

УДК 632.4:519.85

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПИРИКУЛЯРИОЗА РИСА

Ю. А. СТРИЖЕКОЗИН, Н. А. ТИХОНОВА, В. А. ШКАЛИКОВ

(Кафедра фитопатологии)

Представлены основные этапы разработанной авторами модели развития пирикуляриоза риса, наиболее существенные предикторы каждого из этапов, проведена оценка сходимости результатов расчета для отдельных этапов и модели в целом с экспериментальными данными. Модель может использоваться для постановки фитопатологических прогнозов и принятия решений о целесообразности проведения мероприятий защиты риса от пирикуляриоза.

В последнее время для осуществления фитопатологических прогнозов все шире применяется электронно-вычислительная техника. Разрабатываются специальные программы для ЭВМ, методы ввода и кодирования необходимой информации, создаются автоматизированные системы получения ответов на запросы потребителей [3, 9, 10, 11, 14, 16]. Достаточно надежное функционирование вычислительных систем, используемых для прогноза, возможно в том случае, если процесс развития возбудителя в онтогенезе растения-хозяина представлен в виде уравнений. В данной статье приведены результаты исследований по разработке систем уравнений, моделирующих развитие пирикуляриоза риса.

Подобного рода модели многих заболеваний сельскохозяйственных растений разработаны и применяются при составлении прогнозов, планировании и организации мер защиты [1, 2, 4—7, 13].

Основой для построения математических моделей развития пирикуляриоза риса послужили результаты проведенных для этой цели лабораторных и многолетних полевых опытов. Опыты проводились в разных зонах страны на относительно восприимчивых сортах риса Дубовский 129, Краснодарский 424, Новосельский с соответствующими им в зонах

возделывания изолятами местных популяций возбудителя пирикулярриоза. Изучали динамику болезни и ее вредоносность при различных потенциалах инфекции и определенных погодных условиях.

При этом проводились регулярные наблюдения за метеорологическими условиями, в частности за температурой воздуха, относительной влажностью воздуха, продолжительностью сохранения капель росы или дождя на поверхности растений, продолжительностью и интенсивностью осадков. Исследовалось также влияние отдельных факторов внешней среды на заражение растения-хозяина, инкубационный период болезни, споруляцию гриба и др.

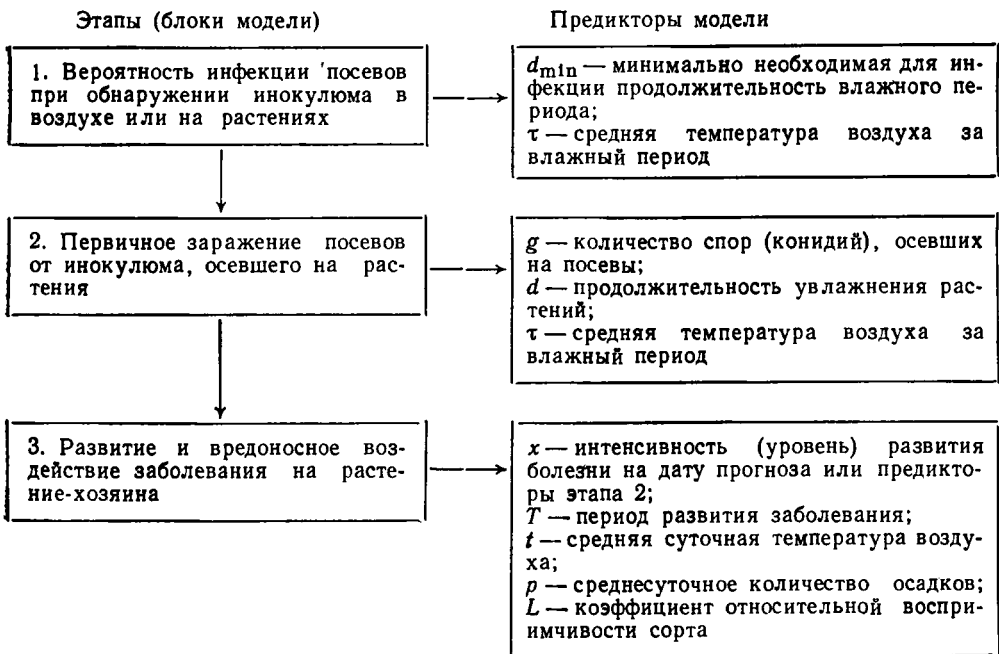
Математическая обработка экспериментальных данных и отладка моделей проводились на ЭВМ с помощью программ дисперсионного, корреляционного, регрессионного анализа и нелинейной оценки параметров.

