

## MATHEMATICAL MODELING IN ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY

Naizabayeva L.K.<sup>1</sup>, Nurzhanov Ch.<sup>2</sup>, Mukimbekov M.Zh.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>al-Farabi Kazach National University, Almaty, Kazakhstan  
naizabayeva@gmail.com, darkeremite@yandex.kz

**Key words:** mathematical modeling, xenobiotics, ecology, biotechnology, bioremediation, phytoremediation

**Abstract.** Mathematical models are an efficient tool to find the optimal solution, the adequate description of the process of soil contamination with xenobiotics, forecasting the effects of violations of soil processes and the selection of the optimal strategy of biological remediation (bioremediation and phytoremediation).

The article analyzes the methodological approaches to the modeling of the destructive effects of pollutants that can negatively influence on an ecological situation, and analyzes the possibilities of mathematical modeling of bioremediation and phytoremediation soils contaminated by xenobiotics. Is described achievement of mathematical modeling in the field of environmental biotechnology? Basic attention is given the conceptual basis of the models under consideration and interpretation of simulation results.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

Найзабаева Л.К.<sup>1</sup>, Нуржанов Ч.А.<sup>2</sup>, Мукимбаев М.Ж.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
naizabayeva@gmail.com, darkeremite@yandex.kz

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ксенобиотики, экология, биотехнология, биоремедиация, фиторемедиация

**Аннотация.** Математические модели являются эффективным инструментом, которые позволяют найти оптимальное решение, адекватное описание процесса загрязнения почв ксенобиотиками, прогнозирование последствий нарушения почвенных процессов и выбор оптимальной стратегии биологической ремедиации (биоремедиации и фиторемедиации).

В статье проведен анализ методологических подходов к моделированию деструктивного воздействия загрязнителей, отрицательно влияющих на экологическую ситуацию, и проанализированы возможности математического моделирования процессов биоремедиации и фиторемедиации почв, загрязненных ксенобиотиками. Описаны достижения математического моделирования в области экологической биотехнологии. Основное внимание уделено концептуальной основе рассматриваемых моделей и интерпретации результатов моделирования.

Изучение особенностей влияния ксенобиотиков на биологические процессы в почве и механизмов устойчивости растений к токсикантам является научной основой при разработке технологии предотвращения негативных последствий загрязнения и методов прогнозирования экологического риска загрязнения почв [1]. Важность разработки прогнозирования возможных рисков связано с возрастающим загрязнением почвы ксенобиотиками предприятий агропромышленного и нефтегазового комплекса, горнорудной и перерабатывающей промышленности, военно-испытательными полигонами. Почвы вокруг этих территории содержат в несколько раз превышающие предельно допустимые концентрации нефтепродуктов, полициклических ароматических и галогенированных углеводородов, радионуклидов, пестицидов, тяжелых металлов [2-4].

Так, к примеру, почвы Восточно-Казахстанской области загрязнены Zn, Cd, Pb, Cu в результате длительной деятельности металлургических комбинатов в Зыряновске, Риддере и Усть-Каменогорске. В почвах ядерного полигона и промышленных предприятий г. Семипалатинска содержание Zn в 7,4 раза, Pb – в 9,9 раза, Co – в 2,4 раза, Cr – в 1,7 раза больше по сравнению с их фоновым содержанием [5]. Высокая концентрация ряда тяжелых металлов в почве отрицательно отражается на уровне урожайности и качестве растительной продукции. В значительной части растительных проб содержание тяжелых металлов превышает допустимую концентрацию (ПДК) в 2-3,5 раза [6]. Исследования почвы вокруг складских помещений в Алматинской и Акмолинской областей показали, что они загрязнены стойкими органическими загрязнителями, в частности метаболитами ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан) и изомерами ГХЦГ (гексахлорциклогексан), концентрации которых превышают предельно-допустимые нормы в десятки и сотни раз [7]. Опасность ксенобиотиков заключается в том, что многие из них слабо деградируются в природной среде. Например, период деградации цинка составляет 500 лет, кадмия – до 1100 лет, меди – до 1500 лет, свинца – от 740 до 5900 лет, метаболиты ДДТ, изомеры ГХЦГ – до 70 лет [2]. Высокие концентрации тяжелых металлов и стойких органических пестицидов в почве обладают мутагенным и канцерогенным эффектом и способностью к биоаккумуляции и биомагнификации. Они способны переноситься на большие расстояния в атмосфере, выпадать совместно с осадками на удаленных территориях и загрязнять подземные воды и изменять качественный состав почвы [8].

Одним из способов улучшения экологической обстановки и предотвращения негативных последствий загрязнения среды ксенобиотиками на экосистему является ремедиации.

#### **Способы восстановления техногенно-загрязненных почв**

Ремедиация загрязненных ксенобиотиками почв/воды – это приоритетное направление в области охраны окружающей среды. В настоящее время существует более 27 типов технологии очистки загрязненных земель с помощью физико-химических и биотехнологических методов [9]. При использовании физико-химических методов ремедиации загрязненный грунт извлекают, измельчают, помещают в специальные камеры, где проводят либо химическую экстракцию загрязнения, либо его вымывание. Принято считать, что эффективность физико-химических методов высока, так как мало зависит от конкретных характеристик загрязнений среды и практически не зависит от климатических условий окружающей среды, отличаются от биотехнологических методов, высокой стандартизацией применения технологии, оперативностью, предсказуемостью результата. При этом процесс ремедиации можно провести за несколько недель в зависимости от масштаба загрязнения. Однако физико-химические методы оказывают жесткое воздействие на почву и высоко затратны [9]. Более перспективными способами очистки загрязненных территорий являются современные успешно развивающиеся и применяющиеся биотехнологические методы, основанные на активации природных механизмов самоочистки с помощью биологических объектов: биоремедиация и фиторемедиация. Суть биоремедиации заключается в том, что в процессе биоочистки увеличивается скорость естественной микробной деградации загрязнителей среды путем взаимодействия с питательными веществами как источниками углерода или донорами электронов. При этом могут быть использованы местные микроорганизмы или отобранные специфические штаммы, способные деградировать загрязнения с высокой скоростью.

Существует два метода биоремедиации почв *ex situ* и *in situ*. Технология биоочистки *ex situ*

включает биореакторы, биофильтры и методы компостирования, а *in situ* – биостимуляцию, биовыход и отдельные методы компостирования. Биоремедиация *ex situ* более дорогостоящая, чем биоремедиация *in situ*. Тем не менее, у технологий данного типа есть ряд преимуществ: они требуют меньше времени и обеспечивают полный контроль процесса очистки. Процесс утилизации загрязнителя при ферментации в биореакторе и стоимость (на рынке США) на 10-40% ниже, чем стоимость аналогичного проекта, выполненного физико-химическими методами [9, 10]. Фиторемедиация приобрела большую популярность в мире и одобрение у широкой общественности, так как это экологически чистая и дешевая технология и применима в любых экологически неблагоприятных зонах. Рыночный успех фиторемедиации связан, в первую очередь, с ее низкой стоимостью по сравнению с другими технологиями. Основная цель фиторемедиационной технологии – это восстановление деградированных экосистем и загрязненных территорий непосредственно в районе загрязнения *in situ* с помощью растений [11-16].

