

УДК 504.064

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198785

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЧВ

Бойко Т. В., Складанный Д. Н., Запорожец Ю. А., Плашихин С. В.

## ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ҐРУНТІВ

Бойко Т. В., Складанный Д. М., Запорожец Ю. А., Плашихин С. В.

## APPLICATION OF SIMULATION MODELING FOR ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF SOILS

Bojko T., Skladannyu D., Zaporozhets J., Plashykhin S.

*Объектом исследования является экологическая безопасность загрязнения почв промышленным предприятием. Общій процесс геофильтрации рассматривается как комплекс отдельных физических и физико-химических процессов. В ходе исследования рассмотрены отдельные составляющие процесса геофильтрации и проведен обоснованный выбор математических моделей для их описания. Одним из проблемных мест является оценивание влияния типа грунта и соответствующей этому типу схемы геофильтрации на общій результат фильтрационных процессов. Рассмотрена классификация грунтов с точки зрения процессов фильтрации, которые в них происходят. Для различных типов грунтов установлены весовые коэффициенты влияния отдельных процессов, составляющих геофильтрацию. В качестве оценки результатов геофильтрации предложено отношение текущей концентрации загрязнителя к его фоновой концентрации. Предложена методика определения показателей эффективности очистки, основанная на имитационном эксперименте. Разработан алгоритм проведения имитационного эксперимента на комплексе моделей с учетом установленных коэффициентов и проведено 10000 его реализаций. По результатам имитационного эксперимента определены величины, позволяющие судить о качестве геофильтрации:*

*– интервальная оценка степени очистки;*

*– высота грунтового слоя, которая обеспечивает максимально возможную степень очистки и вероятности полной очистки от загрязнителя при прохождении через слой грунта для всех рассмотренных грунтов.*

*Предложено рассматривать риск проникновения загрязнителя в подземные воды через почвенный слой и установлена шкала оценивания этого риска на основе шкалы желательности Харрингтона. Для всех рассмотренных типов грунтов оценен риск проникновения загрязнений в случаях, когда начальная концентрация загрязнителя превышает фоновую в три, пять и десять раз.*

*Благодаря этому обеспечивается возможность получения значений показателей*

эффективности геофильтрации в зависимости от начальной концентрации загрязнителя с учетом типа грунта. Эти показатели рекомендуется учитывать при проектировании мест размещения потенциально опасных объектов и производств.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, загрязнения почв, геофильтрация, имитационный эксперимент, степени очистки.

Об'єктом дослідження є екологічна безпека забруднення ґрунтів промисловим підприємством. Загальний процес геофільтрації розглядається як комплекс окремих фізичних і фізико-хімічних процесів. В ході дослідження розглянуті окремі складові процеси геофільтрації та проведено обґрунтований вибір математичних моделей для їх опису. Одним із проблемних місць є оцінювання впливу типу ґрунту та відповідної цьому типу схеми геофільтрації на загальні результати фільтраційних процесів. Розглянуто класифікацію ґрунтів з точки зору процесів фільтрації, які в них відбуваються. Для різних типів ґрунтів встановлені вагові коефіцієнти впливу окремих процесів, що становлять геофільтрацію. В якості оцінки результатів геофільтрації запропоновано відношення поточної концентрації забруднювача до його фонові концентрації. Запропоновано методику визначення показників ефективності очищення, заснована на імітаційному експерименті. Розроблено алгоритм проведення імітаційного експерименту на комплексі моделей з урахуванням встановлених коефіцієнтів і проведено 10000 його реалізацій. За результатами імітаційного експерименту визначено величини, що дозволяють судити про якість геофільтрації:

– інтервальна оцінка ступеня очищення;

– висота ґрунтового шару, яка забезпечує максимально можливу ступінь очищення та ймовірності повного очищення від забруднювача під час проходження через шар ґрунту для всіх розглянутих ґрунтів.

Запропоновано розглядати ризик проникнення забруднювача в підземні води через шар ґрунту та встановлено шкалу оцінювання цього ризику на основі шкали бажаності Харрінгтона. Для всіх розглянутих типів ґрунтів оцінено ризик проникнення забруднень у випадках, коли початкова концентрація забруднювача перевищує фонову в три, п'ять і десять разів.

Завдяки цьому забезпечується можливість отримання значень показників ефективності геофільтрації в залежності від початкової концентрації забруднювача з урахуванням типу ґрунту. Ці показники рекомендується враховувати під час проектування місць розміщення потенційно небезпечних об'єктів і виробництв.

