

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518: 004.652

В.П. Часовских, В.А. Усольцев, М.П. Воронов

Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ**



В информационных системах поддержки принятия решений в лесном комплексе основу составляют модели и базы знаний. Исследуется методология создания систем, в которых требуется непосредственное практическое участие лица, принимающего решение, и которые не приводят к фатальным последствиям в случае ошибки. Наиболее интересными в прикладном аспекте являются информационные системы, в которых применяется технология виртуальных тренажеров, облачных вычислений на динамически развивающихся сайтах, что позволяет выполнять имитацию изменения состояний управленческих объектов в зависимости от действий принимающего решения.

Было принято решение создать информационную систему мониторинга хозяйственной деятельности лесного комплекса, генерирующую «виртуальный тренажер», позволяющий осуществлять оценку управленческого решения по величине экологического ущерба от хозяйственной деятельности. Одной из задач данной работы стало определение механизма получения оценок экономического ущерба по анализу динамики количества депонируемого лесами углерода на основе моделей, предложенных профессором В.А. Усольцевым (2001). Такая система может использоваться для формирования навыков оценки экологической безопасности, навыков составления оптимального плана лесопользования и т.п. ранее было показано, что процесс обучения эффективно обеспечивается в виртуальной среде на динамично развивающихся сайтах. На основании изучения свойств и особенностей лесных экосистем было выявлено, что они часто характеризуются неполной и меняющейся информацией, заданной на нечетких множествах (Часовских, Воронов, 2012; Воронов, Часовских, 2013 а, б).

Для рассмотрения методов представления знаний о лесных экосистемах рассмотрены проблемы сложности информационного моделирования, адекватность и эффективность компьютерной обработки. Выбран метод реляционного представления на нечетких множествах знаний о сложных объектах на динамично развивающихся сайтах.

Основные компоненты такой информационной системы могут быть отображены в виде схемы (рис. 1).

