

**Г.О.Иутинская, Ю.В.Коппа**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ**

С применением интерактивной системы АСТРИД методом группового учета аргументов по экспериментальным данным построены математические модели, которые описывают изменение численности микроорганизмов в зависимости от ряда экологических факторов и присутствия тяжелых металлов в грунте. Показана перспективность использования индуктивного подхода для моделирования микробиологических процессов в грунте.

Для анализа, моделирования и прогнозирования экологических процессов в условиях неполноты априорной информации о механизмах явлений, которые моделируются, целесообразно применять методы прямого построения моделей по данным натурных экспериментов. Одним из наиболее эффективных методов моделирования по экспериментальным данным является метод группового учета аргументов (МГУА) [1]. Это индуктивный метод для построения линейных, нелинейных, полиномиальных, авторегрессионных и других моделей сложных процессов по коротким выборкам данных. В его основу положены принципы внешнего дополнения, автоматической генерации и последовательной селекции усложняемых структур моделей [1,2]. Алгоритмы МГУА были использованы для моделирования процессов в водных экосистемах [1] и в экономике [3].

Разные алгоритмы МГУА, которые отличаются между собой классами моделей или генераторами структур, служит основой построения автоматизированной системы моделирования АСТРИД [3,4], в диалоговой оболочке которой содержится структурированный опыт применения этих алгоритмов.

Целью работы было моделирование с помощью системы АСТРИД динамики численности микроорганизмов основных эколого-трофических групп в почве, загрязненной тяжелыми металлами.

Исследование микрофлоры почвы проводили на мониторинговых участках в мелкоучастковом полевом опыте на темно-серой оподзоленной легкосуглинистой почве Киевской области. Модельное загрязнение почвы осуществлялось путем ежегодного внесения в грунт растворов солей тяжелых металлов. Количество внесенных металлов (из расчета содержимого их ионов) отвечала дозам загрязнения 2 и 4 предельно допустимых концентраций (ПДК). Образцы почвы для анализов отбирали на глубине пахотного слоя (0-20 см) приблизительно через 2, 30, 90 суток после внесения солей металлов.

Количество микроорганизмов в контрольном и загрязненном участке почвы определяли методом посева почвенной суспензии на агаризированную питательную среду, в состав которой входили мясо-пептонный агар и водный агар в соотношении 1:10. Такая среда отвечает олиготрофным условиям существования микроорганизмов в почве [5].

Учитывая отсутствие информации относительно внутренней структуры моделируемых процессов, то есть процессов, которые определяют динамику численности микроорганизмов в почве, для построения модели была использована интерактивная система АСТРИД, разработанная в Международном научно-учебном центре ЮНЕСКО информационных технологий и систем НАН и МОН Украины. Эта система базируется на индуктивном методе группового учета аргументов (МГУА) и позволяет автоматически строить оптимальные модели по данным наблюдений в условиях неполной априорной информации.

Входными данными для построения моделей были независимые переменные: концентрация подвижных форм тяжелых металлов, среднедекадные значения температуры, влажности почвы и воздуха, численность микроорганизмов в почве контрольного (незагрязненного) участка. Выходной (зависимой) переменной были данные о численности микроорганизмов на участках с экспериментальным модельным загрязнением почвы тяжелыми металлами.

Для построения модели динамики численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов был сформирован такой список входных переменных:

- $X_1$  — численность полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на контрольном участке (млн. в 1 г. сухого почвы);
- $X_2$  — концентрация меди (мг/кг почвы);
- $X_3$  — концентрация стронция (мг/кг почвы);
- $X_4$  — концентрация кадмия (мг/кг почвы);
- $X_5$  — концентрация ртути (мг/кг почвы);
- $X_6$  — концентрация свинца (мг/кг почвы);
- $X_7$  — число суток от даты загрязнения;
- $X_8$  — средняя температура воздуха текущей декады ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $X_9$  — средняя температура воздуха предыдущей декады ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $X_{10}$  — средняя влажность воздуха текущей декады (%);
- $X_{11}$  — средняя влажность воздуха предыдущей декады (%);
- $X_{12}$  — коэффициент влажности почвы.

