

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

В.Л. Баденко

Информационная поддержка принятия решений на основе
интеграции теории нечетких множеств и
геоинформационных технологий

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2024

Баденко В.Л. Информационная поддержка принятия решений на основе интеграции теории нечетких множеств и геоинформационных технологий. – СПб., 2024. – 52 с.

В данном пособии основное внимание уделено такой функции географических информационных систем (ГИС) как манипулирование данными и анализ для поддержки принятия управленческих решений. Процессу принятия решений свойственна неопределенность, которая может трактоваться с помощью теории вероятностей и теории нечетких множеств. В настоящем пособии рассматривается второй подход. Изучение этого пособия поможет будущим инженерам понять концепции, лежащие в основе информационной поддержки принятия решений на основе интеграции теории нечетких множеств и ГИС, а также разобраться в технических и организационных вопросах применения рассмотренных технологий, что в конечном итоге позволит им эффективно использовать их возможности в любой из многочисленных областей их применения. Представленные сведения необходимые будущим специалистам, обучающимся по направлениям 08.03.01 «Строительство» (бакалавриат), 08.04.01 «Строительство» (магистратура), 08.05.01 «Строительство» (специалитет), 08.06.01 «Техника и технологии строительства» (аспирантура) и может быть также полезно студентам других специальностей.

Ил. 15. Библиогр.: 39 назв.

Оглавление

Введение	4
1. Трактовка неопределенности при решении задач управления в среде ГИС	6
1.1 Неопределенность и принятие решений	6
1.2. Различия в трактовке неопределенности в теории вероятности и в теории нечетких множеств	8
1.3. Нечеткие множества и нечеткие географические объекты.	11
2. Основные понятия теории нечетких множеств.	13
2.1. Функция принадлежности	13
2.2. Операции над нечеткими множествами.	15
3. Методология применения теории нечетких множеств в информационно-аналитических системах на базе ГИС	22
3.1. Общие положения.....	22
3.2. Построение комплексных оценок	23
3.3. Использование нечетких чисел	26
4. Примеры применения для принятия решений геоинформационных технологий с использованием алгоритмов теории нечетких множеств.....	30
4.1. Включение алгоритмов теории нечетких множеств в ГИС	30
4.1. Анализ загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами и фтором.	32
4.3. Сравнение земельных участков по нескольким критериям.	36
4.4. Оценка соответствия параметров почвы определенным требованиям.	41
Заключение.....	44
Список литературы.....	47

Введение

Современное развитие технологий географических информационных систем (ГИС) связано, прежде всего, с тем, что до 80% информации, используемой менеджерами и лицами, принимающими решения, (ЛПР) имеют географическую привязку [1]. ГИС представляет собой компьютерную систему, содержащую набор средств, которые реализуют ввод, хранение, манипулирование, анализ, а также вывод как пространственных, так и атрибутивных данных с целью обеспечения деятельности по принятию решений [2]. Это определение позволяет разделить основные функции ГИС на несколько групп: ввод и вывод данных, хранение и управление данными, и, наконец, манипулирование данными и анализ [3]. При этом в данном пособии основное внимание будет уделено последней группе функций.

Функции ГИС могут быть также классифицированы на базовые и расширенные. Многие процедуры принятия решений могут быть реализованы с помощью базовых функций. Однако, чтобы полностью использовать потенциальные возможности ГИС как системы для информационной поддержки принятия решений необходимо использовать расширенные функции, такие как пространственная статистика, математическое моделирование и т.д. Расширенные функции зачастую реализуются с помощью языков программирования, существующих для всех основных ГИС, используемых в России. Практические примеры, рассмотренные в данном пособии, реализованы с помощью языка MapBasic для среды MapInfo.

В общем случае, процесс принятия решений может быть, согласно Г. Саймону [5], структурирован на три основные фазы: размышление (осознание проблемы), выработка альтернатив и выбор. Современные программные средства ГИС ориентированы в основном на реализацию первой из этих фаз. Дальнейшее развитие средств ГИС для поддержки остальных фаз принятия решений сдерживается, в частности, отсутствием надлежащего методического обеспечения. Это пособие призвано решить некоторые проблемы.

В большинстве реальных случаев принятие решений носит многокритериальный характер и, кроме того, является групповым решением [6-8]. При этом процессу принятия решений свойственна неопределенность, которая может трактоваться с помощью теории вероятностей и теории нечетких множеств. В настоящем пособии рассматривается второй подход.

При решении задач управления обычно предполагается, что явления реального мира могут быть промоделированы объектами с точными границами и атрибутами, например, полигонами или гладкими непрерывными полями. Существующая неопределенность

обычно трактуется вероятностно, с использованием обычных статистических методов и пространственной статистики. В настоящей работе представлены способы обращения с неопределенностью в терминах нечетких множеств [9-13]. Вместо вероятности, теория нечетких множеств использует концепцию возможности, которая описывается в терминах функции принадлежности. Функция принадлежности для нечеткого множества допускает для конкретного элемента быть частичным членом различных, частично перекрывающихся множеств. При этом вид функции принадлежности может быть определен экзогенно, с использованием мнения экспертов или на основе существующих данных.

Автор надеется, что изучение этого пособия поможет будущим инженерам понять концепции, лежащие в основе информационной поддержки принятия решений на основе интеграции теории нечетких множеств и ГИС, а также разобраться в технических и организационных вопросах применения рассмотренных технологий, что в конечном итоге позволит им эффективно использовать их возможности в любой из многочисленных областей их применения.

Учебное пособие предназначено в первую очередь для студентов, обучающихся по направлению "Строительство" и может быть также полезно студентам других специальностей.

1. Трактовка неопределенности при решении задач управления в среде ГИС

1.1 Неопределенность и принятие решений

Во многих задачах принятия решений и построения систем управления имеет место ситуация, когда объекты исследования, условия задачи, цели, ограничения и последствия возможных решений не могут быть описаны точно. Неточность измерения и, как следствие, неопределенность описания реальных объектов является естественной, однако, несмотря на такую нечеткость, в реальных ситуациях обычно удается получать определенное представление о свойствах этих объектов и решать поставленные задачи.

При моделировании процессов и явлений, происходящих на территории, ЛПР приходится решать вопрос о том, насколько может он быть уверен в информации, используемой им для управления. Источником неуверенности специалиста в данных является нечеткость, присущая окружающему миру. Еще философы Древней Греции обсуждали софизм о том, сколько зерен составляет кучу [12, 13]. Суть софизма в том, что между понятиями "куча" и "несколько зерен", отсутствует четкая граница. Такая ситуация достаточно типична и связана с тем, что понятия естественного языка, отражающие соответствующие элементы мышления человека, как правило, не могут быть определены с помощью традиционного математического понятия множества. Границы многих понятий размыты, например, таких как "спелый", "молодой", "красный" и т.д. Можно говорить о том, что нечеткость объективно присутствует в природе. Так, например, принципиально нельзя определить с произвольной точностью длину предмета из-за атомной структуры вещества.

Формальный классический мыслительный процесс основан на традиционной логике, где большое значение придается парадигме "истина - ложь", например, так построена бинарная или Булева логика. Правила логики, используемые в компьютерных языках запросов, все основаны на точных идеях истины или лжи, которые подразумевают, что все объекты в базе данных соответствуют этой парадигме. Однако для данных об окружающей среде это не всегда верно.

В обыденных ситуациях имеется полная свобода для добавления видоизменений в разделение потенциально перекрывающихся классов, и любые сложные ситуации могут быть решены локально. Например, рассмотрим, как различать в терминах естественного языка высоких и низких людей (рис.1). Для начала можно предположить, что люди, которые имеют рост 190 см – высокие, а те, кто 150 см – низкие. Но человек 170 см –

высокий или низкий? Если границу между классами высокий/низкий зафиксировать посередине между этими двумя крайними случаями, то это не решает проблемы. На практике берется среднее значение и образуется новое множество – короткие-средние-высокие люди. Это создает новые проблемы для классификации людей высотой 154 и 186 см, которые можно разрешить образованием новых классов в области перекрытия для работы со случаями ниже среднего и выше среднего. Этот процесс может продолжаться настолько долго, насколько необходимо до того момента пока мы не достигнем приемлемой системы. Подобный качественный подход позволяет иметь дело с такими концепциями как степень залесенности, управление отдыхом на берегу, понимание климатических зон.

Низкие		Высокие		
Низкие	Средние	Высокие		
Низкие	Ниже среднего	Выше среднего	Высокие	
140	150	170	190	200см

Рис.1. Иллюстрация того, как с помощью естественного языка обращаются с нечеткими классами переопределения и расщепления классов

Многие пользователи ГИС имеют ясное понятие того, что им надо. Оценщики земли и планировщики могут обычно определить идеальные требования для конкретного случая землепользования, но они часто не уверены относительно того, где точно должна быть установлена граница между подходящим и неподходящим классом земли. Во многих ситуациях при принятии решений они формулируют свои требования в общих выражениях. Например, "Где находятся области с почвой, подходящей для использования в качестве экспериментальные поля?", "Сколько земли может быть использовано для определенной сельхозкультуры?" или "Какие области находятся под угрозой затопления?". Такие нечетко сформулированные запросы должны быть преобразованы в доступные термины. Более того, не вся информация, хранимая в ГИС, является четкой. Многие данные, собираемые во время полевых обследований, описываются с использованием нечетких выражений. Например, почва может быть описана как "слабо дренированная", имеющая "небольшие запасы питательных веществ", являющаяся "слабо подверженной почвенной эрозии"; растительность может быть описана как угнетенная, частично угнетенная и т.д. Даже, несмотря на стандартные инструкции, определяющие эти термины с достаточной точностью, на практике они сохраняют особенности качественной неопределенности.

В большинстве инженерных задач исходят из предположения, что все исходные данные заданы совершенно точно, что позволяет при моделировании использовать методы математической физики [14-18]. В описании природных ресурсов и моделировании неразумно позволять пользователям определять свои классы специально организованном способом [14-18]. На практике существует необходимость в соглашениях по ограниченному числу стандартизированных классов для подходящего обучения, исследований и передачи общей информации. Поэтому необходимы методы для описания того, как следует обрабатывать случаи, в которых присутствует нечеткие характеристики и границы.

Таким образом, можно выделить два аспекта нечеткости окружающего мира. Первый возникает при построении математических моделей реальных явлений, второй - нечеткость, присущую человеческому мышлению и восприятию. Забывая об этих аспектах, при построении моделей реальных явлений, исследователь, желая использовать математические методы, вносит определенность там, где ее нет по существу. Особенно опасным является использование такой "искусственной определенности" при принятии управленческих решений.

В общем случае нечеткость в математических моделях может учитываться тремя основными методами. В теории устойчивости сначала находят точные решения, а затем оценивают их вариацию при колебаниях исходных данных в границах допустимых ошибок. В стохастических методах в качестве экспликации исходных понятий, соответствующих реальным объектам и явлениям, рассматриваются случайные величины, а затем вероятностные соображения используют на всех этапах получения принимаемого решения, которое тоже носит случайный характер. Третий метод - описание исходных понятий с помощью теории нечетких множеств и прослеживание такой нечеткости вплоть до окончательного решения.

1.2. Различия в трактовке неопределенности в теории вероятности и в теории нечетких множеств

Теорию нечетких множеств удобно применять, когда имеющихся в распоряжении данных недостаточно, чтобы использовать стандартные и более привычные статистические характеристики (среднее, дисперсия, тип распределения). При этом анализ существующей практики показывает, что, статистические методы не всегда применяются достаточно обоснованно. Например, для сравнения различных методов оценивания параметров в математической статистике используют дисперсии оценок. Считают, что наблюдения

извлечены из генеральной совокупности с распределением, принадлежащим некоторому параметрическому семейству. Лучшей оценкой считается та, у которой наименьшая дисперсия. Она называется эффективной. Ее и рекомендуется использовать. Однако параметрическое семейство распределений - это абстракция, к которой при обработке реальных данных можно приближаться, но ее нельзя достигнуть. Рассмотрим, например, модель, в которой предполагается, что наблюдения извлечены из нормального распределения с неизвестным средним и единичной дисперсией. Тогда эффективной оценкой будет являться среднее арифметическое наблюдений. Однако, при реальных измерениях, проводимых с ошибкой, более реально предположить, что наблюдения извлекаются из нужного распределения с вероятностью $1 - \varepsilon$, а с вероятностью ε - из некоторого другого распределения, описывающего помехи. Можно показать, что если распределение, индуцированное помехами, является распределением Коши, то среднее арифметическое наблюдений не будет приближаться к среднему исходной нормальной совокупности. В то же время выборочная медиана остается хорошей оценкой. Этот пример демонстрирует, что при использовании статистических методов следует обязательно учитывать границы их применимости и при отсутствии необходимых оснований использовать другие методы, например, нечетких множеств. (Орлов)

Создатель теории нечетких множеств Л.Заде высказывает убеждение в необходимости различать случайность (*randomness*) и нечеткость (*fuzziness*), причем последняя является основным источником неточности во многих процессах принятия решений [6]. Под нечеткостью подразумевается тот тип неточности, который связан с нечеткими множествами, т.е. с классами, в которых нельзя указать резкую границу, отделяющую элементы, принадлежащие данному классу, и элементы, не принадлежащие к нему. Например, класс "зеленых предметов" нечеткое множество. Нечеткими являются также классы объектов, характеризующиеся такими часто используемыми прилагательными, как "большой", "маленький", "существенный", "значительный", "важный", "простой", "точный" и т.д. Фактически, большинство классов в реальном мире, в противоположность понятию класса или множества в математике, не имеют четких границ, которые отделяли бы входящие в класс объекты от объектов, не входящих в него. Но с другой стороны, в человеческом общении такие нечеткие утверждения, как "в этом году температура зимой на *несколько* градусов выше, чем в прошлом", "урожайность этого сорта пшеницы *значительно больше*, чем у того", "в этом году имеются *прекрасные перспективы* на урожай картофеля", все же несут значительную информацию, несмотря на неточность выделенных курсивом слов.

Суть различия между случайностью и нечеткостью состоит в следующем. Случайность связана с неопределенностью, касающейся принадлежности или непринадлежности некоторого объекта к множеству, не являющимся нечетким, т.е. четкому. Понятие же нечеткости относится к классам, в которых могут иметься различные градации степени принадлежности, промежуточные между полной принадлежностью и непринадлежностью объектов к данному классу.

