УДК 556.53: 005.336.2: 574.522: 519.876

СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ ПО ВРЕМЕНИ РОСТА КОРНЕЙ РАСТЕНИЯ

Мазуркин П.М., Евдокимова О.Ю.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, e-mail: kaf_po@mail.ru

Техническое решение относится к инженерной экологии и может быть использовано при мониторинге качества проб воды рек и водоемов тестированием ростом корней различных видов тестовых растений.

Ключевые слова: речная вода, загрязнение, корни редиса, время роста, закономерности

WAY OF TEST OF POLLUTION OF WATER ON TIME OF GROWTH OF ROOTS OF THE PLANT

Mazurkin P.M., Evdokimova O.Y.

Volga State Technological University, Yoshkar-Ola, e-mail: kaf_po@mail.ru

The technical solution belongs to engineering ecology and can be used when monitoring quality of tests of water of the rivers and reservoirs by testing by growth of roots of different types of test plants.

Keywords: river water, pollution, garden radish roots, time of growth, regularities

Известен способ испытания загрязнения воды по времени роста корней растения [1]. Стандарт ИСО 5667-2 представляет собой руководство по методам отбора проб, используемым для получения аналитических данных. Они необходимы для контроля качества, характеристик качества и идентификации источников загрязнения воды. Для химического и биологического анализов стандарт рекомендует использование раздельных проб, поскольку методы и устройства для отбора проб, их предварительная обработка, различны. Таким образом, сами пробы воды для орошения или других сельскохозяйственных нужд в растениеводстве могут браться по существующему международному стандарту ИСО 5667-2. Недостатком является нечеткость рекомендаций по срокам проращивания семян различных тестируемых растений.

Известен также способ испытания загрязнения воды по времени роста корней растения в соответствии с методикой биотестирования по проращиванию семян [2], включающий равномерную укладку семян на фильтровальную бумагу в чашке Петри диаметром 10 см, причем в каждую чашку Петри наливают по 5 мл исследуемой воды при 4–8-кратной повторности, при этом уровень жидкости в чашках должен быть ниже поверхности семян, затем чашки покрывают и помещают в термостат при температуре 20 °С, а при отсутствии термостата эксперимент возможен в комнатных условиях, но тогда из-за колебаний температуры затрудняется сопоставление результатов, проводимых в различное время, эксперимент заканчивается через 72 часа, после чего измеряют длину корней, причем тест на проращивание семян проводят и с семенами других растений и, в первую очередь, растений, которые планируется выращивать при орошении. Недостатком является то, что указано в самом прототипе: «…но тогда из-за колебаний температуры затрудняется сопоставление результатов, проводимых в различное время».

Этот недостаток проявляется и при проращивании семян в течение 72 часов. Однако, колебания в длине корней меньше связано с изменениями температуры окружающего закрытую чашку Петри комнатного воздуха. Причем эти изменения температуры воздуха в комнате и воды внутри чашки Петри малы. Поэтому больше всего на разброс значений длины корней влияет взаимодействие растущих корней от семян друг с другом. При этом разные виды растений имеют разные рациональные сроки проращивания, когда в чашке Петри растущие корни отдельных семян только еще начинают мешать друг другу.

Технический результат – повышение точности тестирования проб воды за счет достижения в предварительных экспериментах оптимального срока проращивания семян растения.

Этот технический результат достигается тем, что способ испытания загрязнения воды по времени роста корней растения, включающий равномерную укладку семян на фильтровальную бумагу в чашке Петри диаметром 10 см, причем в каждую чашку Петри наливают по 5 мл исследуемой воды

при 4–8-кратной повторности, при этом уровень жидкости в чашках должен быть ниже поверхности семян, затем чашки покрывают и помещают в термостат при температуре 20°С, а при отсутствии термостата эксперимент возможен в комнатных условиях, но тогда из-за колебаний температуры затрудняется сопоставление результатов, проводимых в различное время, эксперимент заканчивают через 72 часа, после чего измеряют длину корней, причем тест на проращивание семян проводят и с семенами других растений и, в первую очередь, растений, которые планируется выращивать при орошении, ***отличающийся тем***, что до основных экспериментов тестирования дополнительно проводят предварительный эксперимент по определению рационального срока проращивания семян тест-растения, а также тех растений, которые планируется выращивать при орошении в данной местности, при этом для каждого вида растения определяют свой срок рационального проращивания семян, причем на этот срок влияет и качество поливаемой воды, поэтому в одном предварительном эксперименте повторы выполняют при разных сроках проращивания, после измерений длины корней у всех проростков по всем повторам выявляют статистическим моделированием биотехническую закономерность динамики роста лучших в каждом повторе проростков, по которой проводят математический анализ полуциклов времени проращивания, затем в каждом повторе результаты измерений ранжируют по убыванию длины корней, причем выявляют биотехнические закономерности рангового распределения проростков, а после этого выбирают повтор с рациональным сроком проращивания семян, по которому выявляют ранговое распределении популяционных групп проростков и проводят математический анализ для определения отстающих в опережающих проростков внутри одного выбранного повтора с рациональным сроком проращивания.

