

**Б.А. Мүкүшев^{1*}, С.Б. Мукушев¹, А.Б. Мырзагалиева²,
Б.А. Прмантаева³, Н.М. Омарова³**

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан

²Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

³Л.Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

*Байланыс үшін автор: mba-55@mail.ru

**Экологиялық тізбектер және олардың
математикалық-компьютерлік моделдері**

Аңдатпа. Мақалада микроағзалар деңгейіндегі экологиялық тізбектердің құрылымын және эволюциясын математикалық және компьютерлік модельдермен зерттеу мәселесі қарастырылған. Биологиялық кинетика заңдары негізінде экологиялық тізбектерді сипаттайтын бірнеше математикалық модельдер құрылып, осы модельдер көмегімен компьютерлік эксперименттер жасалған. Бактериялардың, субстраттардың және қарапайымдардың концентрацияларының уақытқа тәуелділігін сипаттайтын математикалық модельдер жасалды. Mathcad пакеті көмегімен математикалық модельдердің графиктік шешімдері алынды және талданды.

Қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығы өзгерген жағдайдағы экологиялық тізбектің күйлерінің графиктері құрылды және осы күйлер зерделенді. Mathcad ортасында алты түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын математикалық модельдер жасалды. Бактерияның әр түрінің концентрациясын сипаттайтын параметрлер белгіленді. Ол параметрге мыналар жатады: бактериялардың қанығу тұрақтысы, қарапайымдардың қанығу тұрақтысы, бактериялардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы, қарапайымдардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы, қарапайымдардың өсуінің экономикалық коэффициенті. Бактерияның концентрациясының динамикасын сипаттайтын математикалық модельдердің графиктік шешімі талданды және қорытынды жасалды.

Бактериялар түрлері арасындағы бәсекелестіктің динамикасын көрсететін компьютерлік эксперименттер жасалды. Оң түрлі бактериялар колониясының өзара бәсекелестігін сипаттайтын сандық және графиктік нәтижелер алынды. Компьютерлік программа Microsoft Visual Basic 6.0. ортасында жасалған.

Түйін сөздер: экологиялық тізбектер, математикалық және компьютерлік модельдер, Mathcad пакеті, бактериялардың, субстраттардың және қарапайымдардың концентрациялары, «продуцент - консумент» жүйесі.

DOI: 10.32523/2616-7034-2023-143-2-54-65

Кіріспе

Экологиялық тізбек (немесе экологиялық пирамида) - экожүйедегі барлық деңгейдегі (шөпқоректілер, жыртқыштар, басқа жыртқыштармен қоректенетін түрлер) продуценттер және консументтер арасындағы қатынастың графикалық бейнесі. Экологиялық тізбектің графикалық модельдерінің трофикалық құрылымының пирамидалық түрін 1928 жылы Ч. Элтон жасаған [1].

Экологиялық тізбектің төменгі сатысында продуценттер немесе автотрофтар орналасқан. Олар қарапайым организмдер қатарына жатады және молекулаларды синтездей отырып органикалық заттарды өндіреді. Олар бүкіл тізбекті басқа сатыларымен салыстырғанда ең көп энергия өндіре отырып қоректендіреді.

Продуценттер - Жер бетіндегі барлық тіршіліктің негізі. Бірде-бір қоректендіру желісі оларсыз қызмет жасай алмайды. Консументтер (гетеротрофтар) – бұл қоректенудің

тұтынушылық сатысы. Өздігінен қоректік зат өндірмейді. Олардың ағзаларындағы зат алмасу өндірушілерді немесе олардың қалдықтарын сіңіру арқылы жүреді [2].

Ұсынылып отырған жұмыс Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университетінің Хабаршысының биологиялық ғылымдар сериясының 2022 жылы 1 санында жарық көрген «Микроағзаларлардың популяциясын зерттеуде модельдер әдісін қолдану» атты мақаланың жалғасы болып табылады [3].

Зерттеу материалдары мен әдістері

Бірнеше организмдер түрінен тұратын күрделі жүйелердегі экологиялық тізбектің математикалық моделін жасайық. Мұндай экологиялық тізбекте бір организм кейбір субстратты қорек ретінде пайдаланса, өзі кейбір организмнің өздері қоректік субстратқа айналады [4].

«Бактериялар + қарапайымдар» жүйесі үшін теңдеулер құрамыз. Бұл жүйеде қарапайымдар бактериялармен қоректенеді, ал бактериялар - өсімдіктердің тамырларынан бөлінген заттармен, өсімдік шірінділерімен (гумус) және сол қарапайымдардың қалдықтарымен қоректенеді.

Біз бастапқы бактерия мен субстраттың концентрацияларына сүйене отырып кез келген уақыт сәтіндегі осы айнымалылардың шамаларын есептеуге қажетті $R_{x1} = \mu_m \cdot \frac{x_2 x_1}{x_2 + K_1}$, $R_{x2} = - \mu_m \cdot \frac{x_2 x_1}{(x_2 + K_1) Y}$ теңдеулерін қарастырып өткенбіз [3]. Осы экологиялық тізбектің математикалық моделін жасау үшін қарастырған теңдеуді жаңа мүшелермен толықтырамыз. Бірінші енгізетін мүшеміз – қарапайымдардың биомассасының концентрациясы (x_3). Зерттеуді R_{x1} теңдеуінен бастаймыз. Бактерияның концентрациясының өзгеру жылдамдығы аддитивтілік заңы бойынша екі жылдамдықтың қабаттасуына байланысты:

- біріншіден, бактериялар бұрынғыша x_1 субстратпен қоректенеді;
- екіншіден, өздері қарапайымдардың қорегі болып табылады. Сондықтан

$$R_{x1} = \mu_m \cdot \frac{x_2 x_1}{x_2 + K_1} - \mu_3 \cdot \frac{x_1 x_3}{(x_1 + K_2) Y_3} \quad (1)$$

Мұнда жаңа тұрақтылар пайда болды: μ_3 – қарапайымдардың меншікті өсу жылдамдығы, K_2 - қарапайымдар бактериялармен қоректенген кездегі қанығу коэффициенті, Y_3 - қарапайымдардың экономикалық коэффициенті.