Например, нечеткое утверждение "этот земельный участок хорошо подходит для выращивания зерновых культур" является неопределенным вследствие нечеткости выражения "хорошо подходит для выращивания зерновых культур". Но утверждение "вероятность того, что урожайность зерновых на данном участке превысит 20 ц/га равна 0,8" содержит информацию о мере неопределенности относительно принадлежности некоторого участка к четкому классу участков, где наблюдается указанная урожайность. Разумеется, использование тех или иных функций принадлежности предполагает, что они имеют определенное эмпирическое обоснование, однако оно не имеет четкого, эксплицитного выражения.

Такое различие приводит к тому, что математические методы теории нечетких множеств совершенно не похожи на методы теории вероятностей. Они во многих отношениях проще вследствие того, что понятию вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простое понятие функции принадлежности в теории нечетких множеств. Кроме того, вместо обычных операций $a+b$ и ab , где a и b - действительные числа, используются более простые операции $Max(a,b)$ и $Min(a,b)$. По этой причине даже в тех случаях, когда нечеткость в процессе принятия решений может быть представлена вероятностной моделью, часто удобнее оперировать с ней методами теории нечетких множеств без привлечения теории вероятностей.

Следует также выделить одну особенность функций принадлежности в сравнении с функциями распределения вероятностей. Если последние имеют объективную основу, например, в виде накопленных статистических данных, то функции принадлежности и их аппроксимации являются субъективными по самой своей сущности и это роднит их с так называемыми субъективными вероятностями. Как известно, что на основе анализа отношений между субъектом, знанием и объектом описаны следующие интерпретации вероятности: классическая, частотная, логическая и субъективная, причем каждая из них удовлетворяет аксиомам теории вероятности А.Н. Колмогорова. Следует также отметить, что нечеткие множества можно рассматривать как "одномерные проекции" случайных множеств. При этом нечеткие множества моделируются в теории вероятностей, но не с помощью случайных величин, а с помощью случайных множеств.

1.3. Нечеткие множества и нечеткие географические объекты.

При моделировании процессов и явлений в среде ГИС первую очередь необходимо выделить в окружающем мире либо четко ограниченные элементы - земельные участки, административные единицы, почвенные разности или непрерывные поля - температурные градиенты, рельеф, плотность населения. Эти элементы представляются в ГИС с помощью точек, линий, полигонов, имеющих пространственные и атрибутивные характеристики. Набор средств ГИС обеспечивают основные правила для манипулирования пространственными примитивами с помощью обычных правил логики хорошо определенных в математике.

Одной из важнейшей задачей, решаемой в среде ГИС, является задача классификации, т.е. разделения элементов базы данных (БД) ГИС на те элементы, которые удовлетворяют определенному критерию и на те, которые ему не удовлетворяют. [5]. Традиционно в процессе классификации неосознанно используются основные законы мышления, впервые сформулированные Аристотелем:

- Закон тождественности (все есть то, что оно есть – дом есть дом)
- Закон непротиворечивости (что-то и его противоположность не может быть одновременно истиной – дом не может быть одновременно домом и не домом)
- Принцип исключающий противоречие – исключенного третьего (любое утверждение является либо истиной, либо ложью – этот дом либо заселен, либо нет)

Принцип исключенного третьего гарантирует, что все утверждения в обычной логике могут иметь только два значения – истина и ложь, которые могут быть закодированы нулем или единицей. Этот принцип двузначной логики делает невозможным существование перекрывающихся классов, концепции частичного членства во множестве и концепции частичной правды. Однако многие географические явления являются такими, что разделить их на элементы совсем не просто. Структуры, создаваемые природными процессами, варьируются по многим пространственным и временным масштабам, и выделение элемента определяется не одним, а многими взаимодействующими факторами.

При реализации ГИС много усилий тратится на то, чтобы определить исходные. При ограничении правил выделения объектов до бинарной логики возникают ограничения на получение и классификацию данных. В реальной ситуации при принятии решений идут на компромисс, основываясь на степени, с которой объект удовлетворяет спецификациям.. Например, при покупке новой квартиры спецификации могут выглядеть следующим образом – в ней должно быть 3 комнаты, имеется кухня по крайней мере 10 м² и

расположение в 10 минутах езды от станции метро и магазинов, не более чем в 20 минутах ходьбы от вашей работы и стоимостью не более чем 30000\$. Это все звучит достаточно точно, но что означает "10 минут ходьбы". Является ли это средней цифрой и если это так, то как это измерить? Можно ли определить интенсивность движения? Будут ли рассматриваться варианты вне спецификации, такие как квартира с 9 м² кухней, стоящей 31000\$ с 4 комнатами, если она удовлетворяет другим критериям?

Подобные проблемы в ГИС возникают постоянно - при определении классификации природных явлений, таких как типы подстилающих пород, классы почв или растительности и т.д. Даже в случае точно определенных классов, часто нет возможности отнести элемент к конкретной группе, либо потому, что правила являются двусмысленными, либо измерение не может быть сделано с достаточной точностью. Разница в интерпретации правил дискретизации проявляется в сборе данных и классификации, продолжая существовать в базах данных, и имеет непосредственное влияние на представление и интерпретацию результатов моделирования в среде ГИС.

2. Основные понятия теории нечетких множеств.

2.1. Функция принадлежности

Нечеткость — это тип неточности, характеризующийся классами, которые по различным причинам не могут иметь или не имеют четко определенных границ. При этом членство элемента во множестве не может быть определено точно или оно не имеет четкого основания, т.к. границы множества не определены. Эти нечетко определенные классы называются нечеткими множествами. Нечеткость часто сопутствует сложности. Нечеткие множества подходят для использования везде, где имеет место двусмысленность, неопределенность и противоречивость в математических или концептуальных моделях эмпирических явлений.

Теория нечетких множеств была предложена Л.Заде как аппарат анализа и моделирования гуманистических систем, т.е. систем, в которых участвует человек. Эта теория является обобщением и не заменяет хорошо известную абстрактную теорию множеств, на которую часто ссылаются как на Булевскую логику. Центральная концепция теории нечетких множеств - функция принадлежности (членства), которая в числовой форме представляет отношение элемента к множеству. Точное определение таково:

Нечеткое множество A , определяемое на универсальном множестве U , характеризуется функцией принадлежности $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу $u \in U$ число $\mu_A(u)$ из отрезка $[0,1]$, характеризующее степень принадлежности элемента u множеству A .

Чем ближе значение $\mu_A(u)$ к единице, тем выше степень принадлежности u к A . Функция принадлежности является, очевидно, обобщением характеристической функции обычной теории множеств, принимающей лишь два значения: 1 для элементов, принадлежащих множеству, и 0 для элементов, не принадлежащих множеству A . Число $\mu_A(u)$ показывает степень принадлежности элемента u нечеткому множеству A . С формальной точки зрения нет необходимости различать нечеткое множество и его функцию принадлежности, при этом эти понятия можно употреблять как синонимы. Таким образом, главное отличие от классической теории множеств состоит в том, что в последней существует четкое или однозначное различие между элементами принадлежащими множеству и теми, которые не принадлежат множеству.

В случае дискретных множеств U применяется запись нечеткого множества A как множества пар:

$$\mathbf{A} = \{(\mathbf{u}, \mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}))\} \quad (1)$$

Например для определения нечеткого подмножества \mathbf{A} "чисел значительно превышающих число 10" универсального множества \mathbf{U} , совпадающего с множеством целых чисел, можно предложить функцию принадлежности следующего вида:

$$\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}) = \begin{cases} 0 & \mathbf{u} \leq 10 \\ (1 + 10^3/(\mathbf{u} - 10)^2)^{-1} & \mathbf{u} > 10 \end{cases} \quad (2)$$

Некоторые значения этой функции будут таковы:

$$\mu_{\mathbf{A}}(10) = 0; \quad \mu_{\mathbf{A}}(50) \approx 0.6; \quad \mu_{\mathbf{A}}(100) \approx 0.9; \quad \mu_{\mathbf{A}}(500) \approx 1$$

В общем случае выбор функции принадлежности $\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u})$ субъективен и основан на частичной информации, имеющейся в каждом отдельном случае. Интерпретацией функции принадлежности $\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u})$ является также согласно Заде, субъективная мера того, насколько элемент $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$ соответствует понятию, смысл которого формализуется нечетким множеством \mathbf{A} .

Например, на рис.2 представлена интерпретация выражения "уровень грунтовых вод на данном участке составляет порядка 150 сантиметров" с помощью функции принадлежности.

Вопрос о содержательной интерпретации функции принадлежности является чрезвычайно важным. Спектр мнений по этому поводу достаточно широк. В основополагающей работе вообще утверждалось, что нет необходимости находить реальный смысл функции принадлежности. В дана следующая интерпретация: $\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u})$ есть условная вероятность наблюдения события \mathbf{A} при наблюдении \mathbf{u} . В большинстве же работ предполагается, что функция принадлежности - это некоторое невероятностное субъективное измерение нечеткости и что она отличается от вероятности. Однако аргументы в пользу такого мнения сводятся к следующему: либо просто декларируется указанное выше предположение, либо строятся примеры, в которых в процессе рассуждения происходит подмена одного рассматриваемого объекта (оценок степени принадлежности) другим (частотой встречаемости в природе).

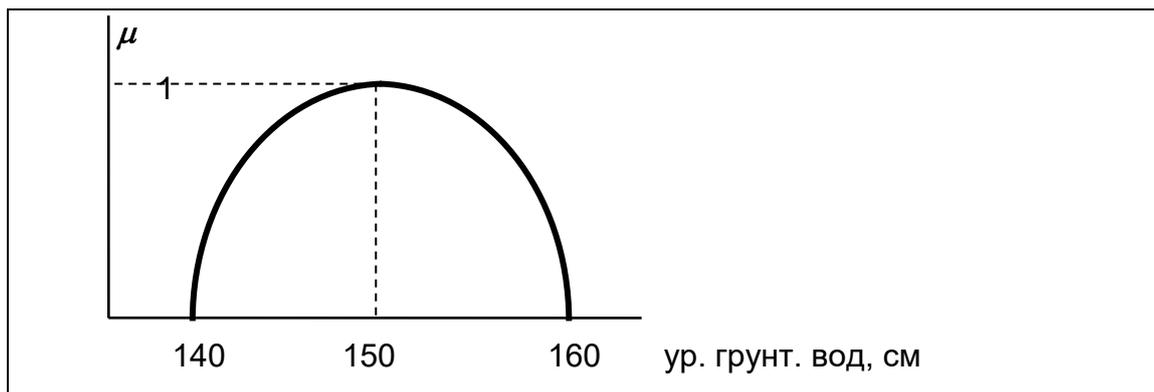


Рис.2. Пример интерпретации выражения "Уровень грунтовых вод около 150 см" с помощью функции принадлежности.

С практической точки зрения наиболее важным является вопрос о методах построения функции принадлежности, которые обычно строятся по результатам опросов экспертов или путем анализа документов. Рассмотрим пример, в котором для определения значения функции принадлежности $\mu_A(u)$ элементов $u \in U$ к нечеткому множеству A используется опрос мнения экспертов. Если часть экспертов (n_1) отвечает на вопрос о принадлежности элемента u множеству A положительно, а другая часть (n_2) - отрицательно. Тогда считается:

$$\mu_A(u) = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (3)$$

Некоторые авторы предлагают процедуру построения функции принадлежности $\mu_A(u)$ на основе количественного парного сравнения мнения экспертов. Другие для построения $\mu_A(u)$ используют методику, основанную на стандартном наборе графиков функции принадлежности. В этом случае эксперт в режиме диалога с компьютером имеет возможность выбрать вид функции и подобрать параметры [7].

2.2. Операции над нечеткими множествами.

Операции, определяемые для нечетких множеств, с одной стороны, имеют общие черты с соответствующими операциями классической теории множеств: переходя в них в предельном случае: когда функция принадлежности принимает лишь два значения 0 и 1, с другой стороны, эти операции обладают определенной спецификой и, в известной степени, определены произвольно. В определениях операций, приведенных ниже, предполагается,

что при комбинировании нечетких множеств рассматриваются одинаковые универсальные множества U .

Определение 1. Эквивалентность. Два нечетких множества A и B эквивалентны ($A \equiv B$) тогда и только тогда: когда для всех $u \in U$ имеет место $\mu_A(u) = \mu_B(u)$.

Определение 2. Включение. Нечеткое множество A содержится в нечетком множестве B , или является подмножеством множества B ($A \subset B$), тогда и только тогда, когда для всех $u \in U$ имеет место $\mu_B(u) \geq \mu_A(u)$.

В этом смысле нечеткое множество очень больших чисел есть подмножество нечеткого множества больших чисел. Например, аналогично примеру с функцией принадлежности (2) можно построить нечеткое множество B "целых чисел, значительно превышающих 1" с функцией принадлежности:

$$\mu_B(u) = \begin{cases} 0 & u = 1 \\ (1 + 10/(u - 1)^2)^{-1} & u \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

Очевидно, что $\mu_B(u) \geq \mu_A(u)$ и $A \subset B$.

Определение 3. Дополнение. Нечеткое множество A' является дополнением A , если $\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u)$.

Например, дополнение для множества (3) дополнение будет множество B' "целых чисел, не превышающих значительно 1" с функцией принадлежности:

$$\mu_{B'}(u) = \begin{cases} 1 & u = 1 \\ (1 + (u - 1)^2/10)^{-1} & u \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

Для определения следующих двух основных операций объединения и пересечения нечетких множеств используется характерная для теории нечетких множеств операция отыскания максимума и минимума.

Определение 4. Пересечение. Пересечение $A \cap B$ двух нечетких множеств A и B определяется как наибольшее нечеткое множество, являющееся одновременно подмножеством обоих этих множеств. Функция принадлежности множества $A \cap B$ определяется выражением:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (7)$$

Если использовать вместо символа \min знак конъюнкции \wedge , можно переписать (7) в следующем виде:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u) \quad (8)$$

Понятие пересечения имеет близкое отношение к понятию соединительного союза "И". Так, если **A** - множество *холодных* дней и **B** - множество *ветренных* дней, то **A** ∩ **B** - множество дней, которые одновременно *холодные* И *ветренные*. При этом следует заметить, что отождествление союза "И" с операцией (8) означает, что "И" понимается в "жестком" смысле, т.е. отсутствует возможность какой-либо "компенсации" имеющихся значений $\mu_A(u)$ какими-либо значениями $\mu_B(u)$ и наоборот.

