

УДК (004.8.032.26+004.891+63:911.3):631.43

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ НА БАЗЕ ГИБРИДНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ*д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС, В.И. КОВАЛЕНКО**(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск)*

Рассматривается построение программных средств для прогнозирования миграции радионуклидов в почвах на базе гибридной экспертной системы. Показано использование гибридных экспертных систем для структурирования и формирования данных о физико-химических характеристиках почвы, прогнозирования миграции радионуклидов и решения других экологических задач. В сравнении с обычными математическими моделями гибридная экспертная система обладает рядом достоинств. Для повышения эффективности работы созданных программных средств предложено объединение в составе программного комплекса модулей экспертных систем и модулей, реализующих модели, построенные на строгих математических расчетах процессов миграции радионуклидов в почвах.

Введение. Большое значение при оценке и прогнозировании загрязнения окружающей среды в настоящее время имеют методы математического моделирования и реализующие их специализированные программные средства, которые позволяют производить оценку той или иной ситуации, связанной с загрязнением окружающей среды при минимальных затратах времени и материальных средств, без непосредственного вмешательства в природные процессы. Для Республики Беларусь одной из актуальных проблем в этом отношении является техногенное и антропогенное загрязнение почв. Эта проблема особенно обострилась после Чернобыльской катастрофы.

В настоящей работе предложено использование гибридных экспертных систем для решения задач систематизации накопленной информации по миграции радионуклидов в различных видах почв, характеристикам почвенно-грунтовых систем, с возможностью решения задач долгосрочного прогнозирования названных процессов. Предпосылкой для создания такой системы является то, что к настоящему времени собрано большое количество экспериментальной информации по миграции радионуклидов в различных почвенно-грунтовых системах. Однако эта информация отличается большой разнородностью и отсутствием должной систематизации, что снижает ее ценность в принятии определенных управленческих и технологических решений, а также для использования в классических математических моделях как для целей прогнозирования, так и верификации получаемых результатов. Это обуславливается чаще всего отсутствием связи результатов экспериментальных измерений с типом почв и их характеристиками. Следует также отметить, что разработанные строгие физико-математические модели чаще всего не учитывают многие факторы окружающей среды, влияющие на процесс миграции (рельеф местности, климатические особенности региона, характер растительности, сельскохозяйственная деятельность человека и др.) [1 – 3]. Многие из указанных выше проблем можно успешно решить с применением гибридных экспертных систем.

Анализ существующих моделей. Проведенный анализ предметной области показывает, что к настоящему времени разработано значительное число концептуальных математических и компьютерных моделей, позволяющих моделировать миграцию переменного насыщенности жидкостей в пористых средах, распространение теплоты в почвогрунтовых системах, и в результате – миграцию растворенных веществ в почве [1, 2]. Однако при более детальном рассмотрении каждой из моделей оказывается, что часть из них располагает достаточно большими допущениями и приближениями, а также апробируется на единичных экспериментальных данных. В указанных моделях в основном используются эмпирические коэффициенты диффузии, дисперсии и конвекции, подобранные для конкретных типов почв [2].

С другой стороны, существуют более полные модели, включающие в себя достаточно глубокие описания химических и физических процессов, протекающих в почве [3]. Однако основными недостатками таких моделей является большое количество граничных условий, как следствие, сложность и порой невозможность их использования специалистами-практиками (наиболее известные компьютерные модели – Hydrus2D, Hydrus3D, встроенные модели в Comsol Multiphysics). Получение граничных условий для таких моделей требует проведения серьезных исследований, которые по трудоёмкости соизмеримы с созданием собственных конвективно-диффузионных математических моделей миграции веществ в заданном регионе. Помимо этого, дополнительным существенным недостатком таких моделей является потребность в больших вычислительных ресурсах для обеспечения приемлемой для практики скорости расчёта.

Проведённый анализ использования географических информационных систем (ГИС) в исследуемой области показал, что имеющиеся работы носили лишь статистический и демонстрационный харак-

тер без подключения дополнительных средств анализа самих механизмов миграции на базе полученных результатов [4], хотя это направление является весьма актуальным и перспективным для анализа геоинформации [5].

