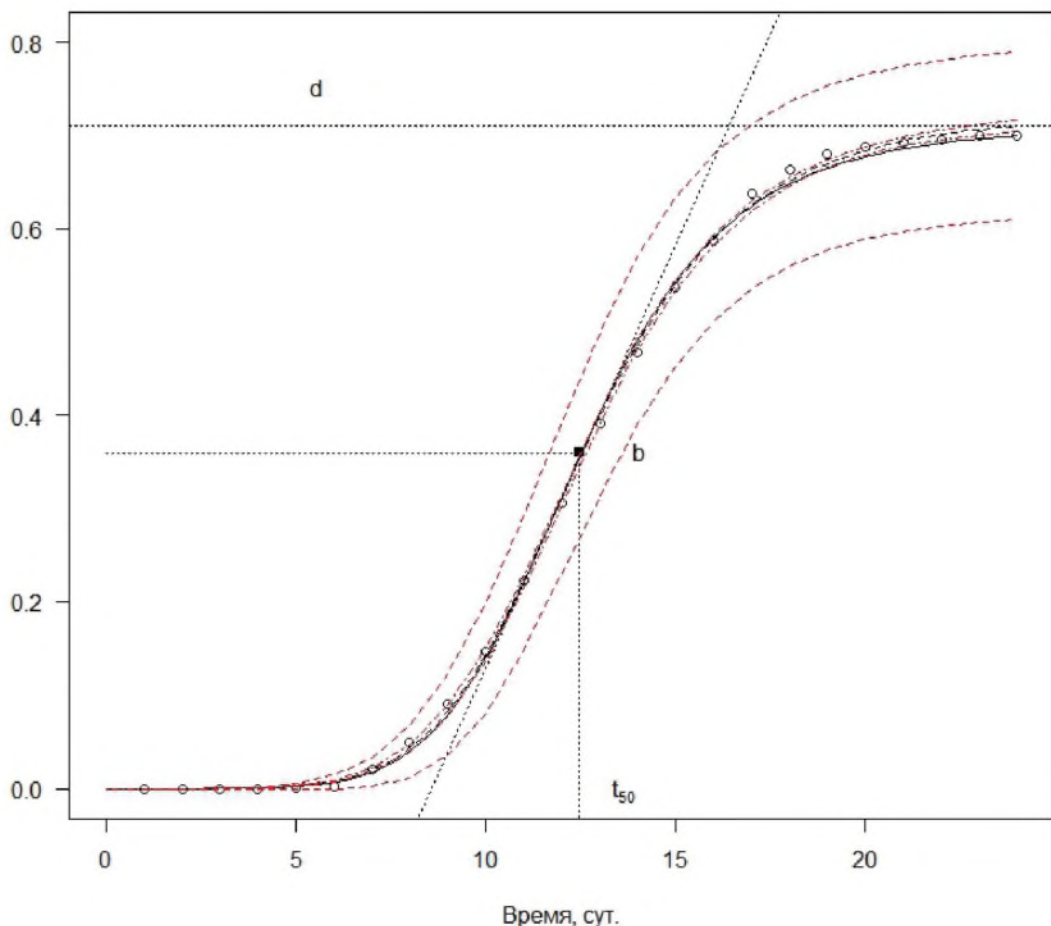
Темп роста ( $T_p$ ) — это показатель интенсивности изменения уровня ряда, выраженный в процентах, а коэффициент роста ( $K_p$ ) — в долях единицы. Коэффициент роста  $K_p$  представляет собой отношение последующего уровня к предыдущему или какому-либо другому, принятому за базу сравнения. Он показывает, во сколько раз увеличился уровень по сравнению с базисным, а в случае уменьшения — какую часть составляет от базисного уровня. Формула расчета для этих показателей соответственно:

$$K_p = \frac{X_i}{X_{i-1}} \quad (2)$$

$$T_p = K_p \times 100 \quad (3)$$

где  $X_i$  — уровень сравниваемого периода;  $X_{i-1}$  — уровень предшествующего периода.