S.E. Jorgensen өз еңбегінде зоопланктондардың кинетикалық параметрлерін баяндаған [5]. Осыларды біз қарапайымдардың өсу динамикасын сипаттау үшін пайдаланамыз. Орташа $K_2 = 0,5$ мг/л, $Y_3 = 0,6$. Қарапайымдардың ең үлкен меншікті өсу жылдамдығын ($\mu_3 = 0,04 \frac{1}{\text{сағат}}$) бактерияға қарағанда 10 еседей кем аламыз.

Енді қарапайымдардың концентрациясының өзгеру жылдамдығының теңдеуін талдайық. Егер теңдеуде тек қана бір құрылым – қарапайымдардың бактериямен қоректенуі нәтижесінде олардың өзгерісі оң шама болса, онда қарапайымдардың биомассасы аз уақыт ішінде аса үлкен санмен өрнектелер еді (Мальтус заңын еске түсірейік) [6]. Ал нақты жағдайда қарапайымдар омыртқасыздардың қорегіне айналатынын білеміз. Тіпті, қарапайымдармен қоректенетін жыртқыштар жоқ болса да, олардың санын табиғи жойылу да шектейді.

Мысалы, биологиялық түрдің жыл басындағы саны 10 болсын. Жыл аяғында олардың біреуі жойылуға ұшырап, саны 9 болды делік. Сонда өлім-жітім жылдамдығы 1 түр/жыл болады. Ал біз 100 биологиялық түрді қарастырсақ - олардың жойылу жылдамдығы 10 түр/жыл болады. Ал меншікті жылдамдығы екі жағдайда бір шамаға тең - $0,1 \frac{1}{\text{жыл}}$ болады. Осы сипаттаманы (жойылудың меншікті жылдамдығы) биокинетикада кең түрде қолданады.

Сөйтіп, бір жағынан, қарапайымдардың өсуін, екінші жағынан олардың жойылуға ұшырауын ескере отырып мынандай теңдеу құраймыз:

$$R_{x3} = \mu_3 \cdot \frac{x_1 x_3}{x_1 + K_2} - m \cdot x_3 \quad (2)$$

m - жойылудың меншікті жылдамдығы. В.А. Вавилин, В.Б. Васильевтің зерттеуінше бактериялардың жойылуының меншікті жылдамдығы олардың өсуінің меншікті жылдамдығынан 10 еседей кем [7]. Демек біздің қарапайымдар үшін $m = 0,004 \frac{1}{\text{сағат}}$.

Ең соңында субстраттың концентрациясының өзгеру жылдамдығының теңдеуін қарастырайық. Ол теңдеу 4 құрылымнан тұрады:

1. Теріс компонент – қоректік субстраты бактериялардың пайдалануы.
2. Теріс компонент – жауын-шашынның әсерінен топырақ құрамындағы органикалық заттарды шайылуы.
3. Өсімдік шірінділерінің және өсімдік тамырларының бөлген заттары есебінен қоректік субстраттардың экологиялық жүйеге енуінің жылдамдығы (B) – оң шама.
4. Жойылуға ұшыраған қарапайымдардың органикалық затқа айналып топырақты байытуы.

Сөйтіп біз мынандай теңдеуді аламыз:

$$R_{x2} = -\mu_m \cdot \frac{x_2 x_1}{(x_2 + K_1) Y} - D \cdot x_2 + B + m \cdot x_3 \quad (3)$$

B шама әр түрлі болады және оны әдебиеттерден аламыз [8]. Алдымен $B = 0,005 \text{ мг/л/сағат}$ болған жағдайды қарастырамыз. Ал D шама жауын-шашынның әсерінен топырақ құрамындағы органикалық заттарды шайылуын сипаттайды. Оны [6] әдебиеттен аламыз: $D = 0,0005 \frac{1}{\text{сағат}}$.

Зерттеу нәтижелері және талдау

Бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттардың өзара әсерлесуі.

Бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттардың өзара әсерлесу кезіндегі олардың концентрацияларының уақытқа тәуелділік теңдеулеріне сәйкес ((1), (2), (3) теңдеулер) Matchad 15 ортасында жасалған бағдарламаны ұсынамыз (Листинг 1). Бағдарлама көмегімен қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығын өзгерту кезіндегі ($0,005 \text{ мг/л/сағат}$; $0,009 \text{ мг/л/сағат}$; $D = 0,0005 \frac{1}{\text{сағат}}$) және 0 -ден 6000 сағатқа дейінгі уақыт аралығы үшін экологиялық тізбектің күйлерін сипаттайтын графиктерді алдық (1а және 1б суреттер) [9,10].

```

ORIGIN := 1
*****
B := 0.005 Қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығы
D := 0.0005 Қоректік субстраттың шайылу жылдамдығы
K1 := 2.3 Бактериялардың қанығу тұрақтысы
*****
K2 := 0.5 Қарапайымдардың қанығу тұрақтысы
m := 0.004 Қарапайымдардың өлім-жітімінің меншікті жылдамдығы
*****
Mm := 0.3 Бактериялардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы
M3 := 0.04 Қарапайымдардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы
Y := 0.5 Бактериялардың өсуінің экономикалық коэффициенті
Y3 := 0.6 Қарапайымдардың өсуінің экономикалық коэффициенті

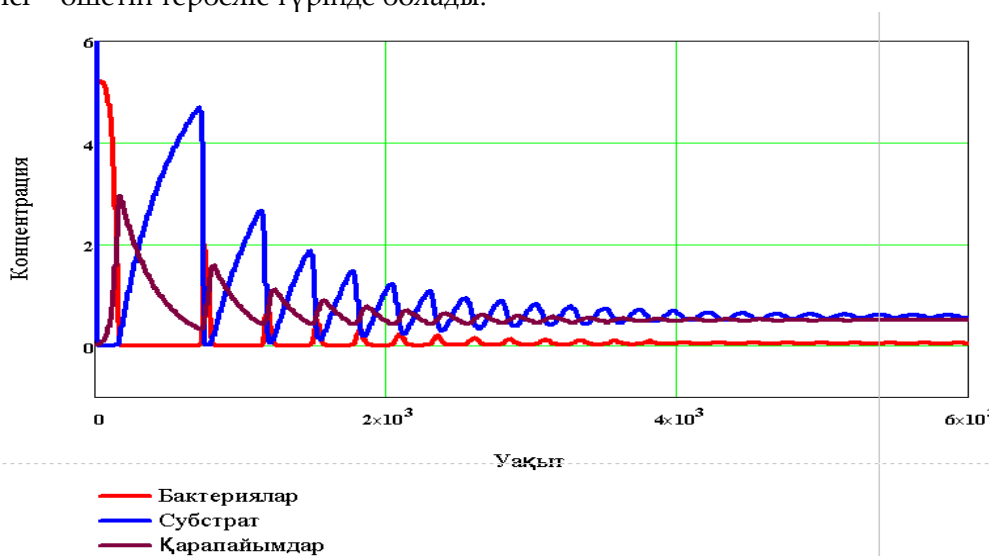
x0 :=  $\begin{pmatrix} 0.2 \\ 10 \\ 0.02 \end{pmatrix}$  Өзара тәуелді айнымалылардың бастапқы шамасы

F(t, x) :=  $\begin{bmatrix} Mm \cdot \left( \frac{x_2 \cdot x_1}{x_2 + K1} \right) - M3 \cdot \left[ \frac{x_1 \cdot x_3}{(x_1 + K2) Y3} \right] & \text{Бактерия биомассасының} \\ -Mm \cdot \left[ \frac{x_1 \cdot x_2}{(x_2 + K1) \cdot Y} \right] - D \cdot x_2 + B + m \cdot x_3 & \text{төңдеуі} \\ M3 \cdot \left[ \frac{x_1 \cdot x_3}{(x_1 + K2)} \right] - m \cdot x_3 & \text{Субстраттың төңдеуі} \\ & \text{Қарапайымдардың төңдеуі} \end{bmatrix}$ 

X := rkfixed(x0, 0, 6000, 10000, F) Рунге – Кутты әдісі
    
```

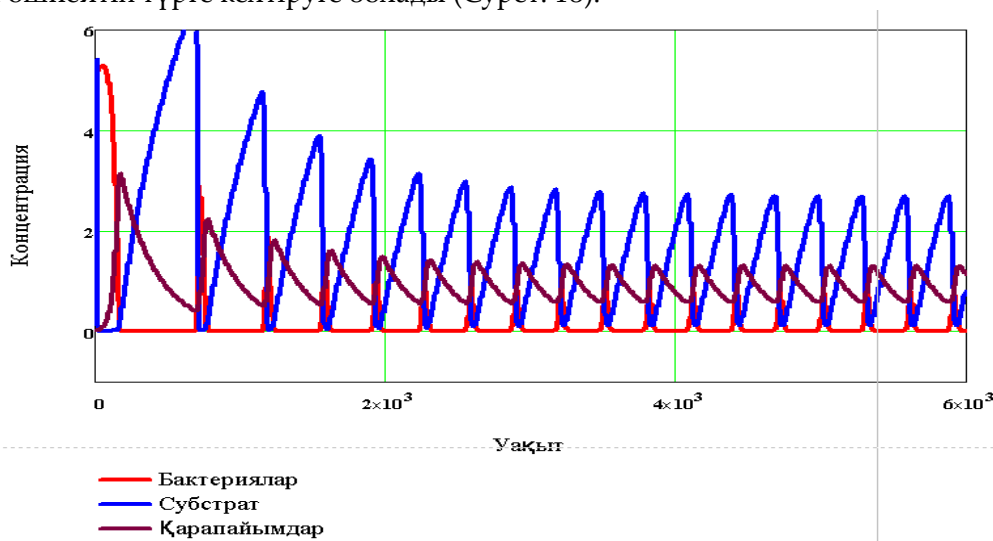
Листинг 1

Компьютерлік эксперимент барысында суретте көрсетілген график салынады. 1а суреттен көрініп тұрғандай, бұл жүйе бактериялардың биомассасы мен субстраттар концентрациялары арасындағы тәуелділікке қарағанда әлдеқайда күрделі заңдылықты көрсетеді [3]. Эксперимент нәтижесінде бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттың концентрациясының уақытқа тәуелді өзгерісі - өшетін тербеліс түрінде болады.