Следует также отметить, что имеются и определенные попытки применения нейронных сетей и экспертных систем в рассматриваемой области [6, 7]. Однако они часто ограничиваются достаточно узким кругом возлагаемых на них задач. Это либо «универсальные аппроксиматоры», цель которых классифицировать набор собранных данных в определенной локальной области, либо классификаторы свойств почв, предоставляющие информацию о требуемом свойстве почвы исходя из выбранного типа. В отдельных разработках можно увидеть использование нейронных сетей для подбора коэффициентов диффузии или дисперсии в зависимости от заданных типов почв.

Особенности построения гибридной экспертной системы (ГЭС). Практика разработки гибридных экспертных систем всегда сводилась к созданию достаточно универсальных в определенной предметной области компьютерных моделей с широкими возможностями использования дополнительных нелинейных инструментов анализа. Одним из таких инструментов может выступать и искусственная нейронная сеть [8, 9]. Проведенный анализ позволил принять решение об использовании нейронных сетей в качестве основного расчетного звена разрабатываемой системы [10]. Однако следует отметить, что при недостаточном продуманном объединении экспертных систем и нейронных сетей не всегда удается получить требуемую точность прогнозирования. Обычно такое объединение повышает точность прогнозирования, так как экспертная система в дополнение к состояниям нейронной сети хранит в себе как заложенные экспертом знания, так и сами экспериментальные данные, что позволяет экспертной системе выполнять постобучение нейронной сети (в случае необходимости) и, соответственно, повышать точность получаемых результатов. Однако есть определенные недостатки этого подхода – подстраивая нейронную сеть самостоятельно, экспертная система сталкивается со сложностями в контроле процесса обучения. Так, может возникнуть ситуация акцентирования нейронной сети на конкретных образах (проблема переобучения).

Предложенная авторами структура гибридной экспертной системы показана на рисунке 1.

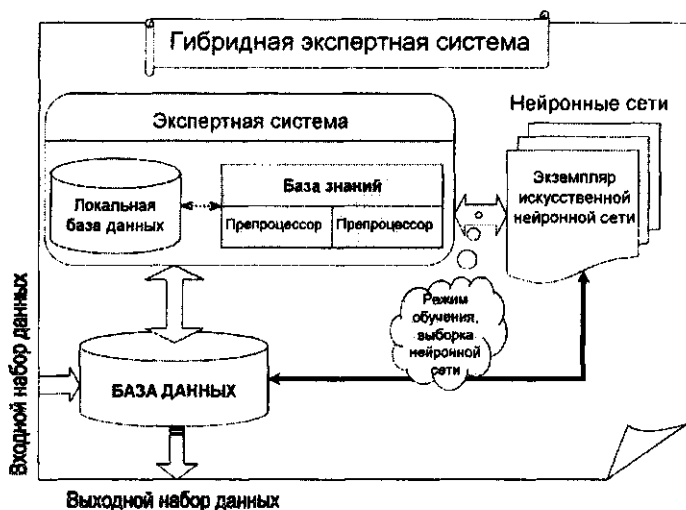


Рис. 1. Структура гибридной экспертной системы

Приведенная структура системы не привязана к определенному виду веществ, прогнозирование миграции которых она осуществляет. Специфика этой области рассматривается на более низких уровнях структурной организации гибридной экспертной системы, а в частности при определении типа знаний, с которыми будет работать база знаний.

Как уже упоминалось выше, одним из основных звеньев гибридной экспертной системы является экспертная система (рис. 2). Экспертная система выполняет функции предварительной классификации и организации данных, их дальнейшей постобработки. В этой роли выступают модули: препроцессор и постпроцессор, входящие в состав базы знаний, содержащей помимо этого ряд логических связей между данными и их семантическим описанием, с одной стороны, и методами их использования, с другой. В состав экспертной системы также включена локальная база данных, предназначенная для хранения промежуточных, инициализационных и наиболее успешных состояний нейронных сетей, а также специфической информации (фреймы данных, правила, символические формы и т.п.), необходимой для функционирования базы знаний. Сама экспертная система является статической, поэтому заложенные прави-

ла не поддаются дальнейшей модификации. Однако, как видно из приведенной схемы, в ней присутствуют некоторые динамические элементы (генетический алгоритм поиска решений нейронных сетей, алгоритм генерации нейронных сетей).