Темп роста представляет собой всегда положительное число. Темпы роста для любых рядов динамики являются интервальными показателями, т.е. характеризуют



**Рис. 2.** График кумулятивной кривой прорастания популяции семян пастернака и log-логистической регрессии  $\varphi(x) = \frac{d}{1 + \exp\{b(\log(x) - \log(e))\}}$  с тремя параметрами:  $d$  — верхний предел;  $b$  — угол наклона кумулятивной кривой;  $e$  — время прорастания 50% популяции семян ( $t_{50}$ )

Т а б л и ц а 3

**Log-логистическая модель прорастания популяции семян пастернака (AIC: 95,22)**

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t критерий	Pr(> t )
$d$	0,71	0,22	3,21	0,00402**
$b$	-6,37	1,27	-5,00	$5,19 \times 10^{-5}$ ***
$e$	12,47	0,86	14,56	$8,93 \times 10^{-13}$ ***

0 \*\*\*\* 0.001 \*\*\* 0.01 \*\* 0.05 \* 0.1 ' ' 1.

тот или иной промежуток (интервал) времени. Различают последовательные (точечные) и базисный (средний за период) темпы роста.

Между последовательными и базисными темпами роста, которые выражены в форме коэффициентов, существует определенная взаимосвязь: произведение последовательных коэффициентов роста равно базисному коэффициенту роста за весь период, а частное от деления последующего базисного темпа роста на предыдущий равно соответствующему последовательному темпу роста.

Средний темп роста представляет собой свободную обобщающую характеристику интенсивности изменения уровней ряда динамики и показывает, во сколько раз в среднем за единицу времени изменяется уровень ряда динамики.

В качестве основы и критерия правильности исчисления среднего темпа роста (снижения) применяется обобщающий показатель, который определяется как произведение цепных темпов роста, равное темпу роста за весь рассматриваемый период. Если значение признака образуется как произведение отдельных вариантов, то согласно общему правилу необходимо применять среднюю геометрическую.

Так как средний темп роста представляет собой средний коэффициент роста, выраженный в процентах, то для равностоящих рядов динамики расчеты по средней геометрической сводятся к исчислению средних коэффициентов роста по «цепному способу» (4):

$$K = \sqrt[n]{K_1 K_2 \dots K_{n-1}} \quad (4)$$

где  $K_1, K_2, \dots, K_{n-1}$ , — коэффициенты роста по сравнению с уровнем предшествующего периода;  $n$  — число уровней ряда.

Анализ хода абсолютной величины признака в некоторый момент (рис. 1) очень хорошо показывает динамичность процесса, но считается не совсем удовлетворительным, поскольку не полностью характеризует динамический ряд, так как в нем нет выражения собственно скорости явления.

Скорость это изменение показателя (прирост) количественно характеризующего динамический процесс (координаты, движущегося тела, концентрация вещества в химической реакции, доля проросших семян и т.д.) в единицу времени.

Если прирост измеряют в единицах исследуемого параметра, то его называют абсолютным приростом. Абсолютный прирост ( $\Delta X$ ) (5) — характеризует увеличение или уменьшение уровня ряда за определенный промежуток времени (рис. 3). Формула расчета абсолютного прироста:

$$\Delta X = X_i - X_{i-1} \quad (5)$$

где  $X_i$  — уровень сравниваемого периода;  $X_{i-1}$  — уровень предшествующего периода.

Абсолютные приросты для любых рядов динамики являются интервальными показателями, т.е. характеризуют тот или иной промежуток (интервал) времени. Соответственно отношение абсолютного прироста к интервалу времени, за которое оно произошло, будет абсолютной скоростью (6, 7). Формула абсолютной скорости:

$$V = \Delta X / \Delta t \quad (6)$$

$$V = \frac{(X_i - X_{i-1})}{(t_i - t_{i-1})} \quad (7)$$

Абсолютный прирост может иметь положительный или отрицательный знак. Он показывает, насколько уровень текущего периода выше или ниже базисного, и тем самым измеряет абсолютную скорость или снижение ее уровня. В практике часто используют модуль абсолютного прироста (рис. 3). Соединение обоих требований заставляет наблюдаемые абсолютные приросты того или иного признака относить к величине, давшей этот прирост; иначе говоря, мы приходим к необходимости исчисления для характеристики относительных приростов (темпов прироста).