Определение 5. Объединение. Объединение **A** ∪ **B** двух нечетких множеств **A** и **B** определяется как наименьшее нечеткое множество, содержащее оба множества **A** и **B**. Функция принадлежности множества **A** ∪ **B** определяется выражением:

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (9)$$

Если использовать вместо символа \max знак дизъюнкции \vee , можно переписать (9) в следующем виде:

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u) \quad (10)$$

Операция объединения имеет близкое отношение к соединительному союзу "ИЛИ". Так, если опять рассмотреть два множества *холодные* и *ветренные* дней, то **A** ∪ **B** = { *холодные* ИЛИ *ветренные*. дни}.

В предельном случае, когда функции принадлежности и принимают лишь значения 0 и 1 (т.е. множества **A** и **B** не являются нечеткими), формулы (7) и (9) совпадают с обычными теоретико-множественными операциями объединения и пересечения. При этом следует отметить, что везде выше предполагается, что отнесение элемента $u \in U$ к нечеткому множеству **A** осуществляется независимо от аналогичного процесса для множества **B**.

Определение 6. Алгебраическое произведение. Функция принадлежности алгебраического произведения **AB** нечетких множеств **A** и **B** определяется следующим образом:

$$\mu_{AB}(\mathbf{u}) = \mu_A(\mathbf{u}) * \mu_B(\mathbf{u}), \quad (11)$$

Определение 7. Алгебраическая сумма. Для алгебраической суммы $\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}$ функция принадлежности выражается формулой:

$$\mu_{\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}}(\mathbf{u}) = \mu_A(\mathbf{u}) + \mu_B(\mathbf{u}) - \mu_A(\mathbf{u}) \mu_B(\mathbf{u}) \quad (12)$$

Для сравнения возможных результатов применения последних четырех операций рассмотрим, например $\mu_A(\mathbf{u}) = 0.8$ и $\mu_B(\mathbf{u}) = 0.5$, то имеем:

$$\mu_{\mathbf{A} \cap \mathbf{B}}(\mathbf{u}) = 0.5; \mu_{AB}(\mathbf{u}) = 0.4; \mu_{\mathbf{A} \cup \mathbf{B}}(\mathbf{u}) = 0.8; \mu_{\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}}(\mathbf{u}) = 0.9 \quad (13)$$

Для введенных выше четырех операций можно доказать следующую теорему.

Теорема 1. Законы де Моргана справедливы и для нечетких множеств, а именно выполняются следующие тождества:

$$(\mathbf{A} \cup \mathbf{B})' = \mathbf{A}' \cap \mathbf{B}', \quad (\mathbf{A} \cap \mathbf{B})' = \mathbf{A}' \cup \mathbf{B}' \quad (14)$$

$$(\mathbf{A} \oplus \mathbf{B})' = \mathbf{A}' \mathbf{B}' \quad (\mathbf{AB})' = \mathbf{A}' \oplus \mathbf{B}' \quad (15)$$

Как можно заметить к законам де Моргана для классических множеств (14) в данном случае добавляются соотношения (15) для произведения и суммы нечетких множеств.

Доказательство.

Рассмотрим первое тождество. По определениям 5 и 3 имеем:

$$\mu_{(\mathbf{A} \cup \mathbf{B})'}(\mathbf{u}) = 1 - \max(\mu_A(\mathbf{u}), \mu_B(\mathbf{u})) = \min(1 - \mu_A(\mathbf{u}), 1 - \mu_B(\mathbf{u}))$$

Как можно заметить последнее выражение совпадает с функцией принадлежности нечеткого множества $\mathbf{A}' \cap \mathbf{B}'$.

Второе тождество доказывается аналогично. Третье тождество следует из следующей цепочки равенств:

$$\begin{aligned} \mu_{(\mathbf{A} \oplus \mathbf{B})'}(\mathbf{u}) &= 1 - \mu_A(\mathbf{u}) + \mu_B(\mathbf{u}) - \mu_A(\mathbf{u}) \mu_B(\mathbf{u}) = \\ &= (1 - \mu_A(\mathbf{u})) (1 - \mu_B(\mathbf{u})) = \mu_{\mathbf{A}'}(\mathbf{u}) \mu_{\mathbf{B}'}(\mathbf{u}) \end{aligned}$$

Последнее тождество доказывается аналогично. Теорема доказана.

Необходимо отметить, что операции пересечения и объединения ассоциативны и дистрибутивны по отношению друг к другу. В то же время операции произведения и суммы ассоциативны, но не дистрибутивны.

Определение 8. Выпуклость и вогнутость. Пусть универсальное множество U представляет собой множество действительных чисел. Тогда нечеткое множество A называется выпуклым, если его функция принадлежности для любой пары элементов u, v из U удовлетворяет неравенству:

$$\mu_A(\lambda u + (1 - \lambda)v) \geq \min(\mu_A(u), \mu_A(v)), \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (16)$$

Соответственно A является вогнутым, если его дополнение выпукло. Например, функция принадлежности на рис.2 является выпуклой.

Нетрудно показать, что если два нечетких множества A и B выпуклы, то их пересечение $A \cap B$ также выпукло. С другой стороны, если A и B вогнуты, то вогнутыми будет и их объединение $A \cup B$.

Определение 8. Уровневое множество. Пусть A - нечеткое множество. Параметр $\lambda \in [0, 1]$ определяет λ - уровневое множество A_λ как множество всех тех элементов u для которых $\mu_A(u) \geq \lambda$.

$$A_\lambda = \{ u \mid \mu_A(u) \geq \lambda \} \quad (17)$$

При этом $\lambda=0,5$ носит название "уровень перехода".

Определение 9. Нормальность. Нечеткое множество A называется нормальным если существует по крайней мере один элемент u такой, что $\mu_A(u) = 1$.

Все функции принадлежности, которые рассматриваются в примерах, представленных ниже, являются выпуклыми.

Определение 10. Нечеткое число. Нечеткое множество A называется нечетким числом, если оно является нормальным выпуклым множеством. При этом универсальное множество U является множеством действительных чисел.

Нечеткие числа являются удобным представлением мнений экспертов о значении некоторого параметра. Например, на рис.2 представлено мнение эксперта об уровне грунтовых вод с помощью нечеткого числа.

Определение 11. Степень нечеткого множества. Если α - действительное число, то функция принадлежности для A^α будет $\mu_{A^\alpha}(u)$.

При $\alpha = 2$ получаем частный случай операции - так называемую операцию концентрации CON:

$$\text{CON}(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^2, \quad (18)$$

а при $\alpha = 0.5$ - операцию растяжения DIL:

$$\text{DIL}(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^{0.5}. \quad (19)$$

Поскольку степень принадлежности - неотрицательная величина, не превосходящая единицы, операция CON снижает степень нечеткости описания, в то время как операция DIL повышает степень нечеткости. Эти операции можно использовать для весьма грубой аппроксимации действия лингвистических определений *очень* (CON) и *более или менее* (DIL).

Определение 12. Принцип расширения. Пусть $f: \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ - отображение \mathbf{U} на \mathbf{V} и $\mathbf{v} = f(\mathbf{u})$, где \mathbf{u} и \mathbf{v} - произвольные элементы из \mathbf{U} и \mathbf{V} соответственно. Пусть \mathbf{A} - нечеткое множество в \mathbf{U} . Тогда отображение f порождает нечеткое множество \mathbf{B} в \mathbf{V} с функцией принадлежности, задаваемой соотношением:

$$\mu_{\mathbf{B}}(\mathbf{v}) = \text{Sup}\{\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}); \mathbf{u} \in f^{-1}(\mathbf{v})\}, \quad (20)$$

причем супремум берется по всем элементам, составляющим прообраз $f^{-1}(\mathbf{v})$ в \mathbf{U} элемента \mathbf{v} , для всех остальных элементов $\mu_{\mathbf{B}}(\mathbf{v}) = 0$. Иными словами значение функции принадлежности аргумента остается тем же и его образа. Подобную же форму имеет принцип расширения для функций нескольких аргументов.

Принцип расширения можно использовать для определения операций над нечеткими числами. Пусть Θ - бинарная арифметическая операция (например, сложение, умножение и т.д.) Пусть \mathbf{A} и \mathbf{B} - два нечетких числа. Тогда:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \Theta \mathbf{B} \quad (21)$$

нечеткое число с функцией принадлежности:

$$\mu_{\mathbf{C}}(\mathbf{v}) = \text{Sup} \{ \min (\mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}_1), \mu_{\mathbf{A}}(\mathbf{u}_2)); \text{таких что } \mathbf{v} = \mathbf{u}_1 \Theta \mathbf{u}_2 \} \quad (22)$$

Для использования нечетких множеств разработан достаточно мощный аппарат, который позволяет эффективно работать с нечеткой информацией, что имеет многочисленные подтверждения. В настоящей работе не повторяются основные положения теории, а сразу используются соответствующие результаты. Их практическое применение позволяют сделать заключение о том, что в системах поддержки принятия управленческих решений в среде ГИС, использование информации, представленной с помощью нечетких множеств, является перспективным направлением. Аппарат нечетких множеств позволяет избежать возможных трудностей в применении статистических методов. Кроме того, появляется возможность принимать управленческие решения на основе представления в картографическом виде информации, отражающей знания экспертов.

3. Методология применения теории нечетких множеств в информационно-аналитических системах на базе ГИС

3.1. Общие положения.

Теория нечетких множеств является аксиоматической. Основными объектами этой теории являются нечеткие множества (функции принадлежности). Для этих объектов разработан достаточно мощный формальный аппарат, позволяющий успешно проводить операции над нечеткими множествами и выводить различные формальные утверждения. Методология применения любой аксиоматической теории основывается на том, что сначала строятся формальные образы объектов реального мира, с которыми проводятся различные манипуляции по правилам этой теории, а затем проводится интерпретация результатов таких манипуляций для реальных объектов.

В создаваемых на базе ГИС информационно-аналитических системах (ИАС) информация о территории собирается и хранится в виде комплексных атрибутивно-графических данных. Следовательно, при применении теории нечетких множеств в ГИС первой задачей является представление данных о некотором понятии, которое используется при принятии решений, в виде значений функции принадлежности. Для этого необходимо сформулировать какую именно управленческую задачу предстоит решить и определить ее в виде нечеткого множества. Например, при решении задачи о выборе выдела для будущей лесосеки можно рассмотреть следующее нечеткое множество "выделы, на которых находится небольшое число сухостоя".

Если основываться на предположении, что в ГИС используется геореляционная схема, то объекты O БД ГИС могут быть представлены в общем виде как тройка $O=\{id, pos, att\}$, где id - идентификатор, pos - графическая часть и att - атрибуты объекта. Тогда следующий этап состоит в выборе подходящего выражения для преобразования фактических значений att для объектов $O=\{id, pos, att\}$, БД ГИС в значения функции принадлежности. На этом этапе множество att дополняется элементами для хранения этих значений. В том случае, если элементы att измеряются по количественным шкалам, для вычисления значения функции принадлежности следует использовать аналитические выражения в виде некоторой комбинации элементарных функций. Вид этого выражения определяется на основе мнений экспертов, а его аргументами являются элементы att для каждого $O=\{id, pos, att\}$.

В случае, если элементы *att* измеряются по качественным шкалам, для определения значения функции принадлежности также следует использовать мнение экспертов. Однако, в этом случае аналитическую функцию построить достаточно трудно, поэтому мнение экспертов используется не для получения некоторого аналитического выражения, а сразу для получения значений функции принадлежности. Рассмотрим, например, задачу выбора участка с малопроницаемыми грунтами. Предположим, что в БД ГИС, имеются площадные объекты (участки) с атрибутом - механический состав грунтов на участке. При решении задачи целесообразно определить следующее нечеткое множество G : "участки, на которых грунты имеют незначительную проницаемость" и дополнить объекты БД ГИС (участки - u) соответствующим атрибутом - $\mu_G(u)$. В этом случае предлагается использовать следующий подход для определения значений $\mu_G(u)$ - функции принадлежности: на тех участках, где грунт песчаный, $\mu_G(u) = 0$, а на тех где, например, тяжелые суглинки, $\mu_G(u) = 1$, а там где супеси $\mu_G(u) = 0,5$.

Определенные таким образом значения функций принадлежности, которые сохраняются в БД ГИС как новые атрибуты объектов $O=\{id, pos, att\}$, рекомендуется использовать для построения тематических карт. Последние, при соответствующем выборе оценочных интервалов, служат эффективным средством информационной поддержки принятия решений по охране ОС в условиях неопределенности. Например, при наличии в БД ГИС площадных объектов с атрибутами, как в предыдущем примере с грунтом, следует построить тематическую карту для оценки участков $\mu_G(u)$ с тремя оценочными интервалами: те объекты, на которых $\mu_G(u) < 0,5$ получают название "неподходящие", там, где $\mu_G(u)$ принимает значения от 0,5 до 0,9 - "частично пригодные", а где $\mu_G(u) > 0,9$ "полностью пригодные".

3.2. Построение комплексных оценок

В создаваемых на базе ГИС ИАС для решения задач по охране ОС приходится сравнивать объекты $O=\{id, pos, att\}$ БД ГИС. При этом чаще всего выбор альтернатив определяется несколькими частными критериями r_i . Возникает задача о построении комплексной оценки R для $O=\{id, pos, att\}$. Следуя развиваемой методологии применения аппарата теории нечетких множеств в ИАС, частные критерии r_i следует определять как значения функции принадлежности для множества, выражающего искомое решение. При этом возможно два случая, когда $r_i \in \{att\}$ одного $O=\{id, pos, att\}$, и когда они принадлежат разным $O=\{id, pos, att\}$, которые могут находиться даже на разных слоях БД ГИС и,

следовательно, строго говоря, объекта оценки в БД ГИС не существует. Во втором случае процессу вычисления R должно предшествовать построение новых $O=\{id, pos, att\}$, например, с помощью операция оверлея с выделением уникальных полигонов или другой подходящей по смыслу оверлейной операции.

