```
%     ответствует свой элемент вектора me и свой элемент вектора sigma);  *
% N - количество реализаций вычислений невязки;                          *
% P - доверительная вероятность для расчета доверительного интервала, со- *
%     держащего среднее значение невязки.                                %
%                                                                        *
% ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ:                                                    *
% HEBmin,HEBmax - соответственно, левая и правая границы доверительного  *
%     интервала, содержащего среднее арифметическое значение невязки,    *
%     обусловленной погрешностью экспериментальных данных;               *
% HEB - вектор, содержащий все значения невязок, полученных в процессе   *
%     сатистического моделирования;                                      *
% HEBavg - среднее арифметическое значение, вычисленное по элементам HEB. *
%*************************************************************************
% НЕОБХОДИМАЯ ВНЕШНЯЯ ФУНКЦИЯ (из Statistics Toolbox):                   *
% tinv - Inverse of Student's T cumulative distribution function.        *
%*************************************************************************
% ПРИМЕЧАНИЕ: Вычисление доверительного интервала производится в предпо- *
% ложении нормального распределения значений невязки. Поскольку это пред- *
% положение в реальности может не выполняться, к величине доверительного *
% интервала следует относиться с осторожностью.                          *
%*************************************************************************
% ЛИТЕРАТУРА: Румшиский Л.З. 1971. Математическая обработка результатов  *
% эксперимента. М.: Наука. С. 29.                                        *
%*************************************************************************
% ПРОГРАММИСТ: Глаголев М.В. 16/02/2020                                  *
%*************************************************************************

Y =[59     130    0.041
    65     130    0.057
    80     130    0.068
   106     126    0.089
   150     120    0.107
   213     109    0.127
   314      90    0.140
   479      63    0.140
   711      36    0.134
   899       0    0.122
   947       0    0.116];

[m,n] = size(Y); % Количество строк (m) и столбцов (n) матрицы Ye
YAvg = mean(Y); % Характерные значения переменных

for k=1:N
    y=randn(m,n); % Генератор нормально распределенных случайных чисел
    HEB(k)=0;
    for i=1:m for j=1:n HEB(k)=HEB(k)+abs(me(j)+sigma(j)*y(i,j))/YAvg(j);
              end %for j...
    end %for i...
end %for k...

% Расчет доверительного интервала в предположении нормального распределения
HEBavg=mean(HEB); x=tinv(1-0.5*(1-P),N-1)*std(HEB)/N^0.5;
HEBmin=HEBavg-x; HEBmax=HEBavg+x;
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2: MATLAB- ФУНКЦИЯ Ugodchikov3
APPENDIX 2: MATLAB FUNCTION Ugodchikov3

```
function HEB=Ugodchikov3(coef)
%*************************************************************************
%                        ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ                       *
%     СТРУКТУРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ МИКРООРГАНИЗМОВ:   *
%                      dX/dt = m*S*X*R/[(Kr+S)*Rm];                      *
```

```
%                     dS/dt = -m*S*X*R/[(Kr+S)*Rm*Y];                    *
%                    dR/dt = [Rm*(Kr+S)/(Ks+S) - R]/T;                   *
%И РАСЧЕТ НЕВЯЗКИ МЕЖДУ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ КРИВЫМИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ*
%***********************************************************************
% ВЫЗОВ: HEB=Ugodchikov3(coef)                                          *
%                                                                       *
% ВХОДНОЙ ПАРАМЕТР: coef - коэффициент Ks в вышеприведенной системе урав- *
% нений (другие коэффициенты определены из экспериментальных данных в    *
% блоке КОЭФФИЦИЕНТЫ МОДЕЛИ).                                            *
%                                                                       *
% ВЫХОДНОЙ ПАРАМЕТР: HEB - невязка между интегральными кривыми и экспери- *
% ментальными данными, представляющая собой сумму нормированных квадратов *
% отклонений (нормирование осуществляется путем деления квадратов отклоне-*
% ний на среднее значение соответствующей переменной, вычисленное по экс- *
% периментальным данным).                                                *
%                                                                       *
% ПРОГРАММИСТ: Глаголев М.В. 10/02/2019. (Версия 1.0)                   *
%***********************************************************************
% ПРИМЕР: при вызове                                                    *
%                                                                       *
% HEB=Ugodchikov3(5)                                                    *
%                                                                       *
% должен быть выдан результат: Rm=0.1297  mu=0.7715  T=1.3081  HEB=4.5821 *
% и выведен график, содержащий экспериментальные и расчетные данные (на   *
% графике X и S приведены в [мг/л], а R – в [мгРНК/гБиомассы]).          *
%***********************************************************************

% ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ:
% X[мг/л] S[мг/л] R[гРНК/гБиомассы] t(Абсцисса, [час])
Ye=[53     130    0.040            0
    59     130    0.041            0.5
    65     130    0.057            1
    80     130    0.068            1.5
   106     126    0.089            2
   150     120    0.107            2.5
   213     109    0.127            3
   314      90    0.140            3.5
   479      63    0.140            4
   711      36    0.134            4.5
   899       0    0.122            5
   947       0    0.116            6];