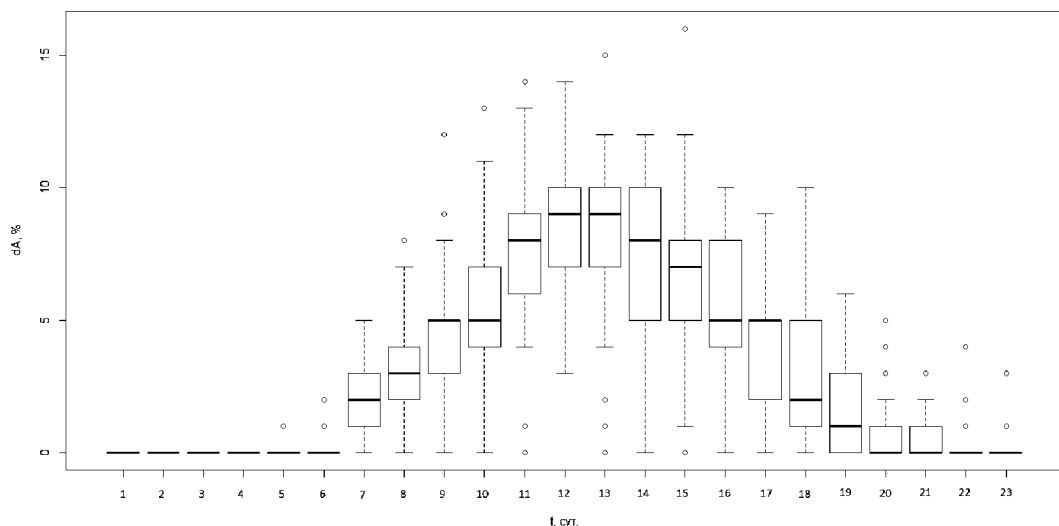


Рис. 3. Абсолютный прирост прорастания семян пастернака, %

Таким образом, если  $X$  — абсолютная величина в некоторый момент,  $\Delta X$  — ее приращение за время  $\Delta t$ , принимаемое за единицу, то относительный прирост ( $N$ ) (темп прироста) (8) выраженный в процентах будет:

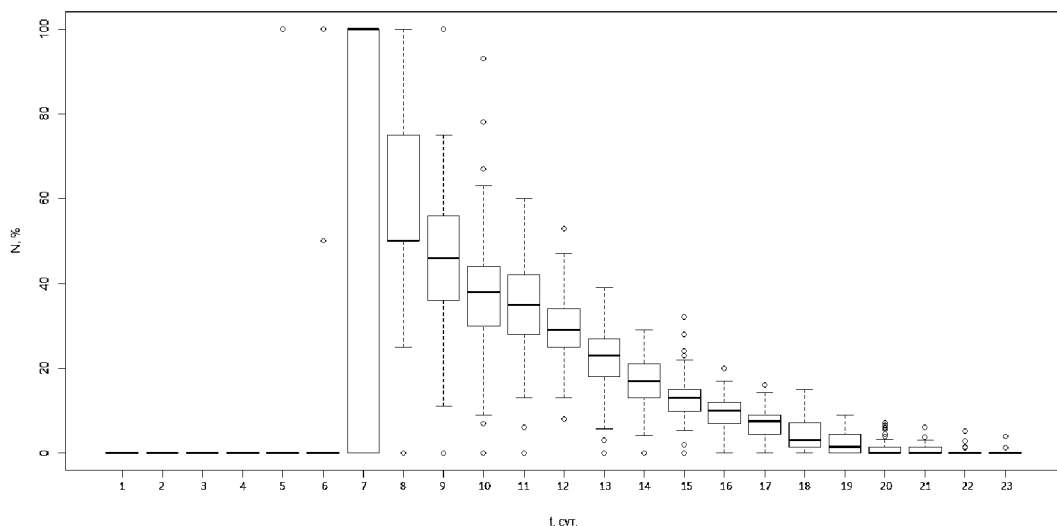
$$N = [(X_i - X_{i-1})] \div X_{i-1} \times 100 \quad (8)$$

