

## Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств

### Environmental risk analysis in GIS based on fuzzy sets

**Ключевые слова:** геоинформационные системы – geographic information systems; экологический риск – environmental risk; загрязнение почвы тяжелыми металлами – soil contamination by heavy metals; нечеткие множества – fuzzy sets.

В работе рассматривается подход к оценке экологического риска методами теории нечетких множеств в среде ГИС. Анализируется загрязнение почвенного покрова территории тяжелыми металлами. Для представления уровня загрязнения почв тяжелыми металлами и порогового уровня используются нечеткие числа. Сравнение этих чисел позволяет сформировать для участков территории индекс надежности по каждому загрязнителю. Показана возможность формирования на основе индексов по отдельным загрязнителям комплексных оценок. Все алгоритмы по работе с нечеткими множествами интегрированы в среду ГИС. Работоспособность предложенных методов подтверждается практическими примерами.

Approach to environmental risk assessment using methods of the theory of fuzzy sets in a GIS environment is discussed. A problem of soil contamination by heavy metals is analyzed. To represent the level of soil contamination by heavy metals and the corresponding threshold values are used fuzzy numbers. Comparison of these numbers allows to form the reliability index for each land parcels relatively to each pollutant. The possibility of the formation of the comprehensive evaluations on the basis of the indices for selected pollutants is presented. All algorithms to work with fuzzy sets are integrated into the GIS environment. Efficiency of the proposed method is confirmed by practical examples.

**БАДЕНКО / BADENKO V.**

**Владимир Львович**

(vbadenko@gmail.com)  
доктор технических наук,  
профессор кафедры "Водохозяйственное  
и гидротехническое строительство"  
Санкт-Петербургского государственного  
политехнического университета,  
Санкт-Петербург

#### ВВЕДЕНИЕ

В системах поддержки принятия управленческих решений по развитию территорий широко используются географические информационные системы (ГИС) [1]. При этом одной из самых распространенных задач является поиск участка территории, удовлетворяющего определенным условиям [2, 3]. Часто такой поиск осуществляется с целью удовлетворить требованиям инвестора, которые в большинстве случаев целиком удовлетворить не удастся, а кроме того могут существовать ограничения о которых инвестор и не подозревает [4, 5]. Возникает задача о сравнении участков в среде ГИС, в том числе и с учетом возможных экологических рисков [6, 7]. Использование среды ГИС для решения такой задачи очень важно, т.к. не всегда предпочтения можно выразить с помощью математических соотношений или условий, а среда ГИС позволяет задействовать уникальные возможности человеческого мозга по визуальному выявлению пространственных связей и отношений при анализе изображения (модели) территории, которые пока еще полностью алгоритмизировать не удастся [8, 9].

Современный анализ экологического риска базируется на таком определении риска, по которому он является произведением оценки тяжести последствий экологически опасного события, обычно имеющего денежное выражение, на величину вероятности осуществления этого события, количественно отражающей возможность наступления неблагоприятной ситуации [10, 11]. При этом основные проблемы возникают при оценке именно вероятностей эколого-

гически неблагоприятных ситуаций. Следует также отметить, что классическое определение вероятности вводится как частота однородных событий, происходящих в неизменных внешних условиях, что в реальных условиях управления территорией достичь практически невозможно. При использовании субъективной вероятности возрастает роль эксперта назначающего эти вероятности, что тоже не устраивает исследователей – в ней оказывается слишком много субъективной экспертной оценки и слишком мало информации о том, как эта оценка была получена [12]. Альтернативный подход к оценке текущего состояния территории с точки зрения отсутствия экологических рисков основан на использовании теории нечетких множеств [13]. Эта теория, основоположником которой является Лотфи Заде, продолжает успешно развиваться, в том числе и для решения задач управления [14]. Использование теории нечетких множеств при оценке экологических рисков имеет перспективы, в том числе и потому, что ключевое понятие этой теории – функция принадлежности принимает значения от нуля до единицы также как и вероятность. Следует отметить, что разработано достаточно много программных средств по работе с нечеткими множествами [13], также имеются результаты по внедрению алгоритмов на основе теории нечетких множеств при разработке ГИС по поддержке принятия управленческих решений по развитию территорий [15–18].