Для более четкого математического описания процесс развития пирикулярриоза на посевах риса может быть подразделен на несколько этапов (блоков) в зависимости от совокупности факторов, оказывающих в тот или иной период определяющее воздействие. Условно этот процесс был разделен нами на 3 подлежащих моделированию этапа: оценка возможности инфекции посевов риса при обнаружении инокулюма в воздухе или на растениях; первичное заражение растений от инокулюма, осевшего на посевы; развитие и вредоносное воздействие заболевания на растение-хозяина (снижение урожая и его качества).

Изучение специальной литературы по данному заболеванию [8, 12, 15], логический, дисперсионный и корреляционный анализ полученных нами экспериментальных данных позволили выявить факторы, оказывающие существенное влияние на развитие патогена в пределах каждого моделируемого этапа. Результаты этого анализа представлены в блок-схеме.

Согласно принятой схеме, 1-й и 2-й моделируемые блоки включают уравнения, характеризующие воздействие биотических и абиотических факторов среды на возможность заражения посевов и позволяющие в случае заражения оценить потенциальный уровень (интенсивность) первичного проявления болезни.

#### Блок-схема математического моделирования развития пирикулярриоза риса



В результате регрессионного анализа экспериментальных данных этих блоков получены уравнения, используемые в краткосрочном прогнозе пирикулярноза риса. Они предусматривают, в частности, расчет минимально необходимой для осуществления инфекции продолжительности периода увлажнения растений в зависимости от температуры воздуха в этот период:

$$d_{\min} = 0,064 (\tau - 22,3)^2 + 4,2, \quad (1)$$

где  $d_{\min}$  — минимальная продолжительность периода с капельным увлажнением растений после нанесения суспензии конидий, необходимая для последующего проявления болезни, ч;  $\tau$  — средняя температура воздуха за этот период, °С.

В случае, если фактическая продолжительность увлажнения посевов  $d > d_{\min}$ , возможно заражение посевов.

По данным опытов, в которых по истечении инкубационного периода (в среднем через 8—10 дней) наблюдалось проявление болезни, определены коэффициенты уравнения, моделирующего зависимость интенсивности первичного проявления в фазу кушения растений от факторов внешней среды.

$$x = 0,1g (d-2)^3 \exp [-0,0183 (\tau - 22,5)^2 - 7,02]; R = 0,95, \quad (2)$$

где  $x$  — интенсивность первичного проявления, число пятен на одно растение;  $d$  — продолжительность периода с капельным увлажнением растений, ч;  $\tau$  — средняя температура воздуха за этот период, °С;  $g$  — количество осевших конидий на 1 см<sup>2</sup> горизонтальной поверхности;  $R$  — коэффициент множественной корреляции.

Третий моделируемый блок включает уравнения, объединенные в общую зависимость «первичное проявление болезни (или количество осевшего инокуляма) — снижение урожая». Данная зависимость имеет логистическую S-образную форму, которая может изменяться в зависимости от складывающихся погодных условий.

Вместе с формулой (2), применяемой для оценки первичного проявления, уравнения этой зависимости образуют систему уравнений

$$J = \frac{100L}{1 + (0,1\beta g)^{-\psi} \exp [-(\varphi + 0,029T - 2,8)]}; \quad (3)$$

$$\beta = 0,02 \exp \{-0,018 (\tau - 22,5)^2 + 3 \ln (d - 2)\},$$

где  $T$  — период развития болезни от даты проявления до даты начала фазы полной спелости риса, дни;  $p$  — среднесуточное количество осадков за период  $T$ , начинающийся и заканчивающийся на 10 дней раньше периода развития болезни, мм/сут;  $t$  — среднесуточная температура воздуха за указанный период, °С;  $\varphi(p, t)$  — функциональный показатель степени благоприятности метеорологических условий для развития пирикулярноза;  $d, \tau, g$  — предикторы модели первичного проявления;  $\beta$  — показатель совместного влияния параметров  $d, \tau$ ;  $\psi$  — угловой коэффициент логистической зависимости;  $L$  — коэффициент относительной восприимчивости сорта;  $Y$  — снижение урожайности риса по отношению к контролю, %.

