

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6083

УДК 004.942 (632.125)

Статья

Нечёткое моделирование процесса естественной рекультивации нарушенных земель

Побединский Владимир Викторович

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
(Российская Федерация), e-mail: pobed@el.ru,*

Анянова Евгения Васильевна

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
(Российская Федерация), e-mail: anyanovagv@m.usfeu.ru*

Ковалев Рудольф Николаевич

*доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
(Российская Федерация), e-mail: kovalevrn@m.usfeu.ru,*

Иовлев Григорий Александрович

*кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой сервиса транспортных
и технологических машин АПК ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный
университет» (Российская Федерация), e-mail: gri-iovlev@yandex.ru*

Получена: 6 января 2022 / Принята: 22 марта 2022 / Опубликовано: 29 марта 2022

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема рекультивации нарушенных земель. Поскольку на сегодняшний день не выработан подход даже на методологическом уровне, то должна решаться первоначальная задача — как определить тот период времени, который необходим для естественного восстановления земель. Только после решения этой задачи появится возможность оценить эффективность вообще каких-либо агротехнических мероприятий по восстановлению в сравнении с естественным процессом. Объект настоящих исследований — фонд нарушенных земель по Свердловской области, которые попали под техногенные воздействия от горнодобывающей промышленности. Все параметры такого объекта характеризуются условиями неопределённости данных, поэтому главная идея работы заключалась в использовании нечёткой

логики, вначале для описания основных параметров, влияющих на процесс восстановления, а затем получения функциональной зависимости выходного параметра — периода времени восстановления от этих исходных параметров. Таким образом, была определена цель исследований — разработка нечёткой модели процесса естественной рекультивации нарушенных земель. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: 1) выполнение экспериментальных исследований состояния нарушенных земель конкретного региона; 2) разработка постановки задачи в содержательном виде; 3) обоснование нечётких функций принадлежности задачи; 4) разработка базы правил нечёткой продукции; 5) нечёткий вывод и получение результирующей функции; 6) программная реализация задачи. Результатами исследований явилась программно-реализованная в среде Scilab функциональная зависимость периода времени восстановления нарушенных земель от типа почвы, её параметров и типа растительности. Результаты предназначены для проектирования агротехнических, нормативных и других мероприятий по восстановлению нарушенных земель.

Ключевые слова: рекультивация нарушенных земель, оценка времени восстановления нарушенных земель, нечёткое моделирование

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6083

Article

Fuzzy modeling of disturbed lands natural revegetation

Vladimir Pobedinskiy

D. Sc. in engineering, professor, head of the Department of Intelligent Systems, FSBEE HE «Ural State Forest Engineering University» (Russian Federation), e-mail: pobed@el.ru

Evgeniya Anyanova

Ph. D. in agriculture, associate professor, Department of Intelligent Systems, FSBEE HE «Ural State Forestry University» (Russian Federation), e-mail: anyanovagv@m.usfeu.ru

Rudolf Kovalev

D. Sc. in engineering, professor, Department of Intelligent Systems, FSBEE HE «Ural State Forest Engineering University» (Russian Federation), e-mail: kovalevrn@m.usfeu.ru

Grigory Iovlev

Ph. D. in economics, associate professor, Head of the Department of Service of Transport and Technological Machines of the Agroindustrial Complex, FSBEE HE «Ural State Agrarian University» (Russian Federation), e-mail: gri-iovlev@yandex.ru

Received: 6 January 2022 / Accepted: 22 March 2022 / Published: 29 March 2022

Abstract: The problem of disturbed lands recultivation is considered. Since no methodological approach has been developed, the primary task to be solved is to determine the desired period of time for lands natural revegetation. Agrotechnical revegetation measures effectiveness could be compared with the one of natural revegetation only if this task has been solved. The object of this research was the fund of mined disturbed lands in the Sverdlovsk region. All parameters of this object were characterized by data uncertainty conditions, therefore the main idea of the work was to use fuzzy logic, first to describe the main parameters affecting the revegetation process, and then to obtain a functional dependence of the output parameter, i.e. the recovery time period from these initial parameters. Thus, the goal of the research was to develop a fuzzy model of the process of natural revegetation of disturbed lands. The authors studied experimentally the disturbed lands state in a particular region; developed the

problem statement; justified fuzzy membership functions of the problem; developed a base of rules for fuzzy products; obtained fuzzy inference and the resulting function; and developed software implementation of the task. The research results were software-implemented in the Scilab environment functional dependence of disturbed lands revegetation period on the type of soil, its parameters and the type of vegetation. The results might be applied to design agrotechnical, regulatory and other measures for disturbed lands revegetation.

