УДК 556.53: 005.336.2: 574.522: 519.876

СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ ПО РОСТУ КОРНЕЙ РАСТЕНИЯ

Мазуркин П.М., Евдокимова О.Ю.

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

Изобретение по патенту 2402765 относится к инженерной экологии и может быть использовано при экологическом мониторинге загрязнения поверхностных вод рек и водоемов при оценке качества проб воды методом тестирования, а также при обосновании мероприятий защиты природной среды и ландшафтного природоохранного обустройства территорий водосборных бассейнов и управления источниками загрязнения водохозяйственной системы.

Ключевые слова: сточные воды, река, загрязнение, тестирование, редис красный

WAY OF TEST OF POLLUTION OF WATER ON 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 invention according to the patent 2402765 belongs to engineering ecology and can be used at environmental monitoring of pollution of a surface water of the rivers and reservoirs at an assessment of quality of tests of water by a testing method, and also at justification of actions of protection of environment and landscape nature protection arrangement of territories of catchment basins and managements of sources of pollution of water management system.

Keywords: sewage, river, pollution, testing, garden radish red

Известен способ испытания загрязнения воды по росту корней растения [1]. Известно, что за рубежом общая стоимость комплексного анализа проб воды составляет не менее 1100 долларов. Поэтому такие сложные и дорогие анализы не могут быть применены к пробам воды для орошения и использования в растениеводстве. Кроме того, такая дороговизна не позволяет наладить действенную экологическую экспертизу населением, в частности школьными экологическими кружками и студенческими научно-исследовательскими работами.

Известен также способ испытания загрязнения воды по росту корней растения в соответствии с методикой биотестирования по проращиванию семян [2], включающий равномерную укладку 30 или 50 штук семян редиса красного круглого с белым кончиком или белой горчицы (Sinapis alba) на фильтровальную бумагу в чашке Петри диаметром 10 см (Сводный доклад странчленов СЭВ по теме 7.03.05. Будапешт, 1975, с. 2–4). Эксперимент заканчивается через 72 часа. Измеряют длину корней, исключая из ряда данных пять наименьших значений, включая и не проросшие семена. Если, по сравнению с контрольными, семена в исследуемой воде вообще не проросли, или же длина корней в процентах от контроля ниже 70%, то испытуемая вода не пригодна для орошения. Порог 70% обосновывается тем, что почва, благодаря сорбционной способности, снижает ингибирующее воздействие исследуемой воды. При длине корней в опыте свыше 120% от контроля предполагается, что вода обладает стимулирующими свойствами.

Недостатком является функциональная нестыковка простого по прототипу способа с действиями биохимического анализом на содержание загрязняющих веществ в пробах воды по международным стандартам из аналога. Этот недостаток не позволяет сопоставлять результаты анализа, например, речной воды водозабора, с результатами биотестирования по отечественному стандарту – Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573–96.

Технический результат – расширение функциональных возможностей испытания биотестированием поверхностных вод для комплексного косвенного измерения загрязнения реки, пруда или озера путем предварительного сопоставления действий и результатов биотестирования ростом корней растений с результатами контроля химической, бактериальной и радиационной безопасности воды по международным стандартам.

Этот технический результат достигается тем [3], что способ испытания загрязнения воды по росту корней растения, включающий равномерную укладку семян редиса красного круглого на фильтровальную бу-

магу в чашке Петри, в чашку Петри наливают исследуемую воду, при этом уровень жидкости в чашке должен быть ниже поверхности семян, затем чашку покрывают и помещают для проращивания семян в комнатных условиях, а затем измеряют максимальную длину корней каждого проростка, ***отличающийся тем***, что до проведения испытаний на водном объекте выбирают створ для наблюдений, отбирают пробу воды, проводят её консервацию и подготовку для каждого испытания, причем при отборе каждую пробу воды разделяют по крайней мере на две части, затем анализ и оценку результатов измерений концентрации загрязняющих веществ проводят по одной части пробы воды, а вторую часть каждой пробы воды используют для испытания загрязнения воды.