Критерии выбора методов очистки зависят, прежде всего, от типа ксенобиотиков. Для биоремедиации нефтезагрязненных экосистем успешно применяют штаммы микроорганизмов (их иначе называют “бактериальные коктейли”), утилизирующие углеводороды. Например, основную роль в процессе деструкции нефтепродуктов в почве выполняют бактерии родов *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, способные использовать компоненты нефти в качестве источника энергии [17]. Успешно используются бактериальные препараты для восстановления нефтезагрязненных земель, например, бактериальный препарат БИОР-АВ, созданный отделом биотехнологии ОАО «МНИИЭКОТЭК», Пермь. Данный биодеструктор нефти содержит (%): гуминовые кислоты – 65,0; карбоновые кислоты – 11,0; аминокислоты – 13,36; полисахариды – 0,6; витамины группы В – 0,04; активную микрофлору (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens*) – 10,0 [18]. Микроорганизмы способны разрушать практически любые соединения: органические или минеральные, но при условии применения смесей культур. Однако технология биоремедиации малоэффективна для некоторых видов ксенобиотиков, например, мышьяка, кадмия, меди, ртути, селена, свинца, стойких пестицидов и радионуклидов из-за медленной деградации их микроорганизмами [19].

Для восстановления загрязненных почв/воды данными ксенобиотиками успешно используют технологии фиторемедиации. Следует выделить два пути фиторемедиации – повышение доступности ксенобиотика для растений и экстрагирование их из почвы толерантными видами-аккумуляторами. Для повышения биодоступности ксенобиотика применяются различные хелатирующие агенты, изменение рН почвенной среды, окислительно-восстановительные добавки. Причем растения должны обязательно обладать толерантностью к высоким концентрациям ксенобиотика, способностью их накапливать, быстро расти и образовывать большую биомассу. В США исследовали возможность фиторемедиации загрязненных Pb почв и роль синтетических хелатов в фитоэкстракции Pb. При загрязнении Pb 2500 мг/кг почвы хелаты повышали концентрацию Pb в стеблях кукурузы и гороха с 500 до 1000 мг/кг [20].

Составлен перечень древесных и травянистых видов растений (гипераккумуляторов, аккумуляторов и эксклюдеров), используемых для фиторемедиации загрязненных органическими и неорганическими ксенобиотиками почв/воды [21]. Известно около 400 видов растений-гипераккумуляторов, произрастающих на богатых металлами территориях в тропиках и средних широтах. Например, *Miscanthus x giganteus* (мискантус гигантский) обладает потенциалом деградировать органические загрязнители, в частности, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Показано, что корневые экссудаты *M.giganteus* обладают деструкционной способностью, они разлагают пирен и фенантрен [22-24]. Выявлено, что полифенольные соединения (галловая, хлорогеновая и кофейная кислоты), флавоноиды (кверцетин, рутин, катехин) присутствующие в ризосфере *M. giganteus* стимулируют рост микроорганизмов, утилизирующие ПАУ [24]. Далее вид *Kochea sp.* биodeградирует пестициды, такие как атразин, металлохлор, трифлуралин [25]. В США более 200 частных фирм занимаются на коммерческой основе очисткой окружающей среды фиторемедиационным методом. Эти фирмы осуществляют очистку среды по заказу крупных корпораций, армии США, а также по заказу любого государственного учреждения или физического лица [26].

В Казахстане создан определенный научный задел в области разработки и внедрения

технологии фито и биоремедиации почв. В Институте биологии и биотехнологии растений разработаны технологии фиторемедиации почв, загрязненных пестицидами и тяжелыми металлами [27-29], в Институте микробиологии и вирусологии и Казахском национальном университете им аль-Фараби разработаны методы деструкции нефтезагрязнений и технологии фиторемедиации территорий, загрязненных тяжелыми металлами и радионуклидами [30, 31].

#### **Математическое моделирование в экологии**

Компьютерная технология открыла широкие возможности для изучения процессов, происходящих в природе. Среди задач, успешно моделируемых на компьютерах, особое место занимают экологические процессы. С одной стороны – это законы развития естественных биологических видов в природной среде, с другой – исследование влияния деятельности человека на природу. Методы экологического моделирования условно делят на физические и математические. При физическом моделировании изучаемое явление воспроизводится в том или ином масштабе с сохранением его физической природы. Математическое моделирование представляет собой способ исследования экологических явлений путем изучения процессов, имеющих различное физическое содержание, но описываемых одинаковыми математическими соотношениями. Решение математических моделей может осуществляться аналитически, численными методами, на аналоговых и цифровых вычислительных машинах.

Существует три типа математического моделирования. Первый тип основан на фундаментальных законах материального мира (законы сохранения энергии, массы, количества движения, переноса, трансформации и др.). Второй тип математических моделей основан на установлении закономерностей функционирования экологических систем путем статистического выявления взаимосвязей в этих системах или объектах. Разработка подобных моделей заключается в выборе метода статистического анализа, планировании процесса получения данных контроля, компоновке данных об экологической системе, алгоритмировании и расчете компьютерными средствами статистических соотношений. Для долгосрочного прогнозирования поведения сложных экологических систем используют третий тип математического моделирования – имитационный. Суть имитационного моделирования заключается в изучении сложной математической модели с помощью экспериментирования с моделью и обработке результатов этих экспериментов. Имитация позволяет воссоздавать причинно-следственные связи экологических явлений и процессов, предоставляя возможность не только теоретически изучать поведение сложных экосистем, но и исследовать альтернативные стратегии управления экологической ситуацией [32].

Диапазон и масштаб моделируемых процессов крайне велик - от глобальной экологии до прогнозирования динамики отдельных компонентов агроценозов, поэтому при классификации экологических моделей используются различные подходы. По способам реализации модели подразделяются на регрессионные (эмпирические, феноменологические) и эколого-физиологические (объясняющие, механизменные) [33]. Первые базируются на массовом экспериментальном материале. Вторые основаны на представлении о механизме функционирования модели целого объекта. Их верификация производится по экспериментальным данным, что позволяет проверить достоверность гипотезы [34].