Сурет 1а. $B=0,005$ мг/л/сағат болғандағы бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттың концентрациясының уақытқа тәуелді өзгерісі

Қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығын шамалы арттырсақ ($V=0,009$ мг/л/сағ) бұл тербелістерді өшпейтін түрге келтіруге болады (Сурет. 16).



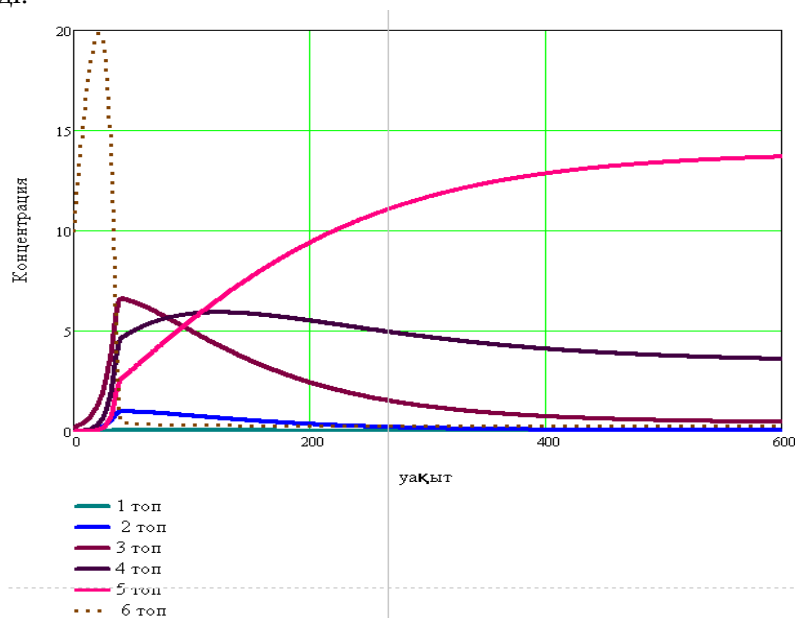
Сурет 16. $V=0,009$ мг/л/сағат болғандағы бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттың концентрациясының уақытқа тәуелді өзгерісі

Тербелістер сыртқы периодты әсердің себебінен емес (мысалы, температураның маусымдық немесе тәуліктік өзгеруі), жүйенің ішкі элементтерінің өзара әрекеттесуінен болатыны түсінікті. Бұл тербелмелі құбылыс қалай пайда болады? Бұл құбылысты былай түсіндіруге болады. Бактериялардың концентрациясының өсуі процестің басында қарқынды болады, өйткені қоректік субстрат өте көп, ал бактериялармен қоректенетін қарапайымдардың (жыртқыштардың) концентрациясы әлі де аз және олардың бактериялармен қоректенуі байқалмайды. Бактериялардың биомассасының тез артуына байланысты және қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығы тұрақты болғандықтан біраз уақыт өткеннен кейін бактериялардың көбею жылдамдығы күрт төмендейді. Ал жыртқыштардың концентрациясының өсу қарқыны біртіндеп арта түседі. Ақыр соңында жыртқыштардың бактериялармен қоректену жылдамдығы олардың көбею жылдамдығынан асып түседі. Осыдан кейін бактериялардың концентрациясы төмендей бастайды.

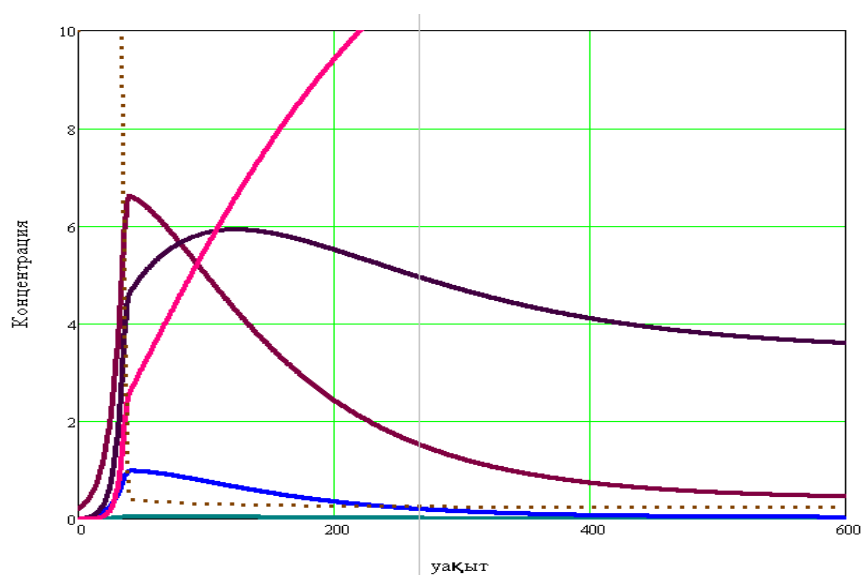
Жүйеге кіретін барлық субстраттармен саны күрт азайып кеткен бактериялар қоректені алмайтындықтан, субстраттың концентрациясы арта бастайды. Жыртқыштардың концентрациясы әлі де артып келеді, бірақ көп ұзамай оларға қорек жетіспейді - өйткені олар бактериялардың көп бөлігін жеп қойды. Бұл жағдайда қарапайымдардың жойылу жылдамдығы олардың көбею жылдамдығынан асып түседі және қарапайымдардың концентрациясы төмендей бастайды. Қарапайымдардың концентрациясы өте аз болған кезде, тірі қалған аздаған бактериялар үнемі жүйеге еніп жатқан және үлкен шамаға жеткен субстраттармен қоректеніп көбейе бастайды. Осы қарастырылған цикл периодты түрде тағы да қайталанады. Сөйтіп бактериялардың, қарапайымдардың және субстраттың концентрацияларының уақытқа тәуелді өзгерісі - өшпейтін тербеліс түріне көшеді. Бұл тербелмелі құбылыс табиғаттағы *автотербелістер* деп аталады [11,12].