Пример. Нами предлагается принципиально новый метод быстрой и комплексной оценки качества воды по росту корней растения. Для этого за основу принимается метод проращивания семян в течение 72 ч по стандартам [2]. Пробы воды брали как часть изпроб для ежемесячного анализа речной воды перед городским водозабором «Йошкар-Ола». В табл. 1 приведены данные проращивания в комнатных условиях 50 семян редиса красного круглого в двух чашках Петри – с использованием водопроводной воды и пробы речной воды.

Таблица 1

Изменение длины корня за 72 часа по всем 50 семенам редиса красного

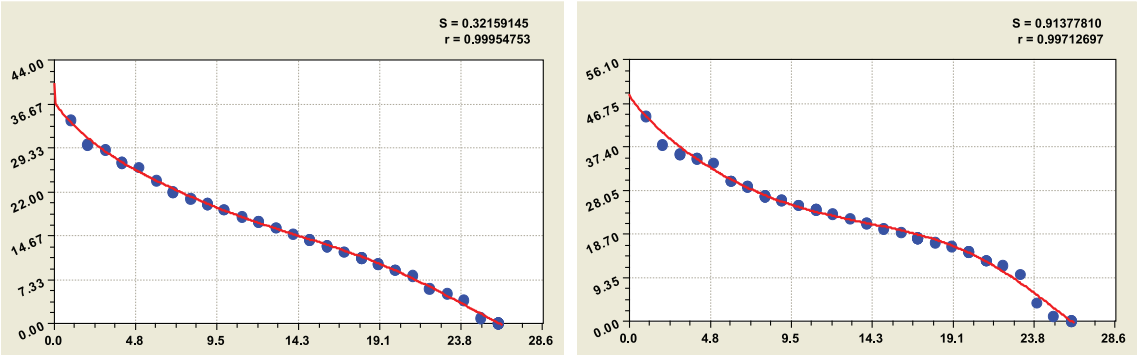
№ п/п	Вода водопроводная		Проба речной воды		№ п/п корня	Вода водопроводная		Проба речной воды	
	Ранг	*L*, мм	Ранг	*L*, мм		Ранг	*L*, мм	Ранг	*L*, мм
1	0	40	0	51	26	16	13	14	21
2	1	34	1	44	27	17	12	14	21
3	2	30	2	38	28	17	12	15	20
4	3	29	3	36	29	18	11	16	19
5	4	27	3	36	30	18	11	17	18
6	4	27	4	35	31	18	11	17	18
7	5	26	4	35	32	18	11	17	18
8	6	24	5	34	33	19	10	17	18
9	7	22	6	30	34	19	10	17	18
10	7	22	6	30	35	20	9	18	17
11	8	21	6	30	36	20	9	19	16
12	9	20	7	29	37	20	9	20	15
13	9	20	7	29	38	21	8	20	15
14	9	20	8	27	39	22	6	20	15
15	10	19	8	27	40	23	5	21	13
16	10	19	8	27	41	24	4	21	13
17	11	18	9	26	42	25	1	21	13
18	12	17	9	26	43	26	0	21	13
19	12	17	10	25	44	26	0	22	12
20	13	16	10	25	45	26	0	23	10
21	13	16	11	24	46	26	0	24	4
22	14	15	11	24	47	26	0	25	1
23	15	14	11	24	48	26	0	26	0
24	15	14	12	23	49	26	0	26	0
25	16	13	13	22	50	26	0	26	0

Первая проба воды была взята из водопровода в квартире. Причем она является питьевой водой после обработки на предприятии «Водоканал» г. Йошкар-Олы из той же речной воды в створе перед городским водозабором, из которой принималась одна часть пробы для анализа на содержание загрязняющих веществ, а другая для проведения биотестирования семенами редиса красного. Поэтому вторая вода для полива в чашке Петри является частью пробы речной воды без соответствующей обработки для превращения в питьевую воду. После полива питьевой водопроводной водой для 50 семян редиса красного была получена (рис. 1) формула вида

$$L = L_1 - L_2; \qquad (1)$$

$$L_1 = 39,9743\exp\left(-0,0060743r^{2,18695}\right);$$

$$L_2 = 7,70040r^{0,10248}\cos\left(\pi r/\left(7,30303+0,60653r^{0,74682}\right)-1,03768\right).$$



