

О РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И ОПОВЕЩЕНИЯ О ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МАЛЫХ РЕК БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

chernomorets@bsu.edu.ru

**Черноморец А.А., канд. техн. наук, доц.,
Петина М.А., канд. геогр. наук, доц.,
Лебедева М.Г., канд. геогр. наук, доц.,
Болгова Е.В.,
Зайцева Н.О.,
Коваленко А.Н.,
Черноморец Д.А.**

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения информационной технологии мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек региона с использованием интеллектуальной системы управления, а также приведены результаты разработки ее отдельных ее блоков, включая разработку функциональных диаграмм ее работы с применением Интернет-технологий.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, экспертное оценивание, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, базы данных, базы знаний, Интернет-портал

Белгородская область обладает значительным объемом водных ресурсов. Реки Белгородской области используются преимущественно для водоснабжения населения, сельскохозяйственного водоснабжения, в рекреационных целях, а также как приемники промышленных и коммунальных стоков. Практически все водотоки Белгородской области могут быть отнесены к малым рекам, например, Ворсклица, Разуменка, Корень, Айдар, Черная Калитва, Потудань и др. Современная водохозяйственная ситуация в регионе определяется как природно-климатическими факторами, так и факторами, связанными с производственно-хозяйственной деятельностью [1]. Первая группа факторов связана с естественными процессами формирования речного стока и подземных вод, вторая группа факторов отражает многообразие антропогенных факторов в пределах речных бассейнов, влияющих на величину, изменчивость составляющих речного стока, гидрологические

процессы, динамику подземных вод и их качественное состояние. Часто указанные группы факторов взаимосвязаны. При данных обстоятельствах актуальным является мониторинг водных ресурсов.

В настоящее время неравномерное распределение водных ресурсов во времени и пространстве при одновременном увеличении их потребления, а также возрастающее антропогенное воздействие на естественный водный режим привело к загрязнению и истощению водных ресурсов, что требует разработки и составления схем рационального использования и охраны водных ресурсов на региональном уровне, создания постоянно действующей системы контроля загрязненности, учета и расходования водных ресурсов с целью оперативного управления водным хозяйством.

Анализ работ ученых по проблеме мониторинга и контроля загрязненности водных ресурсов показал наличие существенного количества показателей загрязненности рек.

Очевидно, учитывая значительное разнообразие факторов воздействия на гидрологическую среду, для обеспечения информационной поддержки оперативного принятия решений с целью снижения уровня экологических угроз, в частности контроля и борьбы с загрязненностью рек Белгородской области, актуальным является развитие средств анализа их состояния и предоставления адекватных сведений. В работе указанную проблему предложено решать с помощью разработки соответствующей интеллектуальной информационной технологии [2] оценки состояния малых рек, прогнозирования их загрязненности, мониторинга и оповещения о соответствующих экологических угрозах в Белгородской области, включая:

- экспертное оценивание уровней загрязненности рек,
- прогнозирование состояния водных объектов,
- разработку структуры интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек,
- разработку принципов работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах с применением Интернет-технологий.

Разработка экспертного метода оценивания загрязненности рек

С целью принятия решений об уровне загрязненности малых рек в рамках разрабатываемой интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек разработан экспертный метод, в основе которого лежит метод анализа иерархий, что обеспечивает адекватность разработанного метода

поставленной задаче.

Экспертный метод выявления водных объектов с высоким уровнем загрязненности заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

- применение метода анализа иерархий (МАИ) для определения уровня влияния (важности) отдельного фактора загрязнения в конкретной экологической ситуации,

- на основе экспертной оценки рассчитываются весовые коэффициенты K_1, K_2, \dots, K_n (выполняется нормирование экспертных оценок) для каждого фактора загрязнения, n – количество фактора загрязнения,

- вычисляются индексы $I_{11}, \dots, I_{ij}, \dots, I_{nm}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$ загрязненности водного объекта по каждому фактору загрязнения, m – количество водных объектов, например, при условии, что i -тый фактор загрязнения, характеризующийся значением предельно допустимой концентрации (ПДК) p_i , имеет значение f_i , то индекс загрязненности I_{ij} для j -го водного объекта определяется на основании выражения,

$$I_{ij} = \begin{cases} \frac{f_i - p_i}{p_i}, \text{ если } f_i > p_i & i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

- вычисляется уровень Y_j , $j = 1, 2, \dots, m$, загрязненности конкретного водного объекта, $Y_j = \sum_{i=1}^m K_i I_{ij} / m$, $j = 1, 2, \dots, m$.