В данной работе рассматривается подход к оценке экологического риска методами теории нечетких множеств в среде ГИС на примере оценки такого риска от загрязнения почвенного покрова территории тяжелыми металлами. Для представления уровня загрязнения почв тяжелыми металлами и порогового уровня (предельно-допустимой концентрации – ПДК), выше которого возникает экологический риск, используются нечеткие числа. Сравнение этих чисел позволяет сформировать для участков территории индекс надежности по каждому загрязнителю. Равенство единице этого индекса соответствует безопасности, а нулю соответствует безусловному экологическому риску. Кроме того показана возможность формирования на основе индексов по отдельным загрязнителям комплексных оценок. Все алгоритмы по работе с нечеткими множествами интегрированы в среду ГИС. Работоспособность предложенных методов подтверждается практическими примерами.

#### МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Рассмотрим сначала несколько ключевых определений. 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  $A$ . Нечеткие числа представляют собой нечеткие множества, определенные на множестве действительных чисел, функция принадлежности которых монотонно возрастает до единицы, а потом монотонно убывает.

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 ( $|a_1, a_2| = |a_2, a_3|$ ). Таким образом можно говорить, что при определении треугольного нечеткого числа, выделяются три характерные точки исследуемого процесса или явления – минимально возможное, наиболее ожидаемое и максимально возможное значение параметра окружающей среды. 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, который формулируется следующим образом [19]. Пусть  $f: U \rightarrow V$  – отображение  $U$  на  $V$  и  $v = f(u)$ , где  $u$  и  $v$  – произвольные элементы из  $U$  и  $V$  соответственно. Пусть  $A$  – нечеткое множество в  $U$ . Тогда отображение  $f$  порождает нечеткое множество  $B$  в  $V$  с функцией принадлежности, задаваемой соотношением:

$$\mu_B(v) = \text{Sup}\{\mu_A(u); u \in f^{-1}(v)\}, \quad (1)$$

В выражении (1) супремум определяется по всем элементам, составляющим прообраз  $f^{-1}(v)$  в  $U$  элемента  $v$ , для всех остальных элементов  $\mu_B(v) = 0$ . 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  $\Theta$  – бинарная арифметическая операция (например, сложение, умножение и т.д.) Пусть  $A$  и  $B$  – два нечетких числа. Тогда:

$$C = A \Theta B \quad (2)$$

нечеткое число с функцией принадлежности:

# ГЕОИНФОРМАТИКА

$$\mu_C(v) = \text{Sup} \{ \min (\mu_A(u_1), \mu_A(u_2)); \text{таких что } v = u_1 \oplus u_2 \} \quad (3)$$

Представление характеристик управляемой территории в ГИС в виде нечетких чисел целесообразно использовать в случае, когда приходится решать задачу, связанную со сравнением этих характеристик с некоторыми пороговыми значениями (ПДК). Превышение этих порогов определяет экологический риск. В реальных задачах характеристики окружающей среды и их пороговые значения определяются с некоторой долей неопределенности, поэтому представление их в виде нечетких чисел является целесообразным. Так для рассматриваемой задачи концентрация тяжелых металлов в почве некоторого участка определяется на основании проб, взятых в нескольких точках и совершенно очевидно, что эта концентрация будет варьировать по площади участка, что наблюдается и для других почвенных параметров [20]. Поэтому оправданно использование нечеткого числа для представления концентрации тяжелого металла в почве, с функцией принадлежности принимающей значение единица для измеренного значения. При этом ширину интервала можно задавать в пределах 10-15% от этого значения.

Нормирование содержания тяжелых металлов в почве усложняется из-за невозможности полного

учета всех факторов природной среды, а изменение, например, агрохимических свойств почвы, может в несколько раз уменьшить или увеличить содержание загрязнителей в растениях. Пороговые значения также различаются и для разных стран [21]. В России для характеристики загрязнения почв тяжелыми металлами используется коэффициент, равный отношению концентрации загрязнителя в почве к его фоновой концентрации (Госкомгидромет СССР, №02-10 51-233 от 10.12.90). Однако данные разных исследователей о фоновом загрязнении отличаются в 5-10 раз. Все это говорит о том, что использование нечетких чисел и для пороговых значений концентрации тяжелых металлов в почве также оправдано.