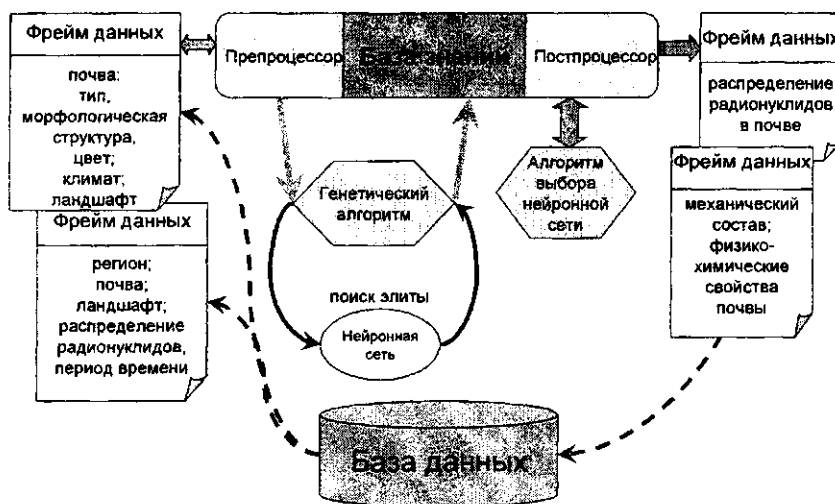


Рис. 2. Принцип работы экспертной системы

В структуру гибридной экспертной системы также включена общая база данных, хранящая поступающие на вход (входной набор данных) экспериментальные, тренировочные и расчетные данные, а также результаты прогнозирования (выходной набор данных). Наличие этой информации является необходимым условием для реорганизации состояний нейронных сетей во время работы системы, что и обуславливает динамические свойства гибридной экспертной системы в целом.

Модуль нейронной сети в силу своего содержания является ее центральным звеном. Он представляет собой основной прогнозирующий компонент, имеющий свою структурную специфику и собственный инструментарий. Его динамический характер обусловлен созданием нескольких экземпляров искусственных нейронных сетей, каждая из которых характеризуется различным собственным состоянием, необходимым для решения конкретных специфических задач. Следует отметить, что нейронная сеть функционирует в двух режимах: режиме обучения и режиме прогнозирования. Во время оптимизации состояния нейронной сети (обучения) предыдущие состояния сохраняются в локальную базу данных экспертной системы. Подробное описание работы предложенной структуры нейронной сети и используемых алгоритмов приведено в работах [11 – 14].

Классификационные функции между экземплярами нейронных сетей в соответствии с заложенными в базу знаний принципами (помимо своих остальных функций) выполняют модули: препроцессор и постпроцессор. При работе системы это проявляется в конкретизации типа решаемой задачи и в возможности оценки погрешности, обеспечиваемой той или иной нейронной сетью. В случае если нейронные сети выдают неадекватные результаты, то задействуется механизм коррекции гибридной экспертной системы, на базе подстройки состояния дополнительных нейронных сетей, что обеспечивает снижение погрешности прогнозирования.

Программная реализация системы. Важной особенностью программной реализации гибридной экспертной системы является то, что в состав программного комплекса (рис. 3) помимо неё самой включена и физико-математическая модель – модель конвективной диффузии водорастворимых соединений в природных дисперсных системах при неизотермическом влагопереносе [15]. Это позволяет в случае успешной верификации модели использовать расчетные данные в качестве дополнительного обучающего множества для гибридной экспертной системы, а также воспользоваться её возможностью генерировать граничные условия для физико-математической модели на базе вводимой символьной информации либо простого выбора из базы данных участка местности, для которого необходимо проводить прогнозирования с автоматической загрузкой свойств почв и других входных данных.

Первым этапом при работе с системой является выбор режима работы: прогнозирование; обучение; расчёт; формирование граничных условий, а также работа с базой данных и слоями карт регионов (встроенная географическая информационная система). Режим прогнозирования предполагает использование гибридной экспертной системы в качестве основного инструмента. В силу своих функциональных возможностей гибридная экспертная система выполняет масштабный ориентировочный прогноз, и для

его дальнейшего уточнения можно использовать математическую модель (режим расчёта). В качестве входной информации для расчета существует возможность использования гибридной экспертной системы в режиме формирования граничных условий, тем самым упрощая при этом работу пользователя (она автоматически будет вводить граничные условия для математической модели, ввод данных будет контролировать непосредственно пользователь). Представление результатов моделирования (прогнозирование) осуществляется с помощью встроенного в систему графического редактора (2D – 3D). Кроме этого, для этих целей используется внешняя географическая информационная система, интеграцию с которой осуществляет отдельный модуль.