Компьютерлік эксперимент көмегімен экологиялық жүйедегі бактериялардың әр түрлері арасындағы бәсекелестігін зерттеу. Mathcad 15 ортасында 6 түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын бағдарлама жасалып, нәтижесін графиктер түрінде алдық (Сурет 2а). Әрбір бактерияның концентрациясының уақытқа тәуелділігін сипаттайтын теңдеулері әр түрлі болды. Өйткені әр бактерия үшін алынған параметрлер (бактериялардың қанығу

тұрақтысы, қарапайымдардың қанығу тұрақтысы, бактериялардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы, қарапайымдардың меншікті өсу жылдамдығының максимал шамасы, қарапайымдардың өсуінің экономикалық коэффициенті), басқа бактериялардың концентрациясының динамикасын сипаттайтын теңдеудегі параметрлердің сан мәнінен басқаша еді.



Сурет 2а. Алты түрлі бактериялар арасындағы бәсекелестікті сипаттайтын графиктер



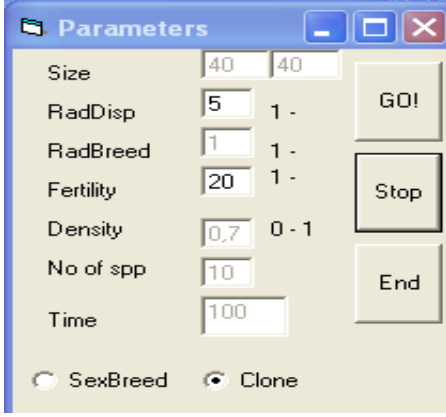
Сурет 2б. Үлкен масштабтағы бәсекелестікті сипаттайтын графиктер

2б суреттегі графиктер әр түрлі бактериялардың концентрациясының уақытқа тәуелділік динамикасын үлкен масштабта көрсетеді. Бұл графиктен әр түрлі бактериялардың табиғи сұрыпталуын жақсы көруге болады.

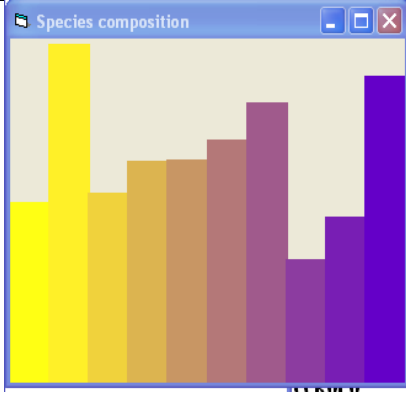
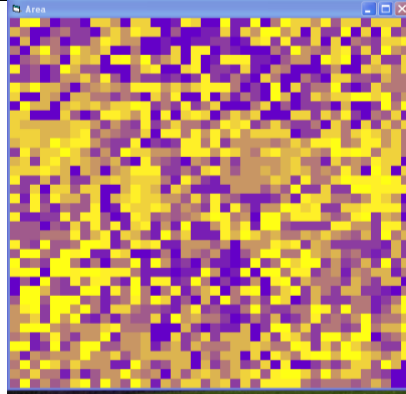
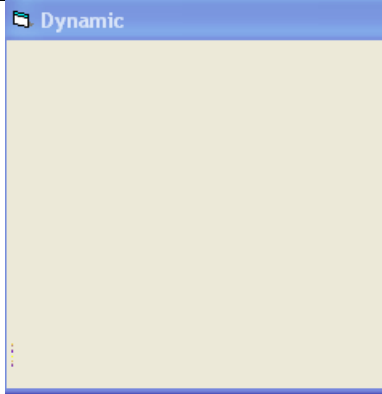
Графиктерді талдау барысында мынандай қорытынды жасаймыз: 1-інші топ бактериялары бірден жойылып кетеді; 2-інші топ бактерияларының концентрациясы аз уақыт ішінде өсті де, жойыла бастады; 3-інші топ бактерияларының концентрациясы аз уақыт ішінде өсті де, азая бастады; 4-інші топ бактерияларының концентрациясы аз уақыт ішінде өсті де, азая

бастады; 5-інші топ бактерияларының концентрациясы аз уақыт ішінде тез өсті. Белгілі бір уақыттан кейін бактерияларының санының өсу жылдамдығы уақытқа тәуелді азая бастады; Аз уақыттың ішінде 6 топтың бактерияларының саны өте үлкен шамаға жетті. Сонан кейін шамалы уақыттың аралығында бұл бактериялардың концентрациясы 60 еседей азайды. Қалған уақытта бактериялар концентрациясы тұрақты болып қалды.