В число входных переменных были включены данные о влажности и температуре воздуха предыдущих декад, что было сделано с учетом определенной инерционности биологических процессов.

На основе динамики этих переменных были построены модели изменений численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве.

На мониторинговых участках в почве контрольного и опытных вариантов (загрязненных разными дозами тяжелых металлов) выявлена сезонная динамика численности микроорганизмов, которая в зависимости от метеорологических условий колебалась из года в год. Вообще отмечали высокую численность микроорганизмов в июне-июле и постепенное уменьшение ее в августе и сентябре. На фоне сезонной динамики численности микроорганизмов выявлено влияние загрязнения тяжелыми металлами: уменьшение численности микроорганизмов в первые сроки (2-3 суток) после внесения в грунт тяжелых металлов и в постепенном восстановлении их численности в следующие периоды наблюдений [6].

По данным мониторинговых исследований были построены математические модели численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на контрольном и загрязненном тяжелыми металлами участках.

Численность полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве контрольного участка описывается уравнением:

$$Y = -25.468 * X_2 - 0.071741 * X_8 - 0.015415 * X_{11} + 26.582 * X_{12} \quad (1)$$

Модель имеет такие статистические характеристики: СКО = 0.91601 (среднеквадратичная погрешность модели), R = 1.8465 (максимальная абсолютная погрешность модели), R<sub>отно.</sub> = 30.78% (отношение максимальной погрешности к интервалу варьирования моделируемой величины).

На рис.1 представлены экспериментальные данные и графический вид модели сезонной динамики численности микроорганизмов в почве контрольного участка за годы наблюдений. Как видно из этих данных, модель не включает переменные от X<sub>3</sub> до X<sub>7</sub>, то есть фоновые значения содержания стронция, кадмия, ртути в почве контрольного участка на протяжении периода исследований не влияли на численность полисахаридсинтезирующих. Кроме того, для численности полисахаридсинтезирующих неинформативными были переменные X<sub>9</sub>, X<sub>10</sub> – средняя температура воздуха предшествующей декады и средняя влажность воздуха текущей декады.

На базе модели численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве контрольного участка были построены соответствующие модели для численности микроорганизмов в почве, загрязненном тяжелыми металлами.