- на основании значений уровня Y_j , $j = 1, 2, \dots, n$, загрязненности отдельного водного объекта формируются сведения о качестве воды (выполняется группировка по децилям) (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней загрязненности и качество воды

Очень чистая	Чистая	Умеренно чистая	Загрязненная	Грязная
0-0,20	0,21-0,40	0.41-0,60	0,61-0,80	0,81-1

Для принятия решения о пригодности загрязненного водного объекта для конкретного водопользования на рисунке 1 представлена иерархия, где в качестве альтернатив выступают виды водопользования.

Экспертный метод принятия решений о пригодности водного объекта для конкретного водопользования на основе метода анализа иерархий состоит в следующем [3].

1. Определение цели. Целью является оценка пригодности водного объекта для конкретного вида водопользования.

2. Определение критериев. В качестве критериев используются физические, химические и гидробиологические показатели.

3. Определение альтернатив. В качестве альтернатив выступают виды водопользования. Различают пять видов водопользования: хозяйственно-питьевое, промышленность, рыбное хозяйство, купание, спорт, транспорт.



Рисунок 1 – МАИ: Оценка качества речной воды

Для критериев строятся матрицы парных сравнений. Далее устанавливаются приоритеты альтернатив по каждому критерию на основании расчета вектора глобальных приоритетов, то есть определяется пригодность водного объекта для конкретного вида водопользования.

Новизна разработанного экспертного метода принятия решений об уровне загрязненности малых рек определяется применением метода анализа иерархий для оценки качества речной воды (при этом рекомендуется использовать метод анализа иерархий сезонно или при резком изменении условий окружающей среды, таких как наводнения, засуха, техногенные аварии и т.д.), а также тем, что он позволяет для отдельного водного объекта получить характеристику его пригодности для каждого вида водопользования с позиций оценки уровня загрязненности воды.

Разработка методов прогнозирования загрязненности водных объектов

Одним из структурных элементов разрабатываемой интеллектуальной системы управления является блок прогнозирования на основе использования частотных представлений и нейронных сетей.

Математическая модель и метод прогнозирования на основе частотных представлений

В проекте предлагается применять новый эффективный инструмент прогнозирования изменений показателей загрязненности малых рек региона на основе частотного анализа (косинусное преобразование), используемого для выявления устойчивых значимых периодических закономерностей в изменении геоэкологического состояния малых рек.

Метод прогнозирования был разработан на основании свойства реальных процессов – значимые периодические закономерности (энергетические характеристики) в последовательных отрезках зарегистрированных данных сохраняются в течение определенного периода времени [4].

Математическая модель, на основании которой вычисляется прогнозируемое значение, формулируется следующим образом: при условии совпадения долей P_V энергии в частотной подобласти V , исходного вектора $(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, x_N)^T$ и вектора $(x_1, x_2, \dots, x_N, x_{N+1})^T$, содержащего прогнозируемое значение x_{N+1} , имеем:

$$x_{N+1} = \frac{-\vec{g}_N^T \vec{x} \pm \sqrt{(\vec{g}_N^T \vec{x})^2 - (g_{N+1,N+1} - P_V)(\vec{x}^T B_V^{N+1} \vec{x} - P_V \sum_{i=1}^N x_i^2)}}{g_{N+1,N+1} - P_V}, \quad (2)$$

где \vec{g}_N – вектор-столбец, элементы которого совпадают с элементами $\{g_{N+1,1}, g_{N+1,2}, \dots, g_{N+1,N}\}$ субинтервальной матрицы G_V^{N+1} косинусного преобразования [5]; $B_V^N = (g_{i_1 i_2}^{N+1})$, $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, N$, – матрица размерности $N \times N$, являющаяся угловой подматрицей матрицы G_V^{N+1} .

Проведенные вычислительные эксперименты [6] по оцениванию эффективности метода прогнозирования состояния загрязненности малых рек на основе частотных представлений в сравнении с результатами использования известных методов прогнозирования показали его высокую работоспособность.