Для реализации предлагаемого подхода предлагается использовать методику, изложенную ниже. Данная методика является развитием подходов, предложенных в [15, 18, 21].

Пороговое значение характеристики будем называть сопротивлением и обозначать  $R$ , а текущее значение параметра нагрузкой и обозначать  $L$ . Пример таких чисел представлен на рис. 1. Величину превышения порогового значения можно подсчитать как разность этих чисел  $Z = R - L$ .

При вычислении разности чисел  $Z = R - L$  воспользуемся понятием подмножества  $a$ -уровня [14] – подмножество всех элементов нечеткого множества имеющие значение функции принадлежности не меньше  $a$ . Пусть  $A$  – нечеткое множество. Пара-

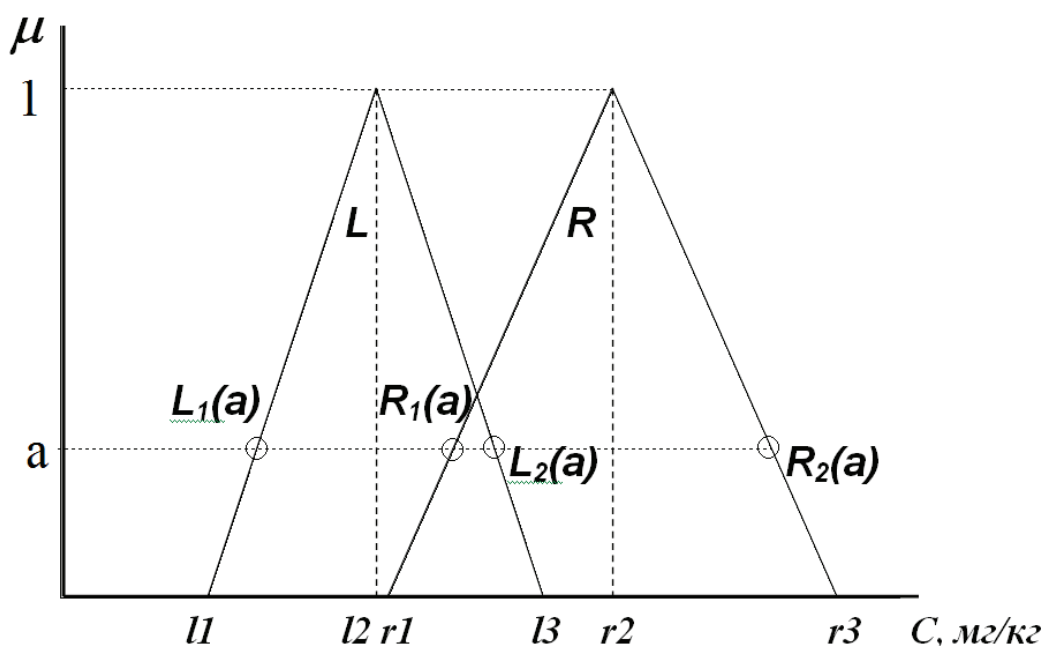


Рис. 1. Два треугольных числа и параметры для вычисления их разности  $Z=R-L$

метр  $a \in [0, 1]$  определяет  $a$ -уровневое подмножество  $A_a$  как множество всех тех элементов  $U$   $Z$ , определенную на положительной части оси (рис.2):

для которых  $\mu_{A_a}(u) \geq a$ .

$$A_a = \{u \mid \mu_{A_a}(u) \geq a\} \quad (4)$$

При этом для  $Z=R-L$  получим следующие соотношения (обозначения на рис.1):

$$\begin{array}{l} R(a) = [R_1(a), R_2(a)] \\ L(a) = [L_1(a), L_2(a)] \\ Z(a) = R(a) - L(a) \end{array} \longrightarrow Z(a) = [Z_1(a), Z_2(a)] \quad (5)$$

$$\begin{array}{l} Z_1(a) = R_1(a) - L_2(a) \\ Z_2(a) = R_2(a) - L_1(a) \end{array}$$