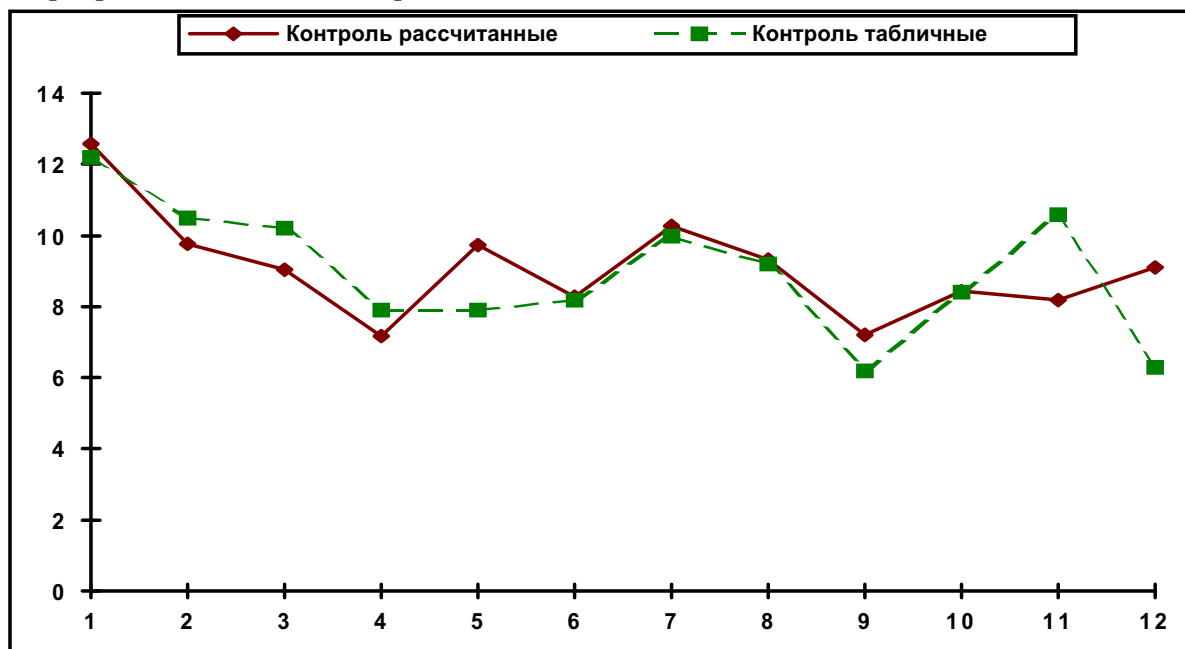


Рис.1. Экспериментальные и модельные данные численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве контрольного участка.

Модель динамики численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве, загрязненной медью, имеет вид:

$$Y = 41.51 + 1.255 \cdot X_1 + 0.00244 \cdot X_2 - 2.478 \cdot X_3 + 2.342 \cdot X_5 + 3.549 \cdot X_6 + 0.0219 \cdot X_7 + 0.441 \cdot X_8 - 0.051722 \cdot X_9 + 0.038719 \cdot X_{10} - 0.19064 \cdot X_{11} + 0.00083593 \cdot X_{12}. \quad (2)$$

Она имеет такие характеристики качества: СКО = 0.784, R = 1.657, R<sub>отно.</sub> = 28.08%, то есть совпадала с данными экспериментальных наблюдений на 71.92%.

Как видим, существенным образом на численность полисахаридсинтезирующих в загрязненной почве влияла концентрация всех тяжелых металлов, кроме X<sub>4</sub> (кадмия).

Графический вид модели приведен на рис.2. Анализ этих графиков показывает, что в большинстве случаев экспериментальные и рассчитанные с помощью модели данные совпадают. Тем не менее, имеются случаи их расхождения, например, в почве, загрязненной дозой 2 ПДК в 6-й и 7-й точках наблюдений, а также в почве, загрязненной дозой 4 ПДК в 6-й, 9-й и 11-й точках наблюдений. Такие расхождения можно объяснить

пространственной неоднородностью почвы, наличием корневых остатков, другими микролокальными условиями, которые могло вызвать колебания численности микроорганизмов, не предусмотренные моделью.

На «экзаменационной» выборке (точки 10-12 на участке с ПДК 4), которая используется для проверки модели в режиме прогнозирования, имеем довольно хорошее совпадение в точках 10 и 12, тем не менее, имеем относительно большую ошибку в точке 11, что может быть объяснено неоднородностью почвы.

