

УДК 556.53: 574.522

## СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНОЙ ВОДЫ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ВРЕМЕНИ РОСТА КОРНЕЙ РАСТЕНИЯ

Евдокимова О.Ю.

*Марийский государственный технический университет, г. Йошкар-Ола*

В статье рассмотрено техническое решение инженерной экологии, которое может быть использовано при мониторинге качества проб речной воды тестированием роста корней определенных видов тестовых растений.

**Ключевые слова:** мониторинга загрязнения, проба воды, рост корней.

Техническое решение относится к инженерной экологии и может быть использовано при мониторинге качества проб воды тестированием ростом корней различных видов тестовых растений [1, 2].

Пробу речной воды брали перед городским водозабором «Йошкар-Ола» и ею поливали все пять групп по 50 семян редиса красного круглого. Поэтому вода для всех пяти чашек Петри была одной и той же, однако семена различны, поэтому эти пять

статистических выборок следует считать независимыми друг от друга по значениям длины корней.

В таблице 1 приведены данные проращивания в комнатных условиях (семена были посажены в 17 часов 24 июня 2009 г.) пяти независимых выборок из 50 семян редиса красного круглого в пяти чашках Петри с использованием для полива одной пробы речной воды.

**Таблица 1**  
**Результаты измерений длины корней у редиса красного круглого, мм**

№ измерения	Продолжительность проращивания, ч					№ измерения	Продолжительность проращивания, ч				
	24	48	72	96	120		24	48	72	96	120
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
1	2	14	39	30	52	26	1,5	13	14	7	31
2	2	11	46	50	28	27	1	10	38	38	59
3	1,5	23	25	50	7	28	3	21	16	25	34
4	2	20	38	17	28	29	4	5	33	24	6
5	0,5	15	26	41	40	30	1,5	4	22	39	80
6	3	15	52	20	112	31	1	8	22	57	64
7	1,5	12	30	41	84	32	1,5	8	26	73	47
8	4	13	31	9	65	33	0,5	4	25	19	78
9	1	17	39	7	65	34	1	4	18	5	27
10	4	18	26	56	0	35	2	13	48	20	56
11	2,5	13	22	61	91	36	2	14	25	23	21
12	2,5	13	47	33	35	37	0	17	42	25	73
13	1,5	20	43	38	45	38	0	5	5	25	18
14	4	13	30	31	42	39	0	6	5	38	54

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	3	17	22	34	62	40	0	10	10	44	77
16	3	4	50	13	78	41	0	15	8	30	72
17	2	9	29	22	84	42	0	6	5	41	57
18	0,5	16	22	64	70	43	0	8	23	4	52
19	3	18	9	58	82	44	0	19	25	0	73
20	1,5	14	30	25	72	45	0	5	34	0	43
21	2,5	18	10	18	102	46	0	10	40	0	52
22	2	17	22	28	54	47	0	9	22	0	49
23	1,5	12	35	48	49	48	0	5	38	0	56
24	2	4	30	20	75	49	0	5	35	0	0
25	2,5	10	21	46	74	50	0	0	0	0	52

В выборке было проведено ранжирование по убыванию длины корня, максимального из всех корней у одного проростка. Результаты ранжирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Ранжированные популяции семян редиса красного круглого при разных сроках проращивания**

24 часа		48 часов		72 часа		96 часов		120 часов	
г	L, мм	г	L, мм	г	L, мм	г	L, мм	г	L, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	4	0	23	0	52	0	73	0	112
0	4	1	21	1	50	1	64	1	102
0	4	2	20	2	48	2	61	2	91
0	4	2	20	3	47	3	58	3	84
1	3	3	19	4	46	4	57	3	84
1	3	4	18	5	43	5	56	4	82
1	3	4	18	6	42	6	50	5	80
1	3	4	18	7	40	6	50	6	78
1	3	5	17	8	39	7	48	6	78
2	2,5	5	17	8	39	8	46	7	77
2	2,5	5	17	9	38	9	44	8	75
2	2,5	5	17	9	38	10	41	9	74
2	2,5	6	16	9	38	10	41	10	73
3	2	7	15	10	35	10	41	10	73
3	2	7	15	10	35	11	39	11	72
3	2	7	15	11	34	12	38	11	72
3	2	8	14	12	33	12	38	12	70
3	2	8	14	13	31	12	38	13	65
3	2	8	14	14	30	13	34	13	65
3	2	9	13	14	30	14	33	14	64
3	2	9	13	14	30	15	31	15	62
4	1,5	9	13	14	30	16	30	16	59
4	1,5	9	13	15	29	16	30	17	57
4	1,5	9	13	16	26	17	28	18	56
4	1,5	9	13	16	26	18	25	18	56
4	1,5	10	12	16	26	18	25	19	54