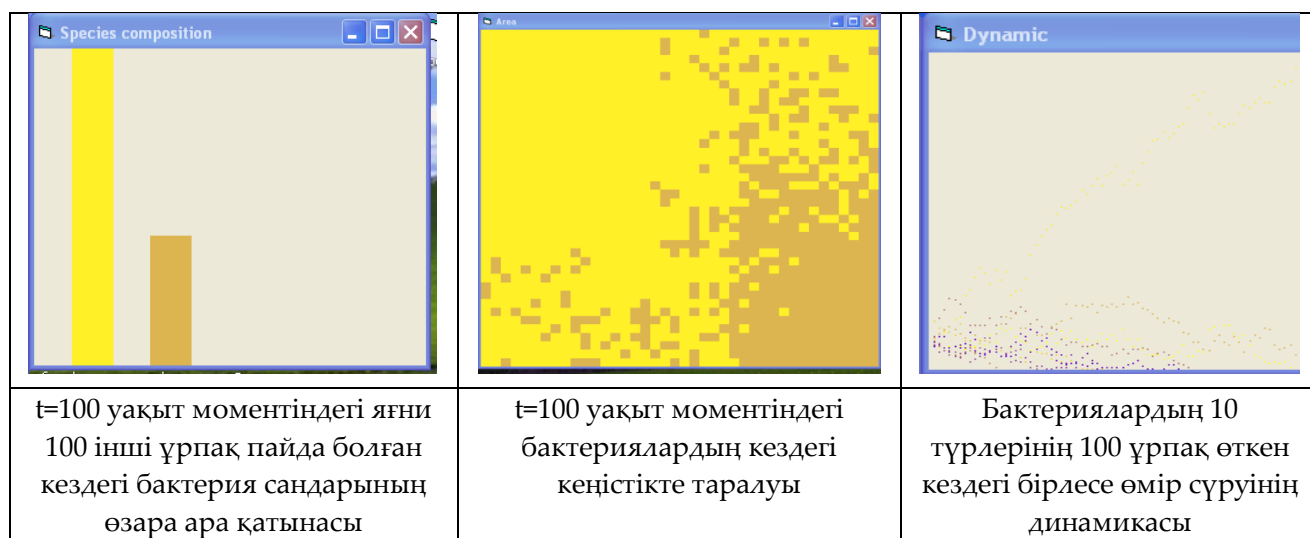
Компьютерлік модель көмегімен бактериялардың әр түрлері арасындағы бәсекелестікті зерттеу. Жоғарыдағы қарастырылған бактериялар түрлерінің биомассасының көбеюін және табиғи сұрыпталуын сипаттайтын компьютерлік модель жасалды. 3 суретте 10 түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын компьютерлік модельдеуінің фрагменті көрсетілген. Компьютерлік программа Microsoft Visual Basic 6.0. ортасында жасалған.

	<p>Size – бактериялар популяциясы орын алатын алаңның өлшемі беріледі.</p> <p>RadDisp – уақыттың бір тактісіндегі организмнің ең үлкен қашықтыққа таралуы.</p> <p>RadBreed – жыныстық көбею жағдайында аталық және аналықтардың бірін-бірі іздеу радиусы.</p> <p>Fertility – ұрпақтар саны.</p> <p>Density – бір ұрпақтың уақытындағы таралған аймағының үлесі.</p> <p>No of spp – старттық позициядағы түрлердің саны.</p> <p>Time – ұрпақтар саны.</p> <p>SexBreed – жыныстық көбею.</p> <p>Clone – жыныстық емес көбею.</p>
<p>Компьютерлік моделдеудің интерфейсі</p>	<p>Модель Go кнопкасын басқанда жұмыс істейді, тоқтату үшін Stop кнопкасын басамыз немесе жұмысты аяқтау үшін End кнопкасын басамыз.</p>

1) Нөлдік ұрпақ кезеңінде

		
<p>Старттық жағдайдағы әрбір түрдің бактерия сандарының өзара ара қатынасы (t=0)</p>	<p>10 түрді құрайтын бактериялардың t=0 кездегі кеңістікте таралуы</p>	<p>t=0 уақыт моментіндегі әр түрдің бактерияларының санының графигі</p>

2) 100 ұрпақтан кейін



Сурет 3. 10 түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын компьютерлік модельдеу

Осы модельдегі барлық биологиялық түрлердің концентрациясының өзгеру заңдылықтары келесі алгоритммен сипатталады:

1. Уақыттың әр тактісінде әрбір түр жыныссыз немесе жыныстық жолмен көбейеді.

2. Бірінші жағдайда, биологиялық түр бірнеше эквивалентті ұрпақтарға бөлінеді, олардың саны параметрлік түрде беріледі (**Fertility** параметрі). Әрбір ұрпақ **RadDisp** параметрімен анықталған белгілі бір радиуста орналасады. Сонымен қатар, егер таңдалған аймақ бос болса, биологиялық түр бірден сол жерге орналасады. Егер аймақ бос болмаса, онда 0,5 ықтималдықпен биологиялық түр сол жерге орналасып алған басқа биологиялық түрді ығыстырады немесе өзі жойылып кетеді. Екінші жағдайда, биологиялық түр берілген радиуста (**RadBreed** параметрі) айналаны сканерлейді және нақты серіктесті тапқаннан кейін ұрпақтарды дүниеге әкеледі және бұл ұрпақтар сол аймақта қоныстанады. Ұрпақтардың саны мен таралу сипаты жыныссыз көбеюмен бірдей.