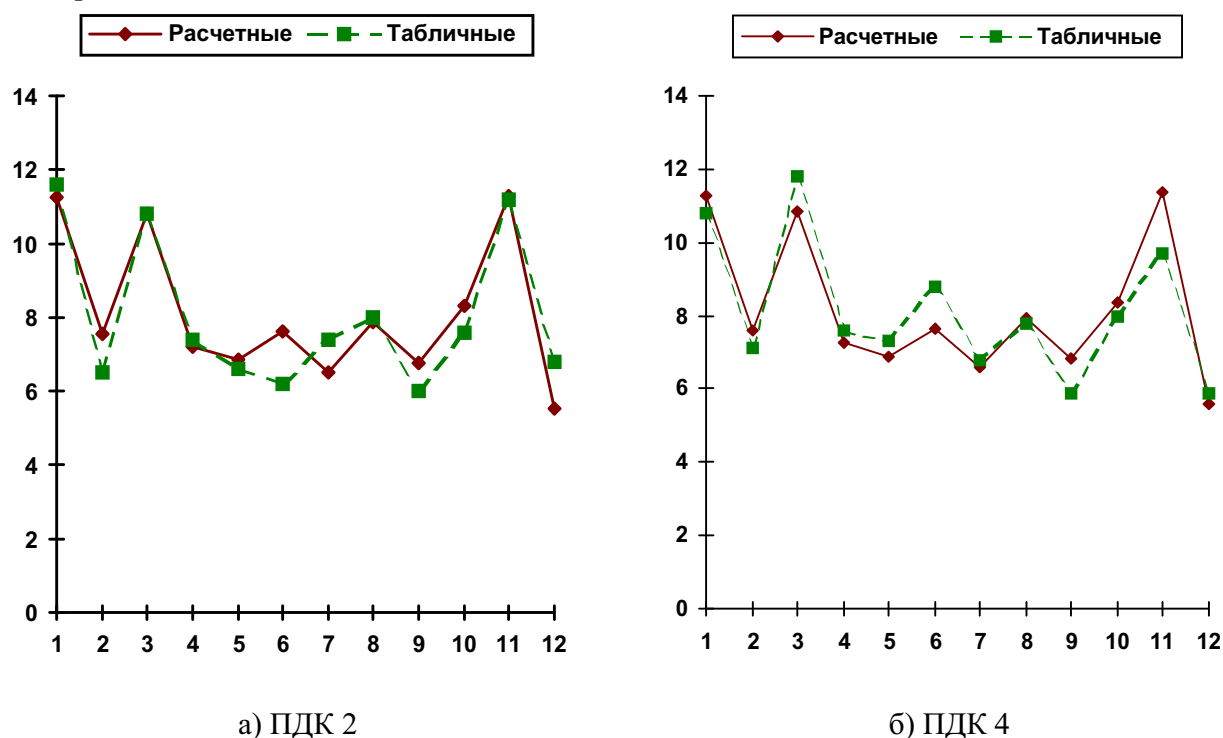


Рис. 2. Графики изменения численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на загрязненном медью участке в точках измерения (по три измерения за вегетационный период 1993-96 гг.).

Численность полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на участке, загрязненном ртутью, описывается уравнением:

$$Y = 1.2152 \cdot x_1 + 13.047 \cdot x_2 - 0.28301 \cdot x_3 - 0.18803 \cdot x_5 + 0.46725 \cdot x_8 - 13.696 \cdot x_{12} \quad (3)$$

Она имеет такие характеристики качества: СКО = 0.718, R = 1.462, R<sub>отно</sub> = 22.84%, то есть совпадала с данными экспериментальных наблюдений на 77.16%.

Модели численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов в почве участков, загрязненных медью или ртутью, имели как общие, так и отличные между собою информативные переменные. Так, в почве, загрязненной ртутью, на численность

полисахаридсинтезирующих микроорганизмов существенным образом влияли такие переменные, как концентрация меди, стронция, ртути, средняя температура воздуха, а неинформативными были переменные, характеризующие концентрацию подвижных форм кадмия, свинца, а также средняя температура предшествующей декады и влажность воздуха текущей и предшествующей декады.

Качество модели иллюстрирует рис. 3, из которого видно, что для дозы загрязнения ртутью 2 ПДК модель адекватно описывает динамику численности микроорганизмов.

Для дозы загрязнения 4 ПДК наблюдается отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по полученной модели как на отрезке мониторинговых наблюдений, так и в последних экзаменационных точках. Такое отклонение можно объяснить тем, что при высокой дозе загрязнения ртутью (которая более токсична для микроорганизмов, чем медь) наблюдается потеря стабильности развития полисахаридсинтезирующих микроорганизмов, они больше реагируют не только на факторы, введенные в модель, но и на те, что не были учтены при математическом моделировании. В данном случае нужно расширять количество переменные или строить нелинейную модель.