Питьевая речная вода (1) Неочищенная речная вода (2)

Рис. 1. Графики закономерностей распределения проростков семян редиса красного круглого через 72 часа

А при поливе семян в другой чашке Петри с речной водой (рис. 1) была получена двухчленная биотехническая закономерность

$$L = L_1 - L_2; \qquad (2)$$

$$L_1 = 48,5583\exp\left(-0,10130r^{0,86029}\right);$$

$$L_2 = 0,0096434r^{2,16431}\cos\left(\pi r/\left(18,24866-1,99097\cdot10^{-5}r^{3,39698}\right)+0,86812\right).$$

Первая составляющая по закону гибели показывает естественное распределение длины корней 50 растений, а вторая характеризует колебательное возмущение популяции семян редиса красного на воздействие поливаемой воды с биохимическими веществами. Остатки после формул (1) и (2) близки к ошибке измерения ±0,5 мм, моделирование прекращается.

Для рангового распределения длины корней предлагается обобщенная формула вида

$$L = L_1 - L_2,$$

$$L_1 = L_{\max}\exp\left(-a_1r^{a_2}\right);$$

$$L_2 = A\cos(\pi r/p \pm a_8);$$

$$A = a_3r^{a_4};\quad p = a_5 \pm a_6r^{a_7}, \qquad (3)$$

где L – длина корня растения в чашке Петри за 72 часа, мм; L_1 – первая составляющая изменения длины корня в зависимости от ранга растения в чашке Петри за 72 часа по закону гибели, мм; L_2 – вторая кризисная составляющая колебательного возмущения растения по длине корня в чашке Петри за 72 часа, характеризующая влияние качества поливаемой воды, мм; $L_{\max}$ – максимальное значение длины корня у одного растения, мм; A – половина амплитуды волнового влияния поливаемой воды на рост растения в ранговом распределении особей, мм; p – половина периода волнового изменения у длины корня особей растения из-за влияния качества поливаемой воды по ранговой шкале, ранг; r – ранг проростка по убыванию длины корня; $a_1 \ldots a_{12}$ – параметры готовой статистической закономерности, принимающие конкретные значения для конкретных условий проращивания семян.

Сравнение проб воды. Все критерии были получены из данных табл. 1 и формул (1) или (2). Результаты сравнения проб питьевой и речной воды приведены в табл. 2.

По максимальной длине речная вода дает проростки на 27,5% больше по фактическим значениям длины корня и 21,5% больше по формулам. Эти значения больше нормы в 20%, поэтому речная вода обладает стимулирующими свойствами по сравнению с водопроводной, то есть той же речной водой после водоподготовки для питьевых нужд. Это факт показывает, что на садовых участках нужно орошать культуры непосредственно речной водой, а не водопроводной. Это снизило бы затраты на водопотребление города.

Таблица 2

Сравнение двух проб воды по длине корня за 72 часа проращивания по всем семенам редиса красного

Критерий сравнения	Обозначение	Размерность	Вид пробы воды		речная / питьевая
			питьевая	речная	
По результатам эксперимента					
Максимальная длина корня	$L_{\max}^{\phi}$	мм	40	51	1,275
Всхожесть семян	В	%	84,00	94,00	1,119
По биотехническим закономерностям (1) и (2)					
Максимальная длина корня	$L_{\max}$	мм	39,97	48,56	1,215
Максимальный ранг	$r_{\max}$	–	29	188	6,483
Конечное значение тренда	$L_1^{r=26}$	мм	0,02	9,13	456,5
Конечная амплитуда волны	$2A_{26}$	мм	21,50	22,26	1,035
Начальный период колебания	$2p_0$	ранг	14,60	36,50	2,500
Конечный период колебания	$2p_{26}$	ранг	28,42	33,94	1,194
Разница в периодичности	$2p_{26} - 2p_0$	ранг	13,82	–2,56	–0,185
Негативный максимум волны при ранге длины корня	$L_{2\max}^{-}$	мм	8,61 $r = 3$	9,17 $r = 26$	1,065
Позитивный максимум волны при ранге длины корня	$L_{2\max}^{+}$	мм	10,23 $r = 16$	3,39 $r = 17$	0,331
Интервал отрицательного волнового влияния воды на рост корня	Δr^{-}	ранг	0…8	0…3, 22…26	1,00
Интервал положительного волнового влияния воды на корни	Δr^{+}	ранг	9…26	4…21	1,00
Значимость первой составляющей статистической модели	$\alpha_{1\min}$	%	2,45	81,80	33,4
Значимость второй составляющей по позитивной адаптации	α_2	%	97,75	18,20	0,186
Позитивная приспособляемость проростков к поливаемой воде	k	–	43,42	0,2224	0,005