Так, на рисунке 2 приведены результаты вычислительных

экспериментов по сравнению результатов прогнозирования на основе разработанного метода, метода линейного предсказания и прогнозирования на основе сплайнов – исходными данными являются значения, полученные на Старогородском водозаборе №4, скважина №25, в период с 15.01.2007 по 30.07.2013 для фактора загрязнения сульфаты.

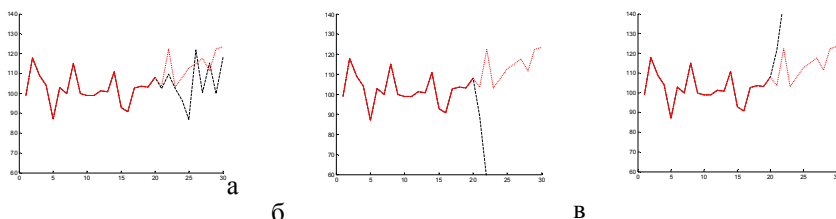


Рисунок 2 – Результаты прогнозирования:

а) разработанный метод, б) метод линейного предсказания, в) сплайн
 (..... – реальные значения, — — — — исходные, — — — — прогнозируемые)

Средняя погрешность прогнозирования δ_{cp} для данного вычислительного эксперимента: метод линейного предсказания – 0.8002, прогнозирование на основе сплайнов – 3.2962, разработанный метод – 0.0929.

Вычислительные эксперименты показали, что применение разработанного метода прогнозирования состояния загрязненности малых рек на основе частотных представлений в большинстве случаев позволяет получить более точные прогнозные значения на длительном промежутке времени.

Прогнозирование значений показателей загрязненности рек на основе искусственных многослойных нейронных моделей

Для прогнозирования сложного, многофакторного характера изменений гидрохимического состояния малых рек в проекте разработан метод прогнозирования уровней загрязненности малых рек с использованием современных искусственных интеллектуальных систем, основанных на нейросетевых технологиях.

Анализ известных нейросетевых моделей и архитектуры нейросетей, применяемых для решения подобных задач, показал, что наиболее подходящим для прогнозирования является четырехслойный персептрон: входной слой, имеющий четыре нейрона, выходной – один нейрон и два скрытых слоя по 10 и 4 нейрона в

каждом соответственно (рисунок 3).

Анализ алгоритмов обучения показал, что наиболее целесообразным для четырехслойного персептрона является алгоритм обратного распространения ошибки и сопряженных градиентов. Для обучения использовано сто итераций обратного распространения ошибки, а также двадцать пять итераций – сопряженными градиентами. Обучающие и тестовые выборки определены на основании данных, полученных на Старогородском водозаборе №4, скважина №25.

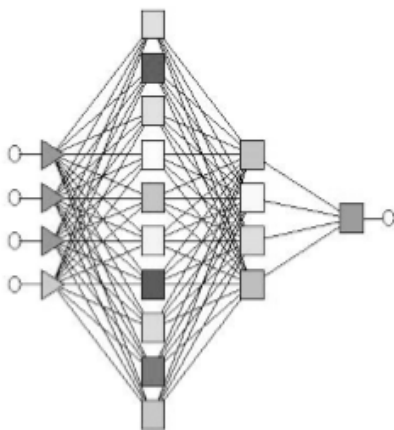


Рисунок 3 – Архитектура четырехслойного персептрона, используемого при прогнозировании

Для активации нейронов многослойного персептрона была использована гиперболическая функция, представляющая собой функцию гиперболического тангенса:

$$y = (e^{as} - e^{-as}) / (e^{as} + e^{-as}), \quad (3)$$

где a – коэффициент, характеризующий крутизну функции.

Многослойный персептрон (MLP) был реализован в пакете MATLAB. Были проведены сравнительные вычислительные эксперименты по оцениванию результатов применения разрабатываемого метода прогнозирования с известными методами, а также с разработанным ранее в проекте методом прогнозирования на основе частотных представлений.

Средняя погрешность прогнозирования δ_{cp} для данного вычислительного эксперимента имеет следующие значения: метод линейного предсказания – 0.6750, прогнозирование на основе

сплайнов – 18.5425, метод на основе частотных представлений – 0.1588, разрабатываемый метод – 0.147, что демонстрирует эффективность разработанного метода по сравнению с другими методами.

