

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНГИБИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ В АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ПОЧВЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПОЙМЫ Р. ОКИ

Ольга Алексеевна ЗАХАРОВА¹, Ольга Валерьевна Евдокимова², Вадим Петрович ШИЧКОВ³

^{1,3}ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань, Россия

²ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Рязань, Россия

ol-zahar-ru@yandex.ru

Аннотация. На основе полученных экспериментальных результатов за сентябрь собран банк данных, которые в последующем лягут в основу научной работы по комплексному изучению аллювиальной почвы Центральной поймы р. Оки.

Проблема и цель. Получение достоверных результатов исследований есть одна из главных задач научных экспериментов, что можно подтвердить статистическими и математическими методами. Математическое моделирование процессов есть один из таких методов, который в основе содержит дифференцированные уравнения. Аллювиальная почва занимает небольшие территории на северо-востоке Рязанской области, ее изучение носит фрагментарный характер. В то же время аллювиальная почва Центральной поймы реки Оки используется в сельскохозяйственном производстве в АО «Московское» Рязанского района Рязанской области. Цель исследований - моделирование ингибирования численности микроорганизмов в аллювиальной почве центральной поймы р. Оки.

Методология. В математическую модель введены значения концентрации токсичного для живых организмов Cd в почве как одного из приоритетных металлов-загрязнителей, температуры и влажности почвы, целлюлозолитических микроорганизмов, протеазной активности и общей микробной численности. Исследования начаты в сентябре, который характеризовался теплой и сухой погодой, что дало возможность собрать банк исходных данных. Методика исследований общепринятая. Для моделирования использованы модель Хиншельвуда, модель Андикса, модель Колпикова. Поверхности отклика построены в компьютерной программе Statistika 10.

Результаты. Полученные данные были введены в дифференцированные уравнения и получены модели ингибирования численности микроорганизмов в аллювиальной почве Центральной поймы р. Оки. Коэффициент микробиологической активности составил менее 1. Использование данной модели, описывающей кратковременный процесс стабилизации и последующий - ингибирования численности микроорганизмов от концентрации Cd в почве при данных факторах влияния (температура и влажность почвы, протеазная активность, целлюлозоразрушение), не противоречит фактическим лабораторным данным.

Заключение. Анализируя полученные результаты исследований установлено влияние концентрации Cd при сочетанном действии факторов (температура и влажность почвы, протеазная активность, целлюлозоразрушение) на численность почвенных микроорганизмов. Почвенные микроорганизмы достигли численности 14,7 млн. КОЕ/г. Протеазная активность тоже была невысокой. Содержание Cd не достигло максимальных величин, но было повышенным, что тоже оказало влияние на численность микробиоты.

Ключевые слова: статистические методы, моделирование, микроорганизмы, численность, ингибирование, аллювиальная почва

Original article

MODELING THE INHIBITION OF MICROORGANISMS IN ALLUVIAL SOIL OF THE CENTRAL FLOODPLAIN OF THE OKA RIVER

Olga Alekseevna ZAKHAROVA¹, Olga Valerievna EVDOKIMOVA², Vadim Petrovich SHICHKOV³

^{1,3}Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev”, Ryazan, Russia
²State Medical University Named after Academician I.P. Pavlov” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Ryazan, Russia

ol-zahar-ru@yandex.ru

Abstract. Based on the experimental results obtained in September, a data bank was compiled, which will subsequently form the basis of scientific work on the comprehensive study of the alluvial soil of the Central floodplain of the Oka River.

Problem and purpose. Obtaining reliable research results is one of the main tasks of scientific experiments, which can be confirmed by statistical and mathematical methods. Mathematical modeling of processes is one of such methods, which is based on differentiated equations. Alluvial soil occupies small territories in the north-east of Ryazan region, its study is fragmentary. At the same time, the alluvial

soil of the Central floodplain of the Oka River is used in agricultural production in JSC Moskovskoye, Ryazan District, Ryazan Region. The purpose of the research was to model the inhibition of the number of microorganisms in the alluvial soil of the central floodplain of the Oka River.

Methodology. The mathematical model included the values of the toxic to living organisms' concentration of Cd in the soil, being one of the priority metal pollutants, soil temperature and humidity, cellulolytic microorganisms, protease activity and total microbial population. The research began in September, which was characterized by warm and dry weather, which made it possible to collect a bank of initial data. The research methodology was generally accepted. The Hinshelwood model, the Andicks model, and the Kolpikov model were used for modeling. The response surfaces were built in Statistika 10 computer program.

