

# **Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений**

**И.А. Уваров, С.А. Барталев**

*Институт космических исследований РАН,*

*117997 Москва, Профсоюзная 84/32*

*E-mail: uvarov@smis.iki.rssi.ru; bartalev@smis.iki.rssi.ru*

Эффективное решение задач распознавания типов земного покрова на основе спутниковых изображений для картографирования больших территорий сопряжено с необходимостью использования методов классификации, учитывающих пространственную изменчивость значений признаков одноименных объектов. К числу таких методов относится разработанный в ИКИ РАН алгоритм обучаемой классификации LAGMA, предусматривающий построение локализованных сигнатур различных типов земного покрова и их локально-адаптивную классификацию по спутниковым данным. Реализация алгоритма в виде специализированного программного комплекса обеспечивает возможность автоматизированного построения и регулярного обновления карт наземных экосистем большого пространственного охвата, в частности, уровня крупных стран, континентов или планеты в целом. В работе описан разработанный алгоритм, а также основные функциональные возможности, особенности технической реализации и использования программного комплекса.

**Ключевые слова:** данные спутниковых наблюдений, распознавание типов земного покрова, обучаемая классификация, адаптивные алгоритмы, распределенные вычисления, программный комплекс

## **Введение**

Спутниковое картографирование земного покрова больших территорий, частности, на национальном, континентальном и глобальном уровнях пространственного охвата, как самостоятельное научно-прикладное направление, получившее развитие в последние годы [1-5], требует разработки соответствующего алгоритмического и программного обеспечения, обеспечивающего высокую степень автоматизации и учитывающего специфические особенности обработки данных дистанционного зондирования для решения данной задачи.

Высокий уровень разнообразия типов земного покрова и пространственной изменчивости их физических (в частности, спектрально-отражательных) характеристик при спутниковом картографировании наземных экосистем больших территорий приводят к необходимости учета локальных вариаций признаков распознавания и возможностей семантической дифференциации объектов.

Разработанный в ИКИ РАН для решения задач глобального картографирования наземных экосистем метод распознавания типов земного покрова предусматривает формирование и итеративное улучшение базы опорных данных, вычисление на ее основе локализованных признаковых сигнатур классов и локально-адаптивную обучаемую классификацию спутниковых изображений [6]. Необходимость максимально автоматизированной и унифицированной обработки больших массивов регулярно обновляемых спутниковых данных для решения задач глобального картографирования наземных экосистем потребо-

вала разработки специализированного программного комплекса, реализующего основные процедуры для использования указанного выше метода. Настоящая работа содержит описание предложенного метода, основных функциональных возможностей и особенностей технической реализации разработанного программного комплекса.

### **Алгоритм локально-адаптивной обучаемой классификации**

Использование методов обучаемой классификации, позволяющих выполнять отнесение к одному из классов некоторого множества объектов, заданных своими описаниями в выбранном пространстве признаков, в общем случае предполагают выполнение следующей последовательности логических шагов:

- построение статистических описаний (сигнатур) классов в пространстве заданных признаков на основе репрезентативной выборки характерных эталонов;
- классификация объектов на основе значений их признаков и полученных описаний классов. [7, с. 140]

Распознавание типов земного покрова по данным спутниковых наблюдений основано, как правило, на использовании в качестве признаков значений спектральной яркости объектов (или полученных на их основе различных производных индексов). Используемый в данной работе статистический подход к классификации исходит из предположения нормального распределения значений признаков, оценки параметров которого формируют сигнатуры классов. Так, сигнатура каждого  $k$ -го класса, включает в себя параметры вектора средних значений  $U_k$  и ковариационной матрицы  $\Sigma_k$  признаков.

В основу алгоритма локально-адаптивной классификации положен подход, предполагающий на первом этапе формирование для рассматриваемой территории пространственного распределения спектральных сигнатур на основе репрезентативной совокупности эталонных объектов (обучающей выборки) с известной принадлежностью к одному из классов заданного множества. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1. В качестве источников данных для формирования обучающей выборки наиболее часто выступают существующие тематические карты, данные наземных обследований, результаты визуальной интерпретации спутниковых изображений, знания экспертов.