Полученное нечеткое число  $Z=R-L$  целесообразно использовать для вычисления показателя соответствия значения характеристики  $L$  пороговому значению  $R$ . Будем говорить, что если концентрация тяжелого металла в почве ( $L$ ) не превышает пороговое значение ( $R$ ), то число  $Z$  должно быть полностью определено на положительной части оси действительных чисел. Это соответствует отсутствию экологического риска. Если  $L$  на много превышает  $R$ , то число  $Z$  будет полностью определено на отрицательной части оси действительных чисел. Для промежуточных значений предлагается вычислять величину  $Co$ , которая показывает относительную часть числа

$$Co = \frac{\int_{z>0} \mu_z(z) dz}{\int_z \mu_z(z) dz} \quad (6)$$

Вспоминая тот факт, что для определения треугольных чисел  $R, L, Z$  требуется всего три параметра, имеем:

$R=(r_1, r_2, r_3), L=(l_1, l_2, l_3)$ . Тогда  $Z=(z_1, z_2, z_3)$ , где  $z_1=r_1-l_3, z_2=r_2-l_2, z_3=r_3-l_1$

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

1.  $z_3 \leq 0 \Rightarrow Co=0$  – ситуация экологической опасности
2.  $z_1 \geq 0 \Rightarrow Co=1$  – ситуация экологической безопасности (отсутствие риска)

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

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

Величина  $Co$  определяет ситуацию для одного загрязнителя. В случае, если необходимо учесть несколько загрязнителей  $Co$  может рассматри-

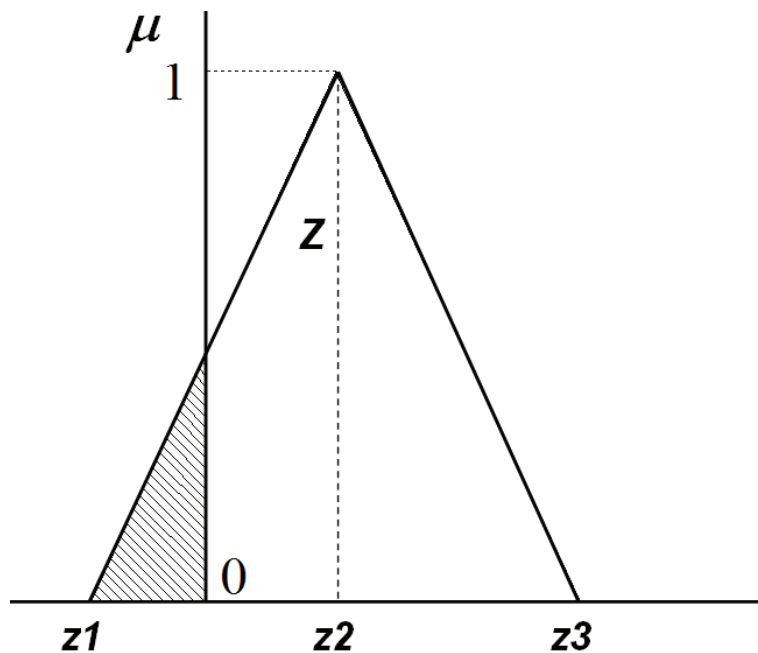


Рис. 2. Заштрихованная область показывает часть нечеткого числа  $Z$ , определенного на отрицательной части оси

# ГЕОИНФОРМАТИКА

ваться как частный критерий значение функции принадлежности множеству "Почвы не подверженные экологическому риску по загрязнению тяжелыми металлами" и участвовать в построении комплексной оценки.

Для построения комплексной оценки можно использовать операции пересечения и объединения, а также алгебраическое произведение или алгебраическую сумму [15]. 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:

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

Функция принадлежности алгебраического произведения  $AB$  нечетких множеств  $A$  и  $B$  определяется следующим образом:

$$\mu_{AB}(u) = \mu_A(u) * \mu_B(u), \quad (8)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для апробации предложенного метода была выбрана территория, в окрестностях Санкт-Петербурга относящаяся к землям сельскохозяйственного назначения [22]. В связи ее особым расположением рядом с большим городом возникает противоречия

с одной стороны производить сельхозпродукцию выгодно из-за низких транспортных расходов, а с другой стороны почва может быть загрязнена вследствие близости города и, например, овощная продукция не будет отвечать санитарным нормам. В таком случае можно эту землю выгодно продать под несельскохозяйственное использование, но инвестор тоже должен представлять всю ситуацию и создание ГИС с соответствующей информацией будет способствовать принятию правильного управленческого решения.