Способ исчисления относительных приростов, дает более простую, плавную кривую, по которой легче установить некоторые закономерности роста или прорастания. Кривая относительных приростов, присущая самым разным биологическим явлениям, может быть охарактеризована, как нисходящая с все более и более замедляющимся падением (рис. 4).

Коэффициент прироста ( $K_{np}$ ) — также относительная величина прироста, но выраженная в долях к предыдущему (или базисному) уровню (8). Характеризует, во сколько раз уровень данного периода больше (или меньше) предыдущего или базисного уровня. Он может быть положительным, отрицательным или равным нулю, выражается в процентах и долях единицы (коэффициенты прироста); вычисляется как отношение абсолютного прироста к абсолютному уровню, принятому за базу:

$$K_{np} = \frac{(X_i - X_{i-1})}{X_{i-1}} \quad (9)$$





**Рис. 4.** Относительный пророст проросших семян пастернака, %

Темп прироста можно также получить из темпа роста, выраженного в процентах, если из него вычесть 100% (10):

$$T_{np} = T_p - 100 \quad (10)$$

Коэффициент прироста ( $K_{np}$ ) соответственно может быть получен путем вычитания единицы из коэффициента роста (11):

$$K_{np} = K_p - 1 \quad (11)$$

При анализе относительных показателей динамики (темпов роста и темпов прироста) не следует рассматривать их изолированно от абсолютных показателей (уровней ряда и абсолютных приростов). Сравнение абсолютного прироста и темпа прироста, за одни и те же периоды времени показывает, что замедление темпов прироста не всегда сопровождается уменьшением абсолютных приростов. Темп прироста рассматривают в сопоставлении с показателем абсолютного прироста.

Наличие указанного выше типа с замедляющимся падением показывает, что чем больше величина  $N$  (относительный прирост), тем больше и ее падение ( $\Delta N$ ). Коэффициент корреляции между относительным приростом проросших семян и его последующим изменением в единицу времени, рассчитанный для некоторых представителей овощных зонтичных культур, находился в пределах от 0,590 до 0,907. Во всех случаях мы имеем дело с линейной зависимостью.

Изменение величины падения ( $\Delta N$ ) в зависимости от величины относительного прироста ( $N$ ) проросших семян петрушки корневой описывается уравнением регрессии:  $y = -0,962 + 0,431 \times x$  ( $r = 0,853$ ).

Это значит, что изменение относительного прироста (а, следовательно, и скорости прорастания) находится в обратно пропорциональной зависимости от самой величины относительного прироста. Чем больше величина относительного прироста к данному моменту, тем на большую величину она уменьшится в последующем.

Насколько интенсивно происходит снижение скорости прорастания семян, указывает, такой параметр, как абсолютное ускорение ( $A$ ). Его следует рассматривать как изменение скорости во времени по формуле (12):

$$A = \Delta V / \Delta t \quad (12)$$

При условии, что интервал измерений будет равен единице времени, то абсолютное ускорение можно рассчитывать по формуле (13):

$$A = \Delta X_i - \Delta X_{i-1} = X_{i-2} \times X_{i-1} + X_{i-2} \quad (13)$$

Для нарастающих рядов абсолютное ускорение имеет значение больше нуля, в таких случаях говорят об ускоренном развитии процесса. Однако, как уже отмечено, прорастание семян, являясь биологическим процессом, развивается с замедлением. Поэтому показатель абсолютного ускорения, как правило, имеет также отрицательное значение.