Для получения R рекомендуется использовать операции \wedge - пересечения и \vee - объединения частных критериев r_i . Применять операцию \wedge следует в тех случаях, когда для принятия решения необходимо одновременно лучшее значение для всех критериев r_i , и в этом случае R определяется самым минимальным значением r_i . В случае же, когда R определяется каким-либо резко выделяющимся уникальным (максимальным) значением r_i , следует использовать операцию \vee . Такая операция используется, например, при поиске аномалий в природных ресурсах.

Другими словами можно сказать, что операция \wedge соответствует позиции ЛПР - "пессимиста", а операция \vee - "оптимиста". Однако, при этом в обоих случаях предполагается, что "отрицательные" и "положительные" моменты r_i в обоих случаях не суммируются, т.е. критерии r_i аддитивные и не имеют коммулятивного (совместного) влияния на комплексную оценку R . Если же считается, что имеется совместное влияние на R r_i , то вместо операции \wedge следует использовать операцию $*$ алгебраического произведения, а вместо операции \vee - \oplus операцию алгебраической суммы. Возможен и более тонкий учет совместного влияния критериев r_i путем предварительного применения операций возведения в степень, а также операций *CON* - концентрации и *DIL* - растяжения.

Также предлагается использовать для принятия управленческих решений алгоритм выбора $O=\{id, pos, att\}$, который базируется на методе принятия решений в условиях определенности [8]. В этом случае рассматривается метод анализа альтернатив, когда частные критериальные оценки r_i задаются как степени соответствия альтернатив понятиям, определяемым критериям. Для построения комплексной оценки R следует использовать свертку на основе операции \wedge .

В общем случае предположим, что есть в БД ГИС множество A из m объектов $O=\{id, pos, att\}$, представляющих, например, земельные участки $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. Множество A следует рассматривать как множество альтернатив. Тогда для некоторого частного критерия r может быть рассмотрено нечеткое множество $r=\{\mu_r(a_1)/a_1, \mu_r(a_2)/a_2, \dots, \mu_r(a_m)/a_m\}$, где $\mu_r(a_i)/a_i \in [0,1]$ - оценка a_i по критерию r , которая

характеризует степень соответствия a_i понятию, определяемому критерием r (функция принадлежности).

Если имеется n критериев r_1, r_2, \dots, r_n , то лучшим считается a_i , удовлетворяющий и критерию r_1 и r_2 , и... и r_n . Поэтому правило для выбора наилучшего a_i следует записать в виде пересечения соответствующих нечетких множеств:

$$R = r_1 \cap r_2 \cap \dots \cap r_n. \quad (23)$$

В качестве наилучшего выбирается элемент $a^* \in A$, который имеет наибольшее значение функции принадлежности:

$$\mu_R(a^*) = \max_{j=1, m} \mu_R(a_j) \quad (24)$$

В случае, если критерии r_i имеют различную важность, каждому из них приписывается число $\alpha_i \geq 0$ (чем важнее критерий, тем больше α_i), и правило выбора принимает вид:

$$R = r_1^{\alpha_1} \cap r_2^{\alpha_2} \cap \dots \cap r_n^{\alpha_n}, \text{ где } \alpha_i > 0, i = \overline{1, n}; \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (25)$$

Коэффициенты относительной важности α_i следует вычислять на основе процедуры парного сравнения критериев. При этом вначале формируется матрица попарного сравнения B . Элементы b_{ij} матрицы B определяются в Таблице 1 и должны удовлетворять следующим условиям: $b_{ii} = 1, b_{ij} = 1/b_{ji}$. При этом b_{ij} могут принимать значения от 1/9 до 9.

После составления матрицы B для конкретного набора критериев находится w - собственный вектор матрицы B , соответствующий максимальному собственному значению λ_{max} : $Bw = \lambda_{max}w$. Искомые значения коэффициентов α_i получаются умножением элементов собственного вектора w на n для выполнения условия (25): $\alpha_i = nw_i$.

Таблица 1. Значения элементов матрицы B для определения коэффициентов относительной важности

Относительная важность критериев r_i и r_j	Элемент b_{ij}
Равная важность	1
Немного важнее	3
Важнее	5
Заметно важнее	7
Намного важнее	9
Промежуточные значения	2, 4, 6, 8

3.3. Использование нечетких чисел

Перспективным направлением является также использование представления значений из $\{att\}$ в виде нечетких чисел и выполнение операций над ними на основе принципа расширения (21). Простейшим видом нечеткого числа является треугольное нечеткое число. Пример такого числа представлен на рис. 3, на котором изображено множество, определяющее уровень грунтовых вод на земельном участке.

Треугольное число A определяется тремя действительными числами (a_1, a_2, a_3) . На отрезке $[a_1, a_2]$ функция принадлежности линейно возрастает от 0 до 1, а на отрезке $[a_2, a_3]$ линейно убывает от 1 до 0. Следует также сделать замечание, что нами наиболее часто используются треугольные нечеткие числа с симметричной функцией принадлежности ($|a_1, a_2| = |a_2, a_3|$). Такое представление нечетких чисел может использоваться при вычислениях любых функций, используемых в моделях. При этом результатом таких вычислений будет нечеткое число, получаемое на основе применения принципа расширения.

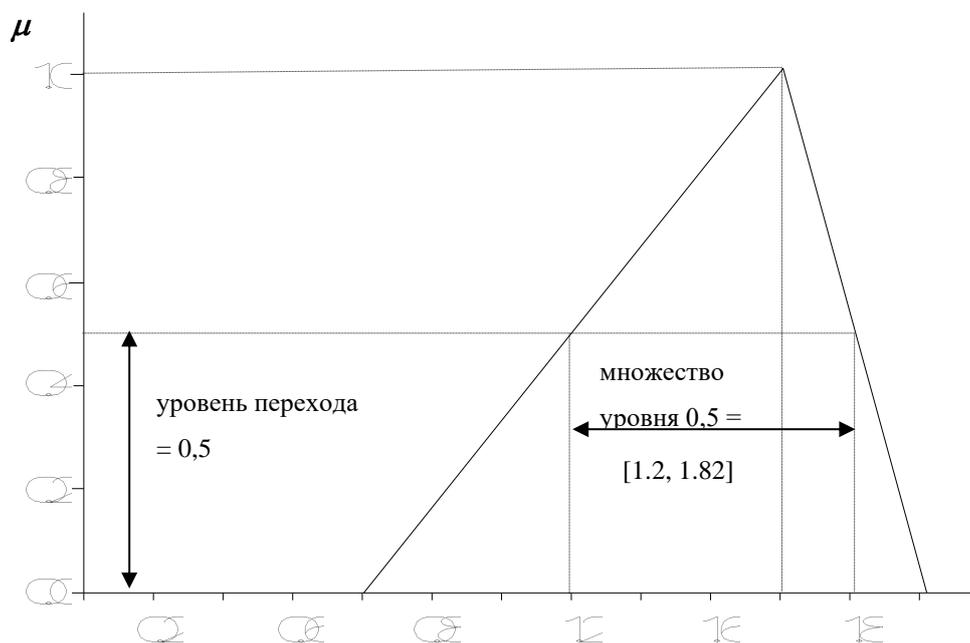


Рис. 3. Пример треугольного нечеткого числа.

Представление характеристик управляемой территории в БД ГИС в виде нечетких чисел целесообразно использовать в случае, когда приходится решать задачу, связанную со сравнением этих характеристик с некоторыми пороговыми значениями. В реальных задачах характеристики окружающей среды и их пороговые значения определяются с некоторой долей неопределенности, поэтому представление их в виде нечетких чисел является целесообразным. Для реализации предлагаемого подхода предлагается использовать методику, изложенную ниже.

Пороговое значение характеристики будем называть нагрузкой и обозначать L , а текущее значение параметра - сопротивлением и обозначать R . Пример таких чисел представлен на рис. 4.А. Тогда можно подсчитать разность этих чисел $Z = R - L$ (рис.4.Б).

При различных вариантах **R** и **L** имеем:

1. $z_3 \leq 0 \Rightarrow Co=0$

2. $z_1 \geq 0 \Rightarrow Co=1$

3. $z_1 \leq 0, z_2 > 0 \Rightarrow Co = 1 - \frac{z_1^2}{(z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}$

4. $z_2 \leq 0, z_3 > 0 \Rightarrow Co = \frac{z_3^2}{(z_3 - z_1)(z_3 - z_1)}$

Величина **Co**, рассчитанная по (27), может рассматриваться как некоторый частный критерий - значение функции принадлежности и участвовать в построении необходимой комплексной оценки.

4. Примеры применения для принятия решений геоинформационных технологий с использованием алгоритмов теории нечетких множеств

4.1. Включение алгоритмов теории нечетких множеств в ГИС

Практическое применение методов теории нечетких множеств позволяет сделать заключение о том, что в системах поддержки принятия управленческих решений в среде ГИС, использование информации, представленной с помощью нечетких множеств, является перспективным направлением. Аппарат нечетких множеств позволяет избежать возможных трудностей в применении статистических методов. Кроме того, появляется возможность принимать управленческие решения на основе представления в картографическом виде информации, отражающей знания экспертов. На основе теории нечетких множеств нами были разработаны модели для анализа и представления информации в ГИС для информационной поддержки комплексного природопользования. В следующем разделе представлены некоторые примеры использования представленного выше формального аппарата в ИАС, созданных на базе ГИС, для поддержки принятия решений по управлению ПТС. При этом модели, которые реализуют методы теории нечетких множеств будем называть нечеткими моделями.

Представленное в [1] обсуждение позволило сформировать классификацию задач, которые решаются в среде ГИС. Такую классификацию можно представить в виде схемы на рис.5. Эта схема также отражает также сложность, а значит и стоимость, решения, которые возрастают слева направо. Следует также сделать замечание, что базовые программные средства создания ГИС ориентированны в основном на решение информационно-справочных задач.

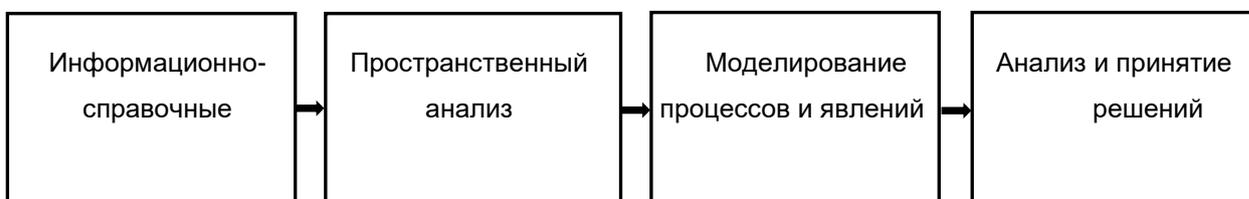


Рис.5. Типы задач, решаемых в среде ГИС.

В данном параграфе представлены примеры реализации блока "Анализ и принятие решений". При этом основное внимание уделено сравнению участков по разным

критериям, причем для проведения анализа используется методология, развитая в разделе 3.

Нечеткие модели включаются в среду ГИС согласно определенным принципам, изложенным в [9]. При этом создается специальный интерфейс. Общая схема представлена на рис.6. На этой схеме изображен также модуль с математическими моделями для получения данных, отсутствующих в БД ГИС.

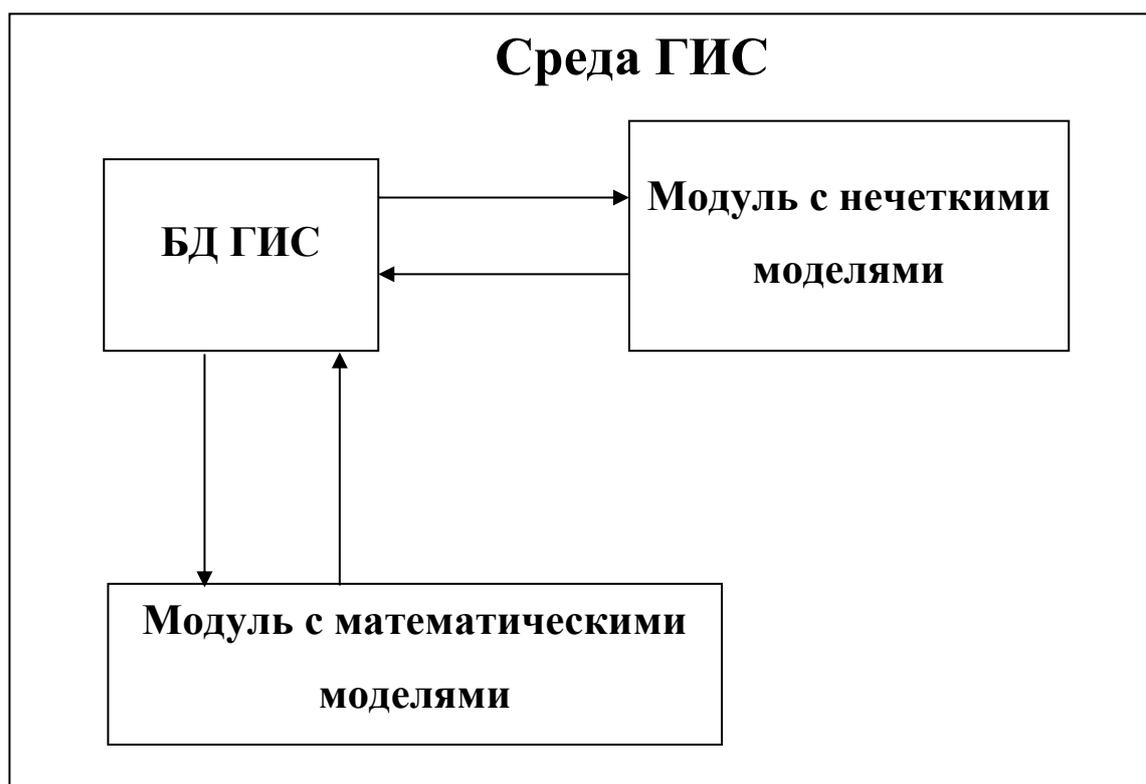


Рис.6. Структура среды ГИС для поддержки принятия решений

Основные шаги по реализации системы принятия решений на основе геоинформационных технологий с использованием алгоритмов теории нечетких множеств следующие:

1. Предварительная фаза: осознание проблемы, идентификация входных и выходных данных, получение недостающих данных с помощью математического моделирования, определение альтернатив и критериев.
2. Формирование нечеткой модели: построение функции принадлежности, выбор нечеткой модели и способа ее интеграции в среду ГИС.
3. Фаза программирования: выбор подходящего существующего программного обеспечения или создание нового.

