

УДК 632.914

DOI: 10.31016/1998-8435-2019-13-1-90-96

## Применение модели Хассела для прогнозирования плотности популяции золотистой картофельной нематоды после выращивания глободероустойчивого сорта картофеля

Александр Александрович Шестеперов, Елена Александровна Лукьянова,  
Александр Анатольевич Бондарев

Всероссийский научно-исследовательский институт фундаментальной и прикладной паразитологии животных и растений – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», 117218, Россия, г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 28; e-mail: shestepеров@vniigis.ru

Поступила в редакцию: 05.02.2019; принята в печать: 21.02.2019

### Аннотация

**Цель исследований:** оценка возможности применения модели Хассела для прогнозирования динамики плотности популяции золотистой картофельной нематоды (ЗКН) в почве после выращивания глободероустойчивых сортов картофеля в монокультуре.

**Материалы и методы.** Для исследования использован массив данных плотности популяций (число яиц и личинок) ЗКН на трех участках, где выращивали восприимчивые сорта картофеля, и одного участка, где выращивали глободероустойчивый сорт картофеля Кардинал, в Калужской области за 14-летний период (1979–1993 гг.). В качестве метода оценки параметров модели использовали нелинейный метод наименьших квадратов, являющийся модификацией метода наименьших квадратов для нелинейных систем. Для анализа был применен пакет поиска решения в программе Excel.

**Результаты и обсуждение.** Модель Хассела для прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН в почве после выращивания в монокультуре глободероустойчивого сорта картофеля показала высокую достоверность. ( $R^2 = 0,94$ ). На основании модели Хассела для развития популяции ЗКН в почве участка с выращиванием нематодоустойчивого сорта проведено моделирование введения глободероустойчивого сорта для различной начальной численности ЗКН и разного уровня плодородия: низкого, среднего и высокого. Модель Хассела подтвердила, что является наиболее универсальной в классе дискретных однопериодных моделей прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН в почве и позволяет прогнозировать численность ЗКН для агробиоценозов с монокультурой картофеля восприимчивых и глободероустойчивых сортов.

**Ключевые слова:** динамика популяций, нелинейные модели, золотистая картофельная нематода, плотность популяции, модель Хассела.

**Для цитирования:** Шестеперов А. А., Лукьянова Е. А., Бондарев А. А. Применение модели Хассела для прогнозирования плотности популяции золотистой картофельной нематоды после выращивания глободероустойчивого сорта картофеля // Российский паразитологический журнал. 2019. Т. 13. № 1. С. 90–96.

DOI: 10.31016/1998-8435-2019-13-1-90-96

© Шестеперов А. А., Лукьянова Е. А., Бондарев А. А.

# Application the Hassell Model for Prediction the Population Density of Golden Nematode of Potato After Growing *Globodera* Resistant Variety of Potato

Aleksandr A. Shesteporov, Elena A. Lukyanova, Aleksandr A. Bondarev

All-Russian Scientific Research Institute of Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plants – a branch of the Federal State Budgetary Institution of Science “Federal Research Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Veterinary Medicine named after K. I. Skryabin and Ya. R. Kovalenko of the Russian Academy of Sciences”, 117218, Moscow, B. Cheremushkinskaya Str, 28, e-mail: shesteporov@vniigis.ru

Received on: 05.02.2019; accepted for printing on: 21.02.2019

## Abstract

**The purpose of the research** is evaluation the possibility of application the Hassell model for prediction the dynamics of population density of golden nematode of potato in the ground after growing *Globodera* resistant variety of potato in the single-crop.

**Materials and methods.** For the research database of population density of golden nematode of potato (amount of ootids and larvae) was used on the three plots where amenable varieties of potato were grown and one plot where *Globodera* resistant variety of potato Kardinal was grown in the Kaluga Region within 14 years (1979–1993). Non-linear least-squares method which is the version of least-squares method for non-linear systems was used as the method for evaluation the model parameters. Toolset of search for solution in the program Excel was used for analysis.