Results. Taking into account the studies conducted after the end of the growing season of the agricultural crop - silage corn and the natural process of gradual attenuation of the activity of soil microorganisms, the results allowed us to model the process of inhibition of microflora. Thus, the concentration of mobile cadmium was slightly below the MAC (-12%), the heat and moisture supply was optimal for microorganisms, protease activity, cellulose destruction and species diversity of the microbiocenosis were low. The obtained data were introduced into differentiated equations and models of inhibition of the number of microorganisms in the alluvial soil of the Central floodplain of the Oka River were obtained. The coefficient of microbiological activity was less than 1. The use of this model, describing the short-term stabilization process and subsequent inhibition of the number of microorganisms from the concentration of Cd in the soil under these influencing factors (soil temperature and moisture, protease activity, cellulose destruction), did not contradict the actual laboratory data.

Conclusion. The soil temperature was above the average long-term indicators. Under these conditions, soil microorganisms developed well and their number was 14.7 million CFU / g. The decomposition of flax was below 10%, which was characterized by the Zvyagintsev scale as very weak. Protease activity was also low. Priority for the region were 4 heavy metals, the concentration of which in Ryazan region was higher than the standards. The Cd content did not reach maximum values, but was elevated, which also affected the number of microbiotas.

Key words: statistical methods, modeling, microorganisms, abundance, inhibition, alluvial soil

Введение

Одним из токсикантов, являющимся цитоплазматическим ядом для живых организмов, является кадмий [4]. Этот тяжелый металл поступает в почву из атмосферы и может находиться в формах, связанных с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, накапливаться в виде нерастворимых гидроксида и карбоната или в ионной форме в кислой среде [5]. Образование гидроксида кадмия $Cd(OH)_2$ начинается при pH 9, что не характерно для региона. Затем по нисходящей в процессе седиментации этот металл проникает в более глубокие слои почвы, грунтовые воды. На основе результатов исследований

Н.В. Величкович с соавт. [1] сделал вывод о влиянии Cd на экологическое состояние почвы и снижение численности микроорганизмов. Д.В. Виноградов [2] отметил нивелирование эффекта стимуляции роста численности микроорганизмов при загрязнении почвы тяжелыми металлами. Cd вызывает изменения свойств белков, нуклеотидов, фосфолипидов, а также нарушает процессы окислительного фосфорилирования и поддержания осмотического давления в клетках. Кроме того, соли кадмия ингибируют рост микроорганизмов. В.В. Водопьянов [3] наблюдал хемотаксис, при котором микроорганизмы меняли свое состояние движения, реагируя на химические вещества. В сентябре получилось возможным рассмотреть влияние токсикантов, в частности, кадмия на почвенные микроорганизмы посредством дифференциальных уравнений [8].

Для математического моделирования ингибирования микроорганизмов используются различные модели [1, 7, 9]. К примеру, модель Андрюса учитывает ингибирование повышенными концентрациями субстрата. В этом случае субстрат, который при относительно низких концентрациях увеличивает скорость роста популяции, при более высоких концентрациях может быть эффективным ингибитором роста микроорганизмов. Наиболее простым линейным уравнением определения кинетических параметров по пересечению прямой с осями является модель Хиншельвуда. Модель Иерусалимского основана на ферментативной кинетике и описывается уравнением, в котором есть константа ингибирования и максимальная удельная скорость роста микроорганизмов. Действие на удельную скорость роста популяции одновременно стимулирующего влияния концентрации субстрата и ингибирования роста самой биомассой микроорганизмов определяется на модели Контуа.

Подбор модели для описания кинетики конкретного биотехнологического процесса и её настройка производятся на основе результатов исследований разных авторов при проведении обзора научной литературы и собственных экспериментальных данных [8, 9].

Цель исследований - моделирование ингибирования численности микроорганизмов в аллювиальной почве Центральной поймы р. Оки.

Объекты и методы исследований

В качестве исходных данных нами взяты концентрации Cd и влажность почвы, численность микроорганизмов по ее горизонтам. Фактические данные получены в сентябре 2024 года, когда был откопан шурф на поле АО «Московское» Рязанского района Рязанской области и выполнено полнопрофильное описание профиля аллювиальной почвы Центральной поймы реки Оки. На поле беспрерывно возделывается кукуруза на силос. Зональными особенностями почвы является регулярное затопление почвы в результате половодья, отложения аллювия, его слоистость, невыраженный гумусовый горизонт (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид профиля аллювиальной почвы
Figure 1 – General view of the alluvial soil profile

2024 год отличался ранним паводком и низкой меженью. Потопление почвы наблюдалось в течение 2-х недель.