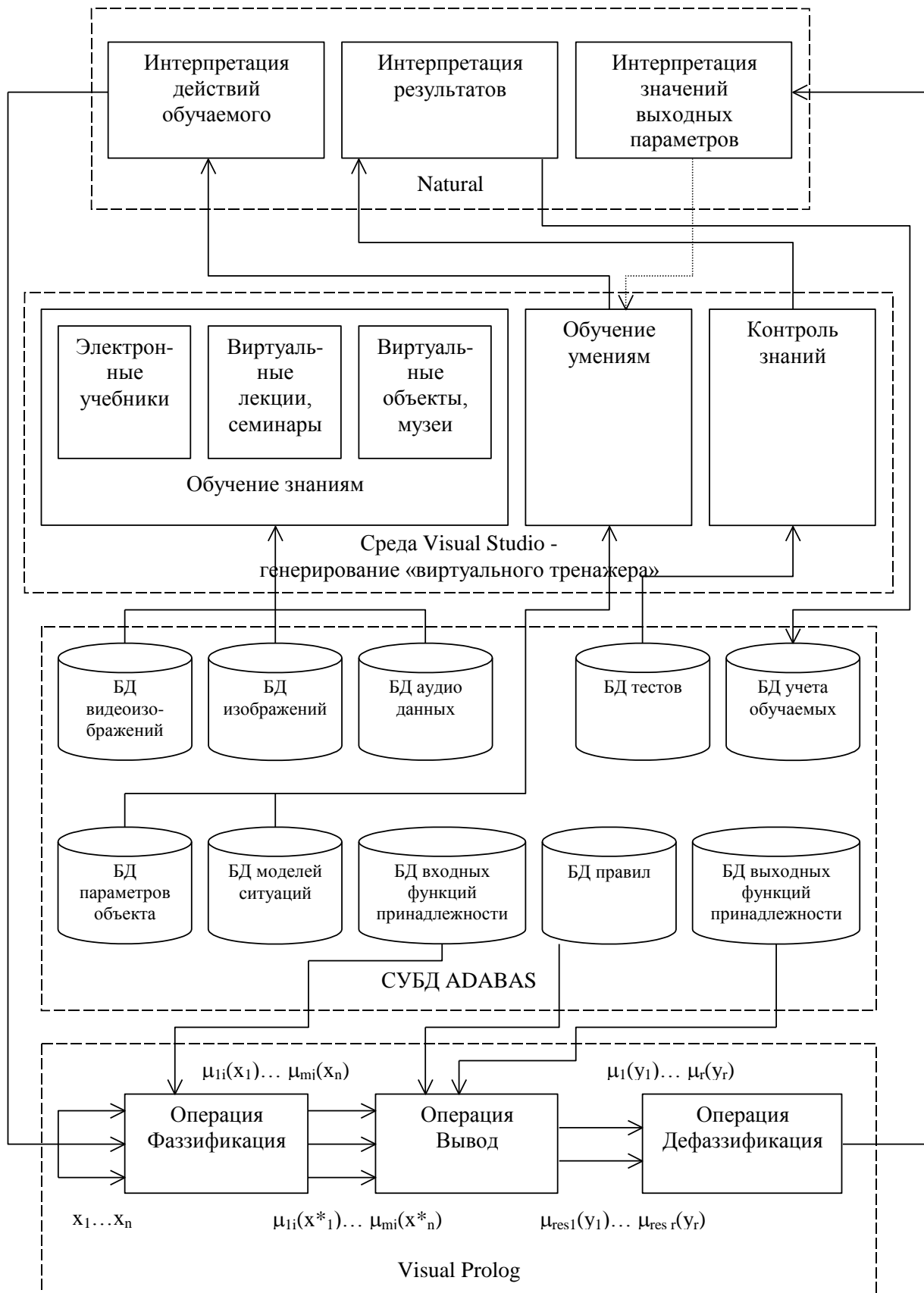


Рис. 1. Информационная система, генерирующая «виртуальные тренажеры»

На рис. 1. использованы следующие условные обозначения:
 $x_1 \dots x_n$ – входные значения параметров, ассоциированных с действиями обучаемого в процессе взаимодействия с «виртуальным тренажером».

$\mu_{i1}(x_1) \dots \mu_{mj}(x_n)$ – функции принадлежности входным нечетким множествам $i_1 \dots m_j$ входных значений параметров $x_1 \dots x_n$.

$\mu_{i1}(x^*1) \dots \mu_{mj}(x^*n)$ – степени принадлежности входным нечетким множествам $i_1 \dots m_j$ входных значений параметров $x_1 \dots x_n$.

$\mu_1(y_1) \dots \mu_r(y_r)$ – функции принадлежности выходных параметров $y_1 \dots y_r$.

$\mu_{res1}(y_1) \dots \mu_{res r}(y_r)$ – результирующие функции принадлежности выходных параметров $y_1 \dots y_r$.

Операция «Фаззификация» – вычисление степени принадлежности входным нечетким множествам.

Операция «Вывод» – определение результирующих функций принадлежности выходных параметров.

Операция «Дефаззификация» – на основе результирующих функций принадлежности вычисление значений выходных параметров.

Функционирование информационной системы (см. **рис. 1**) обеспечивается следующими процессами:

Коммуникация между пользователем и системой. Необходимо осуществлять поиск и транспортировку данных из баз данных СУБД Adabas в различные формы web-сайта с целью представления их пользователю для изучения или редактирования, а также обеспечить движение данных в обратном направлении (из форм web-сайта в БД). Для решения задачи обеспечения коммуникаций в системе в среде Visual Studio 2012 создана «Программа (веб-приложение) для асинхронных коммуникаций в обучающих системах» (свидетельство № 2014611835).

Управление файловой системой. Необходимо обеспечить систему с возможностью перемещения, копирования, редактирования, удаления и организации объектов файловой системы web-сайта таким образом, чтобы было реализовано множество правил вывода, позволяющих генерировать «виртуальный тренажер». Данная задача решена с помощью созданной в Visual Studio 2012 «Программы (веб-приложения) для управления файловой системой Интернет сайтов» (свидетельство № 2014611836).

Оценка принимаемых решений с использованием самонастраивающихся нечетких моделей. Необходимо проведение качественных оценок эффективности решений, принимаемых пользователем в процессе обучения, а также фиксирование всех решений, принимаемых различными пользователями в каждой конкретной управленческой ситуации и соответствующих оценок эффективности этих решений в специализированной базе знаний. Оценка эффективности каждого принимаемого решения осуществляется при этом на основе анализа всех имеющихся в базе знаний принятых решений, их эффективности и последствий. Данная задача решена при помощи созданной в Visual Studio 2012 программы «Автоматизированная система контроля знаний» (свидетельство № 2014611330).