Использование разработанных методов прогнозирования имеет существенное значение при подготовке сведений в системах поддержки принятия решений об экологических угрозах.

Разработка интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

В работе, учитывая сложный характер зависимостей характеристик водных ресурсов, предположено при проектировании системы мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек использовать интеллектуальную систему управления на основе применения интеллектуальных информационных технологий.

В разработанной структуре интеллектуальной системы управления (ИСУ) процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек присутствуют как традиционные элементы системы управления (СУ), так и элементы модели обработки знаний, которые связаны с реализацией искусственного интеллекта, то есть с использованием технологий экспертных систем, базы знаний, нейронных сетей, принятия решений и т.п. [7].

Структура разрабатываемой ИСУ процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек [8] (рисунок 4) связана с построением модели системы [9].

Математическая модель интеллектуальной системы управления основана на взаимосвязи трех компонент:

$$Y = F(IP, UU, OU), \quad (4)$$

где Y – состояние объекта управления, описывается текущим состоянием работ по мониторингу состояния водных объектов и рассылке сигналов оповещения, а также текущими знаниями о факторах загрязнения, F – оператор, который реализуется на основе применения инструкций, рекомендаций и правил по сбору, передаче, хранению данных о состоянии водных объектов и по оповещению, IP – интеллектуальный преобразователь, UU – управляющее устройство системы, OU – объект управления.

В качестве интеллектуального преобразователя в системе управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек используется динамическая экспертная система (ЭС). Математическая модель интеллектуального преобразователя в задаче мониторинга и оповещения основана на применении экспертного

оценивания на основе метода анализа иерархий.

Управляющее устройство системы UU формирует управляющие воздействия на объект управления OU для координирования действий по мониторингу и оповещению путем формирования рекомендаций, указаний и инструкции по порядку, частоте и видам проведения работ по мониторингу различных показателей загрязненности рек в текущий момент времени, также формирует различные сигналы оповещения.

Объект управления OU представляет собой процесс мониторинга и оповещения, в результате функционирования которого определяются значения факторов загрязнения, и осуществляется рассылка сигналов оповещения.

Разработка структуры базы данных интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Одним из элементов интеллектуальной системы управления является база данных.

В работе была спроектирована структура базы данных и построена ее логическая модель. Основные элементы разработанной структуры базы данных в ИСУ мониторинга состояния малых рек представлены на рисунке 5.

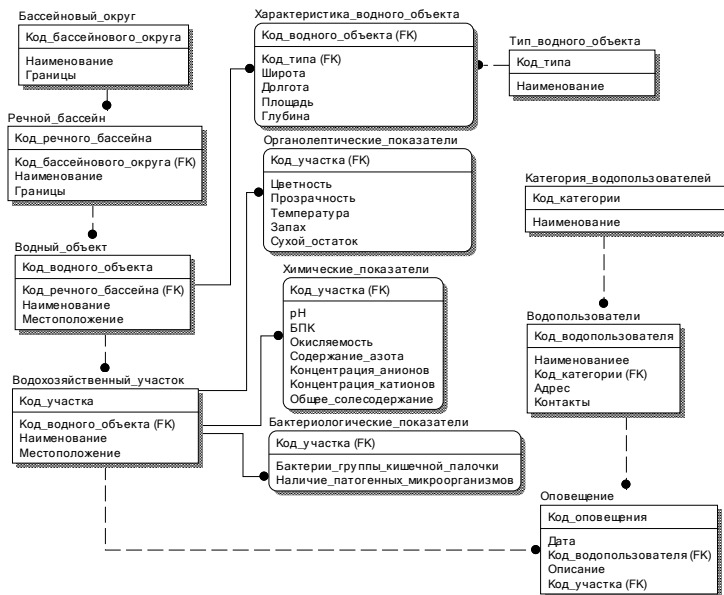


Рисунок 5 – Фрагмент структуры базы данных в ИСУ мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Данная структура может быть расширена необходимыми дополнительными параметрами, которые влияют на качество вод малых рек, а также на процесс мониторинга и оповещения.