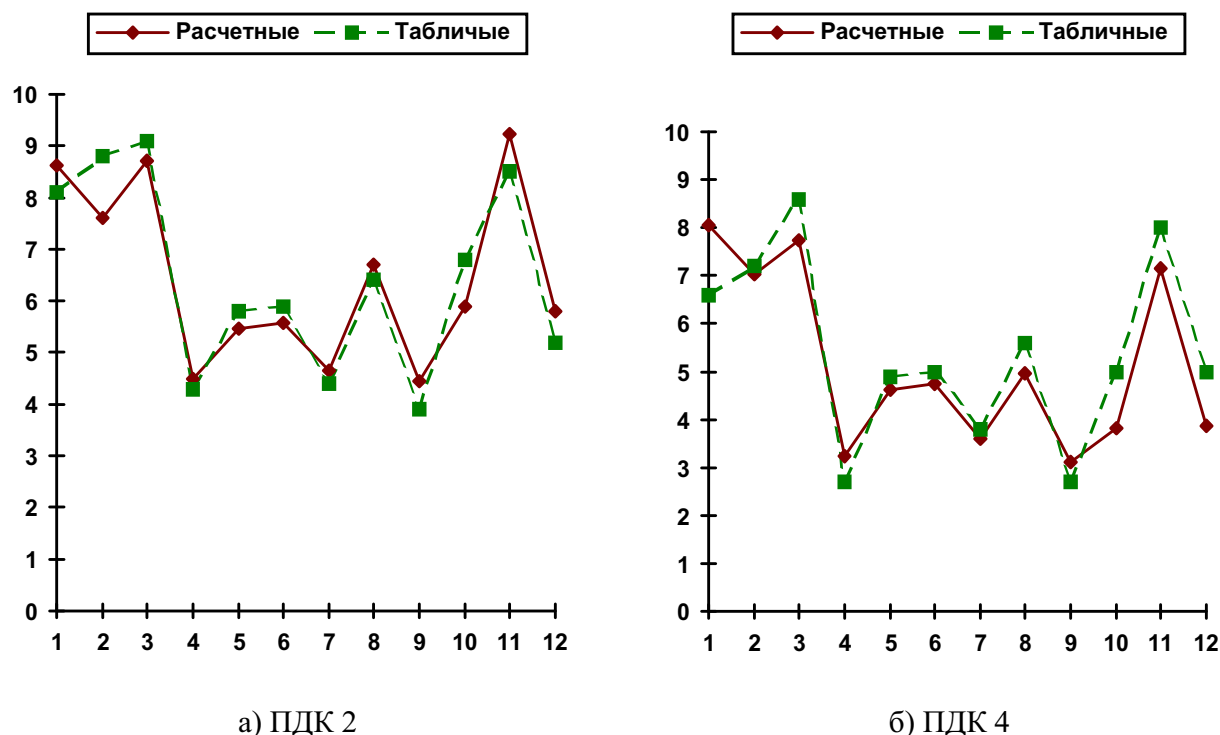


Рис. 3. Графики изменения численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на загрязненной ртутью почве в точках измерения (по три измерения за вегетационный период 1993-96 гг.).

Совместное использование моделей численности микроорганизмов в контрольном и загрязненном участках позволяет решить задачу восстановления отсутствующих или утраченных данных. Например, можно восстановить подекадную динамику численности микроорганизмов на протяжении всего периода проведения мониторинга, несмотря на то, что наблюдение проводили 3 раза за вегетационный период. Возможность восстановления данных обусловлена тем, что модели достаточно точно соответствуют эксперименту, в особенности в точках наблюдений, кроме того, в промежуточных точках имеющиеся «опорные» базовые данные о метеорологических условиях, которые существенным образом влияют на динамику численности микрофлоры. В качестве примера на рис.4 и 5 приведены графики восстановленных значений численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на участках, загрязненных медью и ртутью дозами 2 и 4 ПДК. Как видно из этих графиков, на восстановленную кривую хорошо укладываются данные, полученные во время проведения мониторинга.