**Ключові слова:** екологічна безпека, забруднення ґрунтів, геофільтрація, імітаційний експеримент, ступеня очищення.

## 1. Введение

Усиление антропогенного влияния, что обусловлено техническим прогрессом, приводит к все более заметному изменению состояния окружающей среды, причем большинство из них имеет отрицательное влияние на все живое на планете.

Техногенные воздействия на окружающую среду в современных условиях настолько велико, что возможны катастрофические изменения климатических, геологических, тектонических и сейсмических условий, а также возникновение глобальных загрязнений и т. д. И, как следствие, изменение развития

экосистем, биологического разнообразия условий проживания людей и их здоровья, изменение устойчивости объектов техногенной деятельности.

Основы общей концепции влияния на элементы окружающей среды, в частности на почвы и грунтовые воды, были представлены в работе [1] в конце прошлого века. В связи с интенсивным освоением территорий промышленной и городской застройки, расширяются масштабы проявления отрицательного влияния процессов и явлений, а также объем нанесенного вреда почве. В результате этого возникает проблема в изучении процессов влияния и изменений, которые возникают на территориях для разработки защитных мер с максимальным учетом разновидностей природных и техногенных факторов.

Таким образом, актуальным является исследование влияния промышленных объектов на состояние окружающей среды. Для этого необходимо создание таких методов математического моделирования, которые дадут возможность уменьшать технологическую нагрузку на компоненты окружающей среды.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объект исследования* – экологическая безопасность загрязнения почв промышленным предприятием.

В настоящее время пассивность в проблеме решения вопросов безопасности окружающей среды, и почв в частности, для человечества может вызвать необратимые процессы. Деятельность человека неразрывно связана с увеличением нагрузки по загрязняющим веществам на почву индустриальных экологических систем. Высокая степень загрязнения атмосферного воздуха и воды приводит к накоплению загрязняющих веществ в почве. Причем это наблюдается и при нормальном режиме работы предприятий, особенно химической промышленности. Только мониторинг не может решить проблему экологической безопасности территорий, нужны методы прогнозирования для обоснованного принятия решения. Для объективного решения проблемы снижения техногенной нагрузки необходимо заранее оценивать уровень распределения загрязнителя в почве количественно.

## **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – определить все особенности процесса загрязнения почвенного слоя промышленным предприятием.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Выделить математические модели, которые лучшим образом описывают физико-химические процессы в почвах.
2. Выделить типы почв Украины с разными геофильтрационными условиями в отдельную классификацию.
3. Определить соотношение математических моделей к типам почв.
4. Определить уровень влияния промышленного предприятия на почвенный слой.

## **4. Исследование существующих решений проблемы**

Авторами проведен анализ ряда работ, посвященных оцениванию и моделированию процессов фильтрации загрязнителей, проходящих через

грунтовой слой. Основопологающей работой в этом направлении, по мнению авторов, является работа [2]. В этой работе предложен ряд моделей процесса массопереноса растворимых веществ при движении через грунтовой слой. Обобщенная модель геофильтрации, предложенная автором этой работы, представляет собой функциональное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных. Автором не ставилась задача получить обобщенное решение этого уравнения, поскольку введенные в него функции сильно зависят от условий протекания процесса. Однако в работе рассмотрены три основных варианта решения этого уравнения – для усреднённой и переменной скоростей фильтрации и в случае конвективной диффузии. Однако нерешенными остались задачи переноса полученных результатов моделирования на реальные грунты, поскольку автором не даны рекомендации о критериях применимости того или иного решения модели. Кроме того, в работе рассмотрен только процесс конвективной диффузии, в то же время, на геофильтрацию существенное влияние оказывают и другие физико-химические процессы.

В продолжение означенной выше работы, в работе [3] предложено рассмотреть фильтрацию в грунте, основываясь на массообменных процессах, происходящих на границе раздела фаз при движении ньютоновской жидкости по цилиндрическим трубкам. Автор работы [2] предлагает считать такую формальную конструкцию идеальным грунтом. Для описания процесса фильтрации автор работы [3] рекомендует использовать зависимость скорости фильтрации, основанную на функции Лаверетта, которая приблизительно соответствует малой и большой скоростям фильтрации. Однако предположение о движении загрязнителя в грунте в капиллярном режиме не является достаточно точным, а сделанный автором вывод о необходимости уточнения закона Дарси носит общий характер.