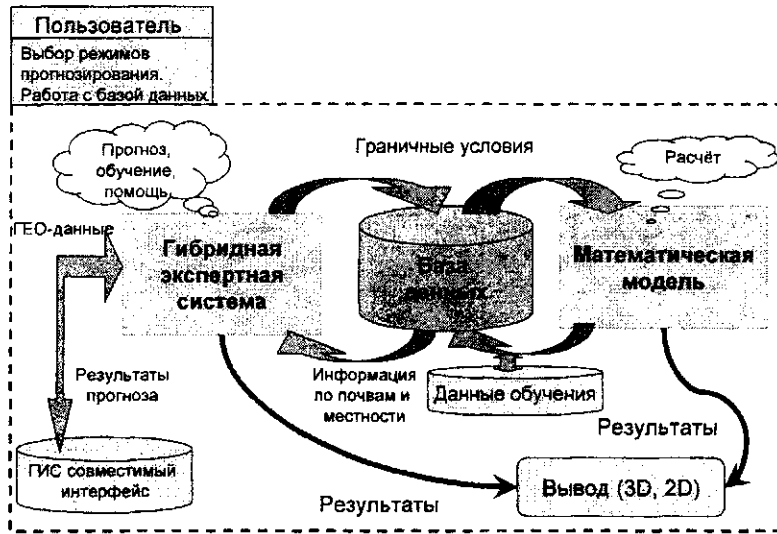


Рис. 3. Схема построения программного комплекса для прогнозирования миграции радионуклидов в почве

Режим обучения – для получения более достоверной прогнозной информации – предполагает подстройку гибридной экспертной системы. При её подстройке обеспечивается возможность контроля хода этого процесса (возможен ручной выбор нейронных сетей для обучения, сброса их состояний; изменение «особей» для применения генетического алгоритма) и определения его нормы (временной и по результирующей ошибке). Вся поступающая в гибридную экспертную систему экспериментальная информация сохраняется в базе данных, с целью ее последующего использования для новой подстройки гибридной экспертной системы и верификации математических моделей.

В силу сложности и объёмности задачи программной реализации всей системы используются: объектно-ориентированный подход к ее программной реализации; возможности платформы .Net; предложенный ранее авторами подход на основе динамически заменяемых модулей [16] и архитектура KMTP Framework [17, 18] (рис. 4).

Приложение «Ecological Forecasting»

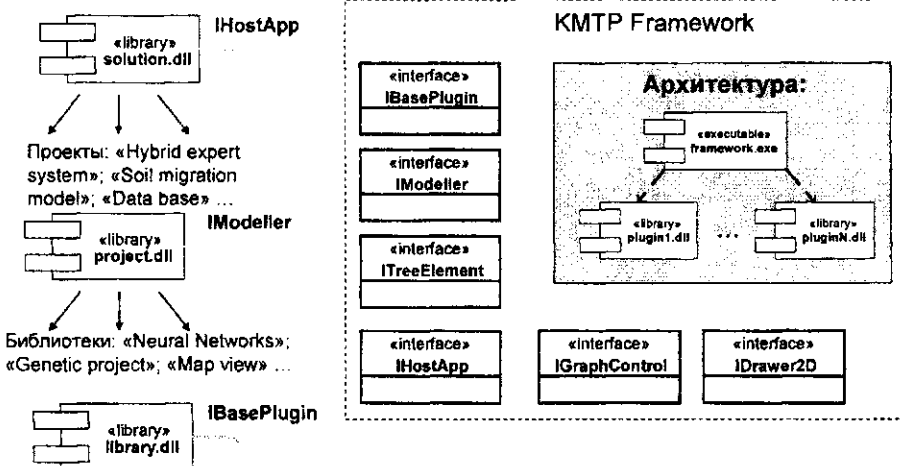


Рис. 4. Архитектура приложения «Ecological Forecasting»

В основе названной архитектуры лежит иерархическая структура плагинов (динамические модули, подгружаемые к программе на этапе ее выполнения). Это гибко вписывается в архитектуру программного комплекса для прогнозирования миграции радионуклидов в почве (см. рис. 4).

Применительно к рассматриваемой задаче, разрабатываемое приложение «Ecological Forecasting» наследует интерфейс IHostApp, в результате чего при обнаружении этого плагина исполняемая программа (kmtprframework.exe) передает ему управление. Затем происходит загрузка проектов, наследуемых от интерфейса IModeller, которые в свою очередь загружают необходимые им библиотеки (IBasePlugin). В качестве проектов выступают: гибридная экспертная система, математическая модель, база данных и географическая информационная система, каждый из которых пользуется схожими инструментами, оформленными в виде библиотек. Так, в нашем случае это экспертная система (и её части), нейронная сеть, модуль, реализующий генетический алгоритм, вывод графики, а также решатели (solvers).