Визуальное отображение информации и интерпретация действий пользователя на основе нечеткой формализации критериев. Для решения этой задачи в среде Visual Studio 2012 создана программа «Автоматизированная система обучения» (свидетельство № 2014611331).

На основе полученные результатов исследования и созданных программ созданы два «виртуальных тренажера» представляющих собой web-сайты, в рамках которых осуществлена связь с базами данных и знаний СУБД Adabas и прочими компонентами (см. **рис.1**) и реализованы вышеописанные коммуникационные процессы:

- программа (веб-приложение) для Интернет сайта УНЦП УГЛТУ (свидетельство № 2013660770);

- программа (веб-приложение) для Интернет сайта «Лесоустроительной экспедиции УНЦП УГЛТУ» (свидетельство № 2013660774).

Назначением обоих «виртуальных тренажеров» является формирование навыка принятия решений при управлении хозяйственной деятельностью в лесных экосистемах на уровне региона или отдельного предприятия. Для этого создана модель определения величины экономического ущерба от хозяйственной деятельности по анализу динамики депонирования углерода. Модель разработана для трёх случаев (Воронов, Часовских, 2013 а, б):

- муниципальное образование является производителем продукции из лесных благ:

$$\sum_{j=1}^k PR_j = \sum_{j=1}^k q_j \cdot (p_j - e_j) + \sum_{m=1}^y q_m \cdot (p_m - e_m) - \sum_{l=1}^r SC_l + \Delta TEV \rightarrow \max$$

при следующих ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_j \leq Dnn_j \\ \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n Q_{ji} \leq \sum_{i=1}^n \frac{NEP_i}{k_i} \\ q_j \geq a_j \\ q_j = \sum_{i=1}^n Q_{ji} \cdot kH_{ji} \\ q_m = \sum_{m=1}^y QNF_m \cdot kH_m \\ QNF_{mj} \leq knf \cdot Q_{ji}, m = 9,13,16,17,18,19,26 \\ QNF_m \leq BH_m, m = 1,2,3,4,8,10,11,12,13,14,15,20,21,22,23,27 \\ QNF_m \leq QNF'_m, m = 5,6,7,10,22,23,24,25 \end{array} \right.$$

- производителем продукции назначается арендатор, с предоставлением самостоятельности в выборе номенклатуры и объемов производимой продукции:

$$PR = \sum_{d=1}^w R_d - \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^s Q_{ji} \cdot c_i - \sum_{m=1}^y QNF_m \cdot c_m - \sum_{l=1}^r SC_l + \Delta TEV \rightarrow \max$$

при следующих ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^s Q_{ji} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^s \frac{NEP_i}{k_i} \\ \Delta TEV \geq 0 \\ QNF_m \leq BH_m, m = 1,2,3,4,8,10,11,12,13,14,15,20,21,22,23,27 \\ QNF_m \leq QNF'_m, m = 5,6,7,10,22,23,24,25 \end{array} \right.$$

- производителем продукции назначается арендатор, без предоставления самостоятельности в выборе номенклатуры и объемов производимой продукции:

$$PR = \sum_{d=1}^w R_d - \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^s Q_{ji} \cdot c_i - \sum_{m=1}^y QNF_m \cdot c_m - \sum_{l=1}^r SC_l + \Delta TEV \rightarrow \max$$

при следующих ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{ji} = Q'_{ji} \\ q_j = \sum_{i=1}^n Q'_{ji} \cdot k'_{ji} \\ q_m = \sum_{m=1}^y QNF'_m \cdot k'_{im} \\ QNF_{mj} \leq knf \cdot Q'_{ji}, m = 9,13,16,17,18,19,26 \\ QNF_m \leq BH_m, m = 1,2,3,4,8,10,11,12,13,14,15,20,21,22,23,27 \\ QNF_m \leq QNF'_m, m = 5,6,7,10,22,23,24,25 \end{array} \right.$$

Основными ограничениями в представленной модели являются:

Для решения поставленной задачи первоочередным является определение значений основных ограничивающих факторов:

общая экономическая стоимость экосистемы TEV, а также ее изменения ΔTEV;

оценка уровня депонирования углерода экосистемой NEPik.