**Results and discussion.** Hassell model for prediction the dynamics of population density of golden nematode of potato in the ground after growing *Globodera* resistant variety of potato in the single-crop demonstrated high confidence. ( $R^2 = 0.94$ ). Based on the Hassell model for development golden nematode of potato population in plot soil with growing nematode resistant variety modeling of introduction of *Globodera* resistant variety was conducted for different initial amount of golden nematode of potato and different levels of fertility of soil: low, average, high. Hassell model has confirmed that it is the most multifunctional in the category of discrete one-period models for prediction dynamics of population density of golden nematode of potato in the ground and permits to predict the amount of golden nematode of potato for agrobiocenosis with single-crop of potato of amenable and *Globodera* resistant varieties.

**Keywords:** dynamics of population, non-linear models, golden nematode of potato, population density, Hassell model.

**For citation:** Shesteporov A. A., Lukyanova E. A., Bondarev A. A. Application the Hassell model for prediction the population density of golden nematode of potato after growing *Globodera* resistant variety of potato. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Parasitology*. 2019; 13(1): 90–96. DOI: 10.31016/1998-8435-2019-13-1-90-96

## Введение

С интенсификацией земледелия, расширением транспортных связей, обменом семенным и посадочным материалами, а также со специализацией хозяйств и многоукладностью сельского хозяйства неуклонно возрастает экономическое значение картофельных глободер, как объектов внешнего и внутреннего карантина. В среднем, потери урожая картофеля от глободероза составляют 30%, но известны случаи, когда потери урожая достигали 80–90%. Кроме прямого ущерба,

картофельные нематоды наносят косвенный ущерб, вызываемый карантинным запретом или ограничением перевозок продукции из зон заражения [4, 6].

Для снижения ущерба от глободероза разработаны методы борьбы с золотистой картофельной нематодой (ЗКН): обработка веществами с нематодоцидными свойствами, севообороты с включением непоражаемых культур, возделывание нематодоустойчивых сортов картофеля [2]. Последний метод широко применяется для снижения ее численности

и вредоносности. Растения нематодоустойчивых сортов стимулируют выход личинок из цист, которые инвазируют их корни. Однако, развиться до взрослых самок личинки в корнях устойчивых растений не могут; они гибнут и превращаются в самцов или неполовозрелых самок. Вследствие этого популяция фитопаразитов уменьшается после выращивания нематодоустойчивых сортов на 40–80% [2, 4].

Эффективность этих методов в плане снижения инвазионной нагрузки в очагах глободероза оценивается сравнением плотности популяции ЗКН в опыте и контроле через равные промежутки времени при одинаковой начальной плотности популяции и интенсивности противонематодного воздействия или одно-, двукратным сравнением пред- и послепосевной плотности популяции ЗКН для разных условий [3, 4, 6]. Недостатком данных оценок является то, что они не направлены на долгосрочное (многолетнее) прогнозирование популяционной динамики ЗКН.

Ранее нами была проведена оценка параметров модели Хассела для прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН на трех участках Калужской области с использованием фактических данных за период 1979–1993 гг. По результатам этого исследования для трех участков модель Хассела показала высокую достоверность прогноза [3]. Данная модель может быть использована для прогнозирования плотности популяций золотистой картофельной нематоды, оценки времени стабилизации ее численности и, возможно, времени сохранения фитопаразита в почве при выращивании глободероустойчивого сорта.

Целью нашей работы стала оценка возможности применения модели Хассела для прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН в почве после выращивания глободероустойчивых сортов картофеля в монокультуре.

### Материалы и методы

Для исследования использован массив данных плотности популяций (число яиц и личинок) ЗКН на трех участках, где выращивали восприимчивые сорта картофеля, и одного участка, где выращивали глободероустойчивый сорт картофеля Кардинал, в Калужской области за 14-летний период (1979–1993 гг.) [3, 4]. Данные обладают высокой достоверно-

стью, представлены предпосадочной и послепосадочной численностью (плотностью) яиц и личинок ЗКН в 100 см<sup>3</sup> почвы. Участки находились в одном районе, что исключены различия по метеорологическим условиям. Все участки характеризуются наличием очагов заражения ЗКН. Плотность популяции ЗКН в 100 см<sup>3</sup> почвы варьировала в течение 14-летнего периода от 5 до 30 000 яиц и личинок. Следует подчеркнуть, что плотность популяций ЗКН измеряют числом яиц и личинок в 100 см<sup>3</sup> [2].