Важной особенностью представленной архитектуры является то, что различные плагины можно реализовывать на выбранных по определенным критериям языках программирования. Так, основная часть программного комплекса написана на языке C# и выполняется в среде платформы .Net, однако при реализации процессоров время исполнения и работа с системной памятью становятся критичными. Поэтому в этом случае целесообразно использовать более гибкие в математическом плане языки, такие как C++ или Fortran.

На рисунке 5 приведен общий вид рабочего окна разработанной подсистемы прогнозирования в составе среды KMTP Framework.

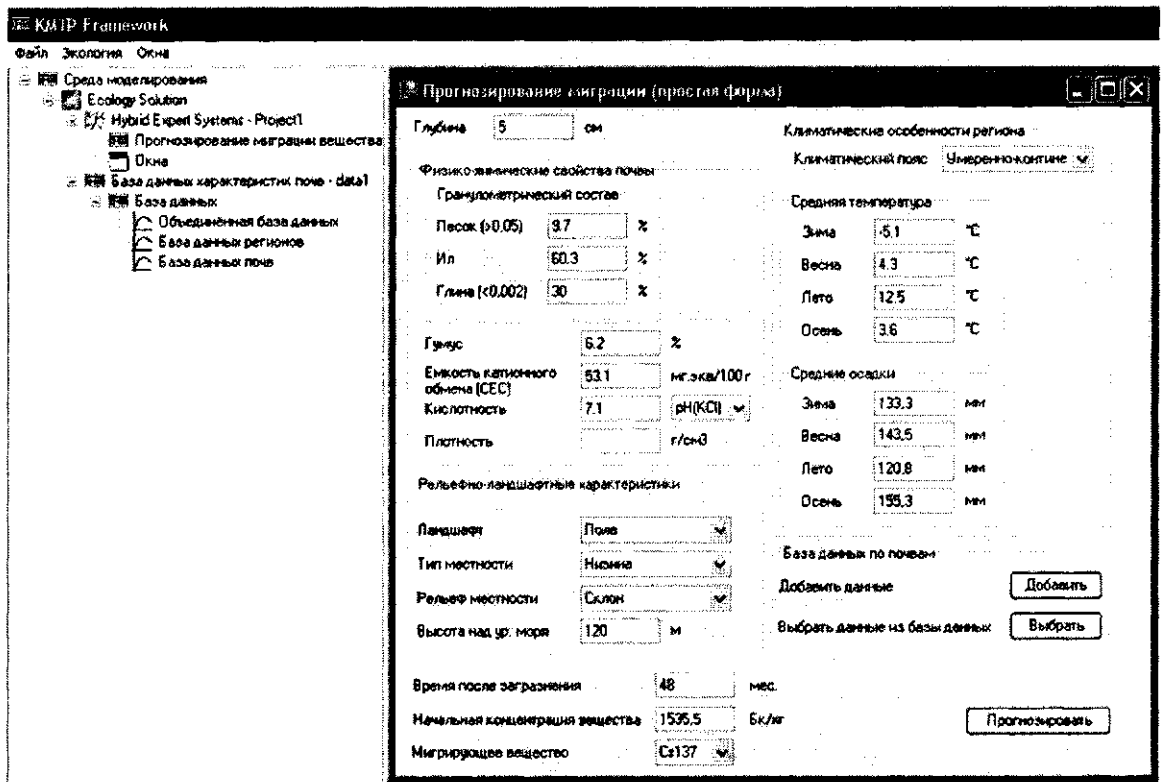


Рис. 5. Общий вид окна в режиме прогнозирования

Выводы. Разработанная гибридная экспертная система может быть использована для прогнозирования миграции примесей в почве и решения других экологических задач. В сравнении с обычными математическими моделями гибридная экспертная система обладает рядом достоинств, и прежде всего возможностью автоматической или ручной настройки на более адекватные результаты прогнозирования на основе использования реальных данных экспериментальных измерений. Скорость решения задач с помощью предложенной системы значительно выше, чем при использовании моделей, построенных на аналитическом или численном решении аналогичных задач прогнозирования.