В работе [4] рассматривается математическое моделирование процесса очистки засоленной воды с начальной концентрацией солей 15 г/л при прохождении через грунтовой слой. При этом учитывается частичное накопление солей и установление в грунте концентрации солей, имеющей суть фоновой. Предложенная авторами математическая модель фильтрационного процесса имеет вид системы алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Однако при этом авторами не учитывается различие в составе грунтов разных типов. Кроме того, авторы не стали усложнять модель, вводя в нее весь комплекс процессов, протекающих в грунтах при фильтрации. В то же время, видятся целесообразными применения авторами имитационного вычислительного эксперимента для исследования процессов фильтрации в грунте, поскольку нахождение обобщенного решения системы математических моделей чрезвычайно затруднено.

Авторами работы [5] для моделирования распространения загрязнений в грунте предложена математическая модель процесса массопереноса в насыщенных и ненасыщенных пористых средах в изотермических условиях. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений первого и второго порядков в частных производных. Несомненным достоинством предложенной модели является учет движения загрязнителя не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлениях. Результатом решения модели есть поле концентраций загрязнителя в грунте. Однако авторы

сосредоточили свое внимание в работе лишь на процессах массопереноса и массообмена, хотя геофильтрация не ограничивается только указанными процессами. Таким образом, остались нерешенными задачи учета влияния процессов механической, химической и т. д. составляющих геофильтрации. Следует отметить, что авторам также не удалось получить обобщенное решение предложенной ими модели ввиду ее достаточно высокой сложности. Решение, предложенное авторами, получено численными методами.

В развитие исследований [2], в работе [6], выполненной с участием авторов, предложено учесть физико-химические характеристики грунта для построения модели процесса геофильтрации. Кроме уже упомянутого коэффициента конвективной диффузии, в модель введены активная пористость среды и насыпная плотность. Полученные результаты более адекватно описывают экспериментальные данные процесса фильтрации в реальном грунте. В то же время, вопросы влияния других физико-химических параметров грунта остались нерешенными.

В работе [7] авторами представлены результаты моделирования распространения загрязнений в песчаных грунтах. В качестве загрязнителей рассмотрен комбинированный состав свалки городских коммунальных отходов. Несомненным преимуществом работы является принятый автором вид модели – линейные, степенные и квадратичные регрессионные уравнения. Указанные уравнения описывают взаимосвязь между массами внесенного и отфильтрованного загрязнителя на единице площади грунта. Невзирая на использование несложных математических зависимостей, полученные результаты моделирования коррелируют с реальными результатами с коэффициентом  $0,98 \div 0,99$ . Авторами указано на возможность адаптации предложенных им уравнений регрессии для других составов почв, кроме рассмотренных в работе песчаных, и различных видов загрязнения, однако сама адаптация не проведена.

Следует также выделить работу [8], в которой авторами предложена математическая модель обратной задачи – удалений загрязнений из грунта путем промывки загрязненных, в данном случае засоленных почв. В основе предложенных авторами моделей лежат достаточно несложные по структуре уравнения химической кинетики. Авторами предложено рассматривать процесс удаления загрязнений как химическую реакцию первого порядка. Однако вопросы других видов взаимодействия между загрязнителями и слоем грунта остались нерассмотренными. Допущение авторов о первом порядке взаимодействия при промывании водой частиц твердого вещества – грунта – видится достаточно грубым.

Более обстоятельная попытка разработать математическую модель процессов, происходящих при промывке почвы, а также по опреснению и очистке грунтов от загрязняющих веществ, предпринята в работе [9]. Авторами предложена модель динамики локально неравновесного во времени процесса конвективной диффузии растворимых веществ в условиях плоско-вертикальной стационарной фильтрации подземных вод с учетом наличия межфазного массопереноса. Авторами получены интегро-дифференциальные модели неравновесного конвективно-диффузионного процесса в пористой среде в условиях массообмена. На основе разработанных моделей авторами произведены вычислительные эксперименты и компьютерное моделирование, результаты которых показывают фронты распространения загрязнений в грунтах с учетом массообмена.

Однако авторами не учтены различия между типами грунтов, которые подлежат промыванию, что, несомненно, внесло бы коррективы в протекающие в грунте процессы.

В работе [10] авторами разработана установка по исследованию проникновения загрязнителей – тяжелых металлов, образующихся в результате сгорания топлива в двигателе автомобиля, в грунт. На основании теоретических и экспериментальных исследований ими предложена физическая и математическая модели проникновения указанных загрязнителей в грунт и определена предельная глубина их проникновения. Однако предложенная авторами математическая модель фактически представляет собой уравнение материального баланса процесса. Также авторами не учтены в исследовании фоновые концентрации исследованных загрязнителей, измерение которых внесло существенные коррективы в полученные авторами результаты, поскольку указанная в работе погрешность изменений концентраций (достигающая 10 %, в одном случае 15 %) значительно превышает фоновую концентрацию загрязнителей.