Keywords: reclamation of disturbed lands, estimation of the time of recultivation of disturbed lands, fuzzy modeling

1. Введение

В настоящее время экологические проблемы обостряются. Особенно губительные процессы для земель любых категорий происходили с России с 1990-х гг., а негативные последствия от этих процессов только усиливаются. В этой связи нашим правительством принималось и принимается много нормативных актов, направленных на поддержание экологических мер, однако решить проблему на сегодняшний день не удаётся. Проблема обостряется, главным образом, ещё и по объективным причинам: рост численности населения Земли, увеличение производства и потребления природных ресурсов любую экологическую проблему постепенно превращают в глобальную.

Примером является и ситуация с нарушенными землями, фонд которых также растёт.

Таким образом была определена цель настоящей работы, которая заключалась в исследовании закономерностей восстановления и разработке модели оценки времени естественной рекультивации нарушенных земель.

Задачи настоящих исследований включали:

- 1) выполнение экспериментальных исследований состояния нарушенных земель конкретного региона;
- 2) разработку постановки задачи в содержательном виде;
- 3) обоснование нечётких функций принадлежности задачи;
- 4) разработку базы правил нечёткой продукции;
- 5) программную реализацию задачи;
- 6) нечёткий вывод и получение результирующей функции.

2. Материалы и методы

В работе использованы методы определения параметров почвогрунтов, методы определения таксационных характеристик, математической статистики для обработки экспериментальных данных, функционального моделирования, теории нечётких множеств и её практического приложения нечёткого моделирования. Реализация модели оценки времени рекультивации выполнена в среде Scilab.

3. Результаты

3.1. Краткий анализ исследований по проблеме

В горнодобывающей отрасли широко распространена угледобыча закрытым способом, при котором близлежащие земли засыпаются отвалами низкопродуктивных горных пород. Это вызывает серьёзные нарушения экологии, т.к. наблюдается снижение уровня плодородия почв и создаются крайне неблагоприятные условия для естественного зарастания земель.

В рамках различных научных исследований делаются попытки улучшить экологическую ситуацию, а именно: воздействовать для создания антропогенной растительности. С этой целью делаются закладки пробных площадей, изучаются таксационные характеристики древесно-кустарниковой растительности, живого напочвенного покрова, берутся пробы почвы отвалов на агрохимию, осуществляются разработка методических рекомендаций рекультивации земель и другие мероприятия.

Наиболее многочисленная группа исследований посвящена вопросам естественного восстановления почвенного и растительного покровов на техногенно нарушенных землях. Так, на Украине можно отметить такие исследования (Бондарь, 1971, 1974; Бондарь, Додатко, 1973, 1974; Денисик, 1984); в Донбассе (Рева и др., 1974; Рева, Хархарота, Дмитриенко, 1978); в Подмосковье (Акулов, Макаров, 1980; Васильева, 1981; Моторина, Ижевская, 1967, 1980; Васильева, 1981); в Кузбассе (Баранник, 1973; Щербатенко, Кондрашин, 1977; Щербатенко, Шушуева, 1974; Трофимов, Овчинников, 1970). Такие работы также проводились на Урале (Колесников и др., 1976; Кулагин, 1982; Левит, 1978; Лукьянец, 1974, 1978; Маковский, Новак, 1974; Махонина, Чибрик, 1974; Махонина и др., 1976; Накаряков, Назаренко, 1980; Пасынкова, 1984, 1992; Прокопьев и др., 1974; Тарчевский, 1964, 1968; Тарчевский, Чибрик, 1969, 1970; Хамидулина, 1970; Чибрик, 1979; Шилова, 1970, 1974; Штина и др., 1971).