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1.5	10	12	17	25	18	25	19	54
4	1.5	11	11	17	25	18	25	20	52
4	1.5	12	10	17	25	19	24	20	52
5	1	12	10	17	25	20	23	20	52
5	1	12	10	18	23	21	22	20	52
5	1	12	10	19	22	22	20	21	49
5	1	13	9	19	22	22	20	21	49
6	0.5	13	9	19	22	22	20	22	47
6	0.5	14	8	19	22	23	19	23	45
6	0.5	14	8	19	22	24	18	24	43
7	0	14	8	19	22	25	17	25	42
7	0	15	6	19	22	26	13	26	40
7	0	15	6	20	21	27	9	27	35
7	0	16	5	21	18	28	7	28	34
7	0	16	5	22	16	29	7	29	31
7	0	16	5	23	14	30	5	30	28
7	0	16	5	24	10	31	4	30	28
7	0	16	5	24	10	32	0	31	27
7	0	17	4	25	9	33	0	32	21
7	0	17	4	26	8	32	0	33	18
7	0	17	4	27	5	32	0	34	7
7	0	17	4	27	5	32	0	35	6
7	0	17	4	27	5	32	0	36	0
7	0	18	0	28	0	32	0	36	0

**Динамика роста корней.** Очевидно, что при нулевом значении времени  $t$  проращивания у всех 50 семян ростки имеют нулевую длину. Однако, из-за измерений в различающихся статистических выборках, можно определить изменения по длине в зависимости от времени с момента посадки в чашку Петри только по максимальным значениям. Они находятся в первой строке чисел в табл. 2.

После идентификации биотехническим законом проф. П.М. Мазуркина вначале было получено уравнение тенденции динамики роста корней у семян редиса красного круглого по максимальным длинам

$$L_{\max} = 0,013347t^{1,99584} \exp(-0,012346t^{0,78595}), \quad (1)$$

где  $L_{\max}$  — максимальная длина корня в пяти выборках, мм;  $t$  — время проращивания семян, ч. Коэффициент корреляции равен 0,9968.

Однако имеется небольшое волновое возмущение, которое показывает косвенно точность (погрешность) проведенных измерений длины корня, то есть чистоту опыта в пяти чашках Петри. Вторая составляющая получает вид волнового уравнения:

$$\Delta L_{\max} = 0,010902t^{2,12937} \exp(-0,039397t) \cos(\pi t/19,03592). \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что сдвиг волны отсутствует, то есть время измеряется точно с момента посадки семян в чашку Петри.

Кроме того, промежутки между измерениями должны быть не через 24 часа, а через каждые 19 часов. Тогда период колебания максимальной длины корней составит 38 часов.

Объяснение этому феномену в науке имеется. Оно заключается в том, что растения возникли более чем 400 млн. лет назад. В то время Земля вращалась быстрее и тогда получается, что семена редиса красного круглого показывают реликтовый суточный цикл при проращивании без доступа солнечного света в комнатных условиях.

Однако человеку сегодня удобнее пользоваться полупериодами в 24 часа, зная, что циклы развития и роста растений (вначале корни, затем стебли) составляют 2-е суток.

После совместной идентификации уравнений (1) и (2) была получена готовая статистическая модель вида

$$L_{\max} = L_{\max1} + L_{\max2} \quad (3)$$

$$L_{\max1} = 0,013363t^{1,99594} \exp(-0,012384t^{0,78691}),$$

$$L_{\max2} = 0,010886t^{2,13058} \exp(-0,039387t) \cos(\pi t/19,06179),$$

где  $L_{\max}$  — максимальная длина корня от лучшего по качеству семени в пяти выборках семян редиса красного круглого, мм;  $L_{\max1}$  — тренд динамики роста корней по длине у лучших семян, мм;  $L_{\max2}$  — волновая составляющая позитивной адаптации у лучших семян в каждой из пяти популяций, мм;  $t$  — время проращивания семян с момента посадки в чашки Петри, ч.