Функциональная структура показателя  $\varphi$  в зависимости от интервалов изменения значений метеопредикторов представлена в таблице.

Аппроксимация сплайн-функциями показателя  $\varphi$   
в зависимости от среднесуточных значений температуры и осадков

$p, \text{ мм/сут}$	$t < 21,4^\circ\text{C}$	$21,4^\circ\text{C} \leq t \leq 25,9^\circ\text{C}$	$t > 25,9^\circ\text{C}$
$p < 5,2$	$-0,027 (t-21,4)^2$	$-0,04 (p-5,2)^2$	$-0,027 (t-25,9)^2$
$5,2 \leq p \leq 7,4$	$-0,04 (p-5,2)^2$	0	$-0,04 (p-5,2)^2$
$p \geq 7,4$	$-0,027 (t-21,4)^2$	$-0,02 (p-7,4)^2$	$-0,027 (t-25,9)^2$
	$-0,02 (p-7,4)^2$		$-0,02 (p-7,4)^2$

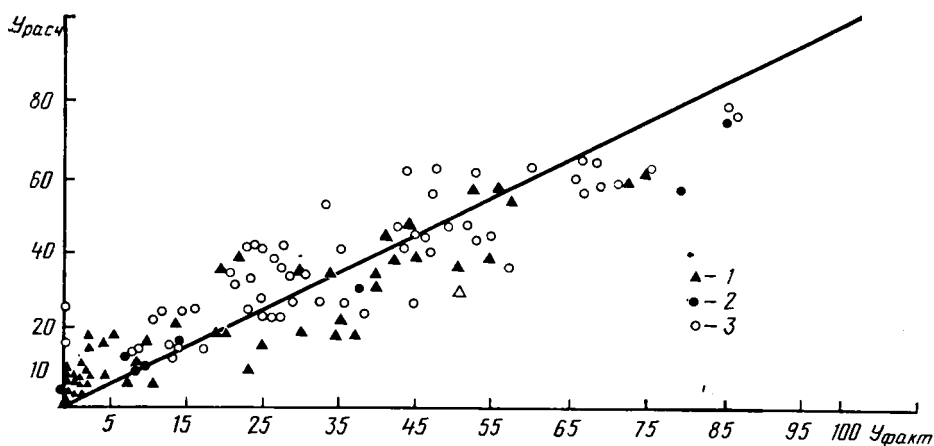


Диаграмма соответствия рассчитанных по модели и фактических снижений урожая риса.

1 — зона умеренно континентального климата; 2 — зона мусонного климата умеренных широт; 3 — зона влажных субтропиков.

Границы интервалов по осадкам и температуре, а также коэффициенты аппроксимации рассчитаны в процессе оптимизации модели на ЭВМ. Согласно таблице, максимальное значение  $\varphi$  равно нулю. В соответствии с этим область оптимальной благоприятности метеоусловий для развития пирикулярриоза является по осадкам ( $5,2 < p < 7,4$ ) мм/сут, по температуре ( $21,4 < t < 25,9$ ) °С. Эти значения согласуются с данными работ [8, 15].

Угловой коэффициент логистической зависимости находится по формуле

$$\psi = \frac{0,47 \exp[-0,18(\varphi + 0,029T - 0,63)^2]}{1 + \exp(8,28 - 0,21T)} \quad (4)$$

Численные оценки коэффициентов уравнений получены на ЭВМ с применением метода наименьших квадратов для минимизации остаточной дисперсии. Точность расчета по модели, представленной системой уравнений (3, 4), определялась путем сравнения значений результирующего показателя — величины снижения урожая  $Y$ , %, полученных расчетным способом и в эксперименте.