Общую характеристику этих исследований отметили Т. С. Чибрик и Ю. А. Елькина (1989). По их мнению, исследования сформировались вокруг двух основных направлений. Первое направление посвящено флористическому анализу вне связи с растительностью окружающих территорий, т. е. подчёркивается только своеобразие растительности. Второе направление — выявление в самом общем закономерностей растительных сообществ на нарушенных промышленностью землях. Исследователями практически не выявлены закономерности агрохимического анализа почвогрунтов, их плодородия с естественным зарастанием, позволяющие подойти к решению проблем комплексного анализа рекультивации земель.

Настоящая работа базируется на последних исследованиях (Анянова, 2006, 2017, 2018, 2019) [1], и делается попытка прогнозирования процесса рекультивации земель.

Таким образом, краткий анализ обзора публикаций и литературы позволяет заключить, что актуальность исследования возрастает, и в рассматриваемом направлении они ведутся, но проблема от решения в полной мере ещё далека.

3.2. Результаты экспериментальных исследований состояния нарушенных земель Свердловской области

Исследования проводились для условий Свердловской области и фонда земель, нарушенных под воздействием горнодобывающей промышленности. Добываемые закрытым способом пустые породы вывозятся в специально отведённые для этих целей территории. Произрастание различных видов растений, особенно в первые годы, на этих почвогрунтах

невозможно, поэтому проходит несколько лет, и смены видов растительности, пока произойдут изменения, достаточные для полноценного восстановления земель.

Исследования проводились с использованием функционального моделирования процесса восстановления, статистической обработки и построения различных диаграмм, которые позволяют просматривать последовательность этапов исследования и картину состояния земель и растительности [1].

Методологическая схема процесса исследований и дальнейшего моделирования приведена на рисунке 1.

Некоторые результаты исследований почвогрунтов приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Средние агрохимические показатели почвогрунтов отвалов Буланашского угольного месторождения

Table 1. Average agrochemical indicators of soils of the dumps of the Bulanash coal deposit

Характеристика отвала	pH	P ₂ O ₅ , мг/100 г	K ₂ O, мг/100 г	Hr, ммоль/ 100 г	Ca + Mg, ммоль/100 г	Гумус, %
Отвал с пятилетним окончанием отсыпки (подножие)	7,7	3,34	18,37	—	—	11,8
Отвал с пятилетним окончанием отсыпки (средняя и верхняя части)	8,1	40,76	8,88	0,45	5,38	14,0
Отвал с пятилетним окончанием отсыпки (подножие)	8,1	52,04	21,71	—	—	10,0
Отвал с тридцатилетним окончанием отсыпки (верхняя и средняя части)	7,3	19,72	20,97	1,15	6,5	11,4
Отвал с тридцатилетним окончанием отсыпки (подножие)	6,9	10,94	16,42	—	—	10,3
Отвал с тридцатилетним окончанием отсыпки (верхняя и средняя части)	7,1	30,45	26,58	1,10	6,13	12,2
Отвал с тридцатилетним окончанием отсыпки (подножие)	6,9	28,66	25,23	—	—	10,6

Проведённый агрохимический анализ проб почвы позволил установить картину содержания в них химических и биологических элементов в зависимости от времени существования отвалов, их ориентирования относительно солнечного света, местоположения по склону отвалов. Так, образующиеся после длительного нахождения в отвалах грунтосмеси алевролиты и аргиллиты с песчаником (серого цвета) уже вполне пригодны по своим свойствам для произрастания многих видов растительности.

Почвогрунты в среднем содержат подвижного фосфора P₂O₅ от 3 до 52 мг на 100 г грунта. Со временем выдержки в отвалах содержание фосфора несколько снижается.

Почвы отвалов первых лет отсыпки имеют низкое содержание подвижного калия, K₂O не более 16 мг на 100 г почвы, которое повышается с увеличением времени отсыпки и к 30 годам достигает 26 мг.