Разработка многоуровневой модели представления знаний

В соответствии с разработанной структурой интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек в рамках динамической экспертной системы предусмотрено наличие базы знаний.

Проанализировав достоинства и недостатки существующих моделей представления знаний, для реализации базы знаний для разрабатываемой ИСУ была выбрана фреймовая модель, так как модели, основанные на фреймах, объединяют основные достоинства моделей представления знаний известных типов.

В соответствии с сущностями разрабатываемой базы данных были выделены соответствующие фреймы, которые будут хранить в себе знания, необходимые для анализа состояния малых рек. Также выделены соответствующие фреймы для формирования сигналов оповещения о загрязненности малых рек и соответствующие слоты.

На основе указанных фреймов и слотов была спроектирована фреймовая модель представления знаний. Фрагмент разрабатываемой модели представления знаний представлен на рисунке 6.

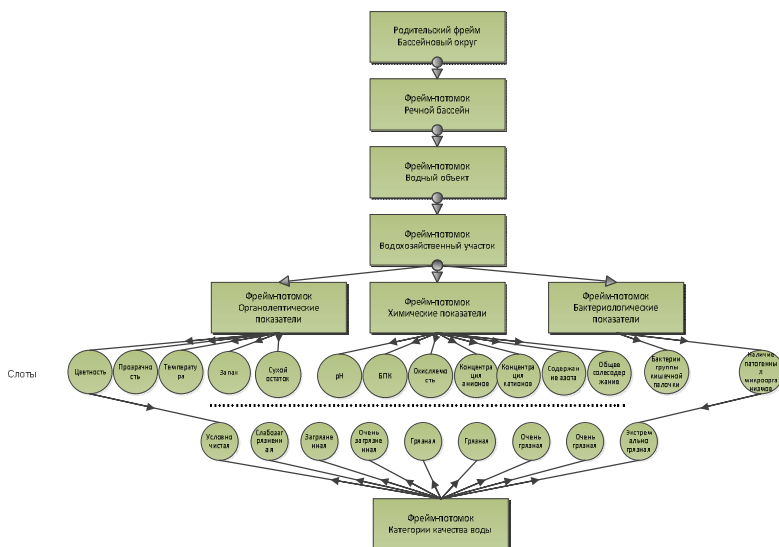


Рисунок 6 – Фрагмент фреймовой модели представления знаний в ИСУ мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

Данная модель может быть расширена необходимыми дополнительными фреймами, описывающими новые появляющиеся антропогенные факторы, влияющие на качество водных объектов, которые будут способствовать проведению мониторинга качества вод малых рек, а также повышению эффективности процесса оповещения об их состоянии.

Разработка структуры базы знаний интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения о загрязненности малых рек

База знаний является основой интеллектуальной системы. Разрабатываемая база знаний предназначена для хранения данных, используемых при мониторинге состояния и оповещении о загрязненности малых рек, а также хранения правил, описывающих преобразования этих данных в знания. База знаний позволяет анализировать данные о малых реках и выдавать управленческие решения для предотвращения экологических бедствий и своевременного оповещения всех заинтересованных субъектов.

Особенностью разрабатываемой базы знаний является то, что она должна содержать в себе сведения для принятия решений по следующим вопросам: Тип программы наблюдения, Физические показатели качества воды, Химические показатели качества воды, Гидробиологические показатели качества воды, Частота забора, Источники загрязнения, Пункты наблюдения (категория пунктов наблюдения), Фаза водного режима, Качество воды, а также позволять добавлять новые структуры хранения знаний.

На основе выделенных задач и сведений, которые должны содержаться в базе знаний, были выработаны рекомендации по ее структуре

На основе выработанных рекомендаций была спроектирована структура базы знаний интеллектуальной системы управления мониторингом и оповещением о загрязненности малых рек, фрагмент которой представлен на рисунке 7.