Для детального анализа и прогноза риска загрязнения почвенного покрова различными ксенобиотиками используют различные методы математического моделирования. Лидирующее место среди программных средств в области охраны окружающей среды занимают модели загрязнения почвы/воды ксенобиотиками: Hydrus [35]; LEACHM [36]; WAVE [37], а также программные продукты России, разработанные фирмой «Интеграл», объединенные в серию «Эколог» и другие [38]. Модель Hydrus представляет собой набор Windows, на основе программного обеспечения для моделирования, которые могут быть использованы для анализа потока воды в переменном насыщенном пористых средах (например, почва). Модель LEACHM была разработана J.Hutson и R.Wagenet в 1992 году [36] и является одномерной моделью воды и движения растворенного вещества, химических реакций и поглощения растениями в зоне аэрации. Программные продукты России, разработанные фирмой «Интеграл», позволяют решить огромный спектр задач в области атмосферного воздуха – расчет величин выбросов загрязняющих веществ, прогнозирование последствий аварий на предприятиях по хранению сильнодействующих ядов. В

работе Р.В.Тесленко [39] разработана имитационно-технологическая система и компьютерная программа "Traector" для проектирования рекультивационных и земельно-охранных систем по ликвидации остаточных загрязнений в условиях проточности мелиорантов. Сотрудники Института водных проблем России разработали с помощью программы TFDD фирмы Геолинк математическую модель биоразложения нефтяных загрязнений в почвогрунтах [40, 41]. Для оценки принесенного ущерба с использованием математического моделирования производится экспертиза, в результате которой количественно оценивается сумма штрафа, которую загрязняющее предприятие обязано выплатить государственным или местным органам. Такие меры оказались весьма действенными и привели в развитых странах практически к повсеместному внедрению очистительных технологий. В России большой вклад в это направление внесли работы школы академика Г.И.Марчука. Модели такого типа широко используются в Европе и США при разрешении судебных исков, предъявляемых населением или местными властями промышленным предприятиям в связи с нанесением определенного экологического ущерба [42]. Следует заметить, что математическое моделирование в области экологии в Казахстане начинает развиваться. Разработана модель продуктивности экосистемы, на основе интеграции природных зон, входящих в нее в соответствии с их географической зональностью, которая позволяет определить закономерности функционирования природных экосистем не только при долговременном изменении климата, но и от степени антропогенного воздействия [43]. Согласно Экологическому кодексу Республики Казахстан предусмотрено создание компьютерной информационной базы данных учета загрязнения окружающей среды [44].

#### **Математическое моделирование в экологической биотехнологии**

Эффективным инструментом современной экологической биотехнологии, направленным на адекватное описание и прогнозирование природных процессов в условиях техногенного воздействия, является математическое моделирование. Математические модели позволяют найти оптимальное решение, адекватное описание процесса загрязнения почв ксенобиотиками, прогнозирование последствий нарушения почвенных процессов и выбор оптимальной стратегии биологической ремедиации (биоремедиации и фиторемедиации).

Исследование сложных механизмов биоремедиации требует создания пакета прикладных программ на основе биомеханических и математических моделей, описывающих процессы очистки почвы от ксенобиотиков под действием микроорганизмов [45, 46]. Так, в работе О.А.Коростина с коллегами [45, 47] был представлен пакет прикладных программ «Очистка загрязненной нефтью и тяжелыми металлами почвы с помощью биосурфактанта». Описаны три основных блока, составляющих представленный пакет прикладных программ, биомеханические и математические модели, на основе которых осуществляется решение задач в каждом из блоков пакета программ. Первый блок «Расчет времени отмывания биосурфактантом загрязненной нефтью почвы, находящейся в накопительном резервуаре». Данный блок предназначен для определения времени прохождения заданного количества биосурфактанта в загрязненной нефтью почве, находящейся в накопительном резервуаре, а также для определения средней скорости вытекания биосурфактанта из накопительного резервуара. Второй блок «Определение параметра  $k$  фильтрации биосурфактанта в почве, загрязненной солями тяжелых металлов» предназначен для определения  $k$  – коэффициента сопротивления со стороны среды при фильтрации биосурфактанта в почве на основе экспериментальных данных по фильтрации биосурфактанта в почве, загрязненной солями тяжелых металлов. Третий блок «Расчет динамики сорбции и десорбции солей тяжелых металлов в почве при фильтрации в ней раствора биосурфактанта» предназначен для прогнозирования эффективности биоремедиации. В своих исследованиях авторы использовали различные математические модели: задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения и краевая задача для уравнения Лапласа в прямоугольнике.

В работе Куюкина М.С. с коллегами [46] предложена математическая модель стационарного процесса нефтеотмывания загрязненного почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта. Разработанная модель основана на теории фильтрации жидкости через пористые материалы и была построена на основе экспериментальных данных по проникновению биосурфактанта в модельной почвенной колонке. Процесс фильтрации описывали уравнениями безынерционного течения идеальной несжимаемой жидкости под действием силы тяжести,

объемной силы сопротивления, пропорциональной скорости, и силы сопротивления, сосредоточенной на фронте проникновения и зависящей от скорости. Авторами предложено адекватное прогнозирование промышленного процесса отмытия загрязненного почвогрунта в полевых условиях.

В Бельгии разработана модель оценки выполнимости метода экстракции для удаления тяжелых металлов из загрязненных почв [48], позволяющая быстро и недорого оценить метод очистки почвы. Определяется поток тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, Cd) в процессе кислотной процедуры экстракции почвы с обратным ходом, состоящим из стадий разрушения карбонатов, растворения и промывания. Модель была калибрована и обоснована экспериментальными результатами. Модельные прогнозы адекватно описывали поведение тяжелых металлов и их удаление на каждой стадии экстракции. Определены оптимальные условия для стадий экстракции, оценена возможность использования процедуры экстракции для удаления тяжелых металлов из очагов загрязнения.

Математическое моделирование (процесса) очистки почв с низким зарядом поверхности от  $\text{Cr}^{6+}$  представлено в работе из США [49]. Авторами апробирован кинетический метод очистки песчаного субстрата от соединений  $\text{Cr}^{6+}$  *in situ*, основанный на наложении постоянного градиента потенциала в матрице с графитовым катодом и железным анодом, что обуславливает миграцию хромата к аноду, где токсичный  $\text{Cr}^{6+}$  восстанавливается до  $\text{Cr}^{3+}$ .

Ученые Казанского университета [50] в своей статье привели сравнительные исследования в области математического моделирования процессов переноса органических загрязнителей в природных пористых средах с учетом их биодegradации микроорганизмами, рассмотрели различные способы математического описания механизмов, вовлеченных в процесс переноса загрязнителей и их взаимодействия с почвенной биотой.

В работе Д.В.Коннова, И.С.Пашковский [51] предложена модель биоразложения и массопереноса нефтепродуктов в зоне аэрации, учитывающая основные процессы, протекающие при очистке почвы. Применимость модели рассмотрена на основе полевых данных и результатов лабораторных экспериментов. Рассматривали основные процессы, происходящие при очистке почвы от нефтепродуктового загрязнения, путем периодического внесения раствора биопрепарата. На основе имеющихся литературных и экспериментальных данных авторами были рассмотрены следующие процессы – разложение нефтепродукта бактериями, рост и отмирание бактерий, выработка бактериями поверхностно-активных веществ, переход нефтепродукта в эмульсию, перенос бактерий с инфильтрующей водой с учетом их сорбции и десорбции, перенос эмульсии нефтепродукта с инфильтрующей водой. Э.В.Чеботаревым [52] построены математические модели изменения концентрации нефти в загрязненных почвах под действием сорбентов и микроорганизмов. При построении математической модели изменения концентрации нефти в почве с помощью нефтеразлагающих микроорганизмов использована модель Моно, который описывает процесс изменения количества субстрата под действием микроорганизмов.