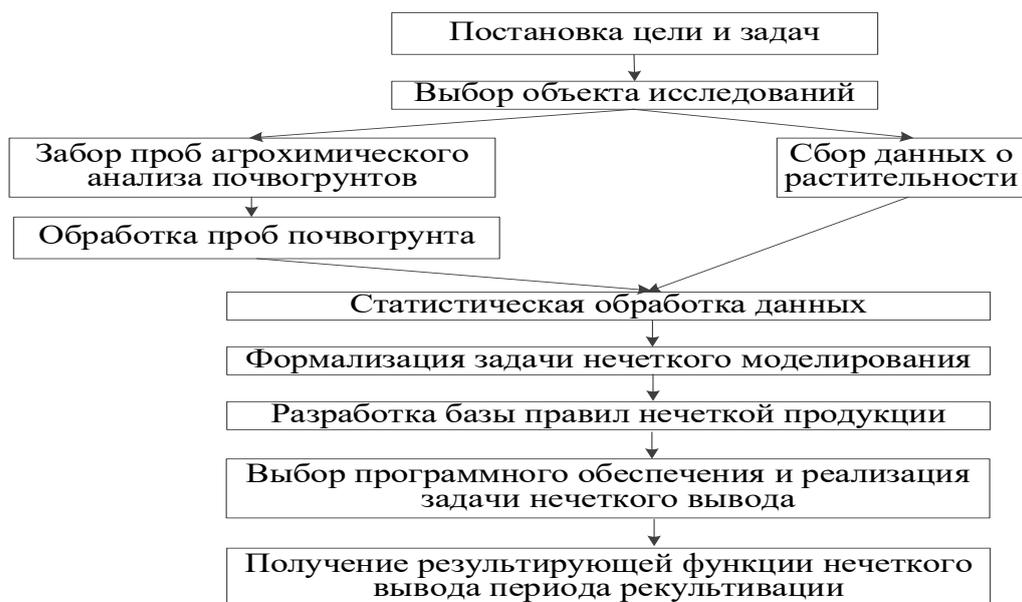


Рисунок 1. Методологическая схема процесса исследований

Figure 1. Methodological scheme of the research process

В целом субстраты почвы проявляют щелочную реакцию за счёт оснований Са и Mg, содержащихся в известняке и карбонатах. Эти элементы оказывают благоприятное влияние, т. к. в ходе почвообразования способствуют накоплению гумуса. Но его содержание достигает существенного количества более 14 % к тридцатилетнему периоду.

Следует отметить, что отвалы из отходов угледобычи содержат больше органических веществ, т. к. их изначально больше в угле. Наилучший состав почвогрунта формируется у подножий отвалов и ближе к тридцатилетнему сроку отсыпки. Здесь наблюдается наибольшая (до 80 %) насыщенность основаниями, что создаёт более благоприятные условия для зарастания растительностью.

Исследование растительности проведено для всех типов экспозиции склона и сроков окончания отсыпки отвалов и для всех встречаемых видов растений. Отдельный фрагмент сводных результатов приведён в таблице 2 [1].

3.3. Постановка задачи моделирования процесса естественной рекультивации нарушенных земель в содержательном виде

Постановка задачи в содержательном виде предусматривает словесное описание состояния объекта исследований для выявления его особенностей, специфики поведения и последовательности действий при работе, входные и выходные параметры и другие свойства. В данном случае следовало определить основные требования к модели и решаемые задачи.

Таблица 2. Характеристика древесно-кустарниковой растительности на пробных площадях, заложенных на отвалах Буланашского угольного месторождения

Table 2. Characteristics of tree and shrub vegetation on the test areas lay out on the dumps of the Bulanash coal deposit