Также отдельно можно выделить работы, в которых отмечаются специфические особенности движение влаги в почве [11, 12]. И исследования, в которых выделяются несколько групп специфических явлений переноса почвенной влаги:

- быстрый перенос по «ведущим» пространства пор и дальнейший обменный с застойными зонами;
- неравномерность движения почвенной влаги, связанной с вариабельностью почвенных свойств;
- движение по макропорам [13];
- формирование отдельных водных каналов, линий преимущественного потока (preferential flow) [14].

Проанализировав результаты исследований по проблемам фильтрации загрязнений при прохождении через слой грунта, авторы пришли к выводу о сложности описания этого процесса при помощи одной математической модели. Процесс геофильтрации сложный и в нем принимают участие различные физические, физико-химические и химические процессы. Потому целесообразным является проведение исследований фильтрационных свойств грунтов на основе моделей отдельных процессов, учитывая относительный вклад таких процессов в общий процесс геофильтрации для различных типов грунтов.

## **5. Методы исследований**

Для решения поставленных задач наиболее перспективными представляются следующие из вышеописанных моделей:

- 1) модель оценки загрязнения грунта с учетом химической реакции в процессе фильтрации [15–17];
- 2) модель оценки загрязнения грунта с учетом особенностей грунтового слоя [6];
- 3) модель оценки загрязнения грунта с учетом массообменных процессов [2];
- 3) модель оценки загрязнения грунта с учетом массообменных процессов: при равномерной сорбции [2];
- 4) модель оценки загрязнения грунта с учетом массообменных процессов: при неравномерной необратимой сорбции [2];

5) модель оценки загрязнения грунта с учетом массообменных процессов: при кристаллизации или растворении компонентов породы в сточных водах [2].

## **6. Результаты исследований**

### **6.1. Учет особенностей грунтов при проведении имитационного эксперимента**

В работе [1] представлены типы почв с различными геофильтрационными условиями. Систематизация данных по геологическим и гидрогеологическим условиям дает возможность выделить на территории Украины 4 области схем фильтрации и 9 районов в их составе:

1. Эолово-делювиальных грунтов лессового комплекса:

1.1. С наличием в основании покровных отложений относительного водоупора.

1.2. Без наличия в основании покровных отложений относительного водоупора.

2. Аллювиальные отложения речных террас:

2.1. С наличием в основании покровных отложений относительного водоупора.

2.2. Без наличия в основании покровных отложений относительного водоупора.

3. Современных морских отложений:

3.1. С наличием в основании покровных отложений относительного водоупора.

3.2. Без наличия в основании покровных отложений относительного водоупора.

4. Трещиноватых скальных и полускальных пород:

4.1. С наличием покровных эолово-делювиальных отложений.

4.2. С наличием покровных аллювиальных отложений.

4.3. С наличием эолово-делювиальных отложений, разрушенных скальных и полускальных пород.

По классификации, которая была предложена основываясь на исследовании [1], в состав эолово-делювиальных грунтов лессового комплекса входят: эолово-делювиальные грунты лессового комплекса, континентальные красно-бурые плиоцен-нижнечетвертичные глины и/или зелено-серые морские глины неогенового возраста и песчано-глинистые отложения речных и морских террас с преобладанием первого вида. В зависимости от типов и состава грунта преобладают те или иные физико-химические процессы в грунтах, что может существенно влиять на фильтрационные свойства грунтового слоя. В данном типе почвы, в связи с соотношением его состава, преобладают процессы, в которых нужно в большей степени учитывать особенности грунтового слоя, а также процессы, в которых учитываются химическая реакция и массообмен. В связи с этим, для оценки загрязнения почвы процессы учитываются в таком соотношении:

– оценка с учетом особенностей грунтового слоя в процессе фильтрации будет составлять 35÷40 %;

– оценки с учетом массообменных процессов в 15÷25 %;

– оценка с учетом химической реакции в процессе фильтрации будет составлять 15÷20 %;

– оценка с учетом массообменных процессов: при равномерной сорбции в 7÷20 %, при неравномерной необратимой сорбции 5÷10 %, при кристаллизации или растворении компонентов породы в сточных водах в 0÷5 %.

Примем предположение, что данные соотношения фильтрационных процессов будут соответствовать доли, описывающей их модели в общем расчете. Для указанного типа и остальных грунтов в соответствии с классификацией, соотношение моделей наведено в табл. 1.