Моделирование процессов загрязнения в системе «почва-растение» приобретают особую актуальность в фиторемедиационной технологии. Большинство исследователей моделируют одноразовое загрязнение почв, далее изучают поведение элемента в почве и затем оценивают воздействие загрязнения на растение в контролируемых условиях. Исследования направлены в основном на моделирование процесса переноса ионов тяжелых металлов в системе «почва-растение» [53-56]. Характер действия загрязнителей в естественных условиях отличается значительной изменчивостью во времени, что затрудняет проведение контроля за степенью загрязнения среды в экосистемах [57]. В связи с этим, для интегрирования значительного объема информации о физико-химических процессах, происходящих в почве, и процессы миграции ксенобиотика, происходящие в почвенно-растительных системах используют имитационное моделирование. Например, в работах А.А.Григорьева с соавторами [58] применили имитационную модель, в основу которой положен коэффициент биологического поглощения. Для исследования системы «почва-растение» оценили зависимость накопления в период вегетации различными органами растения тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути, мышьяка) от их содержания в почве. В качестве растения-фиторемедиатора использовали топинамбур (*Helianthus tuberosus*). Авторы пришли к выводу о том, что практическое применение

адаптированной модели, позволит разработать технологию фиторемедиации загрязненных земель с помощью возделывания топинамбура для возврата маргинальных земель в сельскохозяйственный оборот.

В Уфимском государственном авиационном техническом университете В.В.Водопьянов [59] разработал математическое моделирование процесса деградации поллютантов в растениях. Автор рассмотрел модель, где часть загрязнения может минерализоваться почвенными микроорганизмами, часть поллютантов может оставаться в водной фазе почвы, часть – находиться в биодоступной форме, связанной с твердой почвенной матрицей, а некоторое количество загрязнения может находиться в труднодоступной форме в виде связанных остатков. При математическом моделировании процесса деградации поллютантов в растениях автор учитывал следующие показатели: концентрация загрязнителя в ризосфере растений; численность активных клеток-деструкторов или численность углеводородокисляющих микроорганизмов; плотность питательных веществ, выделяемых растениями в ризосфере; функция фитотоксичности; продолжительность деградации. Проведенные расчеты по модели при различных значениях параметров показали ее феноменологическое совпадение с результатами экспериментов.

В статье F.Lugli с коллегами “Фиторемедиация металлов: численный анализ” [60] моделировали фиторемедиацию почвы, загрязненной ионами тяжелых металлов (с учетом типа культуры, плотности посева, системы полива растений, образования почвенной корки и длины корневой системы). В своей работе они использовали численную модель Hydrus-1D. Модель Hydrus поглощения загрязнителя растением была предварительно была откалибрована на эксперименте, где в качестве фиторемедианта использовали траву *Vetiver grass*. В качестве загрязнителя – ионы металлов:  $Cd^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ . В процессе эксперимента учитывали следующие показатели: структуру почвы и ее плотность; температуру и влажность почвы; количество воды для полива; интенсивность эвапотранспирации в соответствии с законом Бера. На основании моделирования авторы показали, что предложенная ими методика важна при оценке процесса фитоэкстракции загрязнителя. Ими установлено, что фитоэкстракция загрязнителя из почвенной среды усиливает интенсивность транспирации, а для снижения интенсивности транспирации необходимо оптимизировать систему орошения и повысить плотность посадки растений. Кроме этого выявлено, что взаимодействие загрязнителя в почве влияет на эффективность фитоэкстракции загрязнителя из почвы. Из-за низкой мобильности  $Pb^{2+}$  в почве растение не обладает способностью фитоэкстрагировать загрязнитель, а для загрязнителей, характеризующихся низким фактором ретардации (например, ионы  $Zn^{2+}$ ), ремедиационный процесс более эффективен и растение менее востребовано в орошении. Сделанный автором вывод – с помощью математического моделирования экономически эффективно использовать растение *Vetiver grass* для фиторемедиации Zn-загрязненных почв.

Следует заметить, что математическое (компьютерное) моделирование в экологии, в частности, в экологической биотехнологии – достаточно обширная область исследования и по выбору объектов моделирования, и по набору методов, и по спектру решаемых задач. Поэтому довольно трудно охватить сразу все аспекты моделирования. Внимание ученых в основном обращено на два класса методов: моделирование с помощью дифференциальных уравнений и расчетах, определяющие ремедиационную значимость, в частности коэффициент биологического поглощения.

В Казахстане успешно развивается компьютерное моделирование, в основном для решения агропромышленных задач с целью прогнозирования урожайности в зависимости от климатических и агротехнических условий. Создана динамическая модель яровой пшеницы в условиях аридного климата России и Казахстана с учетом адаптационных свойств растений. Данная модель может быть использована для решения задач оценки влияния колебаний и изменений климата в системах мониторинга и прогнозирования урожайности для аридных районов Северной Евразии [61]. Для идентификации параметров модели использовали результаты полевых опытов на яровой пшенице Научно-производственного центра зернового хозяйства имени А. И. Бараева (Казахстан, период наблюдений с 1986 по 2009 гг.) и показатели агрометеостанции «Ершов» (Саратовская область, Россия, период наблюдений с 1951 по 1981 гг.). Несомненно, компьютерное моделирование в данной области является прогрессивным направлением, которое направлено на автоматизирование

экспериментальных исследований для различных сельскохозяйственных культур. В своих многочисленных исследованиях В.М.Казиев [62, 63] отмечает, что при разработке различных систем автоматизированного прогнозирования урожайности, при расчете максимальных урожаев и их агротехническом, экономическом, экологическом обеспечении важное место занимают модели роста и развития растений.