Экспозиция склона	Вид растительности	Количество экземпляров по группам высот, шт./га				Средняя высота, м	Встречаемость, %
		до 0,5 м	0,6—1,5 м	выше 1,6 м	Всего		
Отвал с тридцатилетним окончанием отсыпки							
15, восточная	Клён ясенелистный	0	0	25	25	3,0	33
	Черёмуха обыкновенная	0	0	25	25	2,5	33
	Облепиха крушиновидная	0	7	6	13	1,5	33
	Рябина обыкновенная	0	6	0	6	2,0	33
Всего		69					
16, северное подножие	Черёмуха обыкновенная	0	0	188	188	5,0	25
	Берёза повислая	0	66	22	88	1,0	42
	Клён ясенелистный	11	0	0	11	0,5	8
	Яблоня лесная	0	0	11	11	5,0	8
	Тополь чёрный	0	0	22	22	13,0	8
	Ива остролистная	0	0	66	66	2,4	50
	Рябина обыкновенная	0	11	0	11	1,0	8
Всего		397					

По типу модель относится к экспертным система. Основной её задачей является установление связи между такими характеристиками, как тип почвогрунта, тип растительности и время периода рекультивации. Информативным параметром может являться величина типа растительности, которая указывает на плодородие почвы. Если использовать качественные зависимости, то можно сформулировать процесс зарастания территории начиная с травянистых растений (мхи, лишайники, семейство сложноцветных, а именно: мать-и-мачеха обыкновенная, полынь горькая, осот полевой, из семейства бобовых представлены донник белый, горошек мышиный, клевер луговой, из семейства злаковых лидируют лисохвост луговой, вейник наземный, мятлик луговой и др.) и постепенным

увеличением видового разнообразия. При этом с развитием растительности происходит обогащение почвы необходимыми для растительности химическими и биологическими элементами, в первую очередь гумусом.

Математически зависимость периода времени от развития растительности и увеличения плодородия почвы является прямо пропорциональной.

Здесь самым информативным в нормативном плане показателем является период времени рекультивации, т. к. с его учётом планируются экологические мероприятия

3.4. Разработка модели прогнозирования процесса рекультивации в виде нечёткой системы

Определение переменных задачи

Как было определено при постановке задачи в содержательном виде, основными исходными показателями для оценки периода рекультивации названы следующие:

- тип растительности;
- тип грунта.

Выходной переменной принимаем длительность периода восстановления.

Она может быть задана [3—6] традиционно по пятибалльной шкале, исходя из подразделения растительности по таксационным характеристикам. По мере зарастания и биологического развития происходит смена почвопокровной растительности, мелких кустарников, крупных или древесных кустарников, мелких деревьев, крупных деревьев. При этом под крупными в данном случае понимаются деревья в возрасте 30 лет и высотой до 12 м.

Растительность может подразделяться на следующие категории:

- 1) почвопокровные, травянистые растения;
- 2) мелкий кустарник;
- 3) крупный древесный кустарник;
- 4) мелкая древесная растительность;
- 5) крупная древесная растительность.

Наиболее встречаемые виды растений представлены в результатах исследований [1] и частично в таблице 2.

Аналогично грунты по разновидности [2] или в данном случае, условно говоря, степени плодородия можно подразделить на следующие категории.

1. Скальный или полускальный грунт, низкой прочности (в данном случае цементированные отвалы) [2], т. е. грунт, в котором преобладают структурные связи химической природы. Также можно отнести эту категорию согласно ГОСТ 23740 по относительному содержанию органического вещества к категории минеральных.

2. Грунт с примесью органического вещества, включениями растительных остатков.

3. Грунт со средним содержанием органического вещества или, по аналогии, среднезаторфованные.

4. С высоким содержанием органического вещества или органоминеральный грунт, т. е. грунт, масса органического вещества в котором составляет от 10 до 50 % от массы сухого грунта.

5. Органический грунт (в данном случае антропогенный грунт), т. е. грунт, масса органического вещества в котором составляет не менее 50 % (в настоящих экспериментах выявлялось до 80 %).

Следует отметить, что строгих границы между категориями нет, как в ГОСТе, так и в природных условиях. В отвалах будет наблюдаться смешение категорий, следовательно, имеет место неопределённость в данных. А для формализации и решения такого класса задач используется теория нечётких множеств [3].

Согласно положениям теории нечётких множеств, все переменные задачи могут быть формализованы в виде лингвистических переменных с соответствующими терм множествами функций принадлежности: Мин — минимальное; М — малое, Ср — среднее, Б — большое, Макс — максимальное. Соответственно, определим входные и выходную переменные следующим образом:

Входные переменные

1. «Тип растительности, TR »; от 1 до 5 — TR {Мин, Мал, Ср, Б, Макс}.
2. «Тип почвы, $ТП$ »; от 1 до 5 — $ТП$ {Мин, Мал, Ср, Б, Макс}.