Данные о загрязнении тяжелыми металлами для сельхозпредприятий привязаны к агрохимическим контурам – относительно однородными участками территории (сельхозполям). На рис.3А представлена тематическая карта части территории, отражающая имеющиеся в базе данных ГИС информацию по загрязнению мышьяком ( $A_s$ ) для каждого агрохимического контура. В ходе реализации предложенного метода эти значения были представлены в виде нечеткого числа следующим образом. Пусть  $A_{s_i}$  – значение концентрации мышьяка для  $i$ -го контура [мг/кг], тогда будем представлять загрязнение в виде нечеткого числа  $L_i = (l_{1i}, l_{2i}, l_{3i})$ , где  $l_{1i} = A_{s_i} - 0,4$ ;  $l_{2i} = A_{s_i}$ ;  $l_{3i} = A_{s_i} + 0,4$ . Нормативное значение концентрации мышьяка составляет 2 мг/кг. Тогда оно в виде нечеткого числа может быть представлено в вид  $R = (1,5; 2; 2,5)$ . Тематическая карта, отображающая

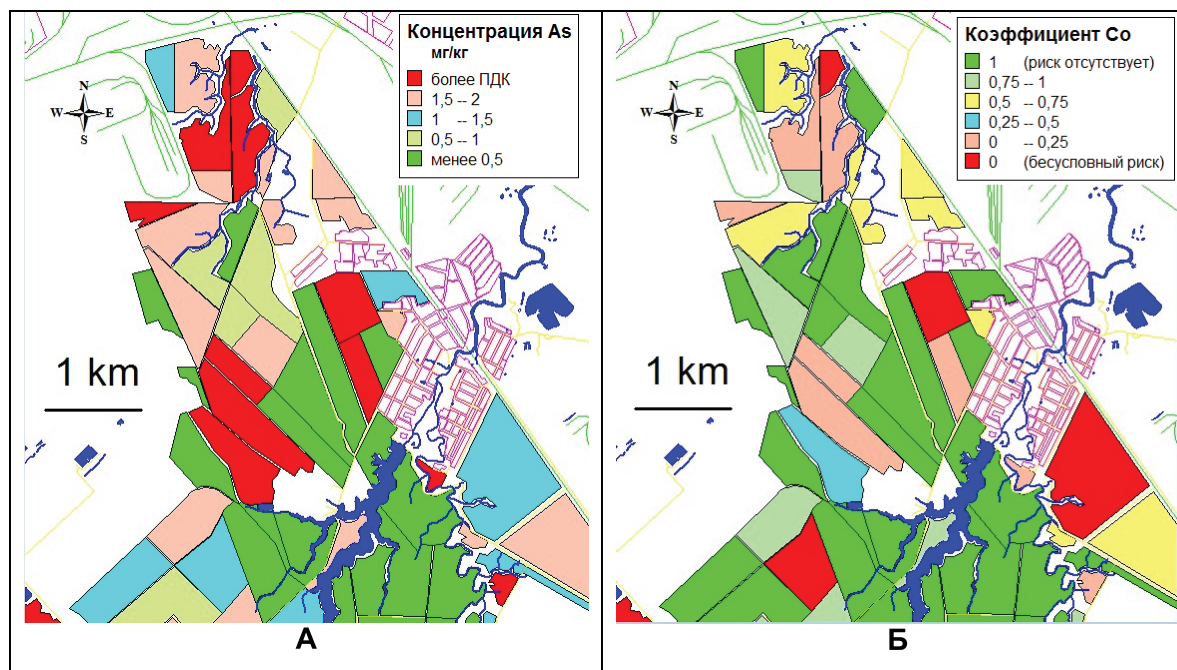


Рис. 3. Анализ экологического риска от загрязнения почв мышьяком

пространственное распределение коэффициента соответствия  $S_o$ , представляющего присутствие или отсутствие экологического риска на агрохимических контурах, показана на рис.3Б.

Для других загрязняющих веществ средствами ГИС можно построить аналогичные карты и анализировать их при принятии управленческих решений. Аппарат нечетких множеств позволяет также строить и комплексные оценки. На рис.4А представлена тематическая карта по комплексной оценке загрязнения свинцом и мышьяком в которой комбинируются значения  $S_o$  для этих загрязнителей с помощью операции пересечения (7), а на рис.4Б – то же, но для алгебраического произведения (8). Предварительно для свинца также было вычислено значение  $S_o$  и занесено в базу данных ГИС.