Методика исследований включала определение концентрации Cd в почве как техногенного металла [6], содержание которого на территории региона повышенное. Метод исследования – фотометрический с катионом. Влажность и температура почвы измерялась тензиметром.

Микробиологические исследования выполнены на кафедре микробиологии Рязанского ГМУ при посеве на питательную среду почвенной суспензии с последующим подсчетом численности микроорганизмов.

Определяли по Гоффману и Тейхеру в мг аминного азота на 10 г почвы за 20 часов.

График построен по полученным данным в системе Statistika 10.

Погодные условия в сентябре отличались от среднееголетних средней температурой воздуха +17,5° С и отсутствием осадков.

Прототипом явилась работа В.В. Водопянова [3], смоделировавшего ингибирование роста микроорганизмов в нефтезагрязненной почве. Отличительными особенностями наших расчетов явился процесс седиментации Cd:

1) при осаждении в присутствии меди, содержание которой в почвах региона высокое, количество выделившегося кадмия возрастает в десятки-сотни раз, но медь сильно подавляет осаждение кадмия. Эффективность этого процесса зависит от соотношения концентраций металлов в растворе, которое в среднем составило $\frac{Cd}{Cu} = \frac{0,4}{2,9} = 0,14$, то есть было незначительным;

2) в аммиачной системе при осаждении плёнки сульфида кадмия формируется поверхностный слой в виде сетчатой структуры. Это происходит за счёт образования и упорядоченной ориентации фибриллярных частиц длиной от 50 до 200 нм, соединённых между собой в сфероподобные агрегаты, в результате чего структура приобретает пористость. Это чисто теоретический вывод, сделанный на основе обзора научной литературы.

В качестве моделей нами взято за основу системы уравнений вида:

$$mS \frac{dC}{dt} - D_1 \frac{d^2 C}{dx^2} \pm q_1 \frac{dC}{dx} - \beta J(M, C) \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = D_2 \frac{d^2 M}{dx^2} \pm q_2 \frac{dM}{dx} + J(M, C) - f(M) \quad (2)$$

где $C(x, t)$ – концентрация Cd,

$M(x,t)$ – концентрация биомассы микроорганизмов,
 t – время,
 x – направление оси диффузии,
 D – эффективные коэффициенты диффузии загрязнителя и биомассы,
 q – конвективный поток субстанции,
 β – количество поллютанта, разлагаемое 1 г микробной популяции,
 m – пористость почвы,
 S – влагонасыщенность почвы.

Учитывая немногочисленность данных, полученных за месяц исследований, нами была использована модель Хиншельвуда, по которой определено ингибирование удельной скорости роста микроорганизмов:

$$\mu = \mu_m - K_P \quad (3)$$

и модель Андрюса, учитывающая ингибирование повышенными концентрациями субстрата, в нашем случае – концентрации C_d , что описывалось уравнением:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_i}} \quad (4)$$

Это уравнение отличается наличием в знаменателе квадратичного члена S^2 с новым кинетическим параметром K_i .

Одновременно со снижением численности микроорганизмов происходит их отмирание, при $\mu=0$ отмирание отсутствует. Расчет скорости отмирания был нами соотнесен с концентрацией C_d в почве (S) по уравнению Колпикова:

$$\mu = \mu_m \frac{1}{1 + \frac{S}{K_d}} \quad (5)$$

где μ – максимальная удельная скорость отмирания (диссимиляции) при нулевой субстрата;

Результаты исследований

Все составляющие известны, кроме количества поллютанта, разлагаемое 1 г микробной популяции. Для расчета нами применена методика Г.В. Кондаковой по изучению биоиндикации, под которой понимается определение биологически значимых нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ. В качестве значимой нагрузки нами принята концентрация токсичного C_d .

Проследить влияние культуры на микробиоценоз почвы и наоборот в этот год не удалось вследствие уборки кукурузы на силос.

Проведенные исследования позволили собрать банк данных для моделирования процесса ингибирования численности микроорганизмов (таблица 1, рисунок 2).