Выходная переменная

1. «Период, T »; лет от 1 до 30.

Переменные задачи в графическом виде изображены на рисунке 2.

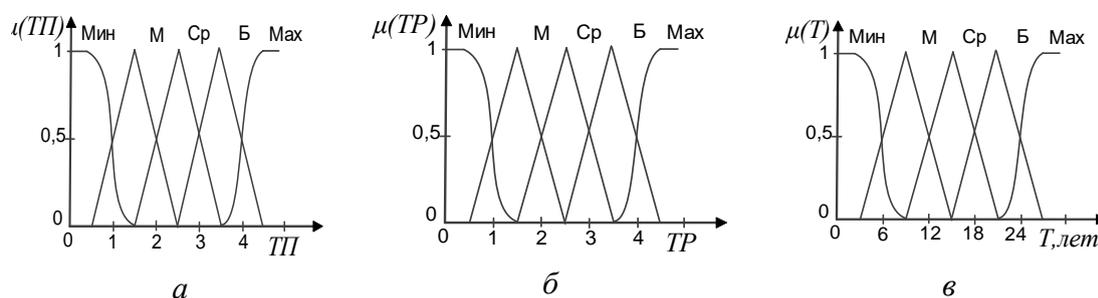


Рисунок 2. Лингвистические переменные задачи: *a* — «Тип почвы, $ТП$ », *б* — «Тип растительности, TR », *в* — «Период, T »

Figure 2. Linguistic variables of the task: *a* — «Type of vegetation, TR », *б* — «Type of soil, TP », *с* — «Period, T »

Разработка базы правил нечёткой продукции

В данном случае для нечёткого вывода используется метод Мамдани [6], следовательно, необходимо разработать базу правил нечёткой продукции [7—9]. Она приведена в таблице 3.

Таблица 3. База правил для нечёткого вывода

Table 3. Rule base for fuzzy inference

Значения переменной «Тип растительности, TP »	Значения переменной «Период, T » в зависимости от значений переменной «Тип почвы, $ТП$ »				
	Мин	М	Ср	Б	Мах
Мин	Б	Ср	Ср	М	Мин
М	Мах	Б	Ср	Ср	М
Ср	Мах	Мах	Б	Б	Ср
Б	Мах	Мах	Мах	Мах	Б
Мах	Мах	Мах	Мах	Мах	Мах

На основе предложенных лингвистических переменных задачи и разработанной базы правил выполняется реализация нечёткой системы в компьютерной программе.

Программная реализация нечёткой системы

Для реализации нечёткой системы в программной среде использована система Scilab [10]. Формализация нечётких функций принадлежности изображена на рисунке 3, где входные функции «Тип растительности, TP » и «Тип почвы, $ТП$ » определены в пользовательских формах программы, а выходная функция «Период, T » задана графически.