На рис.4 в легенде к карте в скобках указано количество контуров, попадающих в каждый класс. Анализ этих значений показывает, что алгебраическое произведение дает более жесткую экологическую оценку для промежуточных значений (между 0 и 1) и можно говорить, что это соответствует позиции "пессимиста". Операция пересечения (рис.4Б) дает более оптимистическую оценку. Отметим, что операция алгебраической суммы, в которой возможна компенсация одних значений другими будет давать еще более оптимистическую оценку.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленный в работе метод относится к функций ГИС по поддержке принятия управленческих решений. Ясно, что до достижения этого этапа должны были быть решены информационно-справочные задачи, связанные с построением базы данных ГИС, в том числе с учетом всех проблем безопасности и надежности [23]. К решению задач принятия решений в среде ГИС обычно приступают после решения указанной задачи, а также пространственного анализа и моделирования процессов и явлений в среде ГИС [3, 8]. Однако задачи принятия решений самые трудные с точки зрения алгоритмизации. В работе были представлены методы на основе теории нечетких множеств для анализа экологических рисков, которые реализованы в виде программных модулей, интегрированных в среду ГИС. Разработанные методы и программные модули позволяют лицам, принимающим решения получать оценки экологических рисков без использования методов теории вероятностей, применение которых не всегда может быть правильно обосновано. Примеры оценок для модельной территории позволяют сделать вывод о работоспособности предлагаемого подхода. Следует сделать замечание, что представление в виде симметричного треугольного нечеткого числа возможно и для других параметров, влияющих

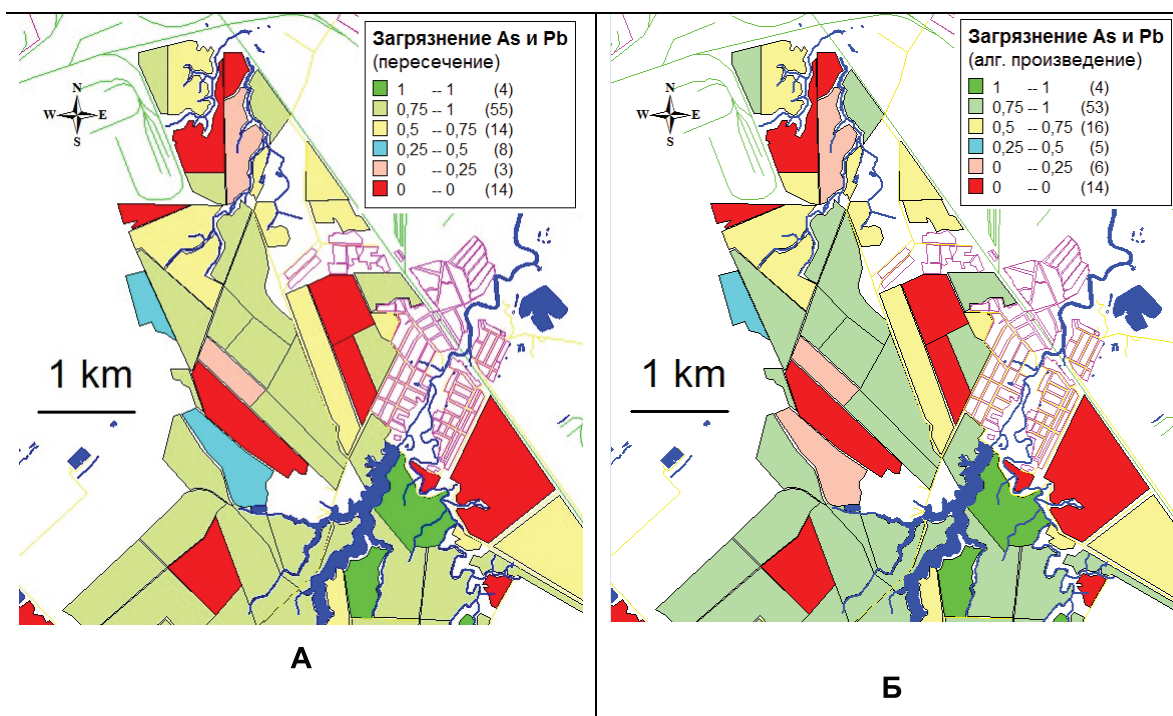


Рис. 4. Комплексный анализ экологического риска от загрязнения почв мышьяком и свинцом