Интенсивность ускорения или торможения описывает коэффициент ускорения ( $K_A$ ), который является относительным показателем, что позволяет использовать его для сравнения различных рядов (14).

$$K_A = \frac{T_i}{T_{i-1}} = \frac{(X_i \times X_{i-2})}{(X_i)^2} \quad (14)$$

Если коэффициент ускорения ( $K_A$ ) больше 1, то имеет место ускорение, а если меньше 1, то замедление.

Для сравнения нескольких динамических рядов используют коэффициент опережения ( $K_{op}$ ), который представляет собой отношение базисных темпов роста или прироста или скорости двух рядов динамики за одинаковые отрезки времени. Он показывает, во сколько раз быстрее растет или отстает уровень одного ряда динамики по сравнению с другими. В данном сравнении темпы должны характеризовать тенденцию одного направления. С помощью коэффициента опережения можно также сравнивать интенсивность изменений уровней рядов во времени. Коэффициент опережения рассчитывают следующим образом (15, 16):

$$K_{op} = T_{p1} \div T_{p2} \quad (15)$$

$$K_{op} = N_1 \div N_2 \quad (16)$$

где  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$  — базисные темпы роста;  $N_1$  и  $N_2$  — базисные темпы прироста первого и второго динамических рядов.

Дружность прорастания семян зачастую ассоциируется с показателем энергии прорастания семян [9, 13]. Однако это не вполне корректно. Ведь энергия, как и всхожесть — это доля проросших семян за определенный срок, но только более короткий. В.Н. Доброхотов [8] характеризует эти два показателя как предварительная и окончательная всхожесть, что указывает на их общность. Следовательно, энергия если и характеризовать дружность прорастания, то лишь косвенно.

Ранее нами была описана большая группа параметров (временных и скоростных), характеризующих процесс прорастания семян [3]. Часть этих показателей можно с успехом использовать для решения поставленной задачи.

Традиционно, дружность прорастания семян (как и др. биологических процессов, таких как появление всходов, цветение, созревание плодов и семян и т.д.) характеризовали интервалом времени между началом и завершением процесса ( $T_K - T_H$ ). Поскольку, эти два показателя ( $T_K$  и  $T_H$ ) являются крайними точками кривой прорастания, они подвержены значительной случайной изменчивости. Поэтому целесообразно использовать другие временные параметры, характеризующие размах варьирования, такие как: ( $T_{90} - T_{10}$ ), ( $T_{80} - T_{20}$ ) или ( $T_{75} - T_{25}$ ).

В англоязычной литературе, посвященной проблеме изучения динамических рядов прорастания семян понятию «дружность» соответствует термин «однородность» (uniformity). Термин «однородность» гораздо более четкий и конкретный. Он указывает на выравненность партии семян по параметрам, характеризующим их способность к прорастанию [17, 19].

С этой целью можно использовать или время необходимое для прорастания каждого конкретного семени, или обратную величину времени — скорость процесса. Основными статистическими параметрами, которые позволяют получить ценную информацию о вариабельности, выравненности или однородности являются стандартное отклонение, ошибка средней, коэффициент вариации. Наиболее ярким показателем степени изменчивости любого показателя, в том числе и периода прорастания семян, является коэффициент вариации, рассчитываемый по общепринятой формуле.

Ранее отмечено, что дружность ассоциируется с понятием скорость. Поэтому, дружность прорастания семян можно в значительной степени охарактеризовать с помощью скоростных параметров, с которыми у нее, как правило, отмечена тесная корреляция. В качестве таких параметров целесообразно использовать: скорость начала прорастания ( $t_{10}^{-1}$ ), скорость прорастания 50% семян популяции ( $t_{50}^{-1}$ ), скорость прорастания от 25 до 75% семян популяции ( $U_{7525}^{-1}$ ).

К этой группе параметров можно отнести два показателя количественно выражающие дружность прорастания, которые разработал И.Г. Страна [12]. Первый из которых (дружность прорастания партии семян), рассчитывается как число проросших семян за один день прорастания, а второй (дружность прорастания всхожих семян) с поправкой на всхожесть. По сути это скоростные показатели, характеризующие среднесуточное прорастание семян.