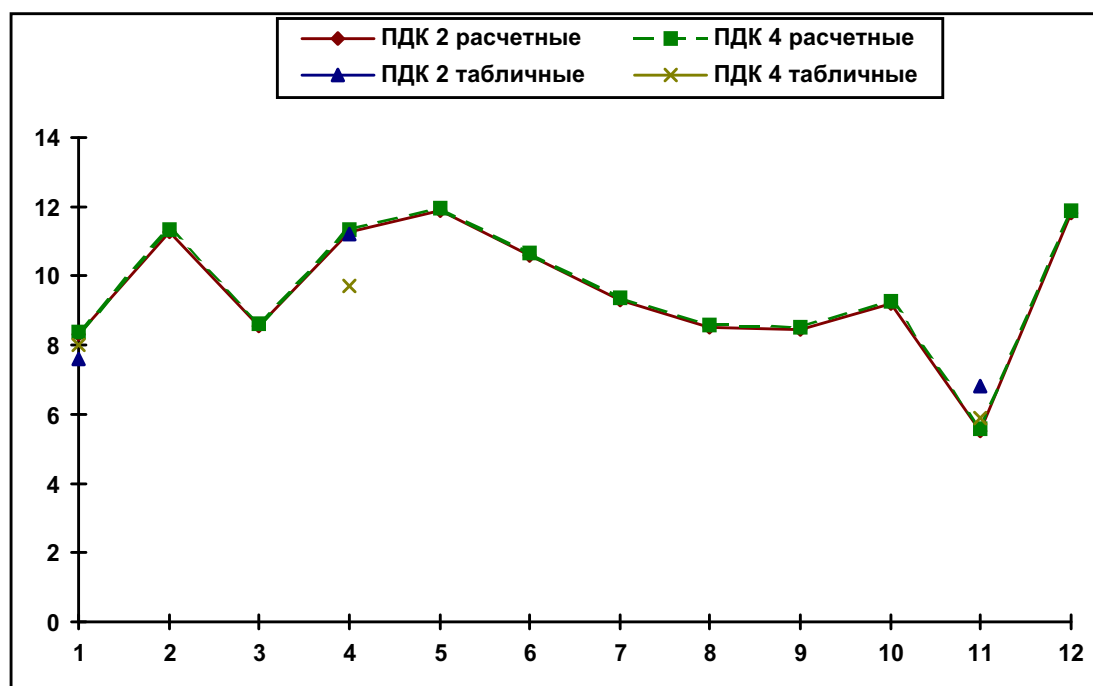


Рис. 4. График восстановленных декадных значений численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на участке, загрязненном медью, за вегетационный период 1996 г.