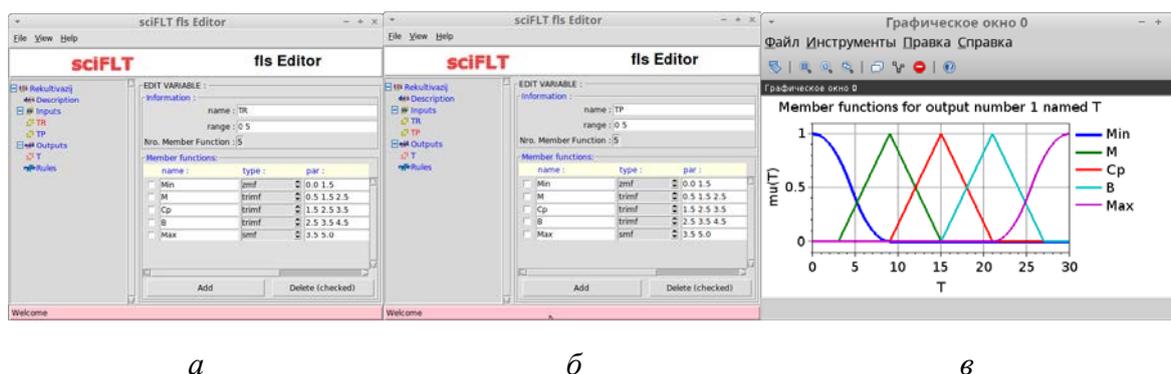


Рисунок 3. Задание входных и выходной функций в Scilab: *a* — «Тип растительности, TP », *б* — «Тип почвы, $ТП$ », *в* — «Период, T »

Figure 3. Setting the input and output functions in Scilab: *a* — «Type of vegetation, TP », *b* — «Type of soil, $ТП$ », *c* — «Period, T »

Созданная база правил (таблица 2) задана в программе (рисунок 4), а на основе результатов нечёткого вывода графически построена результирующая функции $T = f(TP, ТП)$ (рисунок 5).

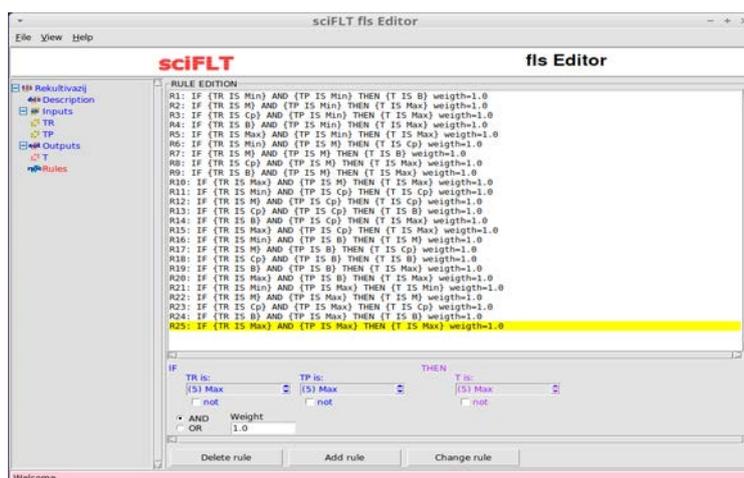


Рисунок 4. Задание базы правил

Figure 4. Setting the Rule Base

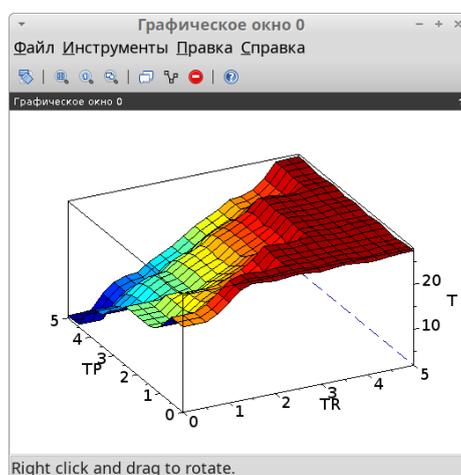


Рисунок 5. График результирующей функции $T = f(TP, TP)$

Figure 5. The graph of the resulting function $T = f(TP, TP)$

Таким образом, на рисунке 5 графически приведён прогноз времени периода рекультивации во всём диапазоне изменения входных переменных.

4. Заключение

Полученные результаты позволяют заключить следующее:

1. В экологическом отношении проблема нарушенных земель только обостряется, т. к. их площади стабильно растут. Из предлагаемых мероприятий восстановления земель достаточно эффективных, во многом по объективным причинам, пока не создано. Многообразие природных, техногенных условий не позволяет выработать даже

методологический подход, т. к. в этих условиях почти все данные о типах растительности, почвогрунтов, климатических воздействий и других факторов характеризуются неопределённостью. Следовательно, для описания процесса восстановления земель следует использовать те методы, которые могут формализовать неопределённости данных, т. е. теорию нечётких множеств и нечёткое моделирование.

2. Проведённые экспериментальные исследования показывают определённые закономерности и описание состояния земель, растительности, процесса произрастания на этих землях, что позволяет использовать их для прогнозирования процесса естественной рекультивации современными методами моделирования.