Результаты анализа модели (3) приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Циклы положительного и отрицательного влияния времени проращивания

Номер полупериода колебания	Интервала времени в часах	Характер адаптации корня к воде	Оптимальный момент времени роста, ч	Приращение длины корня у семени, мм	Примечание
1	0...9	+	6-7	+0,21	Рациональный период роста
2	10... 28	-	21	-2,97	
3	29... 47	+	39	+5,69	Максимум возмущений длины корней
4	48... 66	-	57	-6,35	
5	67... 85	+	76	+5,54	
6	86... 104	-	95	-4,22	Спад возмущений в росте
7	105... 123	+	114	+2,94	

Наибольшую приспособляемость 0,7990 в направлении позитивной адаптации семена редиса красного круглого имеют через два часа после посадки. Коэффициент приспособляемости, вычисляемый по формуле  $k = L_{\max2}/L_{\max1}$ , равен в это время 0,7990, наименьшее позитивное влияние времени роста 0,0327 наблюдается в 29 ча-

сов после посадки. Максимальный кризис для проростков наблюдается через 18 часов с негативным приспособлением к условиям роста с коэффициентом приспособляемости  $k = -0,6572$ . Однако он меньше позитивного максимума 0,7990.

Полный цикл развития и роста корневой завершается через 28 часов. Однако это

число не совсем удобно в практическом использовании. Поэтому рекомендуется завершать эксперименты по тестированию с использованием семян редиса красного круглого через 24 часа. В этот момент времени имеем по данным табл. 4 коэффициент приспособляемости  $k = -0,3878$ , что близко к квадрату золотой пропорции  $0,618$ .

Аналогичные испытания проводят и по другим видам растений, в особенности по тем сельскохозяйственным растениям, которые будут орошаться испытываемой водой.

Эти же рекомендации по **определению рационального срока проращивания** могут быть обоснованы также при рассмотрении ранговых распределений проростков по длинам корней, значения параметров моделей которых приведены в табл. 4 после идентификации функции вида:

$$L_r = \sum_{i=1}^m L_{ri} \quad (4)$$

$$L_{ri} = a_{1i} r^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} r^{a_{4i}}) \cos(\pi r / (a_{5i} + a_{6i} r^{a_{7i}}) + a_{8i}) ,$$

где  $L_r$  — реактивный отклик семян редиса красного по максимальной длине наибольшего корня у каждого семени при формировании популяционных групп по рангам длины через 24, 48, 72, 96 и 120 часов, шт.;  $i$  — номер составляющей формулы, найденной по ранговому распределению длины корня у 50 семян редиса красного;  $m$  — количество составляющих в статистической модели, шт.;  $r$  — ранг проростка по убыванию длины корня, причем максимального корня у одного проростка;  $a_1 \dots a_8$  — параметры составляющих закономерности, принимающие конкретные значения для конкретных условий проращивания семян.

Таблица 4

**Параметры составляющих биотехнической функции**

№ i	Значения параметров составляющей статистической модели								корреляция
	$a_{1i}$	$a_{2i}$	$a_{3i}$	$a_{4i}$	$a_{5i}$	$a_{6i}$	$a_{7i}$	$a_{8i}$	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>34</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Исходные семена 50 штук</b>									
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Длина корней растения у 50 семян через 24 часа проращивания									
1	3,99990	0	0,015693	1,82771	0	0	0	0	0,9999
2	-0,93537	0,46394	0	0	0	0	0	0	
Длина корней растения у 50 семян после 48 часов проращивания									
1	22,35981	0	0,044208	1,13937	0	0	0	0	0,9982
2	-7,74231e-8	6,31626	0	1	-1,55093	0,86980	1,04732	2,26152	
Длина корней растения у 50 семян после 72 часа проращивания									
1	51,9274	0	0,033615	1,04172	0	0	0	0	0,9988
2	-0,00119	3,21262	0	1	0,82821	-0,77017	0,99254	-3,19341	
Длина корней растения у 50 семян после 96 часов проращивания									
1	71,4272	0	0,078037	0,82972	0	0	0	0	0,9985
2	-0,00029350	3,45982	0	0	2,36590	0,17004	1,20704	0,03893	

## Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина корней растения у 50 семян после 120 часов проращивания									
1	112,3046	0	0,00061081	2,78791	0	0	0	0	0,9986
2	-18,48863	0,28542	0	0	7,39102	0,79336	0,75522	-1,18667	
3-13	...	...	...	...	...	...	...	...	>0,3

Из данных табл. 4 видно, что наибольший коэффициент корреляции имеет формула при сроке проращивания в 24 часа. При этом даже такие малые остатки получают волновое изменение.