4. Фаза принятия решения: построение тематических карт и использование их для принятия решения.

4.1. Анализ загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами и фтором.

Для более ясного представления информации о загрязнении агрохимических контуров сельхозпредприятий тяжелыми металлами и фтором и построения соответствующей комплексной оценки нами было предложено использовать аппарат нечетких множеств. Исходной информацией для анализа служил специальный слой из БД ГИС, который содержал площадные объекты, изображающие агрохимические контуры. С этими объектами были связаны атрибуты, содержащие данные по концентрации загрязнителей на каждом контуре. Данные заносились в БД ГИС на основе отчета об агрохимическом обследовании состояния территории сельскохозяйственного акционерного общества закрытого типа (САОЗТ). Рассматриваемая задача является составной частью созданной нами ИАС по управлению аграрным предприятием.

На первом этапе для каждого загрязнителя (медь (**Cu**), цинк (**Zn**), свинец (**Pb**), кадмий (**Cd**), мышьяк (**As**), фтор (**F**)) была построена функция принадлежности множеству "загрязнено **Cu** для выращивания овощей" (или **Zn, Pb, Cd, As** и **F** соответственно), общий вид которой представлен на рис.7.

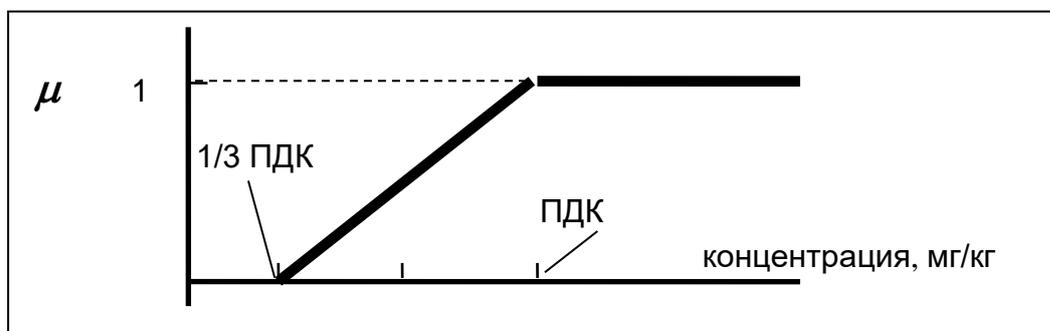


Рис.7 Общий вид функции принадлежности "загрязнено для выращивания овощей".

Например, для меди (ПДК = 3 мг/кг) такая функция принадлежности будет иметь следующий вид (u - концентрация **Cu** в почве данного контура):

$$\mu_{Cu}(u) = \begin{cases} 0 & u < 1 \\ (u - 1) / 2 & 1 < u < 3 \\ 1 & u > 3 \end{cases} \quad (30)$$

На рис. 8 представлены карты распределения функций членства по агрохимическим контурам для двух загрязнителей - мышьяка и меди.

Легенды на этих картах показывают, что контуры, окрашенные в наименее интенсивный цвет, имеют функцию принадлежности равную 0. Это означает, что данные контуры можно рассматривать как "чистые" по отношению к рассматриваемому загрязнителю. В легенде рядом со значением функции принадлежности в скобках указано количество агрохимических контуров, имеющих данное значение.

С помощью рассмотренных в п. 2 операций с нечеткими множествами можно представить совокупное влияние загрязнителей. С этой целью построим функцию членства для каждого агрохимического контура во множестве "загрязнено тяжелыми металлами и фтором для выращивания овощей" - $\mu_c(\mathbf{A})$. Для этого можно использовать операцию **Sum** (алгебраическая сумма нечетких множеств (12)), результат которой в случае n комбинируемых функций принадлежности можно вычислить следующим образом:

$$\mu_c(A_j) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i(A_j)), \quad (31)$$

где $\mu_i(\mathbf{A}_j)$ - функция членства для контура \mathbf{A}_j во множестве "загрязнено i - тым загрязнителем", которая вычислялась на \mathbf{A}_j для каждого загрязнителя согласно рис.8.

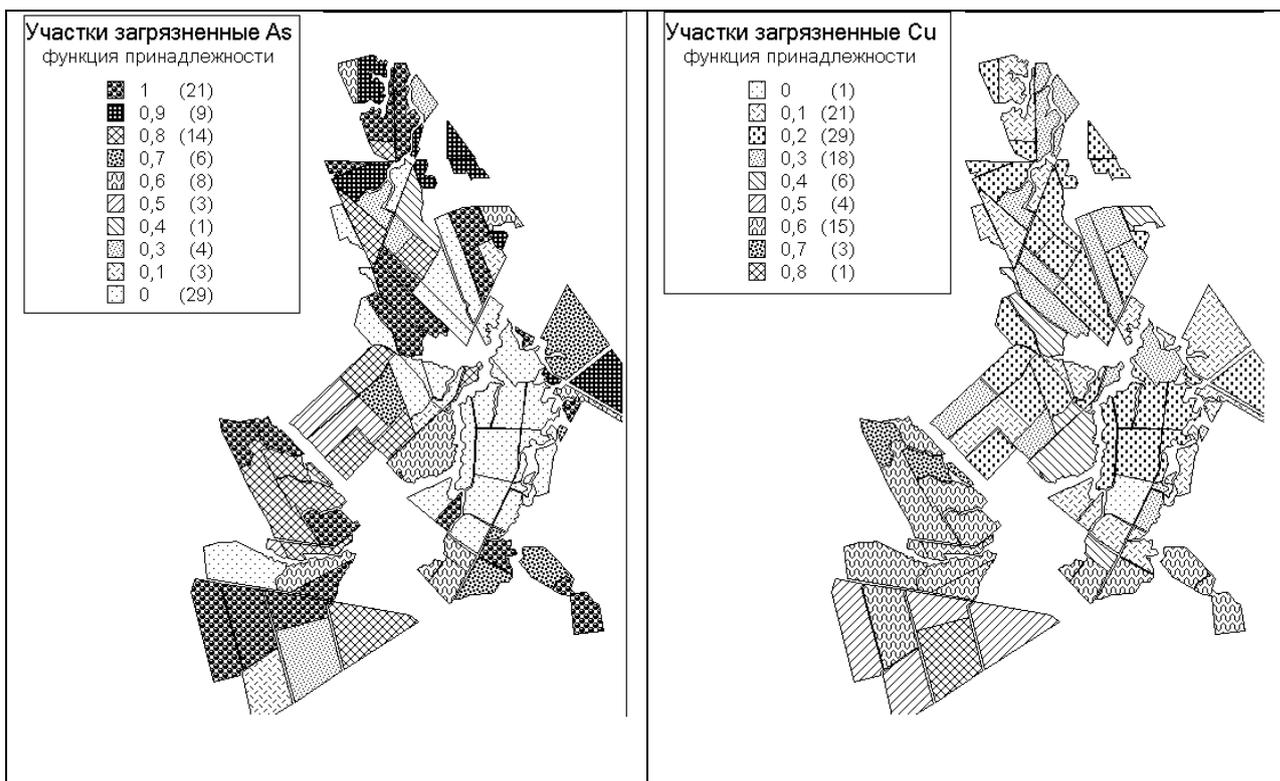


Рис.8. Пространственное распределение функции принадлежности множеству "загрязнено для выращивания овощей" для мышьяка - слева и меди - справа.

На результат операции (30) оказывают влияние все входящие в выражение величины, и результат получается больше, чем самое большое значение функции принадлежности.

Для комбинирования нескольких функций членства и, соответственно выражения совокупного влияния загрязнителей, можно воспользоваться также операцией объединения нечетких множеств (9).

При применении этих операций предполагалось, что функция членства по каждому отдельному загрязнителю во множестве, например, "загрязнено **Zn** для выращивания овощей", совпадает с функцией членства во множестве "загрязнено тяжелыми металлами и фтором для выращивания овощей". Результаты такого комбинирования представлены на рис.9.

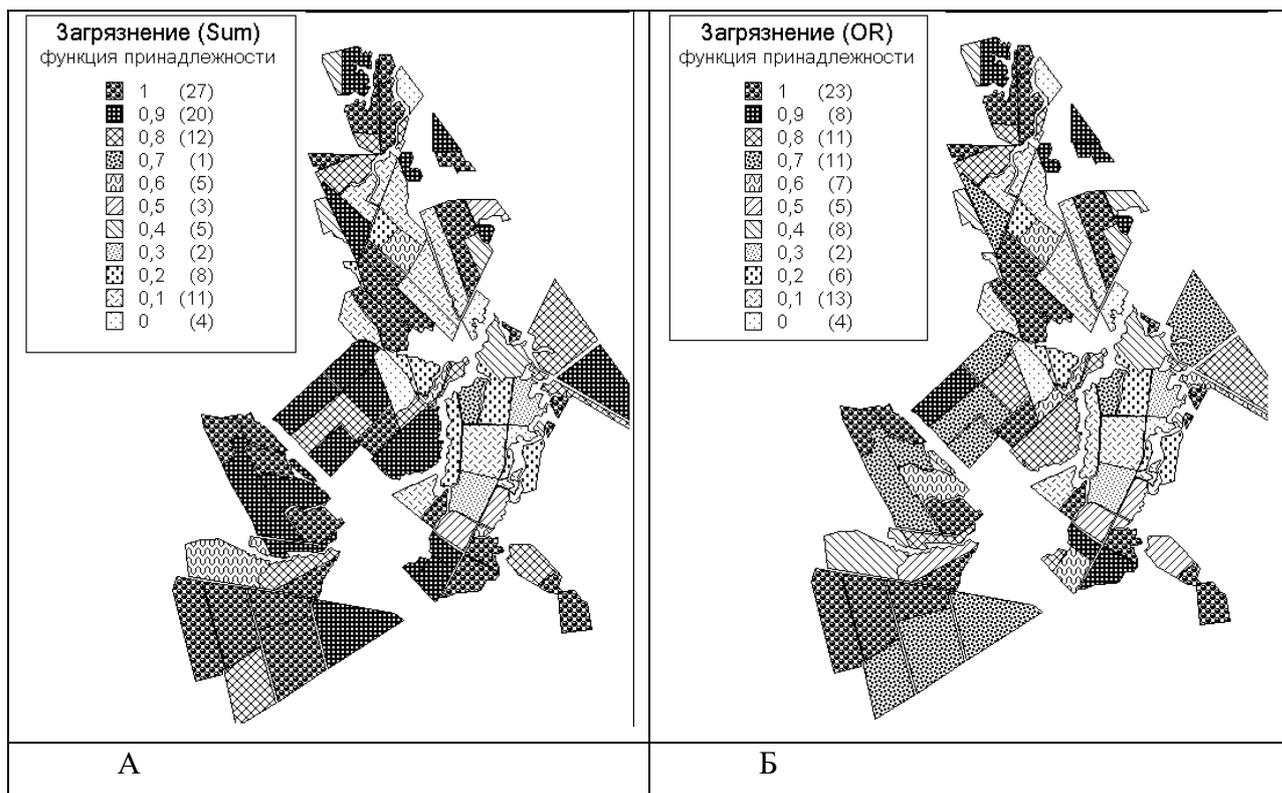


Рис.9. Представление совокупного влияния загрязнителей в виде функции членства во множестве "загрязнено тяжелыми металлами и фтором для выращивания овощей". Слева (А) функция получена с помощью операции алгебраической суммы (*Sum*), а справа (Б)- с помощью операции объединения (*OR*).

Сравнение результатов вычисления операций *Sum* и *OR* на каждом агрохимическом контуре показывает, что *Sum* дает более осторожную экологическую оценку, а значение *OR* управляется максимальным загрязнением по любому веществу. На левой карте (рис.6), полученной с помощью *Sum*, "грязных" контуров (с функцией принадлежности = 1 и окрашенных в более темный цвет) на четыре больше, чем на правой, полученной с помощью *OR*. Информация, представленная в виде таких тематических карт удобна для управления и доступна любому специалисту, даже не имеющему представления о том, что такое ПДК.

Для принятия решения в среде ГИС удобно определить лингвистическую переменную, принимающую значение "не загрязненные" при $\mu < 0.3$, значение "умеренно загрязненные" - при $0.3 \leq \mu < 0.7$ и "загрязненные" при $\mu \geq 0.7$. Соответствующие тематические карты представлены на рис.10.