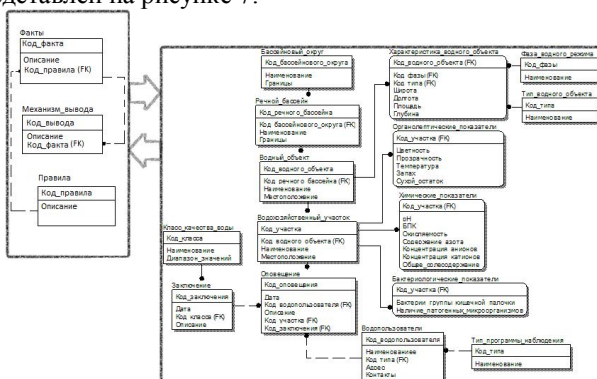


Рисунок 7 – Фрагмент структуры базы знаний интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещением о загрязненности малых рек

Разработка принципов работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах с применением Интернет-технологий

В процессе выполнения проекта разработаны функциональные диаграммы работы интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах [10].

На рисунке 8 представлена диаграмма, на которой выделены основные потребители результирующей информации (внешние сущности) в разрезе их взаимодействия с интеллектуальной системой управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах.

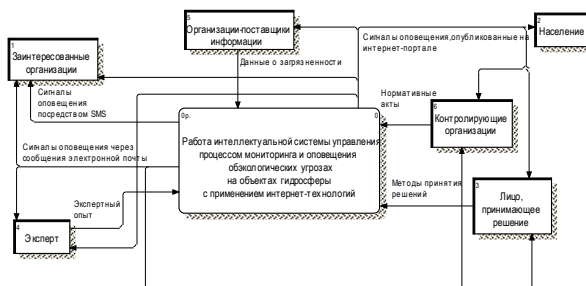


Рисунок 8 – Диаграмма «Работа интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы с применением Интернет-технологий»

На рисунке 9 представлена диаграмма, показывающая прохождение потоков информации между основными структурными элементами интеллектуальной системы управления: базой данных и базой знаний, а также между основными функциональными блоками, описывающими внутреннюю работу Интернет-портала.

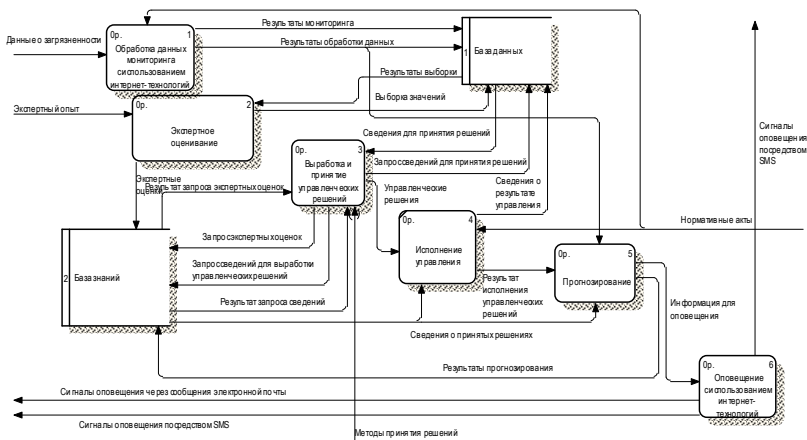


Рисунок 9 – Диаграмма декомпозиции «Работа интеллектуальной системы управления»

Разработанные функциональные диаграммы работы интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах определяют принципы работы данной системы и обеспечивают эффективную организацию выполнения возложенных на нее функций получения оценок геоэкологического состояния малых рек региона, предоставления сведений об их состоянии, прогнозирования их загрязненности и своевременного оповещения заинтересованных организаций и населения об экологических угрозах на водных объектах на основе использования элементов управления знаниями, технологий экспертных оценок, принятия решений и прогнозирования в сочетании с применением Интернет-технологий.

Разработка теоретических основ построения структуры информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы

В работе была поставлена цель создания интеллектуальной системы мониторинга и оповещения об экологических угрозах на водных объектах региона. Для оповещения населения используются различные средства, к которым относятся средства массовой информации такие как радио, телевидение, Интернет-источники, сообщения электронной почты, SMS-рассылка и др.. Для достижения цели с точки зрения реализации доступа был выбран наиболее

доступный для большинства потенциальных пользователей способ – Интернет-портал, так как на своих страницах он сможет содержать актуальную информацию о загрязненности малых рек в режиме реального времени, а также предоставит возможность сообщать об обнаруженной проблеме.

Разрабатываемая структура Интернет-портала отвечает требованиям безопасности и надежности, которые достигаются за счет заранее продуманных и разработанных прав доступа (ролей) к информации.