Таблица 1 - Исходные данные для моделирования, слой почвы 0-20 см, продолжительность – 1 месяц

Показатели	Данные по декадам			Средние данные
	1	2	3	
Общее микробное	15,6±2,4	14,6±1,8	13,9±1,9	14,7

число, млн.КОЕ/г				
Целлюлозоразрушение, %	раз в месяц			8,4±
Протеазная активность, мг	3,6±1,1	3,3±1,0	2,8±0,8	3,2
Температура почвы, °С	17±1,8	17±	16±	16,7
Влажность почвы, %НВ	68±4,0	65±5,3	64±6,2	65,7
Содержание Cd в почве, мг/кг	0,45±0,01	0,43±0,02	0,43±0,02	0,44

Микроорганизмы имеют особенности в виде высокой специфичности действия и исключительной чувствительности. Для микробного ценоза все вышеперечисленные составляющие уравнений (1) и (2) имеют значение. Учитывая недолгое затопление почвы весной в половодье, которое отмечается регулярно, в среднем сроком на 2-3 недели, то существенного влияния на почвенную микрофлору оно не оказало. Нижние горизонты влажные, по капиллярам вода поднималась в вышерасположенные слои, поэтому дефицит влаги почвенное население испытывало только в сухие периоды, что как раз и наблюдалось в сентябре 2024 года.

Большее негативное действие оказывает токсичный кадмий, концентрация которого сосредоточена в верхнем пахотном горизонте. Он ингибирует микробиологические и ферментативные процессы, что выражается в снижении активности почвенной микрофлоры. Для сентября численность микроорганизмов в исследуемой почве достаточная, но видовое разнообразие небогатое.

Разложение льняного полотна за месяц экспозиции в почве по шкале Звягинцева характеризовалось как очень слабое. Протеазная активность говорит о биологической активности почвы, способности микроорганизмов разлагать пептиды и белки, свидетельствует о скорости круговорота азота. Величина протеазной активности незначительная, что есть свидетельство затухания деятельности микроорганизмов и недостатка питания

Представленные в таблице 1 данные свидетельствуют об отклонении фактических величин от среднеголетних по температуре в верхнем слое почвы и влажности, что объясняется нехарактерно теплым и сухим сентябрем. Почва сухая, сцементирована за счет факторов:

- ✓ физических – отсутствия дождей, коагуляции почвенных коллоидов, образования структурных отдельностей,

- ✓ химических – при подтоплении почвы протекают восстановительные процессы, сопровождающиеся образованием большого количества соединений закисного железа. Они растворимы, проникают с водой в почвенные комочки и пропитывают их. При сухой погоде в почве, наоборот, развиваются окислительные процессы, и растворимые вещества закисного железа превращаются в нерастворимые соединения окисного железа, которые цементируют почвенные агрегаты,

✓ биологические – за счет корней растений (при дроблении более крупных).



Рисунок 2 – Разложение льняного полотна в аллювиальной почве. Срок экспозиции 1 мес.

Figure 2 – Decomposition of flax cloth in alluvial soil. Exposure period: 1 month.

ОМЧ в среднем составило 14,7 млн. КОЕ/г почвы, идет затухание активности почвенной микрофлоры.

Содержание подвижных форм кадмия в этом слое почвы лишь на 12% меньше норматива и по градации соответствует уровню умеренно-опасному.

Данные из таблицы 1 вводились в уравнения (1) и (2), в которых $J(M(x,t))$, $S(x,t)$ заменена двухчленным уравнением Моно, а $J(M(x,t))$ представлена линейной функцией.

Во-первых, в таком случае достоверной информации получить не представилось возможным из-за отсутствия в уравнениях данных по общей картине

загрязнения почвы, к тому же рассматривается Cd как единственный действенный фактор, влияющий на рост микроорганизмов.

Во-вторых, при решении подобного вида функций изучаемый процесс влияния рассматриваемых факторов на ингибирование роста микроорганизмов характерен лишь для небольшого промежутка времени.

Учитывая малый объем информации в базе данных, накопленной за один месяц исследований, считаем возможным применить эту математическую модель в качестве предварительного ответа на поставленную цель.