Математическое моделирование используют в основном нефтегазовой промышленности. Ведущие зарубежные компании, оказывающие сервисные услуги в нефтегазовой отрасли Казахстана для исследования различных сценариев развития аварийных ситуаций, для оценки загрязнения почвы, грунтовых и поверхностных вод при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов и негативного влияния на окружающую среду теплового загрязнения в результате возгорания разливов нефти и газовых факелов. В связи с отсутствием программных пакетов в стране, для проведения экологической экспертизы проектов используют коммерческие пакеты программ в основном из России. В процессе выполнения магистерской диссертации Нуржанов Ч.А. создал пять программ, которые по заданным параметрам могут вычислить концентрацию выбросов вредных веществ в атмосферу, которая может быть успешно применима для ускорения процесса проведения экологической экспертизы. Для разработки компьютерной программы им использована среда программирования C# [64]. Вопрос о создании базы данных учета загрязнения окружающей среды ксенобиотиками, вопрос ремедиации загрязненных территории остаются недостаточно изученными. В связи с этим, математическое моделирование в области экологии, в частности в экологической биотехнологии представляет большой интерес для страны и дает возможность понять причинно-следственные связи в системе «почва-растение» и «почва-микроорганизмы». Полученные знания могут стать научной основой при разработке биологической технологии восстановления загрязненных почв.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузнецова С.Н. Методы проектирования математического обеспечения систем прогнозирования техногенных и экологических рисков – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2009. – 20 с
- [2] Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир. 1989. – 439 с.
- [3] Damalas C. A. Understanding benefits and risks of pesticide use // Science Research Essay. – 2009. – Vol.4(10). – P. 945-949.
- [4] Плешакова Е.В., Решетников М.В., Любунь Е.В., Беляко А.Ю., Турковская О.В. Биогенная миграция Cd, Pb, Ni и As в системе «почва–растения» и изменение биологической активности почвы //Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. –2010. – Т. 10, Вып. 2 – С.59-66.
- [5] Панин М.С. Влияние техногенных факторов и агрохимической деятельности человека на содержание миграцию тяжелых металлов в системе “почва-растение” – Состояние и рациональное использование почв республики Казахстана. –1998. – С. 76-79.
- [6] Данные Экологической инспекции по г. Риддеру. – 2010. – 10 с.
- [7] Нуржанова А., Седловский А., Калмыков Е. Анализ содержания хлороорганических пестицидов в почвах некоторых объектов Алматинской и Акмолинской областей // Биотехнология. Теория и практика – 2004.– № 3. – С. 99-105.
- [8] Rajaganapathy, V., Xavier, F., Sreekumar, D., Mandal, P.K. Heavy metal contamination in soil, water and fodder, and their presence in livestock and products: a review // J. Environ. Sci. Technol. – 2011.– Vol.4. – P 234-249.
- [9] Вельков В.В. Биоремедиация: принципы, проблемы. Подходы // Биотехнология. 1995. – № 3-4. – С. 20-27.
- [10] Ritter W.F., Scarborough R.W. A review of bioremediation of contaminated soils and ground-water // J. Environ. Sci. Health. – 1995. – Vol. 30. – P. 333-357.
- [11] Cunningham S.D., Ow D.W. Promises and Prospects of Phytoremediation // Plant Physiol. – 1996. – Vol. 110. – P. 715-719.
- [12] Baker A.J., McGrath S.P., Reeves R.D. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal polluted soils // Contaminated soil and water. – 2000. – Boca-Raton, FL, USA: Lewis Publishers. – P. 85-107.
- [13] Tsao D.T. Overview of phytotechnologies // Advances in Biochemical Engineering /Biotechnology Phytoremediation – 2003. – Springer-Verlag: Berlin – Vol. 78. – 50 p.
- [14] Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами // Физиология растений – 2003. – Т. 50. – № 5. – С. 764-780.
- [15] Karthikeyan R, Davis L.C., Erickson L.E., Al-Khatib K., Kulakow P.A., Barnes P.L., Hutchinson S.L., Nurzhanova A.A. Potential of plant-based remediation of pesticide contaminated soil and water using non-target plants such as trees, shrubs and grasses // Plant Sciences. – США, 2004. – Vol. 23, №. 1. – P. 1-11.



[16] Sophie Pascal-Lorber, François Laurent. Phytoremediation Techniques for Pesticide Contaminations // *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation, Sustainable Agriculture Reviews* 6. E. Lichtfouse (ed.). – 2011. – Springer Science + Business Media. – P. 77-105.

[17] Курицын А.В., Курицына Е.И., Катаева И.В. Биоремедиация нефтезагрязненных грунтов на технологических площадках // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, – 2011. – Т. 13, №1(5). – 1271-1273.

[18] Методические указания по практическому применению бактериального препарата-биодеструктора нефти «Биорекультиват АВ (БИОР-АВ) для рекультивации нарушенных земель и биоремедиации нефтезагрязненных грунтов. ОАО «МНИИЭКО ТЭК», г. Пермь, 12.01.2010. С.1-5.

[19] Lunney A.I., Zeeb B.A., Reimer K.J. Uptake of DDT weathered in vascular plants: potential for phytoremediation//*Environmental Science Technology* – 2004. –Vol.38.–P.6147-6154.

[20] Huang Jianwei W. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction // *Environ. Sci. and Technol.* – 1997. – Vol. 31, № 3. – P. 800-805.

[21] Kennen K., Kirkwood N. *Phyto. Principles and resources for site remediation and landscape design.* – 2015. Routledge. New York. – 346 p.

[22] Techer D., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Henry S., Martinez-Chois C., D’Innocento M., Falla J. An appraisal of *Miscanthus giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration // *Ind. Crops Prod.* –2012. – Vol. 36. – P. 427-433.

[23] Techer D., Laval-Gilly P., Henry S., Bennisroune A., Formanek P., Martinez-Chois C., D’Innocenzo M., Muanda F., Dicko A., Rejsek K., Falla J. Contribution of *Miscanthus giganteus* root exudates to the biostimulation of PAH degradation: an *in vitro* study // *Sci. Tot. Environ. Ind. Crops Prod.* –2011. – Vol. 409. – P. 4489-4495.

[24] Techer D., Martinez-Chois C., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Formanek P., D’Innocenzo M., Fall, J. Assessment of *Miscanthus giganteus* for rhizoremediation of long-term PAH contaminated soils // *Appl. Soil. Ecol.* –2012. – Vol. 62. – P. 42-63.

[25] Coats J.R, Anderson T.A. *The Use of Vegetation to Enhance Bioremediation of Surface Soils Contaminated with Pesticide Wasters.* – 1997. US EPA Office of research and Development. Washindton. DC.

[26] *Phytoremediation of Organics Action Team. Phytoremediation Site Profiles: Cantrall.* – 2000. USA EPA / Washindton. DC.

[27] Нуржанова А.А., Kulakow P., Жамбакин К.Ж. и др. Фиторемедиация загрязненных пестицидами почв – Алматы, 2008 – 160 с.

[28] Нуржанова А.А., Калугин С.Н., Жамбакин К.Ж. Рекомендации по фиторемедиации почв, загрязненных пестицидами – Алматы, 2011 – 54 с.

[29] Атабаева С.Д., Сарсенбаев Б.А. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами – Алматы: ТОО «TST-Company», 2010 – 165 с.

[30] Саданов А.К., Смирнова И.Э., Олейникова Е.А., Галимбаева Р.И., Кузнецова Т.В., Смайлова Л.Т., Айткельдиева С.А. Влияние ассоциаций микроорганизмов, перспективных для биоремедиации нефтезагрязненных почв на их биологическую активность // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Сер. биологическая.* – 2011. – № 4. – С.24-28.

[31] Богустаев К.К., Аликулов З.А. Восстановление засоленных почв Приаралья с использованием специфических видов растений // *Вестник КазГУ. Серия экологическая.* – 2001. –№ 1. – С. 7-10.

[32] Гринин А.С., Орехов Н.А., Новиков В.Н. Математическое моделирование в экологии: Учеб. Пособие – 2003. М.: ЮНИТИ-Дана. – 269 с.

[32] Чумаченко С.И. Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных лесных насаждений. дис..... д-ра биол. наук. 2006. Мытищи. – 287 с.

[33] Романов Е. М. Моделирование роста искусственных энергетических лесов // *Научный журнал КубГАУ.* – 2012. – № 82(08). – С. 1-14

[35] Simunek J., Sejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M.T. *The HYDRUS-1D Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16.* Riverside (CA): Department of Environmental Sciences, University of California. – 2013.

[36] Hutson J., Wagenet R. An overview of LEACHM: a process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. SSSA special publication. – 2014.

[37] Vanclouster M., Viaene P., Diels J., Christiaens K.. *WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment: reference and user’s manual (release 2.0):* Katholieke Universiteit Leuven. – 1994.

[38] Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии РФ. Документы. Доклады и обзоры. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Федерации" 2007

[39] Тесленко Р.В. Обоснование технологических схем восстановления качества грунтовых вод для охраны земель от техногенных загрязнений – автореферат на соискание кандидата технических наук. 2001. Краснодар. – 23 с.