Запишем общее уравнение с пятью параметрами, включая расчетное значение максимальной длины корня, для рангового распределения проростков из всех 50 семян по длинам

$$L = L_1 - L_2, \quad (5)$$

$$L_1 = L_{\max} \exp(-a_1 r^{a_2}), \quad L_2 = a_3 r^{a_4},$$

где  $L$  — длина корня проростков редиса красного круглого в количестве 50 штук в чашке Петри за 24 часа проращивания, мм;  $L_1$  — первая составляющая изменения длины корня в зависимости от ранга по закону гибели, мм;  $L_2$  — вторая кризисная составляющая задержки роста растения по длине корней в чашке Петри за 24 часа, характеризующая по закону показательного роста влияние качества поливаемой воды, мм;  $L_{\max}$  — максимальное значение длины корня у одного проростка из множества в 50 семян редиса красного круглого, мм;  $r$  — ранг проростка по убыванию длины корня;  $a_1 \dots a_4$  — параметры готовой статистической законо-

мерности, принимающие конкретные значения для условий проращивания семян.

В примере получилось уравнение с конкретными параметрами:

$$L = 3,99990 \exp(-0,015693 r^{1,82771}) - 0,93537 r^{0,46394}. \quad (6)$$

Конструкцию уравнения (6) и (5), а также, соответственно, обобщенной модели (4), можно интерпретировать с позиций генетики. Эта наука различает три вида изменчивости: генотипическая, фенотипическая изменчивости и их совместное синергетическое влияние.

В первом приближении первая составляющая модели типа (6) показывает генотипическую изменчивость 50 семян редиса красного круглого, а вторая — фенотипическую, то есть влияние условий произрастания. При этом главным фактором, при прочих равных условиях, становится качество поливаемой на семена в чашке Петри речной или иной воды.

Начиная с третьей и последующие составляющие модели типа (4) волновые составляющие показывают совместное влияние генотипической и фенотипической изменчивости. Тогда становит-

ся понятным, что при сроке проращивания в 120 часов четко видны все три генетические составляющие. По данным табл. 5 из 13 составляющих группа волн №№ 3-13 характеризует совместно влияние внутренних свойств семян и внешних свойств среды произрастания.

Отсюда следует, что при сроках проращивания в 48, 72 и 96 часов фенотипическая часть изменчивости корней по длине получает четко выраженный колебательный характер. И только при сроке в 24 часа это волнение минимальное и составляет менее  $\pm 0,01$  мм. Этот факт показывает, что длину корней через 24 часа проращивания лучше всего измерять с помощью измерительной лупы.

Такая высокая точность моделирования позволяет утверждать то, что при проращивании семян редиса красного круглого, являющегося наиболее распространенным тест-растением для оценки качества воды, выявляются в чистом виде всего две составляющие изменчивости длины корней — генотипическая и фенотипическая. При этом сроки проращивания по сравнению с прототипом сокращаются в три раза, а точность испытаний существенно повышается при использовании семян редиса красного круглого. Остальные виды тест-растений требуют определения собственных сроков проращивания.

**Распределение семян по реакции на воду**

Рассмотрим реакционную способность семян из множества в 50 шт. при про-

ращивании в течение 24 часов. Для этого нужно сосчитать из данных табл. 2 количество семян при одном и том же ранге, а затем искать биотехнические закономерности по ним. При этом принимается допущение, что количество семян с одним рангом длины корней будет составлять *популяционную группу* с одинаковым откликом на воздействие поливаемой воды.

В таблице 5 приведены результаты анализа реактивного роста семян по длине корней в каждой ранговой группе.

**Таблица 5**  
**Реактивность на речную воду семян редиса красного**

Ранг проростков $r$	Численность группы $n_r$ , шт.
0	4
1	5
2	4
3	8
4	8
5	4
6	3
7	13

Самой многочисленной оказалось последняя, седьмая, популяционная группа с нулевыми длинами корней. Этот факт означает, что не взошли через сутки  $100 \times 13 / 50 = 26\%$  семян редиса красного круглого. Часть из них, конечно же, взойдет корнями позже, поэтому седьмая популяционная группа будет показывать динамику всхожести семян растения.