Общая экономическая ценность леса может быть рассчитана по формуле:

$$TEV = UV + NUV,$$

где UV – стоимость использования лесных благ; NUV – стоимость неиспользования лесных благ.

Стоимость использования (UV) определяется по формуле:

$$UV = DUV + IUV + OV,$$

где DUV – прямая стоимость использования; IUV – стоимость косвенного использования; OV – стоимость отложенной альтернативы.

Стоимость неиспользования определяется по формуле:

$$NUV = EV + BV,$$

где EV – стоимость существования; BV – стоимость наследования.

Применительно к составленной классификации древесных и недревесных ресурсов, а также полезных функций леса, прямая стоимость использования (DUV) может быть рассчитана как:

$$DUV = \sum_{i=1}^p CT_i + \sum_{f=1}^o CNT_f + CW_{12} + CW_{14} + CW_{15}$$

где $\sum_{i=1}^p CT_i$ – стоимость древесных ресурсов; $\sum_{f=1}^o CNT_f$ – стоимость недревесных ресурсов; CW12 – стоимость рекреационной функции леса; CW14 – стоимость научно-исследовательской функции леса; CW15 – стоимость образовательной функции леса.

Стоимость древесных ресурсов:

$$\sum_{i=1}^p CT_i = \sum_{i=1}^y CTP_i + \sum_{i=y+1}^p CTA_i$$

где $\sum_{i=1}^y CTP_i$ – стоимость древесных ресурсов, запрещенных к рубке; $\sum_{i=y+1}^p CTA_i$ – стоимость древесных ресурсов, разрешенных к рубке.

Стоимость недревесных ресурсов $\sum_{f=1}^o CNT_f$ составляется слагаемыми:

CNT1 – стоимость орехов; CNT2 – стоимость грибов; CNT3 – стоимость ягод; CNT4 – стоимость плодов; CNT5 – стоимость редких и исчезающих животных; CNT6 –

стоимость охотничьих ресурсов; CNT7 – стоимость рыбных ресурсов; CNT8 – стоимость пищевых растений; CNT9 – стоимость живицы; CNT10 – стоимость лекарственных растений; CNT11 – стоимость пряноароматических растений; CNT12 – стоимость кормовых растений; CNT13 – стоимость технических растений; CNT14 – стоимость продуктов пчеловодства; CNT15 – стоимость медоносных растений; CNT16 – стоимость листьев, почек, цветов, хвойной лапки; CNT17 – стоимость коры; CNT18 – стоимость продуктов сокопродукующих растений; CNT19 – стоимость пневого осмола; CNT20 – стоимость продуктов лесного семеноводства; CNT21 – стоимость продукции лесных плантаций; CNT22 – стоимость лесной подстилки, мха, опада; CNT23 – стоимость лишайников; CNT24 – стоимость песка, гравия, глины; CNT25 – стоимость торфа; CNT26 – стоимость дров, хвороста, хмыза; CNT27 – стоимость продуктов леса, используемых для выпаса скота.

Стоимость косвенного использования находится как:

$$IUV = CW_1 + CW_2 + CW_3 + CW_4 + CW_5 + CW_6 + CW_7 + CW_8 + CW_9 + CW_{10},$$

где CW_1 – стоимость функции поддержания состава воздуха; CW_2 – стоимость воздухоочистительной функции леса; CW_3 – стоимость углероддепонирующей функции; CW_4 – стоимость водоохранно-регулирующей функции леса; CW_5 – стоимость водоочистительной функции леса; CW_6 – стоимость климатообразующей функции леса; CW_7 – стоимость облакообразующей функции; CW_8 – стоимость ресурсорезервационной функции леса; CW_9 – стоимость почвообразующей функции; CW_{10} – стоимость почвозащитной функции леса.

Стоимость отложенной альтернативы находится как:

$$OV = FI + FU,$$

где FI – стоимость будущей информации; FU – стоимость будущего использования.