[m,n] = size(Ye); % Количество строк (m) и столбцов (n) матрицы Ye
time = Ye(:,n)';  % Моменты времени вывода решения

% КОЭФФИЦИЕНТЫ МОДЕЛИ
Ks=coef; Y=6.73; Kr=11.5;
Rm=0.14*(Ks+76.5)/88, mu=5.95*Rm, T=(137.5*Rm/(Ks+126)-0.089)/0.036 % !!!!!!!
cAbs(1)=Rm; cAbs(2)=mu; cAbs(3)=T; cAbs(4)=Y; cAbs(5)=Kr; cAbs(6)=Ks;

Y0  = [Ye(1,1)   % Начальные значения: концентрации биомассы
       Ye(1,2)   %                                 лимитирующего субстрата
       Ye(1,3)]; %                                 РНК

YeAvg = mean(Ye); % Характерные значения переменных

[T,Y] = ode23tb(@Monod,time,Y0,[],cAbs); % Обращаемся к решателю ОДУ

% Вычисление невязки между экспериментальными данными и расчетом по модели
HEB=0; for i=2:m for j=1:n-1 HEB=HEB+abs(Y(i,j)-Ye(i,j))/YeAvg(j); end, end

plot(T,Y(:,1),'k',T,Y(:,2),':k',T,1000*Y(:,3),'--k',T,...
    Ye(:,1),'ok',T,Ye(:,2),'xk',T,1000*Ye(:,3),'*k');
```

```
xlabel('Time, h'), ylabel('Concentration') %Оси координат


%*************************************************************************
%             ФУНКЦИЯ, ЗАДАЮЩАЯ ПРАВУЮ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ            *
%*************************************************************************
function dy=Monod(t,z,cAbs)
Rm=cAbs(1); mu=cAbs(2); T=cAbs(3); Y=cAbs(4); Kr=cAbs(5); Ks=cAbs(6);
X=z(1); S=z(2); R=z(3); % Обозначаем переменные для удобства
dy=[mu*S*X*R/(Kr+S)/Rm          % Уравнения динамики концентраций: биомассы
    -mu*S*X*R/(Kr+S)/Rm/Y       %                   лимитирующего субстрата
    (Rm*(Kr+S)/(Ks+S) - R)/T];  %                                  РНК
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3: MATLAB-ФУНКЦИЯ Ugodchikov2
APPENDIX 3: MATLAB FUNCTION Ugodchikov2

```
function HEB=Ugodchikov2(coef)
%*************************************************************************
%                         ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ                       *
%     СТРУКТУРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ МИКРООРГАНИЗМОВ:    *
%                      dX/dt = m*S*X*R/[(Kr+S)*Rm];                      *
%                     dS/dt = -m*S*X*R/[(Kr+S)*Rm*Y];                    *
%                    dR/dt = [Rm*(Kr+S)/(Ks+S) - R]/T;                   *
%И РАСЧЕТ НЕВЯЗКИ МЕЖДУ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ КРИВЫМИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ*
%*************************************************************************
% ВЫЗОВ: HEB=Ugodchikov2(coef)                                           *
%                                                                        *
% ВХОДНОЙ ПАРАМЕТР: coef - вектор коэффициентов [Rm m T Y Kr Ks] в выше-  *
% приведенной системе уравнений.                                         *
%                                                                        *
% ВЫХОДНОЙ ПАРАМЕТР: HEB - невязка между интегральными кривыми и экспери- *
% ментальными данными, представляющая собой сумму нормированных квадратов *
% отклонений (нормирование осуществляется путем деления квадратов отклоне-*
% ний на среднее значение соответствующей переменной, вычисленное по экс- *
% периментальным данным).                                                *
%                                                                        *
% ПРОГРАММИСТ: Глаголев М.В. 06/04/2020. (Версия 1.0)                    *
%*************************************************************************
% ПРИМЕР: при вызове                                                     *
%                                                                        *
% HEB=Ugodchikov3([0.1297 0.7715 1.3081 6.73 11.5 5])                    *
%                                                                        *
% должен быть выдан результат:   HEB=4.5848.                             *
%*************************************************************************

% ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ:
% X[мг/л] S[мг/л] R[гРНК/гБиомассы] t(Абсцисса, [час])
Ye=[53     130    0.040             0
    59     130    0.041             0.5
    65     130    0.057             1
    80     130    0.068             1.5
   106     126    0.089             2
   150     120    0.107             2.5
   213     109    0.127             3
   314      90    0.140             3.5
   479      63    0.140             4
   711      36    0.134             4.5
   899       0    0.122             5
   947       0    0.116             6];

[m,n] = size(Ye); % Количество строк (m) и столбцов (n) матрицы Ye
time = Ye(:,n)';  % Моменты времени вывода решения
```