3. Жыныссыз немесе жыныстық көбеюден кейін аталық және аналық түрлер өліп, учаскелерді босатады.

10 түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын компьютерлік модельдеу нәтижелерін зерделей отырып мынандай қорытынды жасауға болады: t=100 уақыт моменті яғни 100-інші ұрпақ пайда болған уақыт өткеннен кейін бәсекелестікке тек екі түрлі бактериялар ғана төтеп бере алады екен. Осы екі түрдің ішінде сары диаграммамен белгіленген бактериялар басым түседі.

Қорытынды

Біздің жұмысымызда микроағзалар деңгейінде болып жатқан биологиялық процестердің күрделі құрылымын сипаттайтын және осы процестердің даму бағытын анықтайтын математикалық және компьютерлік модельдер жасалып, олар микроағзалар әлемінде экологиялық тізбектің болу шартын анықтауда қолданылды.

Биологиялық процестердің даму динамикасын, микроағзалардың күйін және экологиялық тізбектің болу шартын анықтайтын дифференциалдық теңдеулер теориясына негізделген математикалық-компьютерлік модельдер зерделенді. Осы модельдер көмегімен төмендегі ғылыми нәтижелерге қол жетті:

- компьютерлік эксперимент көмегімен қоректік субстраттың жүйеге ену жылдамдығын өзгерту кезіндегі экологиялық тізбектің күйлерін сипаттайтын графиктерді алынды;
- Mathcad 15 ортасында алты түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын компьютерлік эксперимент жасалып, графиктер түріндегі шешімдер алынды;
- он түрлі бактериялардың өзара бәсекелестігін сипаттайтын компьютерлік модель жасалып, алынған ғылыми нәтижелер зерделенді.

Алынған ғылыми нәтижелерді жергілікті биологиялық процестерді зерттейтін ғылыми-зерттеу орталықтарының жұмыстарында пайдалануға болады.

Қаржыландыру. Жұмыс Қазақстан Республикасының Жоғары білім және ғылым министрлігінің қаржылық демеуі арқылы орындалды (грант № AP14869376).

Әдебиеттер тізімі

1. Elton C.S. The Ecology of Invasions by Animals and Plants. – University of Chicago Press, 2000. – 196 p.
2. Письман Т.И., Богданова О.Н., Каламбет Н.С. Особенности взаимодействия смешанной культуры водорослей и беспозвоночных в водном биотическом цикле «продуцент-консумент» // Сибирский экологический журнал. – 2002. – №6 – С. 657-662.
3. Мүкүшев Б.А., Киян В.С., Мырзағалиева А.Б., Мукушев А.Б., Турлыбек Н.В. Микроағзаларлардың популяциясын зерттеуде модельдер әдісін қолдану // Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ Хабаршысы. Биологиялық ғылымдар сериясы. – 2022. – №1(138). – Б. 6-16.
4. Volterra V. Mathematical Theory of Struggle for Existence. – Moscow: Nauka, 1976. – 288 p.
5. Iorgensen S.E. Handbook of environmental Data and Ecological parameters. – Pergamon Press, Oxford, 1979. – 1162 p.
6. Перт С.Д. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. – Москва, 1978. – 331 с.
7. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. – Москва: Наука, 1979. – 121 с.
8. Смагин А.В. и др. Моделирование динамически органического вещества почв. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 120 с.
9. Кирьянов Д. Mathcad 14 в подлиннике. – Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2007. – 682 с.
10. Очков В. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. – Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2007. – 370 с.
11. Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 184 с.

Б.А. Мукушев¹, С.Б. Мукушев¹, А.Б. Мырзагалиева², Б.А. Прмантаева³, Н.М. Омарова³

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Астана, Казахстан

²Международный университет Астана, Астана, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Экологические цепочки и их математико-компьютерные модели

Аннотация. В статье рассматривается проблема изучения структур и эволюций экологических цепочек на уровне микроорганизмов с помощью математических и компьютерных моделей. На основе законов биологической кинетики было построено несколько математических моделей, описывающих экологические цепочки, и с помощью этих моделей были разработаны компьютерные эксперименты. Разработаны математические модели, описывающие зависимость концентрации бактериальной биомассы, субстратов и простейших от времени. С помощью пакета Mathcad были получены и проанализированы графические решения математических моделей.

Были созданы графики состояний экологических цепочек с изменением скорости проникновения питательного субстрата в систему и изучены эти состояния. В среде Mathcad были разработаны математические модели, описывающие взаимную конкуренцию 6 различных бактерий. Установлены параметры, характеризующие концентрацию биомассы каждой бактерии. К этому параметру относятся: постоянная насыщения бактерий, постоянная насыщения простейших, максимальная величина удельной скорости роста бактерий, максимальная величина удельной скорости роста простейших, экономический коэффициент роста простейших. Проанализировано графическое решение математических моделей, характеризующих динамику концентрации биомассы бактерии, и сделан вывод.

Был разработан компьютерный эксперимент, представляющий конкуренцию между видами бактерий. Результаты взаимной конкуренции десяти различных колоний бактерий были получены на основе численного и графического методов. Компьютерная программа составлена в среде Microsoft Visual Basic 6.0.

Ключевые слова: экологические цепочки, математические и компьютерные модели, пакет Mathcad, концентрации бактерий, субстратов и простейших, система «продуцент - консумент».