**Таблица 1**

Матрица соотношений математических моделей к типам грунтов

Тип грунта	Граница оценки влияния	Порядковый номер модели					
		1	2	3	4	5	6
1.1	нижняя	0,15	0,35	0,15	0,07	0,05	0
	верхняя	0,2	0,4	0,25	0,2	0,1	0,05
1.2	нижняя	0,2	0,28	0,09	0,15	0,05	0
	верхняя	0,25	0,35	0,2	0,25	0,1	0,05
2.1	нижняя	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0
	верхняя	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
2.2	нижняя	0,3	0,25	0,1	0,1	0,05	0
	верхняя	0,35	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
3.1	нижняя	0,15	0,3	0,17	0,05	0,11	0
	верхняя	0,2	0,35	0,25	0,1	0,25	0,05
3.2	нижняя	0,15	0,3	0,16	0,07	0,08	0
	верхняя	0,2	0,4	0,25	0,12	0,16	0,05
4.1	нижняя	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,4
	верхняя	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,5
4.2	нижняя	0,05	0,15	0,07	0,05	0,05	0,4
	верхняя	0,1	0,2	0,13	0,14	0,12	0,5
4.3	нижняя	0,1	0	0,05	0,07	0,07	0,5
	верхняя	0,2	0	0,1	0,13	0,15	0,6

## 6.2. Определение интервальной оценки степени возможной очистки при геофильтрации

Поскольку принятые оценки степени влияния отдельных процессов и соответствующих им моделей на результат геофильтрации носят интервальный характер, как видно из табл. 1, определенная на основе группы моделей оценка степени возможной очистки также будет интервальной. Для ее определения воспользуемся следующим алгоритмом. На первом шаге произведем имитационный расчет концентрации загрязнителя по каждой из выбранных в разделе 5 моделей отдельно. Расчет произведем по глубине грунтового слоя с шагом 0,1 м до тех пор, пока концентрация, рассчитанная по всем выбранным моделям, не достигнет фоновой. Таким образом, будет найдена максимальная глубина слоя ( $G_{\max}$ ). Расчет показал, что для начальной концентрации загрязнителя, превышая фоновую глубину в 3 раза, эта глубина равна 2,9 м, в 5 раз – 4,9 м, в 10 раз – 11,0 м.

На втором шаге рассчитываем степень очистки в каждой точке по глубине для всех выбранных моделей. Степень очистки рассчитывается как отношение текущей концентрации к фоновой. На третьем шаге найденные степени очистки суммируются с



учетом степеней влияния отдельных моделей (табл. 1). Таким образом, определяются верхние и нижние границы степени очистки на каждой глубине. В случае если в результате сложения полученное значение превышает единицу, оно заменяется на единицу.

В табл. 2 приведены результаты расчетов по изложенному алгоритму – глубина достижения единичной степени очистки по верхней границе ( $\Gamma_1$ ) и максимальная степень очистки по нижней границе ( $q_{\max}$ ).

**Таблица 2**

Глубины, на которых достигается степень очистки, равная единице по верхней границе ( $\Gamma_1$ ) и максимально возможная степень очистки по нижней границе ( $q_{\max}$ ) в грунтах разных типов

Тип грунта	$C_{\Phi} \times 3$		$C_{\Phi} \times 3$		$C_{\Phi} \times 3$	
	$\Gamma_1$	$q_{\max}$	$\Gamma_1$	$q_{\max}$	$\Gamma_1$	$q_{\max}$
1.1	1,4	0,833	3,1	0,833	9,1	0,833
1.2	1,5	0,833	3,5	0,833	9,6	0,833
2.1	1,7	0,833	3,9	0,833	9,9	0,833
2.2	1,8	0,87	4,1	0,87	10,1	0,87
3.1	1,5	0,833	3,1	0,833	9,1	0,833
3.2	1,4	0,847	2,9	0,847	9	0,847
4.1	1,5	0,87	2,5	0,87	7,9	0,87
4.2	1,5	0,84	2,6	0,84	8	0,84
4.3	1,7	0,847	2,7	0,847	8,4	0,847

### 6.3. Имитационный эксперимент по определению вероятности максимально возможной очистки

Для определения вероятности максимально возможной очистки, которая будет трактоваться как достижение концентрации загрязнителя, равной фоновой, предлагается провести имитационный эксперимент. Реализация единичного эксперимента производится следующим образом. Принимаем, что степень влияния каждого из процессов очистки в грунте и, как следует из выше принятого предположения, степень участия модели, есть случайная величина. Закон распределения этой величины – равномерный в интервале, равный принятому интервалу из табл. 3. По указанному закону производим розыгрыш этих случайных величин и получаем их точечные значения. При розыгрыше принимаем во внимание, что сумма всех разыгранных величин равна единице.