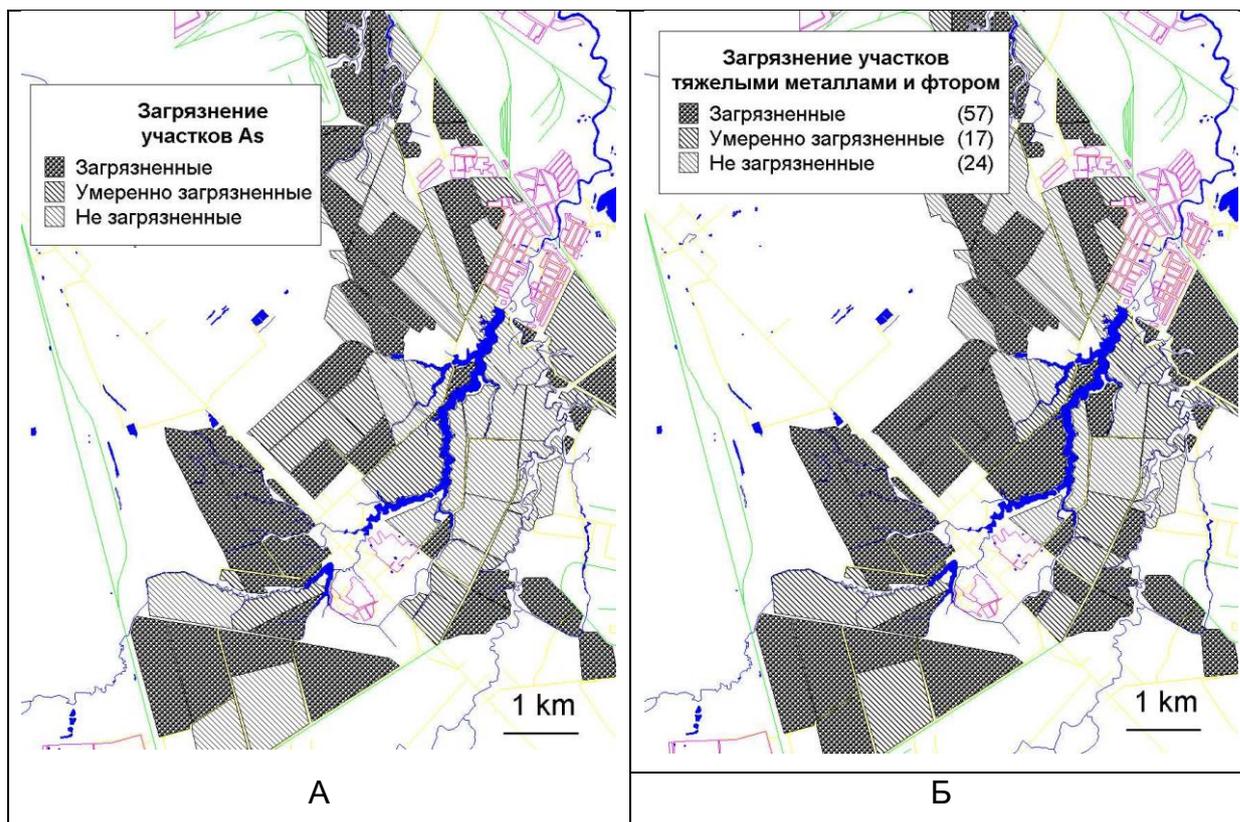


Рис.10. Тематические карты для принятия решений. А - загрязнение мышьяком, Б - комплексная оценка с помощью операции объединения.

4.3. Сравнение земельных участков по нескольким критериям.

В процессе принятия управленческих решений часто появляется потребность сравнивать земельные участки по различным критериям. В некоторых случаях значения таких критериев бывает трудно выразить в виде чисел (критерии качественные). Для апробации использования предлагаемой методики в создаваемых на базе ГИС ИАС для поддержки принятия управленческих решений была рассмотрена следующая задача. Как известно, мелиоративные системы в Ленинградской области находятся не в лучшем состоянии, и многие из них нуждаются в ремонте. Однако, в связи с дефицитом ресурсов, необходимо выбрать для реконструкции именно те мелиоративные участки, вложение средств в реконструкцию которых даст наибольший социально-эколого-экономический эффект. При такой оценке необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- 1) экологические (*ЭЛФ*);
- 2) экономические (*ЭНФ*);
- 3) технологические (*ТФ*);
- 4) социальные (*СФ*).

Данная проблема была решена на основе интегрированного в ГИС алгоритма, реализующего описанную в п.3.2. методологию многокритериальной оценки на базе теории нечетких множеств.

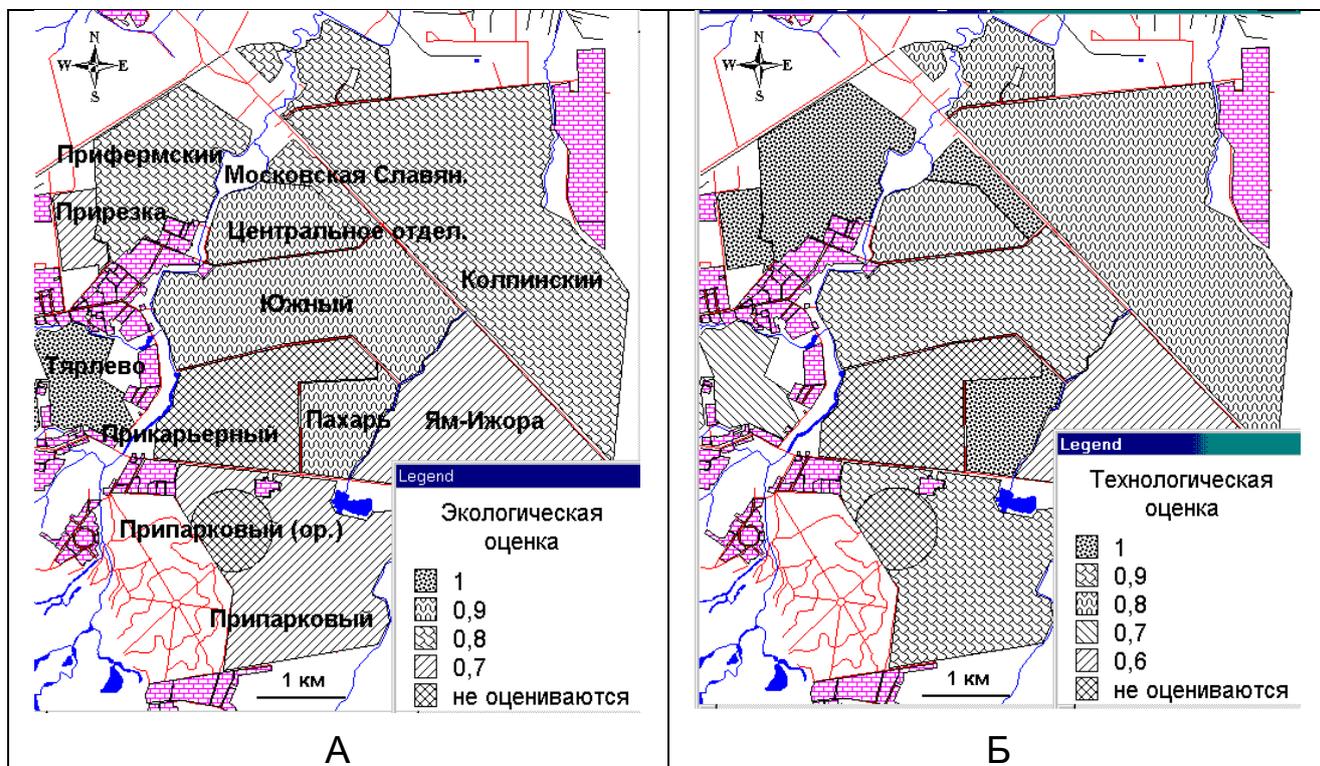


Рис.11. Выбор участка мелиорации для проведения мероприятий.

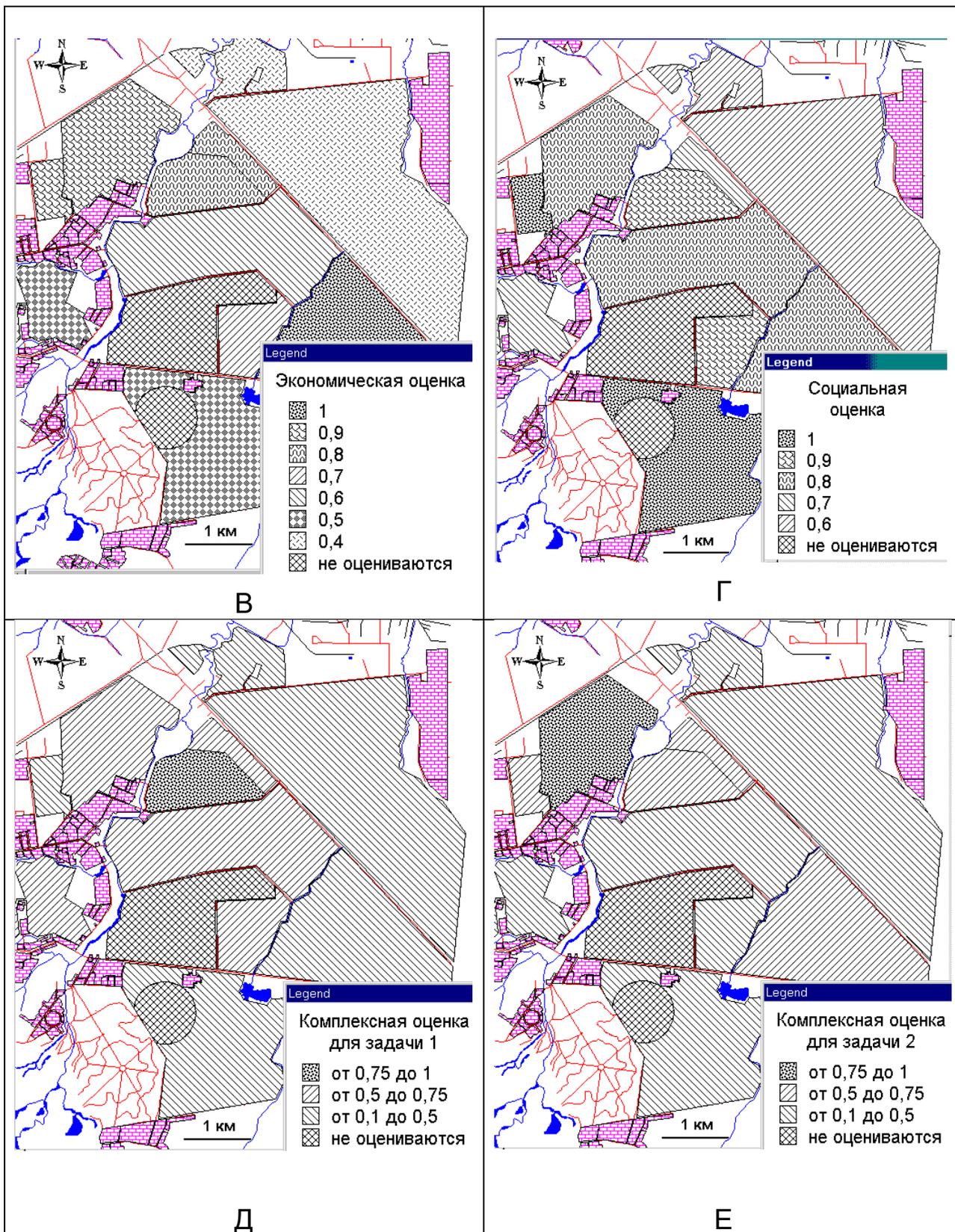


Рис.11.(Продолжение) Выбор участка мелиорации для проведения мероприятий.

На рис.11 А представлены анализируемые участки мелиорации САОЗТ В БД ГИС они представляют собой слой с площадными объектами, атрибутивная

информация для которых представляет собой результаты инвентаризации мелиоративных угодий. При анализе из рассмотрения были исключены участки с орошением, т.е. рассматривались участки, на которых есть только дренаж. Согласно предлагаемой методологии, строилась многокритериальная оценка в виде функции принадлежности множеству "Участки подходящие для реализации мероприятий по реконструкции мелиоративной сети".

Частные факторы – *ЭЛФ*, *ЭНФ*, *ТФ* и *СФ* оценивались в виде функции принадлежности тому же множеству следующим образом:

ЭЛФ предназначен для оценки степени улучшения экологической обстановки при проведении мероприятий на данном участке. *ЭЛФ*=1, если в результате проведения мероприятий на данном участке экологическая обстановка значительно улучшается, *ЭЛФ*=0, если она не меняется или ухудшается.

ЭНФ предназначен для оценки экономической эффективности проведения мероприятий на данном участке. Разная оценка на участках определяется тем, что реконструкция одного участка позволит сразу резко увеличить урожайность, а реконструкция другого - не влияет на урожайность, что может быть связано, например, исходной невысокой продуктивностью участка.

ТФ=1, если имеется полное согласие между характеристиками участка и теми технологиями, которые предполагается использовать при ремонтных работах. В противном случае *ТФ*=0. Это может быть связано с тем, что в строительной организации может отсутствовать какая-либо техника для проведения работ, состав которых определяются некими специфическими условиями данного участка, и эти работы надо будет проводить, допустим, вручную.

СФ предназначен для оценки реакции населения на проводимые мероприятия. *СФ*=1, если реакция сильная, *СФ*=0 если реакции нет. Это связано с тем, что у населения может сложиться мнение, что реконструировать надо какой-либо конкретный участок, а реконструкция какого-либо другого будет воспринята населением индифферентно.

Оценки для каждого фактора были получены путем опроса экспертов, в ходе которых экспертам предлагалось присвоить участкам баллы от 0 до 10 для каждого фактора. При этом оценки делались разными специалистами. Оценка экологического фактора производилась специалистами Департамента природопользования и экологической безопасности Ленинградской области. Технологический фактор оценивался специалистами Управления по мелиорации и сельскохозяйственному водоснабжению Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Экономический фактор оценивался экономистами САОЗТ.

Социальный фактор оценивался по результатам проведенного студентами на преддипломной практике в 1998 году опроса жителей центральной усадьбы.

БД ГИС была модифицирована путем добавления соответствующих полей для площадных объектов - участков мелиорации - в которые были занесены частные оценки экологического, экономического, технологического и социального фактора. На рис. 11 Б, В, Г, Д представлены соответствующие тематические карты.

Важность критериев определялась ЛПР, а точнее лицом - распорядителем кредитов. Результаты попарного сравнения относительной важности критериев представлены в таблице 5.5 для двух задач с разными приоритетами. У задачи 1 наибольший приоритет имеет экологический фактор, а у задачи 2 - экономический. При заполнении таблицы 2 использовались значения из таблицы 1.

Таблица 2. Данные для определения важности критериев.

задача 1	ЭЛФ	ЭНФ	ТФ	СФ		задача 2	ЭНФ	ЭЛФ	СФ	ТФ
ЭЛФ	1	5	6	7		ЭНФ	1	4	6	7
ЭНФ	1/5	1	4	6		ЭЛФ	1/4	1	3	6
ТФ	1/6	1/4	1	4		СФ	1/6	1/3	1	2
СФ	1/7	1/6	1/4	1		ТФ	1/7	1/4	1/2	1

Таким образом, у матрицы попарного сравнения B_1 для задачи 1 компоненты собственного вектора с $\lambda_{max} = 4,390$ следующие:

$$w_1 = 0,619; w_2 = 0,235; w_3 = 0,101; w_4 = 0,045.$$

Тогда коэффициенты относительной важности критериев будут следующие: $\alpha_{ЭЛФ} = 2,48$; $\alpha_{ЭНФ} = 0,94$; $\alpha_{ТФ} = 0,4$; $\alpha_{СФ} = 0,18$.