Ранг $r = 26$ является предельным для обеих статистических выборок. Дальше ранга № 26 результаты расчетов показывают прогноз при увеличении численности популяции у семян редиса красного. Первая составляющая показывает естественную тенденцию убывания длины корней, нуль при ранге $r_{\max} = 29$. В Excel для речной воды возможен максимальный ранг 188. Возможная длина рангового распределения при поливе речной водой повышается почти в 6,5 раз. Отсюда следует, что питьевая вода суживает популяционную емкость. Начальное значение первой составляющей всегда равно максимальной длине корня. А вот конечное значение основной тенденции (тренда), различна и она показывает преимущество речной воды в 456,5 раз. По второй составляющей биотехнической закономерности **амплитудно-частотная характеристика** поведения популяций семян различна.

Распределение семян по реакции на воду. Рассмотрим реакционную способность семян из множества в 50 шт. Для этого нужно сосчитать из данных табл. 1 количество семян при одном ранге, а затем искать закономерности по ним.

В табл. 3 приведены результаты анализа длины корней.

Принимается допущение, что количество семян с одним рангом будет ***популяционной группой с*** одинаковым откликом на полив.

Для водопроводной воды получена модель (рис. 2) вида:

$$n_r = n_{r1} + n_{r2} + n_{r3}; \qquad (4)$$

$$n_{r1} = \exp\left(0{,}045473\, r^{1{,}02164}\right);$$

$$n_{r2} = A_1 \cos(\pi r / p_1 - 0{,}76895);$$

$$A_1 = -1{,}47911 \cdot 10^{-13} r^{9{,}75755};$$

$$p_1 = 5{,}00800 + 0{,}0038218 r^{1{,}37415};$$

$$n_{r3} = A_2 \cos(\pi r / p_3 - 2{,}89840);$$

$$A_2 = 0{,}31377 r^{0{,}32350} \exp\left(-0{,}24875\, r^{0{,}55470}\right);$$

$$p_2 = 1,37237 + 1,22671 \cdot 10^{-5} r^{2,01443},$$

где n_r – реактивный отклик семян редиса красного при формировании популяционных групп по рангам распределения длины корней в росте за 72 часа, шт.; n_{r1} – первая составляющая модели, начинающаяся с одного лидера из всей популяции семян, 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, шт.; n_{r3} – третья составляющая, показывающая волновое возмущение из-за колебательной адаптации популяции к внешним условиями развития и роста проростков, шт.

Таблица 3

Анализ реактивности на поливаемую воду семян редиса красного

Ранг r	Питьевая вода	Речная вода
	n_r, шт.	n_r, шт.
0	1	1
1	1	1
2	1	1
3	1	2
4	2	2
5	1	1
6	1	3
7	2	2
8	1	3
9	3	2
10	2	2
11	1	3
12	2	1
13	2	1
14	1	2
15	2	1
16	2	1
17	2	5
18	4	1
19	2	1
20	3	3
21	1	4
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	8	3