Пример. Пробу речной воды брали перед городским водозабором «Йошкар-Ола» и ею поливали все пять групп по 50 семян редиса красного круглого.

Таблица 1

Длина корней у редиса красного круглого, мм

Номер измерения	Продолжительность проращивания, ч					Номер измерения	Продолжительность проращивания, ч				
	24	48	72	96	120		24	48	72	96	120
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
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

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

В каждой выборке было проведено ранжирование по убыванию длины корня, начиная при нулевом ранге от максимального из всех корней у одного проростка.

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.

После идентификации получено уравнение (рис. 1).

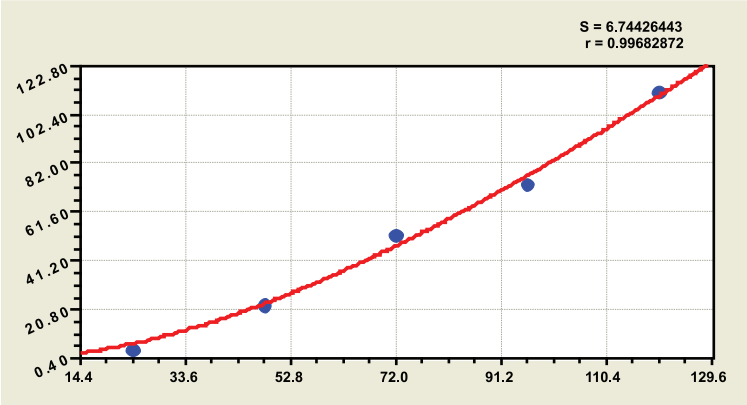

Рис. 1. Тренд (1) динамики роста корней редиса красного круглого максимальной длины в пробе речной воды перед городским водозабором (абсцисса – время в часах, ордината длина корня в мм)

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.

Динамика роста корней у семян редиса по максимуму длин:

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

где $L_{\max}$ – максимальная длина корня в пяти выборках, мм; t – время проращивания семян, ч.

Вторая составляющая получает вид (рис. 2) волнового уравнения

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

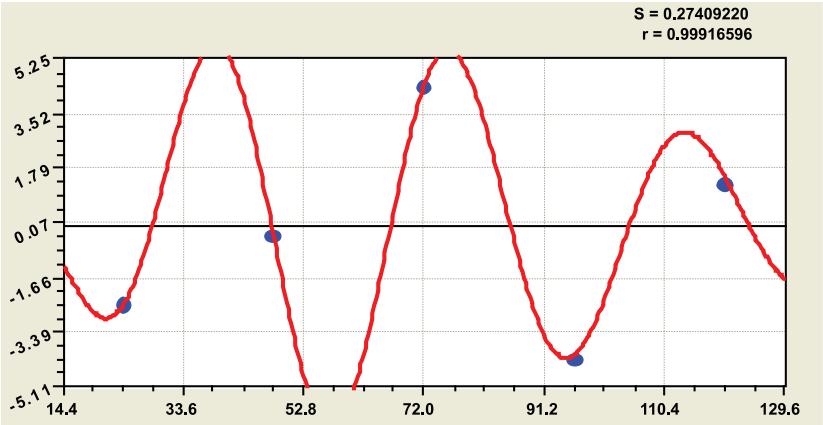

Рис. 2. Волновая составляющая (2) динамики роста корней редиса красного круглого максимальной длины в пробе речной воды перед городским водозабором (абсцисса – время в часах, ордината длина корня в мм)

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. Он заключается в том, что растения возникли более чем 400 млн. лет назад.

А тогда 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 ныне удобней пользоваться полупериодами в 24 часа, зная, что циклы развития и роста растений (вначале корни, затем стебли) составляет двое суток.

После совместной идентификации уравнений (1) и (2) была получена готовая статистическая модель (рис. 3) вида

$$L_{\max} = L_{\max 1} + L_{\max 2}; \qquad (3)$$

$$L_{\max 1} = 0,013363 t^{1,99594} \exp\left(-0,012384 t^{0,78691}\right);$$

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

где $L_{\max}$ – максимальная длина корня от лучшего по качеству семени в пяти выборках семян редиса красного круглого, мм; $L_{\max 1}$ – тренд динамики роста корней по длине у лучших семян, мм; $L_{\max 2}$ – волновая составляющая позитивной адаптации у лучших семян в каждой из пяти популяций, мм; t – время проращивания семян с момента посадки в чашки Петри, ч.