Модель Хассела имеет вид:

$$x_{n+1} = \frac{r \times x_n}{(1 + kx)^\alpha},$$

где  $x_n$  и  $x_{n+1}$  – численность популяции ЗКН ( $n$  – предпосадочная и  $(n + 1)$  – послепосадочная);  $r$  – мальтузианский коэффициент размножения, или удельная скорость воспроизводства популяции ЗКН;  $k$  – параметр масштабирования, или максимально возможный в данных условиях коэффициент размножения популяции;  $\alpha$  – параметр нелинейности (характеризует сопротивление среды) [1, 3].

Проведена оценка параметров  $r$ ,  $k$ ,  $\alpha$  для участка, где в течение 12 лет выращивали глободероустойчивый сорт картофеля Кристалл. Полученные значения характеризуют форму динамического закона Хассела применительно к низко-, средне- и высокоплодородным почвам [3].

В качестве метода оценки параметров модели использовали нелинейный метод наименьших квадратов (НМНК), являющийся модификацией метода наименьших квадратов (МНК) для нелинейных систем [5, 8]. Подробно данный метод описан W. Green [7]. Критерием качества оценки или достоверности прогноза выступает коэффициент детерминации  $R$ -квадрат, стандартный для подобного типа задач [7]. Для анализа был применен пакет поиска решения в программе Excel с использованием численного метода градиентов для подбора таких значений параметров оцениваемых функций, которые минимизируют заданный критерий, в нашем случае –  $R$ -квадрат.

Математическое моделирование осуществляли с помощью пакета поиска решения по методу НМНК, корреляционный анализ полученных данных – в программе Microsoft Office Excel 2010.

### Результаты и обсуждение

Модель Хассела с высокой достоверностью описывает динамику вымирания популяции ЗКН при выращивании глободероустойчивого сорта и имеет вид:

$$x_{n+1} = \frac{0,05x_n}{(1 + 1,35x_n)^{-0,3}}, R^2 = 0,94,$$

где  $x_{n+1}$  – послеуборочная плотность популяции ЗКН, экз.;  $x_n$  – предпосевная плотность популяции ЗКН, экз.

Применим выбранную модель для оценки динамики изменения плотности цист ЗКН в условиях выращивания нематодоустойчивого сорта. Достоверность модели для цист составляет 95%.

Модель имеет вид:

$$x_{n+1} = \frac{1,06x_n}{(1 + 1,6x_n)^{0,013}}, R^2 = 0,95.$$

Выбор цист в качестве показателя плотности популяции ЗКН делает использование однопериодных моделей роста, таких, как модель Хассела, неоправданным [1, 4], так как цисты могут принадлежать к разным поколениям, сохраняясь в почве до 14 лет (рис. 1, 2). Однако, жизнеспособные яйца и личинки полностью погибли на 10-й год, что подтвердил проведенный биотест на жизнеспособность и инвазионность личинок ЗКН. Плотность популяции ЗКН в почве определяют только по численности яиц и личинок в почве [2–5].



Рис. 1. Фактическая плотность популяции ЗКН в условиях выращивания глободероустойчивого сорта (НУС), и плотность популяции ЗКН в почве, оцененная по модели Хассела



Рис. 2. Фактическая численность цист ЗКН в условиях выращивания НУС и численность, оцененная по модели Хассела

После введения на одном из участков нематодоустойчивого сорта можно было наблюдать непрерывное вымирание популяции с 20 344 особей на 100 см<sup>3</sup> весной 1979 г. до 0 к осени 1989 г. Отбор и внедрение устойчивых сортов является одним из наиболее эффективных методов защиты растений от ЗКН [2].

Использование модели Хассела для теоретического моделирования популяционной динамики ЗКН. Проведем моделирование введения глободероустойчивого сорта на полученных моделях для участков с низким, средним и высоким уровнем агротехники и плодородия.

При моделировании введения нематодоустойчивого сорта на участке с низким уровнем плодородия и агротехники при плотности популяции на уровне 4000 особей, полное вымирание происходит на 10 год и существенное снижение численности к 6 году (рис. 3).