Из нулевой популяционной группы видно, что еще не определился лидер среди проростков в росте корней. Но со временем

из четырех претендентов останется только один. Как видно из данных таблицы 2, единственный лидер определился сразу же после 24 часов, потому что к 48 часам проращивания единственный лидер получил преимущества в росте по сравнению со следующим по иерархии длины корней проростком в  $100 \times (23 - 21) / 23 = 8,70\%$ .

Для речной воды после структурно-параметрической идентификации биотехнического закона и его фрагментов была получена статистическая модель распределения численности популяционных групп вида:

$$\begin{aligned} n_r &= n_{r_1} + n_{r_2} + n_{r_3}, & (7) \\ n_{r_1} &= 4,31127 \exp(0,0060902r^{2,94002}), \\ n_{r_2} &= A_1 \cos(\pi r/p_1 + 1,27680), \\ A_1 &= 0,35072r^{4,10370} \exp(-1,24079r^{0,62408}), p_1 = \\ &= 1,86125 + 0,0021574r^{3,13593}, \\ n_{r_3} &= A_2 \cos(\pi r/p_3 + 1,57072), \\ A_2 &= -4054,52 \exp(-5,93014r^{0,28946}), \\ p_2 &= 1,02144 + 0,0015843r, \end{aligned}$$

где  $n_r$  — реактивный отклик семян редиса красного при формировании популяционных групп по рангам распределения длины корней в росте за 24 часа проращивания, шт.;  $n_{r_1}$  — первая составляющая модели, показывающая тенденцию достижения одного среди всех лидеров, шт.;  $n_{r_2}$  — вторая составляющая, показывающая волновое возмущение численности популяционной группы с резко возрастающей амплитудой в конце ряда рангового распределения семян по длине корней проростков, то есть нарастаю-

щее биоэнергетическое волнение среди отстающих в росте особей или у аутсайдеров, шт.;  $n_{r_3}$  — третья составляющая, показывающая волновое возмущение в биоэнергетике среди опережающих в росте особей, которое через 72 часа проращивания превращается в общую волну с выделением только одного проростка-лидера для всего ряда из-за колебательной адаптации всей популяции к внешним условиям развития и роста 50-ти проростков, шт.

Коэффициент корреляции модели (7) очень высок и равен 1.0000. Остатки практически достигли нулевых значений.

Предлагаемый способ обладает простотой и высокой точностью при определении рационального срока для проращивания семян редиса красного круглого. Для этого необходимо проведение предварительных экспериментов для конкретной местности. По предложенному способу испытания и методике последующего статистического моделирования можно определять сроки проращивания и у других видов растений, в особенности тех культурных растений, которые предполагается выращивать в данной местности с поливом или орошением речной водой или водой из другого водного объекта.

При применении тест-растения в виде 50-ти семян редиса красного круглого, в повторах не менее пяти раз по разным срокам проращивания, сроки проращивания по сравнению с прототипом сокращаются с 72 до 24 часов, то есть в три раза, а точ-



ность испытаний существенно повышается. Поэтому рекомендуется измерять длину корней измерительной лупой. Остальные виды тест-растений требуют определения собственных сроков проращивания.

Применение предложенного способа расширяет возможности территориального экологического мониторинга загрязнения простыми средствами у тех водотоков речной сети, на которых расположены населенные пункты и земельные участки сельскохозяйственного назначения. Это позволит внедрять современные технологии адаптивно-

ландшафтного земледелия на территории конкретных регионов страны.

#### Список литературы

1. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во «Протектор», 2000. — 848 с.

2. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения» (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. № 46. Приложение 10.

Статья подготовлена и опубликована при поддержке гранта 3.2.3/4603 МОН РФ

## WAY OF TEST OF POLLUTION OF RIVER WATER ON THE INDICATOR OF TIME OF GROWTH OF ROOTS OF THE PLANT

**Evdokimova O.Ju.**

*Mari state technical university, Yoshcar-Ola, Russia*

**The technical decision concerns engineering ecology and can be used at monitoring of quality of tests of water by testing by growth of roots of various kinds dough-vyh of plants.**

**Keywords: pollution monitoring, water test, growth of roots.**