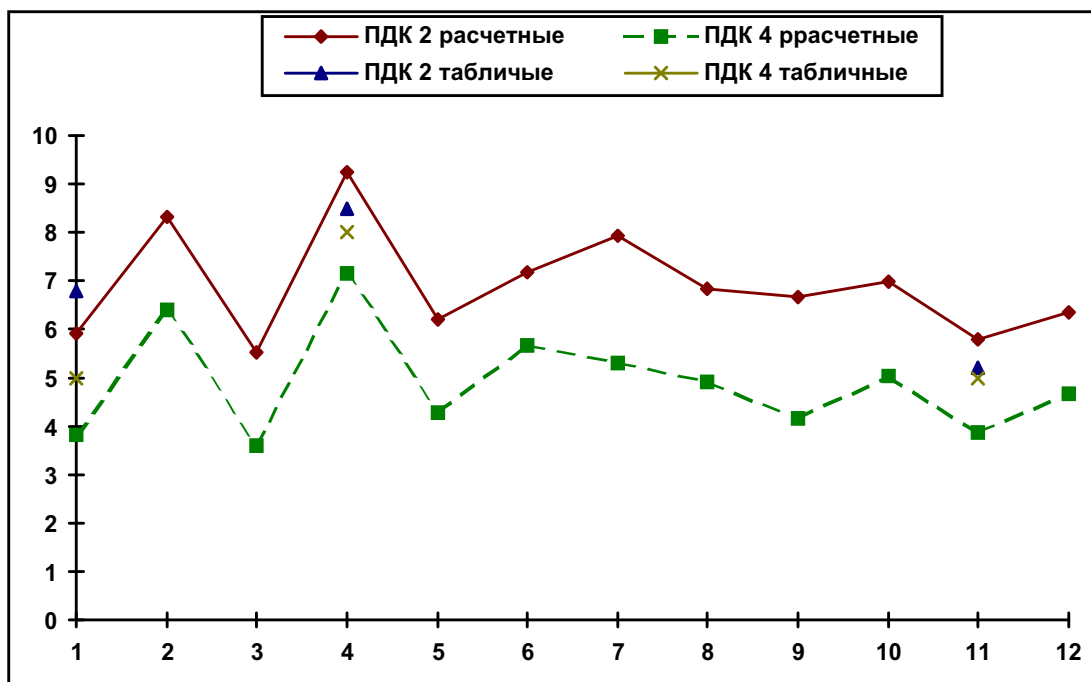


Рис. 5. График восстановленных декадных значений численности полисахаридсинтезирующих микроорганизмов на участке, загрязненном ртутью, за вегетационный период 1996 г.

Таким образом, проведенными исследованиями показана возможность моделирования численности микроорганизмов в почве на основе индуктивного подхода, с применением МГУА. Полученные модели в достаточной степени совпадают с экспериментальными данными, что дает возможность использовать их в системе экологического мониторинга почвы для оценки ситуаций, восстановления данных в промежуточных точках и прогнозирования развития микроорганизмов в определенных экологических условиях.



### Литература

1. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. - К.: Наукова думка, 1982. - 245с.
2. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.
3. Степашко В.С., Коппа Ю.В. Опыт применения системы АСТРИД для моделирования экономических процессов по статистическим данным // Кибернетика и выч. техника. - 1998. - Вып.117. - С. 24-31.
4. Кротов Г.И., Коппа Ю.В. Степашко В.С. Интерактивное моделирование сложных объектов на основе алгоритмов МГУА. // Кибернетика и выч. техника.-1994, вып.104. - С.44-51.
5. Андреюк Е.И., Иутинская Г.А., Петруша З.В. Гомеостаз микробных сообществ почв, загрязненных тяжелыми металлами // Мікробіол. журнал - 1999. – 61. №6. - С.15-21.
6. Іутинська Г.О., Петруша З.В. Резистентність ґрунтових мікроорганізмів до забруднення ґрунтів важкими металами // Мікробіол. журнал. - 1999.- 61. - №5. - С.72-77.

**Г.О.Іутинська, Ю.В.Коппа**

**Моделювання залежності чисельності мікроорганізмів від концентрації важких металів у ґрунті**

З використанням інтерактивної системи АСТРИД, що базується на алгоритмах МГУА, за експериментальними даними побудовано математичні моделі, які описують зміни чисельності мікроорганізмів у залежності від низки екологічних факторів та присутності важких металів у ґрунті. Показано перспективність використання індуктивного підходу для моделювання мікробіологічних процесів у ґрунті.

**Г.А.Иутинская, Ю.В.Коппа**

**Моделирование зависимости численности микроорганизмов от концентрации тяжелых металлов в почве**

С применением интерактивной системы АСТРИД методом группового учета аргументов по экспериментальным данным построены математические модели, которые описывают изменение численности микроорганизмов в зависимости от ряда экологических факторов и присутствия тяжелых металлов в грунте. Показана перспективность использования индуктивного подхода для моделирования микробиологических процессов в грунте.

**G.O.Iutynska, Yu.V.Koppa**

**Modeling the Dependence of Microorganism Population on the Heavy Metals Concentration in a Soil**

By the use of the interactive system ASTRID, based on the Group Method of Data Handling, mathematical models are constructed from experimental data describing changes in population of microorganisms as depending on a number of ecological factors and presence of heavy metals in a soil. Perspectiveness of using the inductive approach to modeling microbiological processes in a soil is shown.