Использование графического способа изображения распределения позволяет визуализировать показатели, характеризующие дружность прорастания (однородность) семян. На графике (рис. 2) дружность прорастания семян можно наглядно оценить путем сравнения угла наклона кумулятивной кривой прорастания.

Кроме того различие по дружности прорастания наглядно проявляется при сравнении изменения абсолютных приростов доли проросших семян в единицу времени. Вид кривой соответствует степени варьирования признака (в данном случае продолжительности прорастания семян) и определяется величиной стандартного отклонения (или дисперсии). При увеличении степени варьирования (V%) изучаемой совокупности дат, вариационная кривая увеличивает свой размах и становится более пологой. При малых значениях стандартного отклонения вероятность выборочной средней увеличивается, а коэффициент вариации уменьшается, и форма кривой становится иглообразной.

## Заключение

Все приведенные в статье параметры, характеризующие динамические процессы, описаны в различных литературных источниках при изучении роста различных биологических объектов, однако в исследованиях по семеноводству и семеноведению используются редко. Показатели, представленные в исследованиях, представляют значительный интерес для использования в научно исследовательской работе при изучении качества семян, сравнении приемов стимулирующего и угнетающего воздействия внешних факторов, явлений покоя и долговечности семян, а также других опытах в практике семеноведения. Предложенные показатели и методы их расчета, могут быть использованы при сравнении эффективности технологических приемов в семеноводстве, изучении покоя, долговечности, качества семян и других явлений.

## Библиографический список

1. *Балеев Д. Н., Бухаров А. Ф.* Специфика прорастания семян овощных зонтичных культур при различных температурных режимах // *Овощи России*, 2012. №3 (16). С. 38–46.
2. *Бухаров А. Ф., Балеев Д. Н.* Температурный стресс и термопокой семян овощных зонтичных культур. Особенности индукции, проявления и преодоления. Часть I // *Овощи России*, 2013. № 2 (19). С. 36–41.
3. *Бухаров А. Ф., Балеев Д. Н.* Временные параметры, характеризующие процесс прорастания семян. Методы определения и практическое использование // «Селекция и семеноводство овощных культур». ФГБНУ ВНИИССОК, 2015. С. 165–172.
4. *Васнев С. А.* Статистика: Учебное пособие. Москва: МГУП, 2001. 170 с.
5. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.
6. ГОСТ 12039-82 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения жизнеспособности.
7. *Гриб С.* Посевной и посадочный материал сельскохозяйственных культур. Берлин, 2001. 380 с.
8. *Доброхотов В. Н.* Семеноведение и контрольно-семенное дело. М.: «Сельхозгиз», 1940. 207 с.
9. *Кулешов Н. Н.* Агрономическое семеноведение М.: Изд-во с.-х. литературы, журналов и плакатов, 1963. 304 с.
10. *Леманн Е., Айхеле Ф.* Физиология прорастания семян злаков. М.: Сельхозгиз, 1936. 489 с.
11. *Николаева М. Г., Лянгузова И. В., Поздова Л. М.* Биология семян. СПб: НИИ химии, 1999. 232 с.
12. *Строна И. Г.* Общее семеноведение полевых культур. М.: Колос, 1966. 464 с.
13. *Фирсова М. К.* Семенной контроль. М., 1969. 295 с.
14. *Czabator F. J.* Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination // *For. Sci.*, 1962. 8: 386–396.
15. *Grundy A. C.* Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges // *Weed Research*, 2003 (43): 1–11.
16. *Hampton J. G.* What is Seed Quality? // *Seed Science and Technology*, 2002. V.30: 1–10.
17. *Hayashi E., Aoyama N., Still D. W.* Quantitative trait loci associated with lettuce seed germination under different temperature and light environments // *Genome*, 2008. 51: 928–947.
18. International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Edition. The International Seed Testing Association (ISTA). Switzerland, 2014.
19. *Kazmi R. H., Khan N., Willems L. A. J., Van Heusden A. W., Ligterink W., Hilhorst H. W. M.* Complex genetics controls natural variation among seed quality phenotypes in a recombinant

inbred population of an interspecific cross between *Solanumlycopersicum* × *Solanumpimpinellifoli-umpce* // Plant, Cell and Environment, 2012. 35: 929–951.