Б.А. Mukushev¹, S.B. Mukushev¹, A.B. Myrzagalieva², B.A. Prmantayeva³, N.M. Omarov³

¹S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Kazakhstan

²Astana International University, Astana, Kazakhstan

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Ecological chains and their mathematical and computer models

Abstract. The article deals with the problem of studying the structures and evolutions of ecological chains at the level of microorganisms using mathematical and computer models. Several mathematical models have been constructed based on the laws of biological kinetics. Computer experiments were developed using these models. Mathematical models describing the dependence of the concentration of bacterial biomass, substrates and protozoa on time have been created. With the help of the Mathcad package, graphical solutions of mathematical models were obtained and analyzed.

Graphs of the states of ecological chains with changes in the rate of penetration of the nutrient substrate into the system were created and these states were studied. Mathematical models describing the mutual competition of 6 different bacteria were developed in Mathcad environment. The parameters

characterizing the biomass concentration of each bacterium were established. This parameter included: saturation constant of bacteria, saturation constant of protozoa, maximum value of specific growth rate of bacteria, maximum value of specific growth rate of protozoa, and economic growth coefficient of protozoa. Graphical solution of mathematical models have been analyzed. These models characterize the dynamics of the concentration of bacterial biomass.

A computer experiment representing competition between bacterial species was developed. The results of mutual competition of ten different bacterial colonies were obtained on the basis of numerical and graphical methods. The software has been compiled in Microsoft Visual Basic 6.0 environment.

Keywords: ecological chains, mathematical and computer models, Mathcad package, bacterial biomass, concentrations of substrates and protozoa, producer - consumer system.

References

1. Elton C.S. The Ecology of Invasions by Animals and Plants (University of Chicago Press, 2000, 196 p.).
2. Pis'man T.I., Bogdanova O.N., Kalambet N.S. Osobennosti vzaimodejstviya smeshanoj kul'tury vodoroslej i bespozvonocnyh v vodnom bioticheskom cikle «producent-konsument», Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Features of the interaction of a mixed culture of algae and invertebrates in the aquatic biotic cycle "producer-consumer", Siberian Ecological Journal], 6, 657-662 (2002). [in Russian]
3. Mukushev B.A., Kiyan V.S., Myrzagalieva A.B., Mukushev A.B., Turlybek N.V. Mikroagzalarlardyn populyaciyasyn zertteude model'der adisin koldanu, L.N. Gumilev atyndagy EEU Habarshysy. Biologiyalyk gylymdar seriyasy [Application of the model method in the study of the population of microorganisms, L.N. Herald of Gumilev State University. Biological Sciences Series], 1(138), 6-16 (2022). [in Kazakh]
4. Volterra V. Mathematical Theory of Struggle for Existence (Moscow: Nauka, 1976, 288 p.).
5. Iorgensen S.E. Handbook of environmental Data and Ecological parameters (Pergamon Press, Oxford, 1979, 1162 p.).
6. Pert S.D. Osnovy kul'turovaniya mikroorganizmov i kletok [The basis of culturing of microorganisms and cells] (Moskva, 1978, 331 s.) [Moscow, 1978. - 331 p.]. [in Russian]
7. Vavilin V.A., Vasil'ev V.B. Matematicheskoe modelirovanie processov biologicheskoy ochistki stocnyh vod aktivnym ilom [Mathematical modeling of processes of biological wastewater treatment with activated sludge] (Moskva: Nauka, 1979, 121 s.) [Moscow: Nauka, 1979, 121 p.]. [in Russian]
8. Smagin A.V. i dr. Modelirovanie dinamicheski organicheskogo veshchestva pochv [Modeling of dynamic soil organic matter] (Moskva: Izd-vo MGU, 2001, 120 s.) [Moscow: Izd-vo MSU, 2001, 120 p.]. [in Russian]
9. Kir'yanov D. Mathcad 14 v podlinnike [Mathcad 14 in podlinniki] (Sankt-Peterburg: «BHV-Peterburg», 2007, 682 s.) [St. Petersburg: "BHV-Petersburg", 2007, 682 p.]. [in Russian]
10. Ochkov V. Mathcad 14 dlya studentov, inzhenerov i konstrukturov [Mathcad 14 for students, engineers and designers] (Sankt-Peterburg: «BHV-Peterburg», 2007, 370 s.) [St. Petersburg: "BHV-Petersburg", 2007, 370 p.]. [in Russian]
11. Riznichenko G.YU. Matematicheskie modeli v biofizike i ekologii [Mathematical models in biophysics and ecology] (Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2003, 184 s.) [Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Studies, 2003, 184 p.]. [in Russian]

Авторлар туралы мәліметтер:

Мұқұшев Б.А. – педагогика ғылымдарының докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан.

Мұқушев С.Б. – педагогика ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан.

Мырзағалиева А.Б. – биология ғылымдарының докторы, профессор, Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан.

Прмантаева Б.А. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Сапаны бағалау орталығының басшысы, Л.Н. Гумилев атындағы Евразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Омарова Н.М. – химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Л.Н. Гумилева атындағы Евразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Mukushev B.A. – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Kazakhstan.

Mukushev S.B. – Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Kazakhstan.

Myrzagaliyeva A.B. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Astana International University, Astana, Kazakhstan.

Prmantayeva B.A. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Center for Quality Assessment, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Omarova N.M. – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.