На рисунке 10 представлена функциональная диаграмма декомпозиции контекстной диаграммы работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы, которая показывает взаимодействие структурных элементов Интернет-портала в терминах стандарта IDEF0.

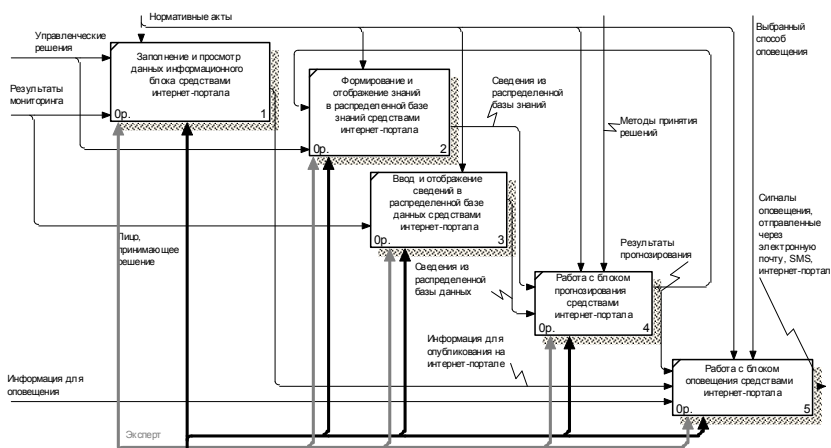


Рисунок 10 – Функциональная диаграмма декомпозиции работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы

В работе сформулированы принципы и разработаны схемы и диаграммы работы Интернет-портала интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на объектах гидросферы, которые определяют основы построения структуры информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы.

Таким образом, полученные в ходе выполнения проекта результаты

могут служить основой для разработки интеллектуальной системы управления процессом мониторинга и оповещения об экологических угрозах на малых реках региона, а также Интернет-портала, обеспечивающего ее функционирование.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта № 14-47-08052 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Крымская О.В., Лебедева М.Г. Качество вод в реках Центрально-Черноземного региона: учебное пособие. Белгород: Изд-во «Политерра», 2004.
2. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
3. Черноморец А.А., Петина М.А., Путивцева Н.П., Коваленко А.Н. Оперативное принятие управленческих решений в сфере водопользования на загрязненных водных объектах // Успехи современного естествознания. 2016. № 11 (часть 2). С. 427-432.
4. Черноморец А.А., Болгова Е.В., Черноморец Д.А., Коваленко А.Н. Метод прогнозирования на основе частотных представлений // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 2015. № 13 (210). Вып. 35/1. С. 164-169.
5. Черноморец А.А., Петина М.А., Лебедева М.Г., Болгова Е.В., Зайцева Н.О., Коваленко А.Н. О методе выделения оптимальных частотных компонент наборов данных на основе косинус-частотных представлений. Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 446-453.
6. Черноморец А.А., Болгова Е.В., Черноморец Д.А., Болгова А.В. Об оценке эффективности метода прогнозирования на основе косинусного преобразования // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 2016. № 2 (223). Вып. 37. С. 114-118.
7. Черноморец А.А., Петина М.А., Коваленко А.Н., Черноморец Д.А. Особенности построения интеллектуальных систем мониторинга. Академическая наука - проблемы и достижения. Материалы VII международной научно-практической конференции. North Charleston, SC, USA, 2015. С. 189-191.
8. Черноморец А.А., Петина М.А., Лебедева М.Г., Болгова Е.В., Зайцева Н.О., Коваленко А.Н., Черноморец Д.А. О разработке структурной схемы интеллектуальной системы управления процессом мониторинга

- и оповещения о загрязненности малых рек [Электронный ресурс] Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. 25-26 февраля 2016, Белгород. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2016. С. 1-10.
9. Степанов М.Ф. Принципы построения и архитектура интеллектуальных систем управления. XII Всероссийское совещание по проблемам управления вспу-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 592-601.
 10. Черноморец А.А., Зайцева Н.О., Болгова Е.В. О теоретических основах работы информационного портала, обеспечивающего обработку знаний об экологических угрозах на объектах гидросферы // Фундаментальные исследования. 2016. № 12 (часть 2). С. 344-348.