Следующим шагом просчитываем концентрацию загрязняющих веществ в грунте по всем моделям с учетом полученных точечных значений степеней их влияния. Расчет проводится для каждой глубины от поверхности грунта и до найденной в подразделе 6.1 с принятым шагом 0,1 м. В случае, если полученная на данной глубине концентрация не превышает фоновую концентрацию загрязнения в грунте (с погрешностью округления), проведенный единичный эксперимент признаем для данной глубины успешным, иначе – не успешным.

Таблица 3

Глубины, на которых достигается предельная вероятность ( $P_{\text{МВО}}$ ) максимально возможной очистки в грунтах разных типов

Тип грунта	$P_{\text{МВО}}$	Глубина, м		
		$C_{\Phi} \times 3$	$C_{\Phi} \times 5$	$C_{\Phi} \times 10$
1.1	0,610	1,3	3,7	9,5
1.2	0,600	1,8	4,1	9,8
2.1	0,660	1,7	4,2	10
2.2	0,714	1,9	4,3	10,4
3.1	0,570	1,8	3,7	9,8
3.2	0,716	1,6	3,6	9,7
4.1	0,832	1,6	2,6	8,9
4.2	0,634	1,6	2,5	7,9
4.3	0,616	1,7	3,2	9,3

По результатам реализации достаточно большого количества единичных экспериментов можно рассчитать относительную частоту успешных экспериментов для каждой глубины. Согласно закону больших чисел, с увеличением числа экспериментов эта относительная частота будет стремиться к вероятности полной очистки с ростом числа единичных экспериментов. В данном исследовании реализованы 10 000 таких экспериментов. Результаты расчетов относительной частоты (статистической вероятности) максимально возможной очистки ( $P_{\text{МВО}}$ ) приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, статистическая вероятность максимально возможной очистки не зависит (с точностью до результатов имитационного эксперимента) от начальной концентрации загрязнителя. От начальной концентрации зависит только глубина, на которой максимально возможная очистка достигается.

#### 6.4. Определение риска проникновения загрязнений через почвенный слой

Установим приемлемость очистки, исходя из величины риска неполноты очистки. Такой риск примем как  $1 - P_{\text{МВО}}$  и установим его отметки в соответствии со шкалой желательности Харрингтона [12], табл. 4.

Таблица 4

##### Градация приемлемости

$1 - P_{\text{МВО}}$	Градация приемлемости
$0 \div 0,2$	Безусловно приемлемый
$0,2 \div 0,37$	Приемлемый
$0,37 \div 0,63$	Условно приемлемый
$0,63 \div 0,8$	Неприемлемый
$0,8 \div 1$	Безусловно неприемлемый

Приемлемость риска проникновения загрязнителя сквозь почвенный слой в зависимости от глубины этого слоя сведена в табл. 5, 6.

Таблица 5

Риск проникновения загрязнения через почвенный слой (начальная концентрация превышает фоновую трехкратно)

Тип грунта	Губина, м, на которой риск проникновения:		
	безусловно неприемлемый	условно приемлемый	безусловно приемлемый
1.1	<2,0	>2,2	не достигается
1.2	<2,1	>2,3	не достигается
2.1	<2,1	2,2–2,4	не достигается
2.2	<2,1	2,2–2,3	не достигается
3.1	<2,0	>2,3	не достигается
3.2	<2,0	2,2–2,3	не достигается
4.1	<1,8	2,0–2,1	>2,4
4.2	<1,8	2,0–2,3	не достигается
4.3	<2,1	2,2–2,4	не достигается

Таблица 6

Риск проникновения загрязнения через почвенный слой (начальная концентрация превышает фоновую десятикратно)

Тип грунта	Губина, м, на которой риск проникновения:		
	безусловно неприемлемый	условно приемлемый	безусловно приемлемый
1.1	<10,3	>10,5	не достигается
1.2	<10,4	>10,6	не достигается
2.1	<10,5	10,7–10,8	не достигается
2.2	<10,5	10,7–10,8	не достигается
3.1	<10,4	>10,7	не достигается
3.2	<10,2	10,5–10,7	не достигается
4.1	<9,8	10,1–10,4	>10,8
4.2	<9,8	10,1–10,7	не достигается
4.3	<10,2	10,5–16,4	не достигается