Из графика на рис. 2. видно, что коэффициент корреляции модели (4) очень высок и равен 0,9383. Иначе ведет популяция семян при поливе речной водой. Вначале получена модель (рис. 2) с коэффициентом корреляции 0,8308 вида:

$$n_r = n_{r1} + n_{r2} + n_{r3} + n_{r4}; \qquad (5)$$

$$n_{r1} = 1;$$

$$n_{r2} = 0,043533 r^{2,06600} \exp\left(-0,00068525 r^{3,41835}\right);$$

$$n_{r3} = 6,30626 \cdot 10^{-7} r^{7,25855} \exp\left(-0,36843 r^{1,00351}\right);$$

$$n_{r4} = A_1 \cos(\pi r / p_1 - 0,66012);$$

$$A_1 = -7,27679 \cdot 10^{-14} r^{15,06576} \exp\left(-0,44512 r^{1,15511}\right);$$

$$p_1 = 0,72135 + 0,0030826 r^{1,56860}.$$

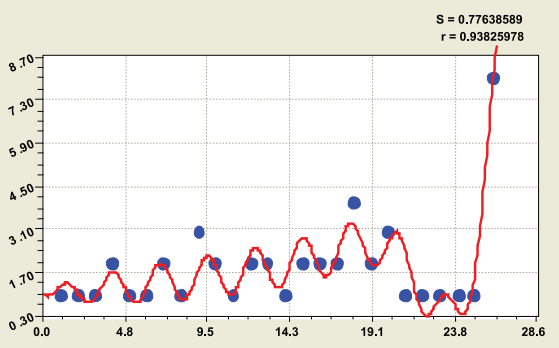
Оказалось, что остатки после модели (4) при поливе семян питьевой водой образуется так называемое «шумовое поле», то есть программная среда не может идентифицировать по этим остаткам новую волновую составляющую. А для остатков после модели (5) были получены дополнительные волны. Для компактной записи примем, что все составляющие изменяются в виде асимметричных вейвлет-сигналов (табл. 5), имеющих единую конструкцию:

$$n_r = \sum_{i=1}^{m} n_{ri};$$

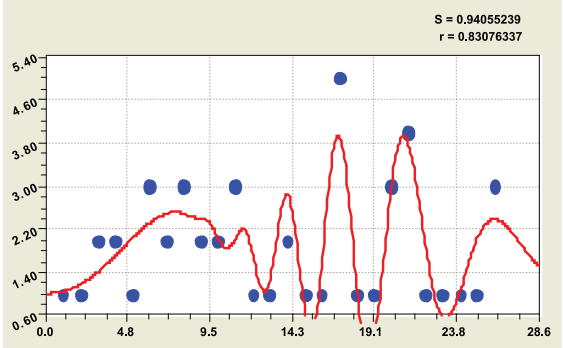
$$n_{ri} = a_{1i} r^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} r^{a_{4i}}) \times$$
$$\times \cos(\pi r / (a_{5i} + a_{6i} r^{a_{7i}}) + a_{8i}), \qquad (6)$$

где n_r – реактивный отклик семян редиса красного при формировании популяционных групп по рангам распределения длины корней в росте за 72 часа, шт.; i – номер составляющей формулы, найденной по ранговому распределению численности популяционных групп у семян редиса красного; m – количество составляющих в статистической модели, шт.; r – ранг проростка по убыванию длины корня; $a_1 ... a_8$ – параметры составляющих статистической закономерности, принимающие конкретные значения для конкретных условий проращивания.

Каждый из всех дополнительных 11 волновых составляющих имеет значение коэффициента корреляции более 0,3. Поэтому можно принять, что частные закономерности имеют достаточную адекватность, чтоб их учитывать в общей модели. Можно считать максимальной погрешностью измерений числа семян по популяционным группам ±0,04 шт.



Питьевая речная вода (4)



Неочищенная речная вода (5)

Рис. 2. Графики распределения семян редиса красного круглого через 72 часа по реакции на пробы воды