Для второй задачи, матрица попарного сравнения B_2 имеет следующие компоненты собственного вектора с $\lambda_{max} = 4,3102$:

$$w_1 = 0,617; w_2 = 0,224; w_3 = 0,097; w_4 = 0,062.$$

Тогда коэффициенты относительной важности критериев будут следующие: $\alpha_{ЭНФ} = 2,47$; $\alpha_{ЭЛФ} = 0,896$; $\alpha_{СФ} = 0,388$; $\alpha_{ТФ} = 0,248$.

На рис. 11 Д, Е, для задач 1 и 2 соответственно, представлены результаты вычисления комплексной оценки, полученной по формуле (24). Для этого в ГИС была интегрирована нечеткая модель, реализующая представленную методику.

4.4. Оценка соответствия параметров почвы определенным требованиям.

Процессы корневого питания растений тесно связаны с такими свойствами почвы как pH почвенного раствора. Кислотность почвы снижает поглощение питательных веществ растениями. В Северо-Западном регионе значительные площади занимают дерново-подзолистые кислые почвы. Чтобы привести реакцию почвы к интервалу слабокислая - слабощелочная, применяют химическую мелиорацию почв. Большинство возделываемых культур и почвенных микроорганизмов лучше развивается при слабокислой или нейтральной реакции почвы. Однако отдельные виды культурных растений значительно различаются по требованиям, как к наиболее подходящему для их роста интервалу pH , так и к смещению его в ту или другую сторону.

Одни растения не выдерживают кислых почв (люцерна, сахарная свекла), другие успешно растут на несколько подкисленной почве (гречиха, картофель, морковь), остальные занимают промежуточное положение. Таким образом, нами предлагается классифицировать сельскохозяйственные культуры на три группы в зависимости от их требований к допустимым значениям pH . При этом анализ литературы позволяет в первом приближении выделить следующие граничные значения для этих групп:

1. $4 < pH < 5$ (например, гречиха, картофель, морковь)
2. $5 < pH < 6$ (например, ячмень, горох, капуста)
3. $6 < pH < 7$ (например, люцерна, сахарная и кормовая свекла)

Следуя методике, изложенной в п. 3.3, эти группы были представлены в виде нечетких чисел следующим образом:

$$L1=(4, 4.6, 5.2), \quad L2=(5, 5.6, 6.2), \quad L3=(6, 6.6, 7.2) \quad (32)$$

Графически эти числа представлены на рис.12.

Рассматриваемая задача является составной частью созданной нами ИАС по управлению аграрным предприятием. Здесь представлен пример применения методики для оценки сельскохозяйственных полей САОЗТ. Была создана БД ГИС, один из слоев которой представлял собой площадные объекты - сельскохозяйственные поля (агрохимические

контура). С этими графическими объектами была связана информация из документов по результатам 6 тура агрохимического обследования, среди показателей которого имеется и *pH*. Согласно разработанной нами методике, *pH* контуров рассматривалась как сопротивление *R* нагрузке трех видов *L1*, *L2*, *L3* (рис.13).

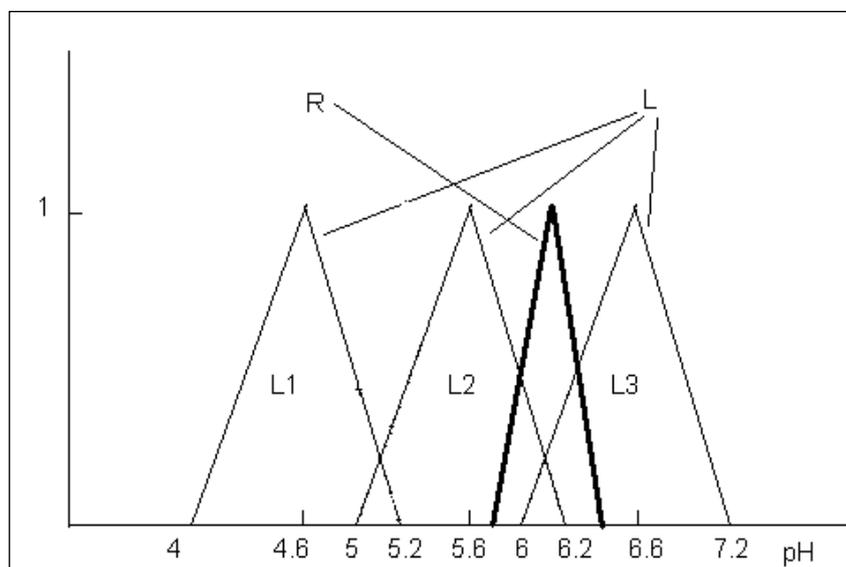


Рис.12. Представление в виде нечетких чисел *pH* агрохимического контура (*R*) и групп сельскохозяйственных культур (*L1*, *L2*, *L3*).

Для реализации методики была разработана программа на языке *MapBasic*, которая вычисляла коэффициент соответствия *Co* (26) с использованием соотношений (28). При этом для каждого агрохимического контура вычислялось три значения *Co* соответствующих трем группам сельскохозяйственных культур. Исходная ситуация показана на рис.13.А. Результаты вычисления коэффициентов соответствия для этих трех групп представлены в виде тематических карт соответственно на рис.13 Б, В, Г.

Анализ рис. 13 позволяет сделать вывод, что для выращивания культур первой группы полностью подходят все 54 сельскохозяйственных поля САОЗТ. Для выращивания культур второй группы полностью подходят уже только 38 полей, а 13 подходят только частично. И, наконец, для выращивания культур третьей группы полностью не подходит ни одно поле, а частично подходят только 15 полей.

Кроме большой наглядности, такой подход позволяет использовать полученную оценку *Co* при вычислении комплексных оценок. При этом *Co* следует интерпретировать как значение функции принадлежности для частного критерия, используемого в комплексной оценке.

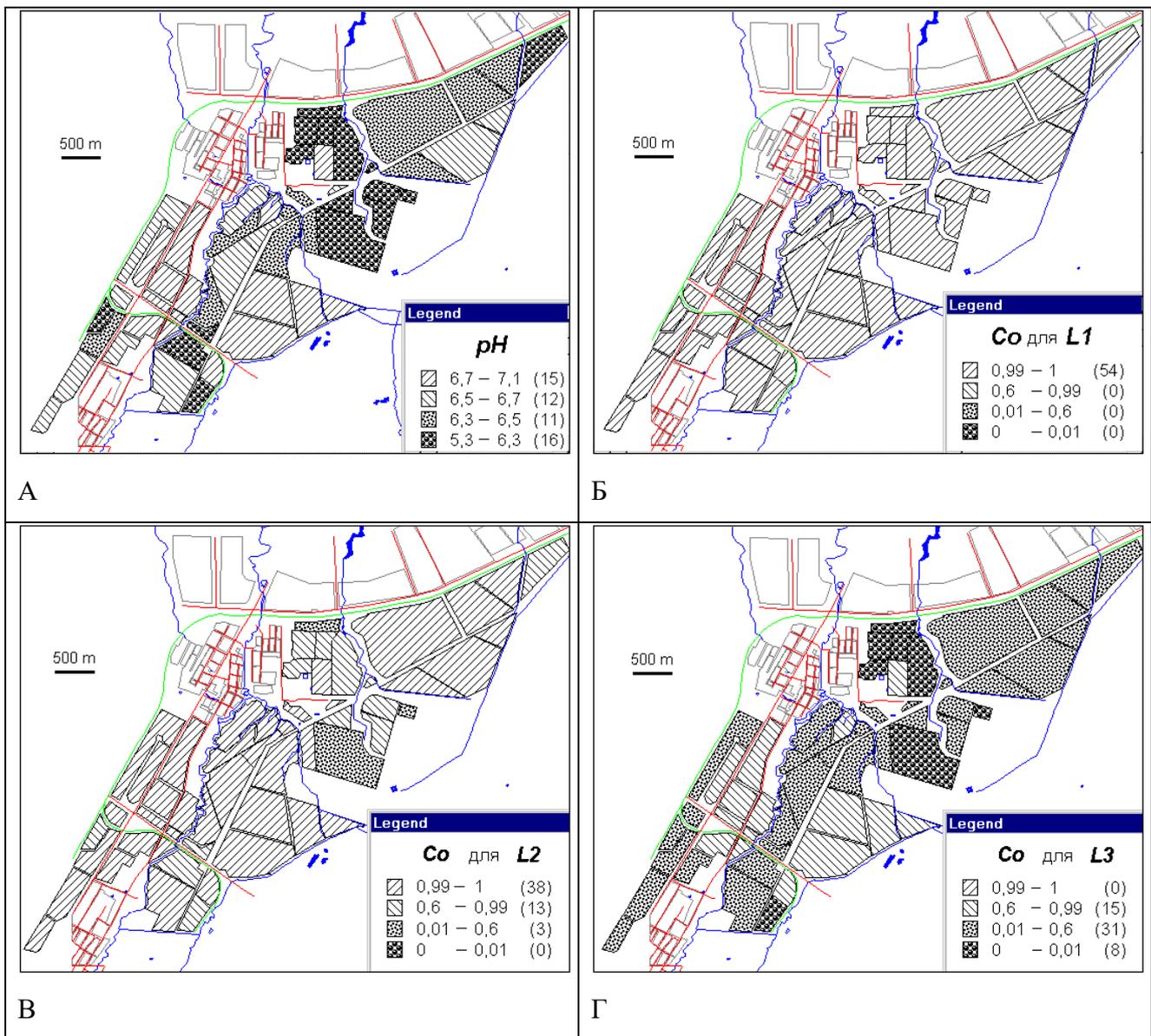


Рис.13. Результаты анализа в ГИС пригодности почвы сельскохозяйственных полей САОЗТ для выращивания сельскохозяйственных культур из трех различных групп - L1, L2, L3.

Заключение

Представленные в пособие результаты опираются на опыт моделирования инженерно-технических задач [13-58]. В целом можно отметить, что при решении практических задач большое значение имеют цифровые технологии, в особенности геоинформационные технологии [18-31].

Также следует отметить, что представленное в пособие изложение целиком ложится в рамки модельно ориентированного системного инжиниринга (Model-based system engineering – MBSE) [57, 58]. Так для создание цифровых моделей для создаваемых предприятий рекомендуется использовать методологию, предложенную в работах Кондратьева В.В. (рис. 14) [59].

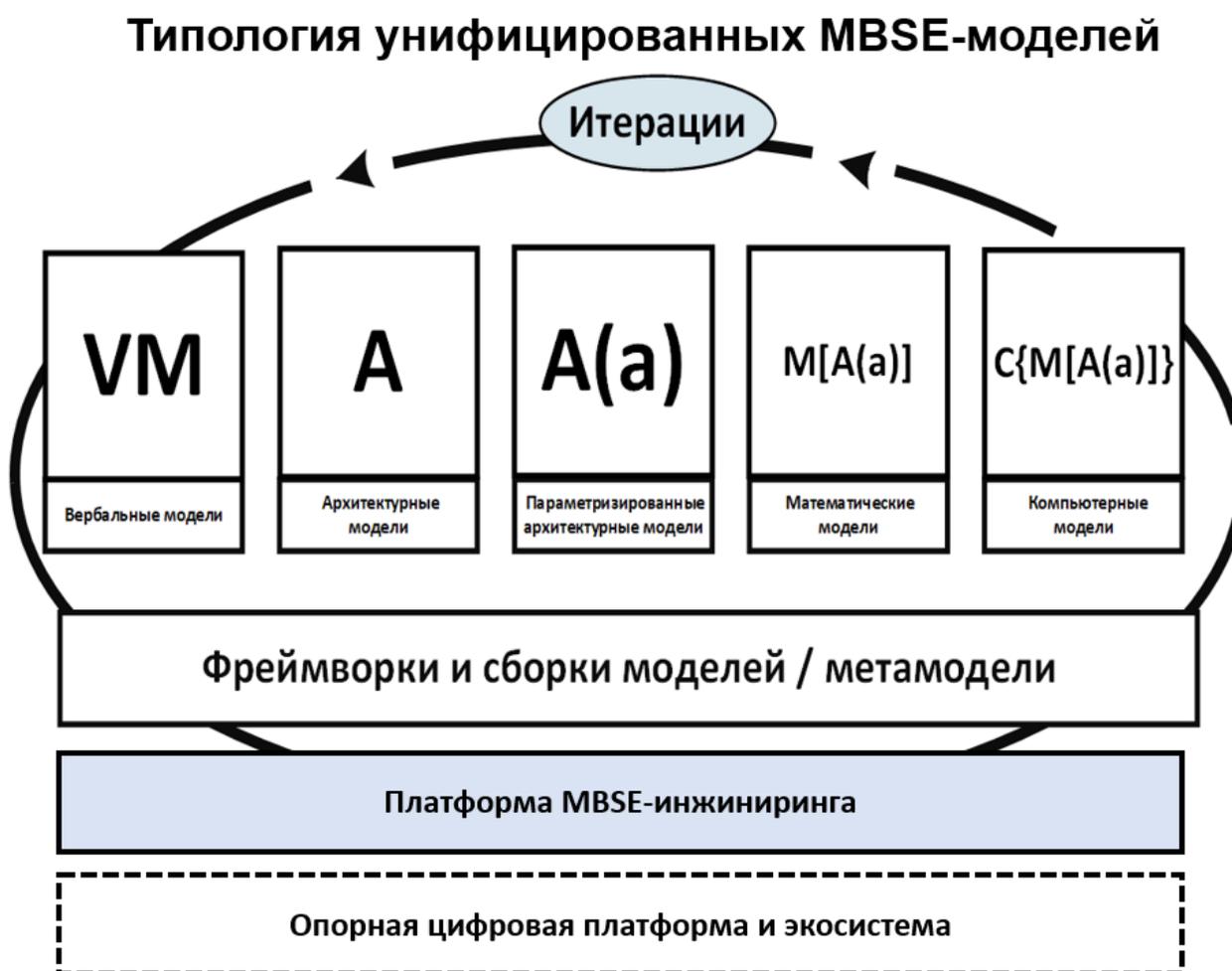


Рис. 14. Типология унифицированных MBSE-моделей

На рис. 15 показаны политики и дорожные карты моделирования и применения моделей в инжиниринге. Архитектурный метод разделения проблемной области на более мелкие проблемные области, которые легче моделировать и, следовательно, легче решать. Уровни абстракции по своей природе являются многоуровневыми, переходя от моделей высокого уровня к более подробным моделям