По результатам имитационного эксперимента можно сделать такие выводы:

– для эолово-делювиальных почв лесного комплекса типа 1.1 достигается условно приемлемая очистка на глубине 1,3, 3,7, и 9,5 м для 3 различных экспериментов, соответственно;

– для эолово-делювиальных почв лесного комплекса типа 1.2 достигается условно приемлемая очистка на глубине 1,8, 3,6 и 9,8 м, соответственно;

– для современных морских отложений типа 3.1 достигается условно приемлемая очистка на глубине 1,8, 3,7 и 9,8 м, соответственно;

– для трещиноватых скальных и полускальных пород типа 4.3 достигается условно приемлемая очистка на глубине 1,7, 3,2 и 9,3 м, соответственно;

– для аллювиальных отложений речных террас типа 2.1 достигается приемлемая очистка на глубине 1,7, 4,2 и 10 м;

- для аллювиальных отложений речных террас типа 2.2 достигается приемлемая очистка на глубине 1,9, 4,3 и 10,4 м;
- для современных морских отложений типа 3.2 достигается приемлемая очистка на глубине 1,6, 3,6 и 9,7 м;
- для трещиноватых скальных и полускальных пород типа 4.2 достигается приемлемая очистка на глубине 1,6, 2,5 и 7,9 м;
- для трещиноватых скальных и полускальных пород типа 4.1 достигается безусловно приемлемая очистка на глубине 1,6, 2,6 и 8,9 м;
- для типов пород 1.1, 1.2, 3.1 и 4.3 приемлемая очистка на территории достигнута быть не может.

## **7. SWOT-анализ результатов исследований**

*Strengths.* Главным плюсом предложенной методики является то, что на данный момент нет таких методик, которые могут позволить оценить уровень риска влияния промышленного предприятия на почву по высоте ее слоя.

*Weaknesses.* Главным недостатком предложенной методики является то, что матрица соотношений математических моделей к типам почв (табл. 1) подходит для соответствующих типов почв с классификации, представленной в разделе 6.1. А при использовании методики для других типов почв необходимо будет вносить такую матрицу соотношений, которая лучше будет описывать те физические процессы, которые в ней происходят.

*Opportunities.* Проблема прогнозирования антропогенного воздействия на состояние почвенного слоя нигде в достаточной степени не интегрирована в систему принятия решений. В связи с этим, применение данной методики позволит: фактически оценивать уровень негативного воздействия на почву, а также принимать решение о ее последствиях.

*Threats* Применение данной методики не требует отдельных затрат для ее реализации, а необходимо знать только перечень веществ, которые попадают в почву, и их концентрацию. В связи с этим внедрение и использование ее на предприятиях не несет за собой никаких угроз.

## **8. Выводы**

1. Выделены 6 математических моделей, которые лучшим образом описывают физико-химические процессы в почвенном слое.

2. Для описания распространения загрязняющих веществ с потоком жидкости в почвенном слое, в зависимости от его разных геофильтрационными условий, была проведена классификация почв Украины.

3. Для решения вопроса определения уровня влияния предприятий на почвенный слой была создана матрица соотношений математических моделей к типам почв, которая учитывает в себе специфику состава слоя почвы и физико-химические процессы в ней.

4. Для определения уровня влияния промышленного предприятия на почву были найдены интервальные оценки степени возможной очистки для разных типов почв. А также найдена вероятность максимально возможной очистки и глубина, на которой она достигается для разных типов почв. В результате это позволило определить риск проникновения загрязнений через почвенный слой для разных типов почв.