Таблица 4

Параметры составляющих биотехнической функции рангового распределения численности популяционных групп по длинам корней редиса красного проста за 72 часа 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}	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,8308
2	0,043533	2,06600	0,00068525	3,41835	0	0	0	0	
3	6,30626e–7	7,25855	9,36843	1,00351	0	0	0	0	
4	–7,27679e–14	15,06576	0,445112	1,15511	0,72135	0,0030826	1,56860	–0,66012	
5	–2,71766e–5	6,04902	0,44472	0,98691	0,59603	0,062160	1,00705	2,07814	0,4163
6	0,41011	0	–0,00020679	2,83434	1,18901	–0,0031406	1,01544	2,68357	0,8033
7	0,0024122	5,99984	1,27614	0,82675	0,54561	0,025671	1,05889	1,85164	0,5811
8	–38556,9	21,86664	11,62223	1,00019	4,07458	0,25573	1,00056	–0,20303	0,5264
9	0,36784	0	10,03408	1	1	0	0	0	0,3005
10	–3,51428e–5	13,85553	2,80852	0,94924	2,12979	0,038594	0,75956	–0,79488	0,4558
11	2,35070e–5	3,12812	0	0	0,94409	0,010994	1,07009	–1,39188	0,8560
12	–0,0013987	1,55771	0	0	1,19155	0,00030631	1,03590	–0,12672	0,8316
13	–8,50173e–8	8,73035	0,67252	0,99119	24,7588	–0,57566	1,00985	4,15803	0,6793
14	7,99368e–12	13,42697	0,79649	1,04510	2,58039	–0,0096851	1,02386	–0,32084	0,6839
15	0,54064	3,74551	1,56417	0,70782	1,00809	–0,0017242	0,60346	–1,50809	0,8161

Симбиоз семян. Первая составляющая формулы (5), равная единице, показывает наличие лидера. Вторая и третья составляющие соответствуют биотехническому закону, предложенному проф. П.М. Мазуркиным. Они четко разделяют популяцию из 50 семян на две части:

а) сильные в согласованном росте корней особи в интервале рангов 0...15 с коэффициентом корреляции близко к 0,7; относительно слабые в симбиотической связи между особями в интервале рангов 16…26 с коэффициентом корреляции всего 0,17. Сумма всех особей первой части равна 28 шт. Таким образом, как видно из рис. 3, можно считать доказанным наличие симбиотической биоэнергетической связи через влияние речной воды между 28 семенами первой части из 50 семян редиса красного.

Симбиотические особи в отдельности по реакции на пробу речной воды без ей очистки для питья дали уравнение тенденции (рис. 3) в виде биотехнического закона

$$n_{r2}^{c} = 1 + 0,091447 r_{1...15}^{1,53918} \exp\left(-0,00024569 r_{1...15}^{3,57513}\right). \quad (7)$$

С волновыми составляющими получили модель (рис. 4) вида

$$n_{rc} = n_{rc1} + n_{rc2} + n_{rc3} + n_{rc4}; \quad (8)$$

$$n_{r1} = 1; \quad n_{rc2} = 0,076363 r_{1...15}^{1,66141} \exp\left(-0,00036855 r_{1...15}^{3,44788}\right);$$

$$n_{rc3} = A_1 \cos(\pi r_{1...15} / p_1 + 0,92549); \quad A_1 = -1,59560 r_{1...15}^{6,88494} \exp\left(-4,69862\, r_{1...15}^{0,55869}\right);$$

$$p_1 = 1,25821; \quad n_{rc4} = A_2 \cos(\pi r_{1...15} / p_2 - 1,88367); \quad A_2 = -0,12009 r_{1...15}^{0,71910};$$

$$p_2 = 2,28798 - 0,083118 r_{1...15}^{0,61318}.$$

Даже очень малые остатки дали волну (рис. 5) с коэффициентом корреляции 0,9888 в виде сложного волнового уравнения

$$n_{rc5} = A_3 \cos(\pi r_{1...15} / p_3 - 1,98122); \qquad (9)$$

$$A_3 = 0,030781 r_{1...15}^{0,30138} \exp\left(-0,00012547\, r_{1...15}^{3,35419}\right); \quad p_3 = 4,27806 - 0,22223 r_{1...15}^{0,42673}.$$