[40] <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>.

[41] <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>.

[42] Математическая экология <http://blog.i.ua/user/2687/23745>.

[43] Мустафаев Ж.С., Рябцев А.Д., Козыкеева А.Т. Современный подход к мелиорации земель в Казахстане // [eccc-water.net/file/mustafaev\\_rvabtsev\\_kozykееva.pdf](http://eccc-water.net/file/mustafaev_rvabtsev_kozykееva.pdf)

[44] Государственный учет загрязнения окружающей среды и их реестры, Экологический кодекс РК от 9 января 2007 года N 212. статья 147, 148, глава 17.

[45] Коростина О.А., Куюкина М.С., Ившина И.Б., Костина Л.В., Осипенко М.А., Няшин Ю.И. Моделирование

процессов фильтрации растворов солей тяжелых металлов и биосурфактанта в почве // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13, № 3 (45). – С. 32–43.

[46] Куюкина М.С., Ивпина И.Б., Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Коростина О.А. Модель нефтеотмывания загрязненного почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта // Российский журнал биомеханики. – 2006. – Т. 10, № 1 (31). – С. 59–67.

[47] Коростина О.А., Куюкина М.С., Ивпина И.Б., Костина Л.В., М.А. Осипенко М.А., Няшин Ю.И. Применение пакета прикладных программ для решения задач, связанных с очисткой почвы от нефти и тяжелых металлов посредством биосурфактанта // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 3 (53). – С. 86–92

[48] цит. Самохвалова В.Л. Применение антидотов при загрязнении системы почва – растение тяжелыми металлами // Грунтознание. – 2006. – Т. 7, № 3–4. – С. 50–66.

[49] Haran Bala, Popov Branko Mathematical modeling of hevalent chromium decontamination from low surface charged soils // J. Hazardous Mater. – 1997. – Vol. 55, № 1-3. – P. 93–107.

[50] Поташев К.А., Малов П.В., Бреус И.П. Учет биодеградации в математических моделях транспорта органических загрязнителей в пористых средах. Современный обзор // Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Естественные науки. – 2011. – Т. 153, кн. 3. – С. 144–170. [49]

[51] Коннова Д.В., Папковский И.С. Модель биологической очистки почв и зоны аэрации нефтепродуктами // Вторая конференция партнеров и пользователей. Консалтинг "Геолинк" <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>.

[52] Чеботарева Э.В. Математические модели изменения концентрации нефти в загрязненных почвах под действием сорбентов и микроорганизмов // Вестник ТГТУ. – 2011. – № 4(26). – С. 48–50.

[53] Белоусова Ю.А. Состояние меди и цинка в системе «почва-растение» в условиях загрязнения – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. 2013. Москва – 20 с

[54] Ефремов И.В., Кузьмин О.Н., Колобова Е.А. Моделирование процессов миграции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах // Аграрная Россия. – 2011. – № 1. – С. 13–21.

[55] Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / С.П. Кундас, И.А. Гишкелюк, В.И. Коваленко, О.С. Хилько; под общ. ред. С.П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. – 212 с.

[56] Росновский И.Н. Системный анализ и математическое моделирование процессов в почвах. – Томск, 2007. – 312 с.

[57] Захаров А.Б. Дендроиндикация загрязненности окружающей среды урбанизированных территорий на примере искусственных популяций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Балахнинской низменности – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. 2014. Нижний Новгород – 20 с

[58] Григорьев А.А., Руденко О.В., Сова Ю.А. О проблемах имитационного моделирования фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами // Матер. 2-ой меж. науч.-практ. конф. «Технические науки – основа современной инновационной системы» – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2013 – С. 83–86.

[59] Водопьянов В.В., Киреева Н.А., Григориади А.С., Якупова А.Б. Влияние нефтяного загрязнения почвы на ризосферную микробиоту и моделирование процессов биодеградации углеводородов // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6 (100). – С. 545–547.

[60] Lugli F., Mahler C.F. Phytoremediation of Metals: A Numerical Analysis // International Journal of Phytoremediation. – 2015. – Vol. 17, N 3. – P. 242–248.

[61] Павлова В. Н., Варчева С.Е. Динамическая модель продуктивности яровой пшеницы для оценки влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климата в степной зоне России и Казахстана // Сб. Математические модели в теоретической экологии и земледелии, посвященной памяти академика Р.А. Полуэктова (Полуэктовские чтения). – Санкт Петербург. 2014. – С. 19–23

[62] Казиев В.М., Кайгермазов А.А. Расчет влажности почвы с учетом динамики накапливаемой биомассы // Сб.: Методы математического моделирования и вычислительного эксперимента. – 1989. Нальчик. – С. 67–70

[63] Казиев В.М., Алоев Т.Б. Моделирование экологически обоснованной оросительной нормы // Вестник КБГУ, серия Экономические науки – 1995. – № 1. – С. 45–51.

[64] Нуржанов Ч.А. Автоматизация методов расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с полигонов твердых бытовых отходов в Казахстане // Сб.: Транспортная наука и инновация», посвященная посланию президента РК Н.А. Назарбаева «Нұрлы Жол – путь в будущее» – 2015. Алматы. – С. 122–125.

## REFERENCES

[1] Kuznetsova S.N. Methods of designing of a software forecasting technological and environmental risks - the thesis abstract on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg. 2009 - 20 p. (in Russ.).

[2] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. - M.: Mir. 1989. - 439 p. (in Russ.).

[3] Damalas C. A. Understanding benefits and risks of pesticide use // Science Research Essay. – 2009. – Vol. 4(10). – P. 945–949.

[4] Pleshakova E.V., Reshetnikov M.V., Lyubun E.V., Belyakov A.Yu., Turkovskaya O.V. Biogenic migration of Cd, Pb, Ni and As in the system "soil-plant" and change the biological-cal activity of soil // Proceedings of the Saratov University. A series of Earth sciences. -2010. - Т. 10, Vol. 2 - p. 59–66. (in Russ.).

[5] Panin M.S. Influence of technological factors and human activities on the agrochemical content of heavy metal migration in the system "soil-plant" - Status and sustainable use of the soil of the Republic of Kazakhstan. -1998. - p. 76–79. (in Russ.).

[6] Data from the Environmental Inspectorate Ridder. - 2010 - 10. (in Russ.).