Стоимость существования может быть найдена как:

$$EV = CW_{11} + CW_{13} + CW_{16} + CW_{17},$$

где CW_{11} – стоимость функции сохранения биоразнообразия; CW_{13} – стоимость оздоровительной функции; CW_{16} – стоимость воспитательной функции леса; CW_{17} – стоимость эстетической функции леса.

Стоимость наследования находится по формуле:

$$BV = BUV + EUV,$$

где BUV – стоимость использования наследия; EUV – стоимость существования наследия.

Таким образом, общая экономическая ценность леса как единой экосистемы может быть выражена формулой:

$$TEV = \sum_{i=1}^y CTP_i + \sum_{i=y+1}^p CTA_i + \sum_{f=1}^o CNT_f + \sum_{g=1}^x CW_g + FI + FU + BUV + EUV$$

Оценка уровня депонирования углерода экосистемой NEPik при помощи регрессионных моделей фитомассы насаждений (Усольцев, 2001; Воронов и др., 2012). В разработанных моделях совмещены базы данных о фитомассе и первичной продукции, полученные на пробных площадях с материалами Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) для территории Уральского федерального округа (10 территориальных образований). Модели позволяют рассчитывать общий углеродный пул фитомассы лесов и годовое депонирование углерода в фитомассе на уровне федерального округа, административного образования, лесхоза, лесничества, квартала или выдела.

Модели, описывающие зависимость фитомассы в абсолютно сухом состоянии (P_i , т/га) каждой фракции (стволы, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы, куда включены подлесок, подрост и напочвенный покров – соответственно P_{st} , P_{br} , P_f , P_r , P_u , т/га) от

возраста (A , лет) и запаса (M , м³/га) насаждения, рассчитаны для каждой древесной породы отдельно (Воронов и др., 2012).

Общий вид модели:

$$\ln Pi \text{ или } \ln(Pi/M) = f[\ln A, (\ln A)^2, \ln M, \ln(Pbr/M), \ln(Pf/M), Pst].$$

Далее приводятся характеристики этой по основным лесообразующим породам. В качестве примера приведена характеристика модели для лиственницы (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика уравнений фитомассы для лиственничных насаждений

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные					R ²	SE
	a ₀	a ₁ (lnA)	a ₂ (lnA) ²	a ₃ (lnM)	a ₄ ln(Pbr/M)		
lnPst, т/га	-0,8145	0,0396	-	0,9956	-	0,992	0,106
ln(Pbr/M), т/м ³	1,4611	-1,7473	0,1777	-	-	0,288	0,236
ln(Pf/M), т/м ³	-0,9048	-0,3814	-	-	0,5662	0,519	0,367
lnPr, т/га	-1,2790	0,3425	-	0,5960	-	0,856	0,504
ln(Pu), т/га	1,7538	0,6194	-	-0,8091	-	0,501	0,762

Модели, описывающие зависимость прироста фитомассы каждой фракции (Z_i) от возраста (A) и запаса (M) имеют вид:

$$\ln Zi = f(\ln A, \ln M, \ln Pf, \ln Pr, \ln Pu).$$

Характеристика модели для лиственницы приведена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика уравнений прироста фитомассы для лиственничных насаждений

Зависимые переменные	Константы и независимые переменные						R ²	SE
	a ₀	a ₁ (lnA)	a ₂ (lnM)	a ₃ (lnPf)	a ₄ (lnPr)	a ₅ (lnPu)		
ln(Zst)	0,5296	-0,6384	0,5172	0,4014	-	-	0,878	0,475
ln(Zbr)	-0,2296	-0,4553	-	1,7087	-	-	0,948	0,436
ln(Zf)	-0,0252	-0,6206	0,6229	-	-	-	0,647	0,508
ln(Zr)	-8,0556	0,8931	0,7663	-	-	-	0,769	0,786
ln(Zu)	-5,0276	-	-	-	-	1,7243	0,939	0,376