20. Taylor A.G. Seed Quality // In.: Encyclopedia of Applied Plant Sciences: Elsevier Academic Press, 2003: 1284–1291.

21. Thomson A.J., El-Kassaby Y.A. Interpretation of seed-germination parameters // New For., 1993. 7: 123–132.

## KINETICS OF SEED GERMINATION. RESEARCH METHODS AND PARAMETERS

A.F. BUKHAROV<sup>1</sup>, D.N. BALEYEV<sup>1</sup>, A.R. BUKHAROVA<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Vegetable Growing;  
<sup>2</sup>Russian State Agrarian Correspondence University)

*The paper presents (as exemplified by parsnip) the main characteristics, as well as the calculation and modeling of seed germination. The inverse of the weighted average of a seed germination period ( $1 / T_{cp}$ ) measured in  $\text{day}^{-1}$  (or  $\text{hour}^{-1}$ ) can be considered as the rate of seed germination. The advantage of this indicator is that, just like for any average value, it is possible to calculate the mean square deviation, variance, the coefficient of variation, the error of mean, etc., i.e. indicators possessing their own information values. To predict and model the germination process, the functions of Gompertz, Weibull, logistic and other functions with a different number of parameters have been used. For more adequate prediction and simulation of the germination process, use has been made of calculation and construction of logistic regression with three parameters. The cumulative germination curve can be transformed into a linear relationship. This transformation allows the researcher to subject the results to a mathematical analysis (for example, to calculate the confidence interval, the curve slope, etc.). In order to show how quickly the germination process takes place, the relative (velocity) parameters of an indicator should be used — the growth rate and the growth factor. The seed germination uniformity can be largely characterized by the use of speed parameters, which, as a rule, are closely correlated with it. The indicators presented in the research are of considerable interest for studying the seed quality, comparing methods of stimulating and depressing effects of external factors, seed dormancy and longevity, as well as other experiments related to seed farming practices. The proposed indicators and their calculation methods can be used to compare the effectiveness of seed production techniques, the study of seed dormancy, longevity, quality and other characteristics.*

**Key words:** Seed, seed germination, speed and timing, probit, logit regression, modeling.

### References

1. Baleyev D. N., Bukharov A.F. Spetsifika prorastaniya semyan ovoshchnykh zontichnykh kul'tur pri razlichnykh temperaturnykh rezhimakh [Specificity of germination of vegetable umbelliferous crop seeds under different temperature moods] // Ovoshchi Rossii, 2012. No. 3 (16). P. 38–46.

2. Bukharov A.F., Baleyev D.N. Temperaturnyy stress i termopokoy semyan ovoshchnykh zontichnykh kul'tur. Osobennosti induktsii, proyavleniya i preodoleniya. Chast' I [Thermal stress

and thermal rest of vegetable umbelliferous crop seeds. Typical features of induction, manifestation and overcoming. Part I // *Ovoshchi Rossii*, 2013. No. 2 (19). P. 36–41.

3. *Bukharov A.F., Baleev D.N.* Vremennyye parametry, kharakterizuyushchiye protsess prorastaniya semyan. Metody opredeleniya i prakticheskoye ispol'zovaniye [Time parameters characterizing the process of seed germination. Methods of determination and practical use] // *Selektsiya i semenovodstvo ovoshchnykh kul'tur*. FGBNU VNISSOK, 2015. P. 165–172.

4. *Vasnev S.A.* Statistika: Uchebnoye posobiye. [Statistics. Study manual]. Moskva: MGUP, 2001. 170 s.

5. GOST 12038-84 Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhnosti [Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination].

6. GOST 12039-82 Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya zhiznesposobnosti [Seeds of agricultural crops. Methods for determining viability].

7. *Grib S.* Posevnoy i posadochnyy material sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Seeding and planting stock of agricultural crops]. Berlin, 2001. 380 p.

