

УДК 631.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ САНИТАРНО-ПОКАЗАТЕЛЬНЫХ БАКТЕРИЙ В ПОЧВЕ ПРИ ПОЛИВЕ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ СВИНОКОМПЛЕКСА

О.Е. ЧЕЗЛОВА, н.с.

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, г. Брест,
Республика Беларусь

А.А. ВОЛЧЕК, д.г.н.РФ и РБ, профессор
Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

Ключевые слова: моделирование, регрессионная модель, бактерии

Аннотация: Динамика численности санитарно-показательных бактерий (бактерии группы кишечной палочки, энтерококков, общее микробное число, сульфитредуцирующие клостридии) описаны с помощью множественных линейных моделей с высоким качеством аппроксимации ($R^2=0,71 - 0,99$).

Key words: modeling, regression model, bacteria

Summary: The dynamics of the number of sanitary indicative bacteria (coliform bacteria, enterococci, total microbial count, sulphite-reducing clostridia) are described using multiple linear models with high approximation quality ($R^2 = 0.71 - 0.99$).

При использовании животноводческих сточных вод (СВ) на орошение сельскохозяйственных культур объекты окружающей среды могут быть подвергнуты значительному бактериальному загрязнению. Для нормирования допустимого уровня антропогенной нагрузки и прогнозирования состояния экосистем необходимо решить задачу предсказания численности видов и групп бактерий – показателей фекального загрязнения [1]. В связи с тем, что параметры реальных многопараметрических объектов являются случайными, что ограничивает применение моделей в виде дифференциальных уравнений, правильно использовать подход, позволяющий находить статистические закономерности функционирования экологических систем [2].

Цель данной работы состояла в количественном описании полученных ранее аналитических данных [3], суть которых состояла в определении количества санитарно-показательных бактерий (бактерий группы кишечных палочек (БГКП), энтерококков, общего микробного числа (ОМЧ), сульфитредуцирующих клостридий) в почве сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО) вследствие полива ее СВ свиного комплекса с помощью оросительной установки «Omega». Выращиваемая культура – кукуруза. Параллельно фиксировались физико-химические и климатические факторы, которые потенциально могли оказывать влияние на динамику численности почвенных микроорганизмов. Статистическая обработка результатов проводилась стандартными методами [1, 4].

В результате множественного корреляционно-регрессионного анализа были созданы уравнения регрессии, которые позволили получить информацию о взаимосвязях между наиболее важными переменными экосистемы почвы ЗПО.

На первом этапе создания моделей данные численности микроорганизмов были подвергнуты логарифмической трансформации для соответствия отклонений зависимой переменной нормальному распределению. При обнаружении в выборках «нулевых» значений, а, как известно, логарифм «0» не определен, к данным численности N добавляли «2» (если добавлять 1, то $\lg 1=0$, что препятствовало дальнейшим расчетам). В результате данные численности бактерий N были трансформированы в десятичные логарифмы $\lg(N+2)$.

На следующем этапе оценивалась взаимосвязь независимых факторов с результирующей переменной (численность бактерий) с помощью корреляционной матрицы, что позволяло установить тесноту и направленность влияния факторов модели на результат. Независимые факторы, значения которых использовались для построения моделей и их обозначения отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Независимые факторы и их обозначение

Независимый фактор	Обозначение в уравнении множественной регрессии	Единицы измерения
1	2	2
Внесение микроорганизмов с поливом	$N_{\text{внес}}$	КОЕ/см ²
Фоновое количество микроорганизмов в почве	$N_{\text{фон}}$	КОЕ/г
Температура воздуха за декаду	t	°С
Атмосферные осадки за декаду	p	мм
pH солевой вытяжки почвы	pH	единицы pH

Окончание таблицы 1

1	2	2
Влажность почвы	w	%
Содержание ионов аммония в почве	C _{NH4}	мг/кг
Содержание нитратов в почве	C _{NO3}	мг/кг
Содержание фосфора в почве (в виде P ₂ O ₅)	C _{P2O5}	мг/кг
Содержание органического вещества	C _{орг.}	%
Время после полива	τ	дни

Принятая модель множественной регрессии оценивалась как:

$$\hat{Y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2)$$

где \hat{Y} – предсказанное значение численности бактерий;

a – отрезок, отсекаемый на оси y;

x₁, x₂, x_n – независимые факторы;

b₁, b₂, b_n – частные коэффициенты регрессии [4].