Для участка со средним уровнем агротехники и плодородия моделирование по модели Хассела показывает, что введение глободероустойчивого сорта в первый год обнаружения заражения при начальной плотности яиц и личинок на уровне 5800 экз. позволяет свести плотность популяции к минимуму за 7 лет и вымиранию на 10-й год (рис. 4).

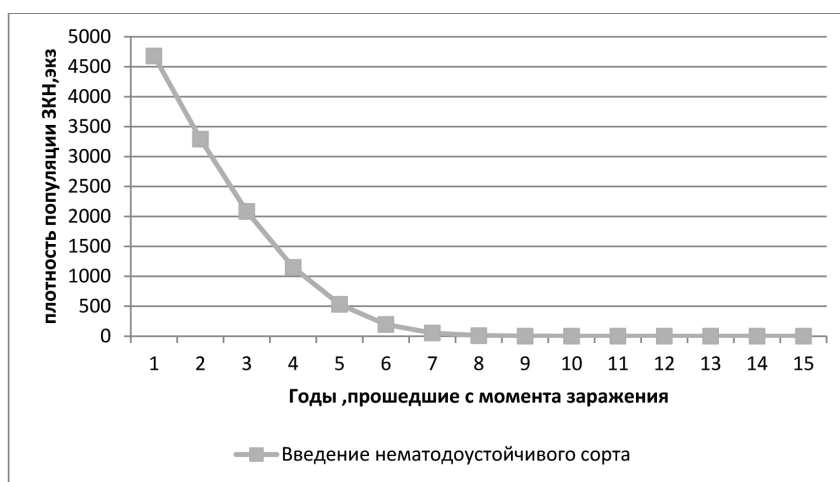


Рис. 3. Моделирование введения нематодоустойчивого сорта на участке с низким уровнем агротехники и плодородия

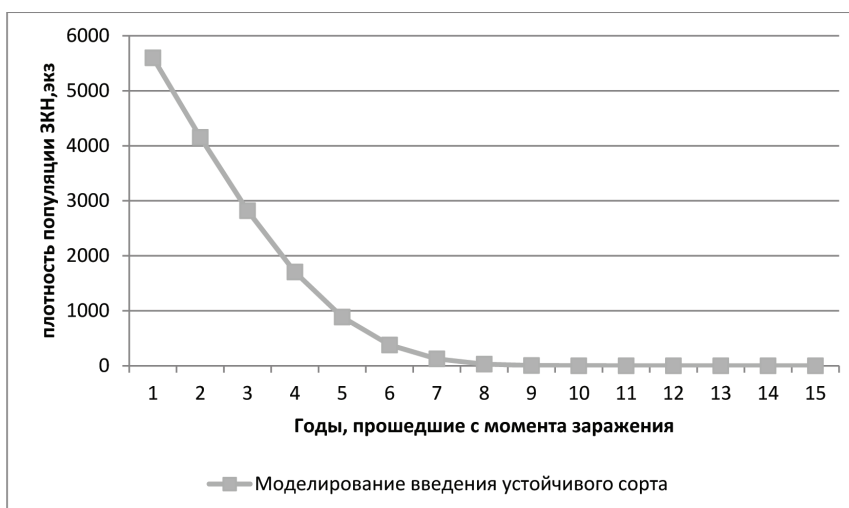


Рис. 4. Моделирование введения глободероустойчивого сорта на участке со средним уровнем агротехники и плодородия

К моменту начала исследований на участке с высоким уровнем агротехники и плодородия в 1979 и 1980 гг. нематоды на участке обнаружены не были. Но уже к осени 1986 г. плотность популяции составила примерно 10 000

экз. на 100 см<sup>3</sup> почвы (рис. 5). Моделирование показывает, что введение нематодоустойчивого сорта до достижения критической численности позволяет снизить плотность до 0 за 13 лет и существенно понизить за 10 лет.



Рис. 5. Моделирование введения нематодоустойчивого сорта на участке с высоким уровнем агротехники и плодородия

Для всех четырех участков модель Хассела весьма точно характеризует имеющуюся динамику популяции ЗКН. Используя данную модель, можно также делать точные долгосрочные прогнозы численности нематод на данных участках. Длинный ряд эмпирических данных и высокий коэффициент корреляции позволяет провести теоретические симуляции высокой степени достоверности.