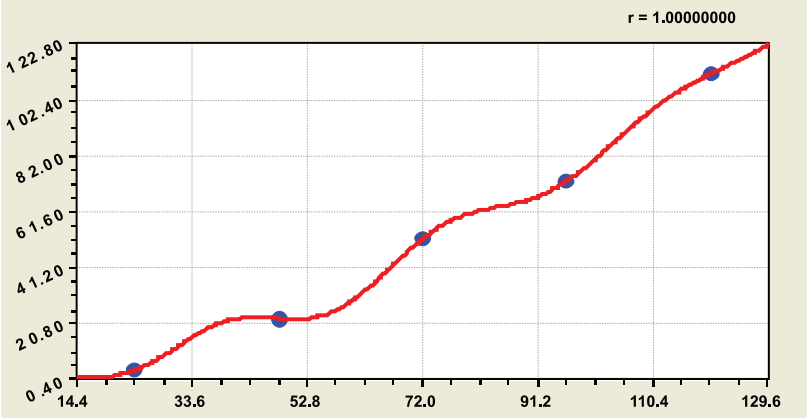

Рис. 3. Тренд и волновая составляющая (3 динамики роста корней редиса красного круглого максимальной длины в пробе речной воды перед городским водозабором

Результаты анализа модели (3) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Циклы положительного и отрицательного влияния времени проращивания

Номер полупериода колебания	Интервал 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 (посева). Коэффициент приспособляемости, вычисляемый по формуле $k = L_{\max 2}/L_{\max 1}$, и он равен в это время 0,7990. Наименьшее позитивное влияние времени роста 0,0327 наблюдается

в 29 часов 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 корней 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 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 испытуемой 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 биотехнической функции вида

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

где L_r – реактивный отклик семян редиса красного по максимальной длине наибольшего корня у каждого семени при формировании популяционных групп по рангам распределения длины корней в росте за время 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; $a_1 ... a_8$ – параметры отдельных составляющих готовой статистической закономерности, принимающие конкретные значения для конкретных условий проращивания семян.

Таблица 4

Параметры составляющих биотехнической функции рангового распределения длины корней редиса красного за различное время проращивания при поливе речной водой

№ i	Значения параметров составляющей статистической модели								Коэффициент корреляции
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
Исходные семена 50 штук									
	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	
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. 5 видно, что наибольший коэффициент корреляции имеет формула при сроке проращивания в 24 часа. Даже малые остатки получают волновое изменение.

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

$$L = L_1 - L_2;,$$

$$L_1 = L_{\max} \exp(-a_1 r^{a_2}); \quad L_2 = a_3 r^{a_4}, \qquad (5)$$

где L – длина корня проростков редиса красного круглого в количестве 50 штук в чаш-

ке 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; $a_1...a_4$ – параметры статистической закономерности, принимающие конкретные значения для конкретных условий проращивания семян.

В нашем примере получилось уравнение с конкретными параметрами:

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

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 проращивании в течение 24 часов. Для этого нужно сосчитать количество семян при одном и том же ранге, а затем искать биотехнические закономерности по ним. Принимается допущение, что количество семян с одним рангом длины корней будет составлять ***популяционную группу с*** одинаковым откликом на воздействие воды.

В табл. 5 приведены результаты анализа реактивного роста семян по длине корней.

Таблица 5

Анализ реактивности 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 100·13/50 = 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. Единственный лидер определился после 24 ч, потому что к 48 ч проращивания он получил преимущества в росте, по сравнению со следующим по иерархии длины корней проростком в 100·(23 – 21)/23 = 8,70 %.

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

$$n_r = n_{r1} + n_{r2} + n_{r3}; \quad (7)$$

$$n_{r1} = 4,31127\exp\left(0,0060902r^{2,94002}\right);$$

$$n_{r2} = A_1\cos(\pi r / p_1 + 1,27680);$$

$$A_1 = 0,35072r^{4,10370}\exp\left(-1,24079r^{0,62408}\right);$$

$$p_1 = 1,86125 + 0,0021574r^{3,13593};$$

$$n_{r3} = A_2\cos(\pi r / p_3 + 1,57072);$$

$$A_2 = -4054,52\exp\left(-5,93014r^{0,28946}\right);$$

$$p_2 = 1,02144 + 0,0015843r,$$

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_{r1} – первая составляющая модели, показывающая тенденцию достижения одного среди всех лидеров, шт.; n_{r2} – вторая составляющая, показывающая волновое возмущение численности популяционной группы с резко возрастающей амплитудой в конце ряда рангового распределения семян по длине корней проростков, то есть нарастающее биоэнергетическое волнение среди отстающих в росте особей или у аутсайдеров, шт.; n_{r3} – третья составляющая, показывающая волновое возмущение в биоэнергетике среди опережающих в росте особей, которое через 72 часа проращивания пре-

вращается в общую волну, с выделением только одного проростка-лидера, для всего ряда из-за колебательной адаптации всей популяции к внешним условиями развития и роста 50 проростков, шт. Коэффициент корреляции модели (7) очень высок и равен 1 0000. Остатки практически достигли нулевых значений.

Предлагаемый способ обладает простотой, 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 определять сроки проращивания и у других видов растений, в особенности тех культурных растений, которые предполагается выращивать на данной местности с поливом или орошением речной водой или водой из другого водного объекта. При применении тест-растения в виде 50 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 часа, то есть в три раза, а точность 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. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения: Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573-96 (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. № 46. Приложение 10.