Созданные регрессионные модели для наиболее важных показателей санитарно-бактериологического состояния почв показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Модели динамики бактерий в почве ЗПО

Показатель	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
БГКП	$N_{\text{БГКП}} = 10^{-0,03 \cdot C_{\text{NO}_3} + 1,23 \cdot C_{\text{орг}}}$	0,99	8
ОМЧ	$N_{\text{ОМЧ}} = 10^{4,15 + 0,13 \cdot N_{\text{внес}} + 0,04 \cdot \tau}$	0,72	4
	$N_{\text{ОМЧ}} = 10^{0,11 \cdot N_{\text{внес}} + 0,05 \cdot \tau + 1,56 \cdot C_{\text{орг}}}$	0,99	3,49
	$N_{\text{ОМЧ}} = 10^{3,22 + 0,07 \cdot \tau + 0,03 \cdot C_{\text{NO}_3} + 0,01 \cdot \tau}$	0,71	4
	$N_{\text{ОМЧ}} = 10^{0,69 \cdot N_{\text{фон}} - 0,02 \cdot p + 0,38 \cdot p\text{H} - 0,06 \cdot C_{\text{NH}_4} + 0,03 \cdot C_{\text{NO}_3} + 0,01 \cdot \tau}$	0,99	1,13
Энтерококки	$N_{\text{энт}} = 10^{0,39 \cdot N_{\text{внес}} + 0,05 \cdot \tau + 0,04 \cdot p + 0,15 \cdot w - 0,17 \cdot p\text{H} - 0,004 \cdot C_{\text{P}_2\text{O}_5}}$	0,98	16
	$N_{\text{энт}} = 10^{0,57 \cdot N_{\text{фон}} + 0,25 \cdot N_{\text{внес}} + 0,03 \cdot C_{\text{NO}_3}}$	0,98	13
Сульфитредуц. кл. остридии	$N_{\text{Cl}} = 10^{0,017 \cdot C_{\text{NO}_3}}$	0,87	32

Параметры, входящие в модель регрессии находились с использованием методики аппроксимации по методу наименьших квадратов. В уравнении множественной регрессии были оставлены независимые переменные, константы при которых оказались статистически значимыми. Интерпретацию результатов многомерного регрессионного уравнения проводили на основе оценки коэффициента детерминации, R^2 , значимости F -критерия Фишера и анализе остатков. Оценка адекватности моделей проводилась с помощью расчета средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \cdot 100\%,$$

где n – объем выборочных данных;

y_i – эмпирические значения результативного признака;

\hat{y}_i – значения результативного признака, рассчитанные по уравнению регрессии.

Для показателя БГКП было получено уравнение множественной регрессии с высокой точностью аппроксимации – коэффициент детерминации, R^2 , равен 0,99 (таблица 2). Набор значимых факторов множественной регрессии включал содержание органического вещества и нитратов в почве.

Для показателя ОМЧ также получены модели, характеризующиеся высокими коэффициентами детерминации от 0,71 до 0,99 (таблица 2). Значимыми факторами явились температура за декаду, внесение бактерий со стоками, содержание биогенных форм азота в почве. Модель значительно улучшалась при введении в нее фактора, отражающего динамику автохтонного сообщества сапрофитов (показатель ОМЧ в контроле) – R^2 увеличивался до значений 0,99, а ошибка аппроксимации снижалась до 1,13.

Уравнения регрессии, описывающие динамику энтерококков в почвах ЗПО, содержали фактор внесения бактерий со стоками, демонстрирующий существенное положительное влияние поливов СВ на количество данных бактерий в почве (таблица 2). Значимым оказался фактор фонового содержания исследуемых микроорганизмов в почве, приводя к уменьшению ошибки аппроксимации уравнения регрессии. Из погодноклиматических факторов существенными оказались температура

воздуха и атмосферные осадки за декаду, которые имели положительный знак. Другими значимыми факторами явились биогенные формы азота и фосфора, рН.

Исходя из полученных зависимостей можно констатировать, что динамика сульфитредуцирующих клостридий в почвах ЗПО демонстрировала наименьшую из всех рассматриваемых микробиологических показателей зависимость от поливов СВ. Регрессионная модель выявила наибольшую зависимость количества данных микроорганизмов от фактора содержания в почве биогенных форм азота (преимущественно в виде нитратов) положительно коррелирующего с объясняемой переменной.

Выводы.

Данные численности санитарно-показательных бактерий (БГКП, энтерококков, ОМЧ, сульфитредуцирующих клостридий) на небольших отрезках времени (2-3 месяца) могут быть описаны с помощью множественных линейных моделей ($R^2=0,71 - 0,99$). Набор значимых параметров в уравнениях множественной регрессии характерен для каждой из групп бактерий и включает погодные факторы (температура воздуха и атмосферные осадки за декаду), биогенные формы азота и фосфора, содержание органического вещества, рН, факторы внесения со стоками и фонового количества исследуемых бактерий, влажность, время после полива СВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании: учеб. пособие / И. С. Белюченко [и др.]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 313 с.
2. Мамутов, Б. В. Стохастические регрессионные модели экологических объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №2. С.112-118.
3. Волчек, А.А. Микробиологический эффект орошения сельхозугодий сточными водами СГЦ «Западный»/ А.А. Волчек, О.Е. Чезлова // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: материалы Международн. науч.-практ. конф., Брест, 23 –25 апр.. 2014 г./ Брестск. Гос. Ун-т; под ред. А.А. Волчека [и др.].– Брест, 2014. – Ч.Ш.–С.34 – 41.
4. Статистические методы в природопользовании: учеб. пособие / В.Е. Валуев [и др.].– Брест: БрПИ, 1999. – 252 с.