на принятие решений. Сравнение параметров в таком виде с требуемыми (пороговыми) значениями – тоже треугольными числами также можно с помощью коэффициента соответствия  $S_o$  (6). После вычисления  $S_o$  для всех параметров, определяющих принятие решений возможно построение комплексной оценки с учетом всех  $S_o$  с разной степенью "оптимизма"/"пессимизма". После построения тематической карты в ГИС можно уже визуально оценить, какой именно участок наиболее подходит лицу, принимающему решение.

### Литература

1. Присяжнюк С.П., Осипов Г.К. Научно-методические основы создания территориальных информационно-аналитических систем для органов местного самоуправления // Информатика и космос. 2007. № 2. С. 67-83.
2. 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
3. Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия // Информатика и космос, 2009, №4. – С. 53-58.
4. Филатов В.Н., Присяжнюк С.П. Автоматизированная поддержка принятия решения на базе геоинформационных систем // Информатика и космос. 2004. № 2. С. 4-8.
5. Присяжнюк С.П., Трубецкой А.И., Савченко О.В. Инструментальные средства моделирования в распределенных геоинформационных системах // Информатика и космос. 2007. № 4. С. 51-55.
6. Щербаков Ю.С. Геоинформационное картографирование интегрированных техногенно-экологических рисков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. Т. 1. № -2. С. 51-55.
7. Любимова А.В., Спиридонова В.В. ГИС-анализ комплекса природных и техногенных рисков Северо-Кавказского экономического района // Геоинформатика. 2012. № 3. С. 1-7.
8. Арефьев Н.В., Баденко В.Л. Геоинформационные системы в природообустройстве: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008., 108 с.
9. Попович В.В., Потапычев С.Н., Панькин А.В., Шайда С.С., Воронин М.Н. Интеллектуальная ГИС в системах мониторинга // Труды СПИИРАН. 2006. Т. 1. № 3. С. 172-184.
10. Гуменюк В.И., Сыров А.А., Федосовский М.Е., Фокин Г.А. Вероятностный анализ безопасности транспортно-технологического оборудования для перегрузки ядерного топлива // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 78. С. 98-102.
11. Махутов Н.А. Экологические риски негативных техногенных воздействий // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 66-70.
12. Недосекин А.О. Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний [Текст]: дис. док. экон. наук: 08.00.13 / А.О. Недосекин; Гос. образоват. учреждение высш. проф.образования «Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов». – СПб, 2003. – 280 с.
13. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
14. Перат А. Нечеткое моделирование и управление. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 798 с.
15. Kurtener D., Badenko V. Fuzzy algorithms to support spatial planning, Chapter 14 in Geertman, S. and Stillwell, J. (eds.) Planning support systems in practice, Springer, Berlin, 2003, pp. 249-265.
16. Yakushev V., Kurtener D., Badenko V. Monitoring frost injury to winter crops: an intelligent geo-information system approach // In Physical Methods in Agriculture – Approach to Precision and Quality (ed. J.Blahovec and M.Kutelek). Kluwer Pub., Dordrecht, The Netherland, 2003, pp. 119-137.
17. Kurtener D., Badenko V. GIS fuzzy algorithm for evaluation of attribute data quality // GIM International, 2001. vol.15, no.3, pp. 76-79.
18. Kurtener D., Badenko V. A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management // J. Braz. Comp. Soc., 2000, vol.6, no.3. pp. 26-35
19. Kaufmann A., Gupta M. Fuzzy mathematical models in engineering and management science. Amsterdam: Elsevier Science, 1988. - 338 с.
20. 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.
21. Bogardi I., Bardossy A., Mays M. D., Duckstein L. Risk assessment and fuzzy logic as related to environmental science // SSSA. Special publ. No 47. 1996. pp. 81-97.
22. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Осипов Г.К. Государственный земельный кадастр. - СПб.: Питер. 2003. - 320 с.
23. Курносос В.И., Парашук И.Б. Основные проблемы и пути комплексного обеспечения безопасности связи и информации // Информатика и космос. 2005. № 2. С. 98-104.