## References

1. Abramov, I. B. (2007). *Otsenka vozdeistviia na podzemnye vody promyshlennno-gorodskikh aglomeratsii*. Kharkov, 285.
2. Lavrik, V. I. (1981). *Reshenie zadachi massoperenosa vodorastvorimyykh veschestv v sluchae zavisimosti koeffitsientov konvektivnoi diffuzii ot skorosti filtratsii*. In-t Matematiki AN USSR, 3–24.
3. Khairullin, A. A. (2018). Application of the ideal soil model and tube hydraulics to study filtration processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 194, 062011. doi: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062011>
4. Ravshanov, N., Khurramov, I., Aminov, S. M. (2019). Mathematical modeling of the process of water-soline transport in soils. *Journal of Physics: Conference Series*, 1210, 012118. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012118>
5. Vlasyuk, A. P., Tsvetkova, T. P. (2015). Mathematical Simulation of the Transport of Salt in the Case of Filtration and Moisture Transfer in Saturated–Unsaturated Soils in a Moistening Regime. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88 (5), 1062–1073. doi: <http://doi.org/10.1007/s10891-015-1285-4>
6. Boiko, T. V., Zaporozhets, Iu. A. (2015). Modeling of mass transfer of pollutants in the soil. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (3 (21)), 8–11. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37648>
7. Szymański, K., Sidelko, R., Janowska, B., Siebielska, I., Walendzik, B. (2017). Modelowanie parametrów migracji zanieczyszczeńchemicznych w podłożu gruntowym składowisk odpadów komunalnych. *RocznikOchrona Środowiska*, 19, 651–667.
8. Mustafayev, Z. S., Kozykeeva, A. T., Abdeshev, K. B. (2013). Mathematical modeling of salt leaching of saline soils. *World Applied Sciences Journal*, 27 (2), 191–200.
9. Bohaienko, V. A., Bulavatskiy, V. M. (2019). Computer Simulation Based on Non-local Model of the Dynamics of Convective Diffusion of Soluble Substances in the Underground Filtration Flow under Mass Exchange Conditions. *Journal of Automation and Information Sciences*, 51 (5), 16–29. doi: <http://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v51.i5.20>
10. Kryshtopa, S., Melnyk, V., Dolishnii, B., Korohodskyi, V., Prunko, I., Kryshtopa, L. et. al. (2019). Improvement of the model of forecasting heavy metals of exhaust gases of motor vehicles in the soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 44–51. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175892>

11. Flury, M., Flühler, H., Jury, W. A., Leuenberger, J. (1994). Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 30 (7), 1945–1954. doi: <http://doi.org/10.1029/94wr00871>

12. Šimůnek, J., Jarvis, N. J., van Genuchten, M. T., Gärdenäs, A. (2003). Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272 (1-4), 14–35. doi: [http://doi.org/10.1016/s0022-1694\(02\)00252-4](http://doi.org/10.1016/s0022-1694(02)00252-4)

13. Shein, E. V., Guber, A. K., Kukharuk, N. S. (1995). Perenos vody i veschestv po makroporam v dernovo-podzolistoipochve. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serii 17: Pochvovedenie*, 2, 22–32.

14. Shein, E. V., Marchenko, K. A. (2001). Vzaimosviaz putei dvizheniia vlagi i prostranstvennogo raspredeleniia plotnosti pochvy Vladimirskogo opolia. *Pochvovedenie*, 7, 823–833.

15. Khramchenkov, M. G. (2003). *Elementy fiziko-khimicheskoi mekhaniki prirodnykh poristyykh sred*. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo matematicheskogo obschestva, 178.

16. *Environmental Indices: Systems Analysis Approach*. Vol. 1 (1999). Hardcover, 655.

17. Zaporozhets, J. A. (2016), Influence of filtration on groundwater quality. *Fifth International Scientific and Practical Conference*. Kyiv, 203–206

*The object of research is the ecological safety of soil pollution by an industrial enterprise. The general geofiltration process could be considered as a complex of individual physical and physico-chemical processes. During the study, the individual components of the geofiltration process were considered and a reasonable choice of mathematical models for their description is made. One of the problems is the soil type influence assessment and the corresponding geofiltration scheme on the overall filtration processes results. The classification of soils according to the filtration processes that occur in them is considered. For different soils types, influence coefficients of individual processes constituting geofiltration are established. As an assessment of the results of geofiltration, the ratio of the current concentration of the pollutant to its background concentration is proposed. A technique is proposed for determining indicators of purification efficiency, based on a simulation experiment. An algorithm for conducting a simulation experiment on a complex of models was developed taking into account the established coefficients and 10,000 of its implementations were carried out. Based on the simulation experiment results, the values that allow assessing the geofiltration quality is determined:*

- purification degree interval assessment;
- soil layer height, which provides the maximum possible purification degree and the complete purification probability when the pollutant passing through the soil layer for all the examined soils.

*Considering the risk of contaminant entering groundwater through the soil layer*

*is proposed and the assessing scale for this risk based on Harrington desirability scale is established. For all considered soils types, the risk of pollution penetration in cases when the initial concentration of the pollutant exceeds the background by three, five and ten times is assessed.*

*It makes possible to obtain values of geofiltration performance indicators depending on the pollutant initial concentration, taking into account the soil type. This indicators is recommended to take into account for designing locations for potentially hazardous facilities and industries.*

**Keywords:** *environmental safety, soil pollution, geofiltration, simulation experiment, purification degree.*