Приведенные регрессионные модели реализованы в рамках автоматизированной системы (Воронов и др., 2009; Usoltsev et al, 2011). Была автоматизирована процедура расчета коэффициентов для моделей фитомассы и ее прироста (зарегистрирована в качестве программы на языке Natural «Автоматизированный расчет значений коэффициентов регрессионных уравнений») (Свидетельство № 2010615266). Для этого согласно способу Чебышева множественное корреляционное уравнение приводится к виду (Воронов и др., 2011):

$$r_{1(j_2)(j_3)(j_4)\dots} = r_{12}\varepsilon_{2(j_2)} + \begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} \\ 1 & r_{23} \\ r_{32} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \varepsilon_{2(j_2)} & \varepsilon_{3(j_3)} \\ 1 & r_{23} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & 1 & r_{34} \\ r_{42} & r_{43} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \varepsilon_{2(j_2)} & \varepsilon_{3(j_3)} & \varepsilon_{4(j_4)} \\ 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & 1 & r_{34} \end{vmatrix} + \dots$$

с основной ошибкой

$$\frac{\sigma_{1,234...}^2}{\sigma_1^2} = 1 - r_{12}^2 - \frac{\begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} \\ 1 & r_{23} \end{vmatrix}^2}{\begin{vmatrix} 1 & r_{23} \\ r_{32} & 1 \end{vmatrix}} - \frac{\begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & 1 & r_{34} \end{vmatrix}^2}{\begin{vmatrix} 1 & r_{23} \\ r_{32} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & 1 & r_{34} \\ r_{42} & r_{43} & 1 \end{vmatrix}} - \dots$$

Далее выводятся формулы для расчета коэффициентов регрессионных уравнений, выражающих зависимость фитомассы и прироста фитомассы от независимых переменных (Воронов и др., 2011).

В результате выполненной работы получено 13 свидетельств о государственной регистрации интеллектуальной собственности, на базе которых создано и функционирует МИП «Вирт Проект» (зарегистрировано в БД хозяйствующих субъектов Минобрнауки РФ №2097 от 26.06.2013). В 2014 году интеллектуальные продукты МИП «Вирт Проект» реализованы шестью предприятиями Уральского региона. Кроме того, результаты НИР могут использоваться в следующих областях:

1. Информационная система оценки и анализа депонируемого углерода для лесного комплекса Урала и РФ.
2. Внедрение новых алгоритмов и программ в форме виртуальных тренажеров в среде динамически развивающихся сайтов для подготовки управляющих.
3. Определение величины экологического ущерба от хозяйственной деятельности по динамике депонирования углерода.
4. Образовательные программы обучения магистров по направлениям "Менеджмент: профиль-информационный менеджмент", "Прикладная информатика", "Менеджмент" и "Бизнес информатика".

Список использованной литературы

Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П. Алгоритм автоматического расчета значений коэффициентов регрессионных уравнений оценки углерододепонирующей способности лесов при обновлении справочных данных // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12. С. 89-95 (http://www.rae.ru/fs/pdf/2011/2011_12_1.pdf).

Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П., Бараковских Е.В. Система пространственного анализа депонирования углерода лесами в среде СУБД ADABAS // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2009. Вып. 186. С. 188-195.

Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П. Исследование методов и разработка информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода в среде Natural: Монография, электронное издание. 2 изд. испр. и доп. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2012. 192 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3301>).

Воронов М.П., Часовских В.П. Концепция управления лесными ресурсами и планирования хозяйственной деятельности на уровне муниципальных образований и отдельных лесопромышленных предприятий на основе оценок биопродуктивности и общей экономической стоимости лесных благ // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10. (Ч.15). С. 3289-3293.

Воронов М.П., Часовских В.П. Отложенная альтернатива и стоимость существования как составляющие общей экономической стоимости лесной экосистемы // *Экопотенциал*, 2013. № 3-4. С. 36-42.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3280>).

Часовских В.П., Воронов М.П. Исследование системных связей и закономерностей функционирования корпоративной информационной системы лесопромышленного предприятия в среде ADABAS и Natural: Монография, электронное издание. 2 изд. испр. и доп. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2012. 180 с.

Usoltsev V.A., Voronov M.P., Chasovskikh V.P. Net Primary Production of Ural Forests: Methods and Results of Automated Estimating // Russian Journal of Ecology. 2011. Vol. 42. No. 5. P. 362–370 (<http://link.springer.com/article/10.1134%2FS1067413611050122#page-1>).

Рецензент статьи: ведущий научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, доктор биологических наук, профессор Е.В. Колтунов.