3. Предложенная модель прогнозирования процесса естественной рекультивации в виде нечёткой системы позволяет учитывать неопределённости данных задачи, поэтому является достаточно корректной математически и адекватной реальным условиям.

4. Для практического использования разработанная модель в дальнейшем позволяет назначать эффективные мероприятия по восстановлению земель на основе прогнозирования и в сравнении с периодом естественной рекультивации.

Список литературы

1. *Анянова Е. В.* Применение метода системного анализа обработки информации для принятия решения при восстановлении нарушенных земель // *Современные наукоёмкие технологии.* 2019. № 10-2. С. 233—238.
2. ГОСТ 25100-2020. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. ГРУНТЫ. Классификация. Дата введения 2021-01-01.
3. *Piegat A.* Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables. Heidelberg: New York, Physic-Verl, 2001. 760 p.
4. *Побединский В. В., Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е., Побединский Е. В.* Моделирование процесса сушки пиломатериалов // *Лесной журнал.* 2020. № 1. С. 154—166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166.
5. *Побединский В. В., Газизов А. М., Санников С. П., Побединский А. А.* Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге // *Вестник Мордовского университета.* 2018. Т. 28, № 2. С. 148—163. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>.
6. *Mamdani E. H.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers.* 1977. Vol. 26, no. 12. P. 1182—1191.
7. *Hongyun Y., Junmin Li, Jiarong S., Yang W.* Adaptive Fuzzy Tracking Control for Stochastic Nonlinear Systems with Time-Varying Input Delays Using the Quad-ratic Functions // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Sys-tems.* 2018. Vol. 26, no. 01. P. 109—142.
8. *Gour A., Pardasani K. R.* Statistical and Soft Fuzzy Set Based Analysis of Amino Acid Association Patterns in Peptide Sequence of Swine Influenza Virus // *Advanced Science, Engineering and Medicine.* 2018. Vol. 10, no. 2. P. 137—144.
9. *Ntaganda J. M., Hagggar M. S. D., Mampassi B.* Fuzzy Logic Strategy for Solving an Optimal Control Problem of Therapeutic Hepatitis C Virus Dynamics // *Open Journal of Applied Sciences.* 2015. Vol. 5. P. 527—541.
10. ESI Group — 2021. URL: <http://scilab.io/company>. Text. Image: electronic.

References

1. Anyanova E. V. Application of the method of system analysis of information processing for decision-making in the recultivation of disturbed lands. *Modern science-intensive technologies*, 2019, no. 10-2, pp. 233—238. (In Russ.)
2. GOST 25100-2020. INTERSTATE STANDARD. SOILS. Classification. The date of introduction is 2021-01-01. (In Russ.)
3. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables*. Heidelberg: New York, Physic-Verl, 2001. 760 p.
4. Gorokhovskiy A. G., Pobedinskiy V. V., Shishkina E. E., Pobedinskiy E. V. Modeling the Process of Sawn Timber Drying. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2020, no. 1, pp. 154—166. doi: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166. (In Russ.)
5. Pobedinskiy V. V., Gazizov A. M., Sannikov S. P., Pobedinskiy A. A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 148—163. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>. (In Russ.)
6. Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, vol. 26, no. 12, pp. 1182—1191.
7. Hongyun Y., Junmin Li, Jiarong S., Yang W. Adaptive Fuzzy Tracking Control for Stochastic Nonlinear Systems with Time-Varying Input Delays Using the Quad-ratic Functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 109—142.
8. Gour A., Pardasani K. R. Statistical and Soft Fuzzy Set Based Analysis of Amino Acid Association Patterns in Peptide Sequence of Swine Influenza Virus. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 137—144.
9. Ntaganda J. M., Hagggar M. S. D., Mampassi B. Fuzzy Logic Strategy for Solving an Optimal Control Problem of Therapeutic Hepatitis C Virus Dynamics. *Open Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 5, pp. 527—541.
10. ESI Group — 2021. URL: <http://scilab.io/company>. Text. Image: electronic.