- [7] Nurzhanova A., Sedlovsky A. Kalmykov E. Analysis of the organochloride content pesticides in soils of some objects in Almaty and Akmolinskaya areas // *Biotechnology. Theory and practice* - 2004. - № 3. - p. 99-105. (in Russ.).
- [8] Rajaganapathy, V., Xavier, F., Sreekumar, D., Mandal, P.K. Heavy metal contamination in soil, water and fodder, and their presence in livestock and products: a review // *J. Environ. Sci. Technol.* – 2011. – Vol.4. – P 234-249.
- [9] Velkov V.V. Bioremediation: Principles, Problems. Approaches // *Biotechnology*. 1995. - № 3-4. - p. 20-27. (in Russ.).
- [10] Ritter W.F., Scarborough R.W. A review of bioremediation of contaminated soils and ground-water // *J. Environ. Sci. Health.* – 1995. – Vol. 30. – P. 333-357.
- [11] Cunningham S.D., Ow D.W. Promises and Prospects of Phytoremediation // *Plant Physiol.* – 1996. – Vol. 110. – P. 715-719.
- [12] Baker A.J., McGrath S.P., Reeves R.D. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal polluted soils // *Contaminated soil and water.* – 2000. – Boca-Raton, FL, USA: Lewis Publishers. – P. 85-107.
- [13] Tsao D.T. Overview of phytotechnologies // *Advances in Biochemical Engineering /Biotechnology Phytoremediation* – 2003. – Springer-Verlag: Berlin – Vol. 78. – 50 p.
- [14] Prasad M.N. The practical use of plants for ecosystem restoration, contaminated metals // *Plant Physiology* - 2003. - V. 50. - № 5. - p. 764-780. (in Russ.).
- [15] Karthikeyan R, Davis L.C., Erickson L.E., Al-Khatib K., Kulakow P.A., Barnes P.L., Hutchinson S.L., Nurzhanova A.A. Potential of plant-based remediation of pesticide contaminated soil and water using non-target plants such as trees, shrubs and grasses // *Plant Sciences.* – CIIIA, 2004. – Vol. 23, № 1. – P. 1-11.
- [16] Sophie Pascal-Lorber, François Laurent. Phytoremediation Techniques for Pesticide Contaminations // *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation, Sustainable Agriculture Reviews 6.* E. Lichtfouse (ed.). – 2011. – Springer Science + Business Media. – P. 77-105.
- [17] Kuritsyn A.V., Kuritsyna E.I., Katayeva I.V. Bioremediation of contaminated soils on the technological platform // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* - 2011 - V. 13, №1 (5). - 1271-1273. (in Russ.).
- [18] Guidelines on the Implementation of bacterial drug-biodegrader oil "Biorekultivat AB (BIOR-AB) for land reclamation and bioremediation of contaminated soils. JSC "MNIIEKO Energy", Perm, 12.01.2010. p.1-5. (in Russ.).
- [19] Lunney A.I., Zeeb B.A., Reimer K.J. Uptake of DDT weathered in vascular plants: potential for phytoremediation//*Environmental Science Technology* – 2004. –Vol.38.–P.6147-6154.
- [20] Huang Jianwei W. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction // *Environ. Sci. and Technol.* – 1997. – Vol. 31, № 3. – P. 800-805.
- [21] Kennen K., Kirkwood N. *Phyto. Principles and resources for site remediation and landscape design.* – 2015. Routledge. New York. – 346 p.
- [22] Techer D., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Henry S., Martinez-Chois C., D’Innocenzo M., Falla J. An appraisal of *Miscanthus giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration // *Ind. Crops Prod.* – 2012. – Vol. 36. – P. 427-433.
- [23] Techer D., Laval-Gilly P., Henry S., Bennisroune A., Formanek P., Martinez-Chois C., D’Innocenzo M., Muanda F., Dicko A., Rejsek K., Falla J. Contribution of *Miscanthus giganteus* root exudates to the biostimulation of PAH degradation: an *in vitro* study // *Sci. Tot. Environ. Ind. Crops Prod.* – 2011. – Vol. 409. – P. 4489-4495.
- [24] Techer D., Martinez-Chois C., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Formanek P., D’Innocenzo M., Fall, J. Assessment of *Miscanthus giganteus* for rhizoremediation of long-term PAH contaminated soils // *Appl. Soil. Ecol.* – 2012. – Vol. 62. – P. 42-63.
- [25] Coats J.R, Anderson T.A. *The Use of Vegetation to Enhance Bioremediation of Surface Soils Contaminated with Pesticide Wasters.* – 1997. US EPA Office of research and Development. Washindton. DC.
- [26] *Phytoremediation of Organics Action Team. Phytoremediation Site Proiles: Cantrall.* – 2000. USA EPA / Washindton. DC.
- [27] Nurzhanova A.A., Kulakow R. Zhambakin K.Zh., et al. Phytoremediation of soil contaminated by pesticides - Almaty, 2008 - 160 p. (in Russ.).
- [28] Nurzhanova A.A., Kalugin S.N., Zhambakin K.Zh. Recommendations for phytoremediation of soils contaminated with pesticides - Almaty, 2011 - 54. (in Russ.).
- [29] Atabaeva S.D., Sarsenbayev B.A. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals - Almaty LLP «TST-Company», 2010 - 165 p. (in Russ.).
- [30] Sadanov A.K., Smirnova I.E., Oleynikova E.A., Galimbaeva R.Sh., Kuznetsova T.V., Smaylova L.T., Aytgeldieva S.A. The influence of associations mikroorganizmov promising for bioremediation of contaminated soils for their biological activity // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Ser. biological.* - 2011. - № 4. - p.24-28. (in Russ.).
- [31] Boguspaev K.K., Alikulov Z.A. Recovering saline soils Aral Sea region with specific species of plants // *Vestnik KSU. A series of environmental.* - 2001. - № 1. - pp 7-10. (in Russ.).
- [32] Grinin A.S., Orekhov N.A., Novikov V.N. *Mathematical modeling in ecology: Textbook. Manual* - 2003 AM: UNITY Dan. - 269 p. (in Russ.).
- [32] Chumachenko S.I. Simulation of multi-species uneven-aged forest stands. *Dis ..... Dr. biol. Sciences.* 2006. Mytishchi. - 287 p. (in Russ.).
- [33] Romanov E.M. Simulation of artificial growth of energy forests // *Scientific journal KubGAU.* - 2012. - № 82 (08). - P. 1-14. (in Russ.).
- [35] Simunek J., Sejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M.T. *The HYDRUS-1D Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16.* Riverside (CA): Department of Environmental Sciences, Uni-