Соответствие модели экспериментальным данным оценивалось по стандартному (среднеквадратическому) отклонению расчетных и фактических значений снижения урожая по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Y_{\text{расч}} - Y_{\text{факт}})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

где суммирование осуществляется по совокупности данных опытов. По результатам анализа 128 опытов, проведенных на указанных сочетаниях «сорт — изолят популяции», взятых в качестве эталонных с коэффициентом относительной восприимчивости  $L=1$ , значение  $\sigma$  составило 10,1 %. Оно несколько меньше среднеквадратической ошибки, полученной для модели ржавчинных заболеваний пшеницы [4, 5].

Для некоторых новых сортов и изолятов популяций гриба представленные уравнения не могут быть использованы без предварительной корректировки. Коррекция модели может быть проведена введением для новых сочетаний «сорт — изолят гриба» поправочных индексов (в частности, коэффициента  $L$ ), устанавливаемых эмпирически путем сравнения фактического развития болезни и снижения урожая с рассчитанными по предложенным выше уравнениям для модельных сочетаний.

Полученные математические модели могут использоваться для расчетов с целью постановки прогноза при различных биометеорологических условиях. Проверка моделей в опытах, проведенных в разных климатических зонах страны, показала достаточно высокую точность про-

гнозирования болезни. Так, первичное проявление в 160 опытах варьировало от 0,01 до 48—50 пятен на растение и оценивалось расчетом со средним отклонением не более чем 1,5—2 раза от наблюдаемых значений, среднеквадратическая ошибка расчетных значений  $\bar{Y}$  составляла 10,1 %.

Соответствие рассчитанного и фактического процента снижения урожая риса от пирикулярриоза показано на корреляционной диаграмме (рисунки).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по составлению прогноза развития желтой ржавчины и защите посевов озимой пшеницы. — М.: Колос, 1981. — 2. Методические указания по составлению прогнозов стеблевой ржавчины пшеницы. — М.: Колос, 1982. — 3. Поляков И. Я., Ченкин А. Ф. Прогнозы фитосанитарной обстановки в растениеводстве. — В сб.: Научные основы защиты растений. М.: Колос, 1984, с. 34—71. — 4. Санин С. С., Стрижекозин Ю. А., Назарова Л. Н. и др. Математическое моделирование эпифитотий стеблевой ржавчины пшеницы эндемического и экзодемического происхождения. — Вестн. с.-х. науки, 1984, № 3, с. 85—89. — 5. Санин С. С., Стрижекозин Ю. А., Пыжикова Г. В. и др. К методике прогнозирования стеблевой ржавчины. — Защита растений, 1983, № 2, с. 15—16. — 6. Aarts H. et al. — Landbouwk. Tijdschr., 1984, vol. 96, N 2, p. 26—29. — 7. APHIS establishes plant pest net work. — Farm chemicals, 1984, vol. 147, N 8, p. 64—65. — 8. Hasimoto A. — Hoeky Agr. Chem., 1983, vol. 30, N 4, p. 12—17. — 9. Kluge E., Lücke N. — Nachrbl. Pflanzschutz in DDR, 1984, Bd. 38, N 5, S. 95—98. — 10. Kranz J. — Gesunde Pflanzen, 1983, Bd. 36, N 6, S. 167—171. — 11. MacKenzie O. R. — FAO Plant Prot. Bull., 1984, vol. 32, N 2, p. 45—49. — 12. Ou S. H. — Annals of the New York Academy of Sciences, 1977, vol. 287, p. 275—286. — 13. Rapport de la deuxieme rennion du groupe de travail sur les previsions. EPP0 publ., 1984, C, N 85, p. 1—14. — 14. Rouse D. I., Teng P. S. — Plant Disease, 1984, vol. 68, N 5, p. 365—369. — 15. Suzuki H. Ann. review of phytopathology, 1975, vol. 13, p. 239—256. — 16. Teng P. — Agr. Forestry Bull., 1982, vol. 5, N 3, p. 13—19.

*Статья поступила 20 марта 1988 г.*

#### SUMMARY

The main stages in the model of development of piriculariase of rice developed by the authors, the most essential predictors for each of the stages are presented in the paper, and convergence of results of calculation for certain stages and for the whole model with experimental data is estimated. The model may be used in phytopathological forecasting and in making decisions whether measures for protecting rice from piriculariase should be taken.