Однако при комплексном подходе к решению задачи необходимо учитывать тот факт, что не всегда в распоряжении исследователей имеются экспериментальные данные, необходимые для обучения гибридной экспертной системы. Поэтому в состав разработанной системы включены модули, реализую-

шие математические модели, описывающие миграцию радиоактивных веществ в почве. В этом случае достигается максимальная эффективность всей системы в целом, так как существует возможность подстройки гибридной экспертной системы по расчётным данным, а также получения входных данных, необходимых для математического моделирования исследуемых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis / F. Abbasi [et al.] // J. of Irrig. And Drainage ASCE. – 2003. – Vol. 129, № 2. – P. 71 – 81.
2. Approximating pollutant transport to ground water / C.G. Enfield [et al.] // Ground Water. – 1982. – Vol. 20, № 6. – P. 711 – 722.
3. Gasto, J.M. Estimation of internodal permeabilities for numerical simulation of unsaturated flows / J.M. Gasto, J. Grifoll, Y. Cohen // Water Resources Research. – 2002. – Vol. 38, № 12.
4. Тимофеев, А.С. Методология прогноза загрязнения сельскохозяйственной продукции и оценки эффективности контрмер с использованием ГИС-технологий / А.С. Тимофеев // 17 лет после Чернобыля: проблемы и решения: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. с участием Президента Респ. Беларусь А.Г. Лукашенко, г. Гомель, 25 апреля 2003 г. / под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского, В.В. Колбанова. – Минск: Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Респ. Беларусь, М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 2003. – С. 164 – 165.
5. Пакет инструментальных средств поддержки процесса принятия решений в задачах регионально-отраслевого управления обществом на основе данных ДЗЗ и цифровых карт / С.В. Абламейко [и др.] // Сб. тез. шестой Украинской конф. по космическим исследованиям. – Евпатория: НЦУИКС НКАУ, 2006. – С. 113.
6. Software for Modelling Migration of Radionuclides in Soil / M. Kanevski [et al.] // Institute of Nuclear Safety (IBRAE). Preprint IBRAE. – Moscow, 1997. – № 16. – 21 p.
7. Ланкин, Ю.П. Моделирование изменений экологических объектов с помощью нейронных сетей / Ю.П. Ланкин, А.П. Лалетин // Сибирский экологический журнал. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – Т. 6, № 4. – С. 449 – 452.
8. Lam, D. A hybrid expert system and neural network approach for environmental application / D. Lam, D. Swayne // Proc. Of ICESD. – Bangkok, 1994. – P. 298 – 303.
9. Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 320 с.
10. Кундас, С.П. Применение экспертных систем для исследования и оптимизации процессов закалки / С.П. Кундас, В.И. Коваленко, Д.Г. Иванов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 73 – 78.
11. Кундас, С.П. Применение экспертных систем для прогнозирования миграции радионуклидов и химических веществ в почве / С.П. Кундас, В.И. Коваленко // Сахаровские чтения 2006 года: экологические проблемы XXI века: материалы 6-й междунар. науч. конф. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2006. – Ч. 2. – С. 162 – 166.
12. Кундас, С.П. Архитектура гибридных экспертных систем для прогнозирования миграции радионуклидов в почве / С.П. Кундас, В.И. Коваленко, И.А. Гишкелюк // Инженерный вестн. – Минск, 2006. – № 1(21)/3. – С. 206 – 209.
13. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 194 с.
14. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение: учеб. пособие для вузов / В.А. Головкин; под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – Кн. 4. – 256 с.
15. Математическое моделирование процессов переноса вещества и влаги в почве / С.П. Кундас [и др.] // Эколог. вестн. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2007. – № 1. – С. 62 – 71.
16. Архитектура построения программных комплексов для моделирования технологических систем на основе динамически заменяемых модулей / С.П. Кундас [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – Т. II. – С. 88 – 91.
17. Разработка структуры программного комплекса для моделирования технологических систем на основе динамически заменяемых модулей / С.П. Кундас [и др.] // Изв. белорусской инж. акад. – Минск, 2004. – № 1(17)/3. – С. 199 – 201.
18. Архитектура программных комплексов для моделирования технологических систем на основе динамически заменяемых модулей / С.П. Кундас [и др.] // Вестн. компьютерных и информ. технологий. – М.: Машиностроение, 2005. – № 7. – С. 14 – 17.

Поступила 29.04.2008