- versity of California. – 2013.
- [36] Hutson J., Wagenet R. An overview of LEACHM: a process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. SSSA special publication. – 2014.
- [37] Vanclooster M., Viaene P., Diels J., Christiaens K.. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment: reference and user's manual (release 2.0): Katholieke Universiteit Leuven. – 1994.
- [38] The official website of the Ministry of Natural Resources and Environment. Documentation. Reports and reviews. State report "On the state and Environmental Protection Federation" in 2007. (in Russ.).
- [39] Teslenko R.V. Substantiation of flowsheets recovery of groundwater quality for the protection of lands from anthropogenic contamination - the author's abstract on competition of the candidate of technical sciences. 2001. Krasnodar. - 23. (in Russ.).
- [40] <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>.
- [41] <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>.
- [42] The mathematical ecology <http://blog.i.ua/user/2687/23745>.
- [43] Mustafayev Zh.S., Ryabtsev A.D., Kozykeeva A.T. The modern approach to land reclamation in Kazakhstan // [ceccawater.net/file/mustafaev\\_ryabtsev\\_kozykeeva.pdf](http://ceccawater.net/file/mustafaev_ryabtsev_kozykeeva.pdf) (in Russ.).
- [44] The state registration of pollution and their registries, Environmental Code of RK from January 9, 2007 N 212. Article 147, 148, Chapter 17. (in Russ.).
- [45] Korostina O.A., Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Kostina L.V., Osipenko M.A., Nyashin Y.I. Modelling of processes of filtration solutions of salts of heavy metals in soil and biosurfactant // Russian Journal of Biomechanics. - 2009. - V. 13, № 3 (45). - p. 32-43. (in Russ.).
- [46] Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Osipenko M.A., Nyashin Y.I., Korostina O.A. Model of oilflushing contaminated soil-ground under the influence of Rhodococcus-biosurfactant // Russian Journal of Biomechanics. - 2006. - V. 10, № 1 (31). - p. 59-67. (in Russ.).
- [47] Korostina O.A., Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Kostina L.V., Osipenko M.A., Nyashin Yu.I. The use of software for solving problems related to the purification of soil from oil and heavy metals through the biosurfactant // Russian Journal of Biomechanics. - 2011, V. 15, number 3 (53). - P. 86-92. (in Russ.).
- [48] Samohvalova V.L. The use of antidotes in the contamination of soil-plant system by heavy metals // *Truntoznavstvo*. - 2006. - V. 7, № 3-4. - p.50-66. (in Russ.).
- [49] Haran Bala, Popov Branko Mathematical modeling of hevalent chromium decontamination from low surface charged soils // *J. Hazardous Mater.* – 1997. – Vol. 55, № 1-3. – P. 93–107.
- [50] Potashev K.A., Malov P.V., Breus I.P. Accounting for biodegradation in mathematical models of transport organic pollutants in porous media. Modern overview // *scientists. Rec. Kasane. Univ. Ser. Natural Sciences*. - 2011. - T.153. Kn.3. - p. 144-170. (in Russ.).
- [51] Konnova D.V., Paszkowski I.S. Model biological treatment of soil and unsaturated zone oil // Second conference of partners and users. Consulting "Geolink" <http://www.rfcontact.ru/text/1211/4.php>. (in Russ.).
- [52] Chebotarev E.V. Mathematical models of changes in the concentration of oil in the Zag-pollution loads soils under the action of microorganisms and sorbents // *Herald TSHPU*. - 2011. - № 4 (26). - p. 48-50. (in Russ.).
- [53] Belousova Yu.A. Status of copper and zinc in the system "soil-plant" in terms of pollution - the thesis abstract on competition of a scientific degree of candidate of biological and logical sciences. Moscow 2013. - 20 p. (in Russ.).
- [54] Efremov I.V., Kuzmin O.N., Kolobova E.A. Modelling of processes of migration of heavy metals in soil-plant systems // *Agrarian Russia*. - 2011. - №1. - p. 13-21. (in Russ.).
- [55] Computer simulation of the migration of contaminants in natural dispersion mediums / .S.P Kundas, I.A. Gishkelyuk, V.I. Kovalenko, O.S. Khilko; under the total. Ed. S.P. Kundas. - Minsk: ISEU. HELL. Sakharov, 2011. - 212 p. (in Russ.).
- [56] Rosnovsky I.N. System analysis and mathematical modeling of processes in soils. - Tomsk, 2007. - 312p. (in Russ.).
- [57] Zakharov A.B. Dendroindication of environmental pollution of urbanized areas on the example of artificial pine populations (*Pinus sylvestris* L.) Balakhna Lowland - Abstract of dissertation for the degree of candidate of biological sciences. 2014. Nizhny Novgorod - 20 p. (in Russ.).
- [58] Grigoriev A.A., Rudenko O.V., Sova Yu.A. On the problems of simulation phytoremediation of soils contaminated by heavy metals // *Mater. 2nd between. Scientific-prac. Conf. "Engineering - the foundation of modern innovational system"* - Yoshkar-Ola: Colloquium, 2013 - p. 83-86. (in Russ.).
- [59] Vodop'yanov V.V., Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Yakupova A.B. The impact of oil pollution in the rhizosphere soil microbiota and modeling of hydrocarbon biodegradation // *Herald OSU*. - 2009. -№ 6 (100). - S. 545-547. (in Russ.).
- [60] Lugli F., Mahler C.F. Phytoremediation of Metals: A Numerical Analysis // *International Journal of Phytoremediation*. - 2015. - Vol.17, N 3. - P. 242-248.
- [61] Pavlov V.N., Varcheva S.E. Dynamic model of productivity of spring wheat to assess the impact of the observed and expected changes in climate in the steppes of Russia and Kazakhstan // *Coll. Mathematical models in theoretical ecology and agriculture, dedicated to the memory of academician R.A.Poluektova (Poluektovskie reading)*. - St. Petersburg. 2014 - p.19-23. (in Russ.).
- [62] Kaziev V.M., Kaygermazov A.A. Calculation based on soil moisture dynamics of accumulated biomass // *Coll. : Methods of mathematical modeling and computational-experimental enforcement*. - 1989, Nalchik. p. 67-70. (in Russ.).
- [63] Kaziev V.M., Alov T.B. Simulation of environmentally sound water the norm-Elnya // *Herald KBSU, science-Economic Series* 1995. - № 1. - p. 45-51. (in Russ.).
- [64] Nurzhanov Ch.A. Automation of methods for calculating emissions of pollutants into the atmosphere from landfills in Kazakhstan // *Coll. : Transport science and innovation* ", dedicated to the message of the President Nursultan Nazarbayev" Nurly

## ЭКОЛОГИЯЛЫҚ БИОТЕХНОЛОГИЯДА МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Найзабаева Л.К.<sup>1</sup>, Нуржанов Ч.А.<sup>2</sup>, Муқимбеков М.Ж.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ақпараттық және компьютерлік технологиялар институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> аль-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан  
naizabayeva@gmail.com, darkeremite@yandex.kz

**Түйін сөздер:** математикалық модельдеу, ксенобиотиктер, экология, биотехнология, биоремедиация, фиторемедиация.

**Аннотация.** Математикалық модельдер топырақтың ксенобиотиктермен ластану процесіне жеткілікті сипаттама, оңтайлы шешім табуға, топырақ процесстерінің бұзылуының салдарын болжауға, және биологиялық ремедиацияның оңтайлы стратегиясын таңдауға мүмкіндік беретін тиімді құрал болып табылады.

Мақалада экологиялық жағдайға теріс әсер ететін ластағыштардың деструктивті әсерін модельдеудің методологиялық тәсілдеріне талдау жүргізілген және ксенобиотиктермен ластанған топырақтың фиторемедиациясы мен биоремедиациясы процесстерін математикалық модельдеу мүмкіндіктеріне талдау жасалған. Экологиялық биотехнология саласындағы математикалық модельдеу жетістіктеріне сипаттама келтірілген. Мақалада қарастырылып отырған модельдердің концептуалді негізіне және модельдеу нәтижелерін түсіндіруге басты назар аударылған.

### Сведение об авторах

Л.К. Найзабаева доктор технических наук, ассоциированный профессор Института информационных и вычислительных технологий, naizabayeva@gmail.com, +7 (727) 272 11 66

Ч.А. Нуржанов PhD докторант механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби, darkeremite@yandex.kz, +7 (708) 657 33 09

М.Ж. Муқимбеков доктор технических наук, и.о. профессора механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби.

Поступила 12.01.2016 г