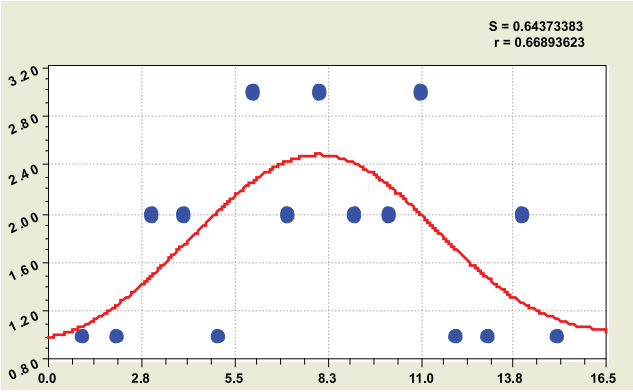


Рис. 3. График распределения семян редиса красного круглого через 72 часа по симбиотической реакции на пробу необработанной речной воды по тренду (7)

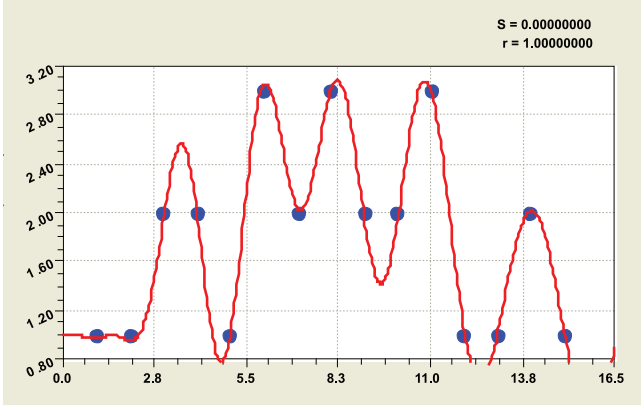


Рис. 4. График распределения семян редиса красного круглого через 72 часа по симбиотической реакции на пробу необработанной речной воды по модели (8)

Отсюда следует, что даже микроскопически малые отклонения численности членов симбиотической группы не более 0,01 шт. по остаткам позволяют получать и дальше волновые биотехнические закономерности. Таким образом, необработанная речная вода явно обладает биоэнергетическими свойствами, позволяющими четко выделить симбиотическую часть от 50 шт. семян в количестве 28 шт. в нашем примере. В питьевой воде при обработке для очищения жизненная энергия воды теряется и поэтому семена редиса красного проращиваются по длине корней значительно хуже.

Предлагаемый способ обладает простотой проведения испытаний речной воды при её применении в орошении и позволяет сопоставлять с результатами биохимического анализа на технические нужды, а также как воду для питьевого назначения. Он значительно повышает точность соотнесения измерений загрязнения в реках и водоемах с результатами тестирования качества

воды растениями. Поэтому предлагаемый способ, после предварительного сопоставления с результатами биохимического анализа, позволяет на некоторое время отказаться от дорогостоящих методов анализа проб воды и заменить их предлагаемым способом комплексной оценки качества воды для орошения сельскохозяйственных культур. Поэтому 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.

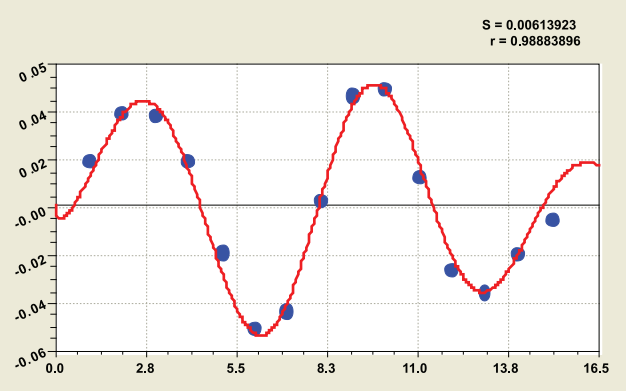


Рис. 5. График распределения остатков численности семян после модели (8) на пробу необработанной для питья речной воды по модели (9)

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.: Издательство «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.

3. Пат. 2402765 Российская Федерация, МПК G 01 N 33 / 18 (2006.01). Способ испытания хагрязнения воды по времени роста корней растения / Мазуркин П.М., Евдокимова О.Ю. (РФ); заявитель и патентообладатель Марийск. гос. тех. ун-т. – № 2009133898/04; заявл. 09.09.2009; опубл. 27.10.2010.