8. *Dobrokhoto V.N.* Semenovedeniye i kontrol'no-semennoye delo [Seed studies and seed control]. M.: Sel'khozgiz, 1940. 207 p.

9. *Kuleshov N.N.* Agronomicheskoye semenovedeniye [Agronomical seed studies] M.: Izd-vo s.-kh. literatury, zhurnalov i plakatov, 1963. 304 p.

10. *Lemann Ye., Aykhele F.* Fiziologiya prorastaniya semyan zlakov [Physiology of germination of cereal seeds]. M.: Sel'khozgiz, 1936. 489 p.

11. *Nikolayeva M.G., Lyanguzova I.V., Pozdova L.M.* Biologiya semyan [Biology of seeds]. SPb: NII khimii, 1999. 232 p.

12. *Strona I.G.* Obshcheye semenovedeniye polevykh kul'tur [General seed production of field crops]. M.: Kolos, 1966. 464 p.

13. *Firsova M.K.* Semennoy kontrol' [Seed control]. M., 1969. 295 p.

14. *Czabator F.J.* Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination // *For. Sci.*, 1962. 8: 386-396. 15. *Grundy A.C.* Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges // *Weed Research*, 2003 (43): 1–11.

16. *Hampton J.G.* What is Seed Quality? // *Seed Science and Technology*, 2002. V.30: 1–10. 17. *Hayashi E., Aoyama N., Still D. W.* Quantitative trait loci associated with lettuce seed germination under different temperature and light environments // *Genome*, 2008. 51: 928–947.

18. International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Edition. The International Seed Testing Association (ISTA). Switzerland, 2014.

19. *Kazmi R.H., Khan N., Willems L.A.J., Van Heusden A.W., Ligterink W., Hilhorst H.W.M.* Complex genetics controls natural variation among seed quality phenotypes in a recombinant inbred population of an interspecific cross between *Solanum lycopersicum* × *Solanum pimpinelli fo-liumpce* // *Plant, Cell and Environment*, 2012. 35: 929–951.

20. *Taylor A.G.* Seed Quality // In.: *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*: Elsevier Academic Press, 2003: 1284–1291.

21. *Thomson A.J., El-Kassaby Y.A.* Interpretation of seed-germination parameters // *New For.*, 1993. 7: 123–132.

**Бухаров Александр Федорович** — д. с.-х. н., вед. науч. сотр. группы семеноведения и первичного семеноводства овощных культур ФГБНУ «Всероссийский научно – исследовательский институт овощеводства» (140153, Московская обл., Раменский р-н, д. Верея, стр. 500).

**Балеев Дмитрий Николаевич** — к. с.-х. н., ст. науч. сотр. группы семеноведения и первичного семеноводства овощных культур ФГБНУ «Всероссийский научно – исследовательский институт овощеводства» (140153, Московская обл., Раменский р-н, д. Верея, стр. 500; e-mail: dbaleev@gmail.com).

**Бухарова Альмира Рахметовна** — д. с.-х. н., проф., зам. декана агрономического факультета Российского государственного аграрного заочного университета (143900, Московская обл., г. Балашиха, ул. Ю. Фучика, д. 1; e-mail: mail@rgazu.ru).

**Aleksandr F. Bukharov** — DSc (Ag), leading researcher, Group of Vegetable Seed Science and Primary Seed Growing, Federal State Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Horticulture”, 140153, Moscow region, Ramenskoye district, Vereya, build. 500

**Dmitry N. Baleev** — PhD (Ag), senior researcher, Group of Vegetable Seed Science and Primary Seed Growing Federal State Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Horticulture”, 140153, Moscow Region., Ramenskoy district, Vereya, build. 500, E-mail: dbaleev@gmail.com.

**Almira R. Bukharova** — Professor, Deputy Dean of Agronomical Faculty of Russian State Agricultural Correspondence University, 143900, Moscow Region, Balashikha, Yu. Fuchika Str., 1. E-mail: mail@rgazu.ru.