Полученные модели Хассала позволяют прогнозировать численность ЗКН в почве для разных агробиоценозов с монокультурой картофеля при выращивании восприимчивых и глободероустойчивых сортов.

Таким образом, проведенное исследование показало, что модель Хассала является наиболее универсальной в классе дискретных однопериодных моделей прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН в Центральном регионе России. Данная модель дает достоверный прогноз долгосрочной динамики плотности популяции ЗКН при гетерогенных условиях (различия в плодородии почвы и уровне агротехники) и выращивании вос-

приимчивых и глободероустойчивых сортов картофеля. Практический вклад исследования выражается в создании математической модели прогнозирования плотности ЗКН в почве, которую можно (в различных полученных вариантах) использовать для оценки как долгосрочной численности ЗКН, так и для плотности ЗКН в следующий период.

### Заключение

Проведено моделирование плотности популяций ЗКН в почве для монокультуры нематодоустойчивого сорта картофеля по модели Хассала. Послеуборочная плотность популяции ЗКН составила 0,94 экз. На 94 % весенняя плотность популяции ЗКН определяется осенней численностью ЗКН в монокультуре картофеля при выращивании нематодоустойчивого сорта.

На основании модели Хассала для развития популяции ЗКН в почве участка с выращиванием нематодоустойчивого сорта проведено моделирование введения глободероустойчивого сорта для различной начальной числен-

ности ЗКН и разного уровня плодородия: низкого, среднего и высокого. Модель Хассела подтвердила, что является наиболее универсальной в классе дискретных однопериодных моделей прогнозирования динамики плотности популяции ЗКН в почве и позволяет прогнозировать численность ЗКН для агробиоценозов с монокультурой картофеля восприимчивых и глободероустойчивых сортов.

### Литература

1. Одум Ю. Экология. Т. 2. М.: Мир, 1986. 376 с.
2. Шестеперов А. А., Федотова Е. Л., Закабунина Е. Н., Колесова Е. А. Создание нематодоустойчивых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. М.: РГАЗУ, 2004. 96 с.
3. Шестеперов А. А., Лукьянова Е. А., Бондарев А. А. Применение модели Хассела для прогнозирования плотности популяции золотистой картофельной нематоды // Защита и карантин растений. 2016. № 11. С. 40–42.
4. Шестеперов А. А., Савотиков Ю. Ф. Карантинные фитогельминтозы. М.: Колосс, 1995. 453 с.
5. Beverton R. J. H., Holt S. J. On the Dynamics of Exploited Fish Populations. Fishery Investigations Series II Volume XIX, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1957.
6. David K. N. Phytoparasitic Nematodes: Risks and Regulations. The Handbook of Plant Biosecurity. 2014; P. 519–546.
7. Green W. Econometric Analysis. 7th Edition, Cambridge press, 2011.
8. Ricker W. Stock and recruitment. *Journal Fisheries research board of Canada*. 1954; 11(5): 559–623.

### References

1. Odum Yu. Ecology. Vol. 2. Moscow. Mir Publ. 1986: 376. (In Russ.)
2. Shesteperv A. A., Fedotova E. L., Zakabunina E. N., Kolesova E. A. Development of nematode resistant varieties and hybrids of agricultural plants. Moscow, Russian State Agrarian Extramural University Publ. 2004: 96. (In Russ.)
3. Shesteperv A. A., Lukyanova E. A., Bondarev A. A. Application the Hassell model for prediction the population density of golden nematode of potato. *Zashchita i karantin rasteniy = Plant protection and quarantine*. 2016; 11: 40–42. (In Russ.)
4. Shesteperv A. A., Savotnikov Yu. F. Quarantine eelworm diseases. Moscow, Kolos Publ. 1995: 453. (In Russ.)
5. Beverton R. J. H., Holt S. J. On the Dynamics of Exploited Fish Populations. Fishery Investigations Series II Volume XIX. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1957.
6. David K. N. Phytoparasitic Nematodes: Risks and Regulations. The Handbook of Plant Biosecurity. 2014: 519–546.
7. Green W. Econometric Analysis. 7th Edition. Cambridge press. 2011.
8. Ricker W. Stock and recruitment. *Journal Fisheries research board of Canada*. 1954; 11(5): 559–623.