Коэффициент микробиологической активности подсчитывался по формуле с учетом протеазной активности (Π), ОМЧ (M) и целлюлозоразрушения (Ψ):

$$K = \frac{\Pi}{M} + \frac{\Psi}{M} \quad (6)$$

Подставив значения в формулы (1), (2) и (4), находим стабилизацию численности микроорганизмов, обусловленную емкостью почвенной экологической ниши, выраженную асимптотической величиной с экспоненциальным ростом, когда скорость роста пропорциональна значению самой величины во времени.

$$K = \frac{3,2}{14,7} + \frac{8,4}{14,7} = 0,80 \quad (7)$$

Коэффициент микробиологической активности невысокий по нескольким причинам: во-первых, снижение деятельности почвенной микрофлоры осенью, во-вторых, влияние высокой концентрации кадмия и погодных факторов на протеазную и целлюлозоразрушающую активность.

На рисунке 3 отображена поверхность отклика активности микроорганизмов в аллювиальной почве центральной поймы р. Оки.

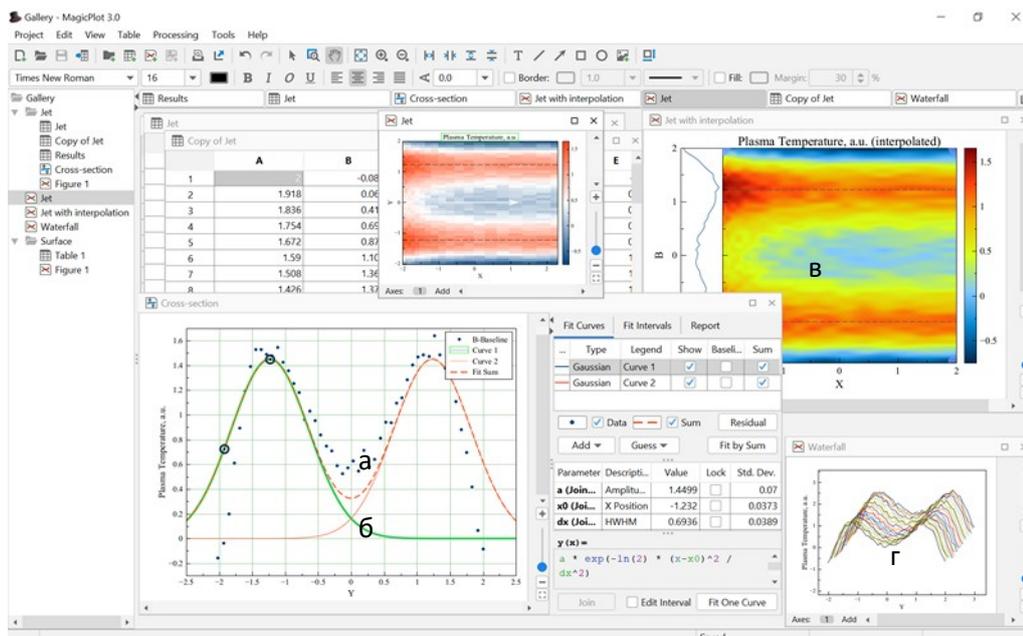


Рисунок 3 – Активность микробиоценоза в аллювиальной почве в сентябре 2024 года

Figure 3 – Microbiocenosis activity in alluvial soil in September 2024

а – протеазная активность микрофлоры (красный штрих, красная линия), б – целлюлозоразложение (зеленая сплошная линия, синий набор точек) теоретические и фактические значения, в – ОМЧ теоретическое и фактическое, г – тепловлагообеспеченность в сентябре: парабола - влажность почвы и обратная парабола – температура почвы

Как видно из графика на рисунке 3, теоретическая численность микроорганизмов и коэффициент их активности выше фактических значений (а).

Взаимодействия в системе «почва-микроорганизмы» и «микроорганизмы-кадмий» носили нелинейный характер, а действие разных факторов учитывалось их сочетанием.

В уравнении ограниченного роста ОМЧ, в котором скорость изменения численности выражалась разностью между скоростью размножения I порядка и скоростью гибели II порядка за счет конкуренции, к примеру, за пищу, получили произведение скорости размножения $M(t)$ и ограничения роста, связанное с емкостью экологической ниши $M_0 - M(t)$. Воздействие микроорганизмов на почву не учитывалось из-за кратковременности опыта.

Использование данной модели, описывающей кратковременный процесс стабилизации и последующего ингибирования численности микроорганизмов от концентрации C_d в почве при данных факторах влияния (температура и влажность почвы, протеазная активность, целлюлозоразложение), что не противоречит фактическим лабораторным данным. На следующий год планируется проведение комплексного обследования почвы, кукурузы и грунтовых вод.