Сильное решение MBSE: до математики, алгоритмов и автоматизации – структурирование вербальных представлений в форме архитектурных моделей $A(a)=\{E,E(a),[E(a),E(a)]\}$

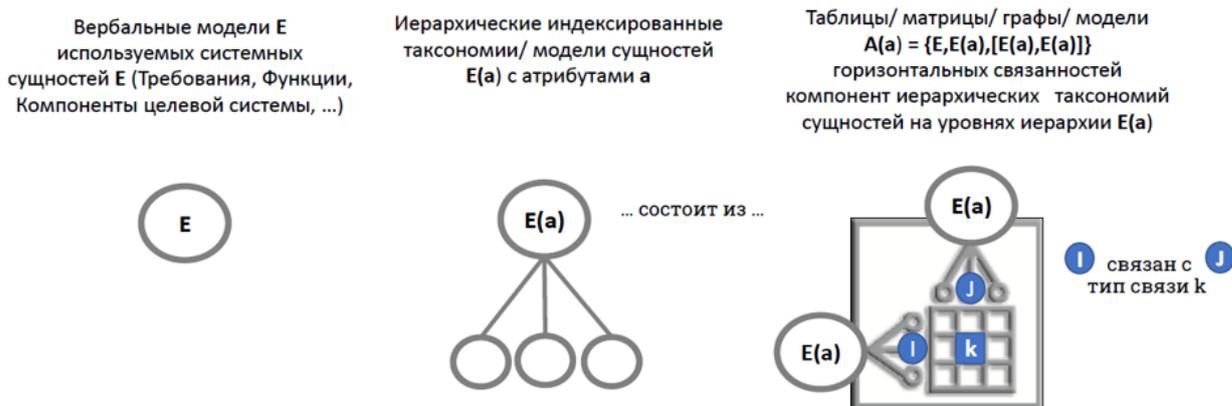


Рис. 15. Политики и дорожные карты моделирования и применения моделей в инжиниринге

Также следует особо отметить, что представленная в пособии может быть успешно использована в развиваемом в СПбПУ подходе к разработке цифровых двойников, в том числе в рамках фабрик будущего (рис. 16) [61-66].



Рис. 16. Цифровой Двойник и Цифровая модель предприятия

При этом фабрики будущего в настоящее время рассматриваются как гармоничное соединение цифрового представления предприятия и физического объекта [61-66]. Однако подробное рассмотрение этого вопроса требует специального внимания и выходит за рамки настоящего пособия.

Список литературы

1. Управление природно-техногенными комплексами: Введение в экоинформатику: Учебное пособие / Н.В. Арефьев, В.Л. Баденко, К.В. Зотов и др., СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000. - 252 с.
2. Simon H.A. The new science of management decision. NY: Harper&Row 1960.
3. Большаков Н.С., Баденко В.Л., Челани А. Выбор участка строительства на основе методов территориального анализа // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5(81). С. 15–24. doi: 10.18720/МСЕ.81.2
4. Орлов А.И. Устойчивость в социально-экономических моделях. - М.: Наука, 1979. - 296 с.
5. P.A. Burrough, R.A. McDonnell Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford University Press, 1998.
6. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. - М.: Мир, 1976, - С.172-215.
7. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. / А.Н.Борисов, А.В.Алексеев, О.А.Крумберг и др. - Рига: Зинатне, 1982. -256 с.)
8. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. - Рига: Зинатне, 1990. - 184 с.
9. Badenko V., Kurtener D. A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management // J. Braz. Comp. Soc., 2000, vol.6 no.3.– 26-35 pp.
10. Kurtener, Dmitry & Badenko, Vladimir. (2003). Fuzzy Algorithms to Support Spatial Planning. Chapter 14 in Geertman, S. and Stillwell, J. (eds.) Planning support systems in practice, Springer, Berlin, 2003, pp. 249-266.10.1007/978-3-540-24795-1_14.
11. Баденко В.Л. Некоторые проблемы информационно-аналитического обеспечения задач регионального развития // Математические модели и информационные технологии в менеджменте. Вып.2. – СПб.: Изд-во С-Петербургского университета, 2004. – С. 48-61
12. Vladimir Badenko, Dmitry Kurtener, Victor Yakushev, Allen Torbert, Galina Badenko. Evaluation of Current State of Agricultural Land Using Problem-Oriented Fuzzy Indicators in GIS Environment // Lecture Notes in Computer Science Volume 9788 2016 - pp.57-69. DOI: 10.1007/978-3-319-42111-7_6
13. Баденко В.Л. Геоэкологическая оценка земельных участков на основе индикаторов с учетом неопределённости исходных данных / В.Л. Баденко, М.П. Федоров,

В.И. Масликов, Л.М. Молодкина, С.Ю. Ефремова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 210-219.

14. Баденко В.Л. Моделирование, прогнозирование и оценка опасных явлений, связанных с лесными пожарами / В.Л. Баденко, М.П. Федоров, В.И. Масликов, Л.М. Молодкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 255-262.

15. Баденко В.Л. Использование ПЭВМ для расчета конвективного теплопереноса в теплоизоляции железобетонного корпуса реактора // ВАНТ Сер. Проектирование и строительство, 1991, вып.1, с.27-30

16. Арефьев Н.В., Федоров М.П., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Методика экологического мониторинга городских территорий с применением ГИС-технологий // Научно-технические ведомости СПбГТУ, № 1-2 (7-8), 1997. - С. 115-117.

17. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Эколого-экономические основы управления природно-аграрными системами в среде ГИС // ГИС-обозрение, 1997, №4. - С. 19-20.

18. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Оценка природно-ресурсного потенциала территории с использованием ГИС-технологий // Региональная экология, № 1, 1998. - С. 17-23.

19. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Бассейново-ландшафтный подход к организации экологического мониторинга гидроэнергокомплексов на основе геоинформационных технологий // Гидротехническое строительство, 1998, № 11. - С. 25-27.

20. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Криулин К.Н., Осипов Г.К., Черняк М.Б. Мониторинг мелиорируемых земель на основе геоинформационных технологий // Мелиорация и водное хозяйство, № 5, 1998. - С. 41-43.

21. Баденко В.Л., Осипов Г.К. Моделирование природно-аграрных систем // Научно-технические ведомости СПбГТУ, № 4(14), 1998. – С. 32-35.

22. Баденко В.Л. Теория нечетких множеств и обеспечение информационной поддержки принятия решений по управлению территориями в среде геоинформационных систем // НЭЖ "Проблемы недвижимости", 1999, №1- С. 112-119.

23. Баденко В.Л. Геоинформационное обеспечение задач по управлению инвестициями // НЭЖ "Проблемы недвижимости", №4, 1999. - С.70-76.

24. Kurtener, Dmitry and Badenko, Vladimir A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management // J. Braz. Comp. Soc., 2000, vol.6 no.3. ISSN 0104-6500 pp: 26-35 10.1590/S0104-65002000000100004

25. Kurtener D, Badenko V. GIS fuzzy algorithm for evaluation of attribute data quality. GIM International, 2001 .vol.15, no.3:76-79.
26. Баденко В.Л. Геоинформационные технологии для принятия решений по управлению территорией в условиях неопределенности // Математические модели и информационные технологии в менеджменте. Вып.1: Сб.науч.статей / Под ред. Н.К.Кривулина, В.В.Трофимова. – СПб.: Изд-во С-Петербургского университета, 2001. – С. 134-141
27. В. Л. Баденко Теория нечетких множеств и информационная поддержка принятия решений в среде ГИС. Серия: Региональная экономика, вып. 5: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. - 78 с.
28. Баденко В.Л. Некоторые проблемы информационно-аналитического обеспечения задач регионального развития // Математические модели и информационные технологии в менеджменте. Вып.2. – СПб.: Изд-во С-Петербургского университета, 2004. – С. 48-61
29. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Иванов Т.С. Методические аспекты геоинформационного обеспечения инвестиционных проектов по развитию гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство, 2007, № 5. - С. 7-10
30. В. Г. Сурин, В. Л. Баденко, С. Г. Слинчук Исследование возможностей использования наземных спектрофотометрических измерений для развития агрономических технологий // Исследование Земли из космоса, № 2, Март-Апрель 2007 С. 89-96
31. Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия // Информация и космос, 2009, №4. – С. 53-58.
32. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №4, 2010. С. 205-211
33. Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Муравьева Л.С. Агрофизические исследования почвы для технологий точного земледелия: постановка задачи и метод // Плодородие.2011. №1. С. 29-31.
34. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Глядченкова Н.А. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях // Мелиорация и водное хозяйство, № 2, 2011, С.18-21. ISSN 0235-2524

35. Баденко В.Л., Баденко Г.В., Терлеев В.В., Латышев Н.К. ГИС-технологии в информационном обеспечении системы имитационного моделирования AGROTOOL // *Агрофизика*, №3, 2011, С.1-5. ISSN 2222-0666
36. Баденко В.Л., Терлеев В.В., Миршель В., Никонова О.Г. Учет пространственной вариабельности гидрофизических свойств почв при моделировании продукционного процесса растений // *Агрофизика*. 2013. № 1. С. 13-22.
37. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // *Информация и космос*. 2013. №3. С. 78-84
38. Тарасевский Ф.Г., Баденко В.Л. Оценка земельного участка с дренажными системами для их восстановления // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 3 (18). С. 145-152.
39. Баденко В.Л., Иванов Д.А., Топаж А.Г. Информационное обеспечение агроландшафтных исследований// *Информация и космос*. 2014. № 4. С. 52-54.
40. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2015. № 1-2. С. 72-76.
41. Баденко В.Л., Баденко Н.В., Иванов Т.С., Олешко В.А., Петрошенко М.В. Результаты оценки гидроэнергетического потенциала рек России в разрезе по субъектам РФ // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2015. № 276. С. 57-69.
42. Arefiev N., Terleev V., Badenko V. GIS-based fuzzy method for urban planning // *Procedia Engineering*. 2015. v. 117. pp. 39-44. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.121
43. Гарманов В.В., Богданов В.Л., Рябов Ю.В., Баденко В.Л., Загорский М.Ю. Оценка эколого-экономического ущерба от нарушения земель // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2015. № 4. С. 136-144.
44. Федоров М.П., Масликов В.И., Баденко В.Л., Чусов А.Н., Молодцов Д.В. Снижение риска наводнений распределенными на водосборе гидроузлами // *Гидротехническое строительство*. 2017. № 5. С. 2-7.
45. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Якушев В.В., Миршель В., Нендель К. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // *Сельскохозяйственная биология*, 2017, том 52, № 3, с. 437-445. doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.437rus

46. Управление землепользованием: учеб. пособие / В.Л.Баденко, В.Л.Богданов, В.В.Гарманов, Г.К.Осипов, под ред. В.Л.Богданова. – СПб.: И-д-во С.-Петербур. ун-та, 2017. – 298 с.
47. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т. Оперативно уточняющийся прогноз урожайности пшеницы в сельскохозяйственных зонах на всей территории России на базе имитационной модели продуктивности // АгроЭкоИнфо. – 2018, №3. – С. 68 – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_345.doc.
48. Большаков Н.С., Баденко В.Л., Челани А. Выбор участка строительства на основе методов территориального анализа // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5(81). С. 15–24. doi: 10.18720/MCE.81.2
49. Баденко В.Л., Баденко Г.В. Роль геоинформационных технологий в мониторинге земель сельскохозяйственного назначения // Вестник факультета землеустройства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 4. С. 7-9.
50. Федоров М.П., Масликов В.И., Баденко В.Л., Чусов А.Н., Молодцов Д.В. Метод системного решения защиты от наводнений в речном бассейне // Гидротехническое строительство. 2019. № 4. С. 53-57.
51. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т., Дунаева Е.А. Оценка продуктивности агроландшафтов в региональном масштабе на основе интеграции имитационной модели агроэкосистемы и ГИС // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3 (19). С. 18-30.
52. Баденко В. Л. Информационные технологии для выбора места размещения объекта капитального строительства: учеб. пособие / В. Л. Баденко, Д. К. Зотов, А. А. Федотов. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 164 с.
53. Баденко В.Л., Большаков Н.С., Федотов А.А., Ядыкин В.К. Цифровые двойники сложных технических систем в индустрии 4.0: базовые подходы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 1. С. 20-30.
54. Якушев В.П., Якушев В.В., Баденко В.Л., Матвеев Д.А., Чесноков Ю.В. Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчетов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор). Сельскохозяйственная биология, 2020, том 55, № 3, с. 451-467.
55. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Медведев С. А., Захарова Е. Т. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений для анализа элементов систем

земледелия // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 8–27. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-8-27.

56. Клушенцев В. А., Чернышева А. В., Баденко В. Л. Расчетное обоснование конструкции осветлителя шахтных вод пруда-отстойника горно-обогатительного комбината // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2021. – Т. 301. – С. 75-84.

57. Баденко В.Л. Модельно-ориентированный системный инжиниринг для строителей: основные понятия и принципы: учебное пособие. – 2023.

58. Баденко В.Л., Тищенко Е.Б., Ядыкин В.К. Модельно-ориентированный системный инжиниринг как инструмент цифровой трансформации промышленного предприятия // Стратегическое управление цифровой трансформацией интеллектуальной экономики и промышленности в новой реальности: монография / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В. Бабкина. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. стр. 603-625 ISBN 978-5-7422-8606-6. DOI 10.18720/IEP/2024.3/23

59. Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0. – М.: МФТИ, 2021. – 102 с.

60. Боровков А. и др. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-Bench®(часть 3) // Октябрь. – 2023. – С. 51.

61. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности. – 2019. – С. 234-245.

62. Kukushkin K., Ryabov Y., Borovkov A. Digital twins: A systematic literature review based on data analysis and topic modeling // Data. – 2022. – Т. 7. – №. 12. – С. 173.

63. Боровков А.И. и др. Передовые производственные технологии: возможности для России. – Экспертно-аналитический доклад / Санкт-Петербург, 2020.

64. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Типологизация цифровых двойников (Digital Twins) // Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы. – 2020. – С. 473-482.

65. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении // Деловой журнал Neftegaz. RU. – 2020. – №. 6. – С. 30-36.

66. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / Санкт-Петербург, 2019.