Графически уравнение Хиншельвуда линейно при $R=0$ и $\mu=\mu_m$, при $\mu=0$ и $R=\mu_m/K$, что позволило определить кинетические параметры μ_m и K по пересечению прямой с осями (рисунок 4).

Проведенный расчет по формуле модели Андрюса показал ингибирование повышенными концентрациями Cd, что отображено на рисунке 5.

По уравнению Колпикова $\mu=1,10$. Пока субстрата много, идет рост, отмирания или нет, или почти нет. С повышением концентрации ТМ скорость отмирания плавно повышается. Такая картина вполне правдоподобна, считают П.В. Миронов с соавт.

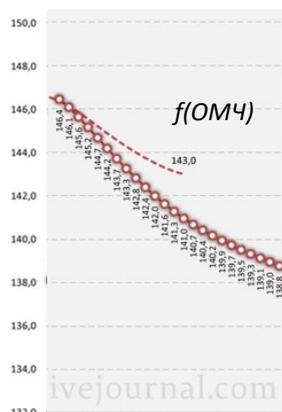


Рисунок 4 – График модели Хиншельвуда, отображавший ингибирование скорости роста численности микроорганизмов
Figure 4 – Graph of the Hinshelwood model showing the inhibition of the growth rate of microorganisms



Рисунок 5 – График модели Андрюса, показывающий ингибирование от повышенной концентрации Cd в почве при конкретных условиях
Figure 5 – The Andrews model plot showing inhibition from elevated Cd concentration in soil under specific conditions

Заключение

Анализируя полученные результаты исследований установлено влияние концентрации Cd при сочетанном действии факторов (температура и влажность почвы, протеазная активность, целлюлозоразушение) на численность почвенных микроорганизмов. Этот показатель смоделирован дифференциальными уравнениями, моделями Хиншельвуда, Андрюса и Колпикова. Так, погодные условия сентября 2024 года были теплыми и сухими, однако нижние горизонты почвы были влажными. Температура почвы была на выше среднеголетних показателей. В этих условиях почвенные микроорганизмы хорошо развивались и их численность была 14,7 млн.КОЕ/г. Разложение льняного полотна было ниже 10%, что характеризовалось по шкале Звягинцева как очень слабое. Протеазная активность тоже была невысокой. Приоритетными для региона являлись 4 тяжелых металла, концентрация которых на территории Рязанской области была выше нормативов. Содержание Cd не достигло максимальных величин, но было повышенным, что оказало влияние на численность микробиоты. Полученные результаты лягут в основу дальнейших исследований аллювиальной почвы Центральной поймы реки Оки.

Библиографический список

1. Величкович, Н. С. Микробиология / Н.С. Величкович, О. В. Козлова, Е. Ю. Агаркова, Д. Н. Калугина. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023. – 199 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/409484?category=43787>
2. Виноградов, Д.В. Экология агроэкосистем / Д.В. Виноградов, А.В. Ильинский, Д.В. Данчеев. – Рязань: ИП Жуков В.Ю., 2020. – 256 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41784419>
3. Водопьянов, В.В. Моделирование ингибирования роста микроорганизмов в нефтезагрязненной почве / В. В. Водопьянов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика, 2007. – Т. 9, № 5. – С. 77-80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-ingibirovaniya-rosta-mikroorganizmov-v-neftezagryaznennoy-pochve>
4. Ильинский, А.В. Исследование накопления тяжелых металлов в фитомассе однолетних трав при различных приемах агрохимической мелиорации / А.В. Ильинский // Евразийский Союз Ученых, 2021. – № 5 (86). – С. 72-75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nakopleniya-tyazhelyh-metallov-v-fitomasse-odnoletnih-trav-pri-razlichnyh-priemah-agrohimicheskoy-melioratsiii>
5. Ильинский, А.В. Исследование транслокации тяжелых металлов в растениях овса при использовании минеральных удобрений / А.В. Ильинский // Евразийский Союз Ученых, 2020. – № 1 (70). – С. 72-75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-translokatsii-tyazhelyh-metallov-v-rasteniyah-ovsa-pri-ispolzovanii-mineralnyh-udobreniy>
6. Колесников, С.И. Ранжирование химических элементов по степени их экологической опасности для почвы / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков, С.В. Пономарева // Доклады РАСХН, 2010 – № 1 – С. 27-29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12975273>
7. Мазанко, М.С. Изменение численности микроорганизмов серопесков под влиянием сочетанного загрязнения свинцом и переменным магнитным полем / М.С. Мазанко, С.И. Колесников, Т.В. Денисова, К.Ш. Казеев, Е.В. Даденко и др. // Научный журнал Кубанского ГАУ, 2012. – № 82(08). – С. 1-10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-chislennosti-mikroorganizmov-seropeskov-pod-vliyaniem-sochetannogo-zagryazneniya-svintsom-i-peremennym-magnitnym-polem>
8. Мильцын, А.М. Анализ поверхности отклика многофакторной модели второго порядка в аффинской системе координат / А.М. Мильцын, Д.Г. Зеленцов, В.И. Олевский // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2010. – С. 30-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23099619>
9. Фрид, А.С. Современное состояние моделирования в агрохимии / А.С. Фрид // Агрохимия, 2004. – № 1 – С. 40-45. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=omhemp>

References

1. Velichkovich, N. S. Mikrobiologiya / N.S. Velichkovich, O. V. Kozlova, E. Yu. Agarkova, D. N. Kalugina. – Kemerovo: Kemerovskij gosudarstvennyj universitet, 2023. – 199 s. URL: <https://e.lanbook.com/book/409484?category=43787>
2. Vinogradov, D.V. E`kologiya agroekosistem/ D.V. Vinogradov, A.V. Il`inskij, D.V. Dancheev. – Ryazan`: IP Zhukov V.Yu., 2020. – 256 s. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41784419>
3. Vodop`yanov, V.V. Modelirovanie ingibirovaniya rosta mikroorganizmov v neftezagryaznennoj pochve / V. V. Vodop`yanov // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo texnicheskogo universiteta. Ser.: Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika i informatika, 2007. – T. 9, № 5. – S. 77-80. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-ingibirovaniya-rosta-mikroorganizmov-v-neftezagryaznennoy-pochve>
4. Il`inskij, A.V. Issledovanie nakopleniya tyazhely`x metallov v fitomasse odnoletnix trav pri razlichny`x priemax agroximicheskoy melioracii / A.V. Il`inskij // Evrazijskij Soyuz Ucheny`x, 2021. – № 5 (86). – S. 72-75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nakopleniya-tyazhelyh-metallov-v-fitomasse-odnoletnih-trav-pri-razlichnyh-priemah-agroximicheskoy-melioratsiii>
5. Il`inskij, A.V. Issledovanie translokacii tyazhely`x metallov v rasteniyax ovsa pri ispol`zovanii mineral`ny`x udobrenij / A.V. Il`inskij // Evrazijskij Soyuz Ucheny`x, 2020. – № 1 (70). – S. 72-75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-translokatsii-tyazhelyh-metallov-v-rasteniyah-ovsa-pri-ispolzovanii-mineralnyh-udobreniy>
6. Kolesnikov, S.I. Ranzhirovanie ximicheskix e`lementov po stepeni ix e`kologicheskoy opasnosti dlya pochvy` / S.I. Kolesnikov, K.Sh. Kazeev, V.F. Val`kov, S.V. Ponomareva // Doklady` RASXN, 2010 – № 1 – S. 27-29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12975273>
7. Mazanko, M.S. Izmenenie chislennosti mikroorganizmov seropeskov pod vliyaniem sochetannogo zagryazneniya svinczom i peremennym magnitnym polem / M.S. Mazanko, S.I. Kolesnikov, T.V. Denisova, K.Sh. Kazeev, E.V. Dadenko i dr. // Nauchnyj zhurnal Kubanskogo GAU, 2012. – № 82(08). – S. 1-10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-chislennosti-mikroorganizmov-seropeskov-pod-vliyaniem-sochetannogo-zagryazneniya-svintsom-i-peremennym-magnitnym-polem>
8. Mil`cyn, A.M. Analiz poverxnosti otklika mnogofaktornoj modeli vtorogo poryadka v affinskoj sisteme koordinat / A.M. Mil`cyn, D.G. Zelenczov, V.I. Olevskij // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovy`x texnologij, 2010. – S. 30-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23099619>
9. Frid, A.S. Sovremennoe sostoyanie modelirovaniya v agroximii / A.S. Frid // Agroximiya, 2004. – № 1 – S. 40-45. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=omhemp>