Пространственное распределение локализованных сигнатур описывается заданием их значений в узлах  $G(p; q)$  регулярной прямоугольной сети с заданным шагом  $d$ , где  $p$  и  $q$  – порядковые номера узлов по осям  $x$  и  $y$  соответственно (рис. 2). Обучение классификатора, включающее в себя два описанных ниже логических этапа, направлено на оценку в узлах  $G(p; q)$  параметров локализованных сигнатур  $U_k(p; q)$  и  $\Sigma_k(p; q)$  для каждого  $k$ -го класса.

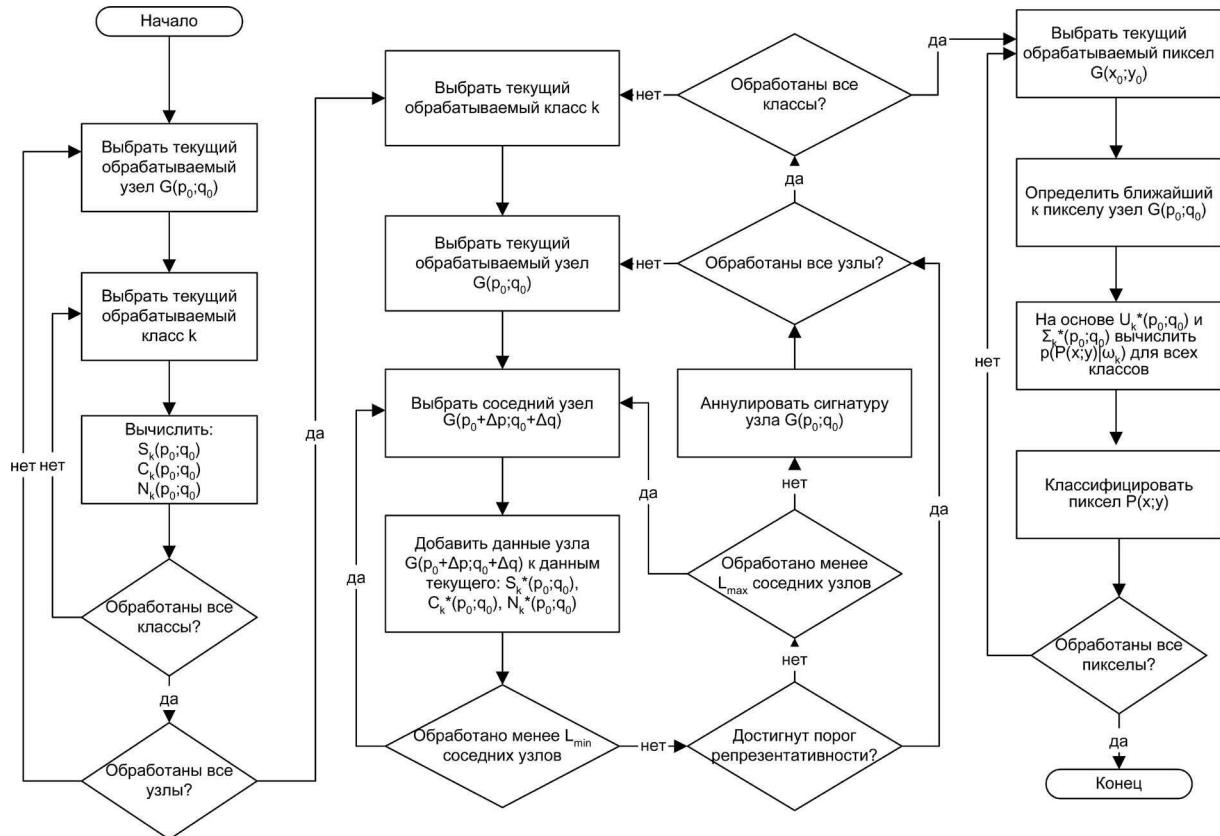


Рис. 1. Блок-схема алгоритма локально-адаптивной классификации

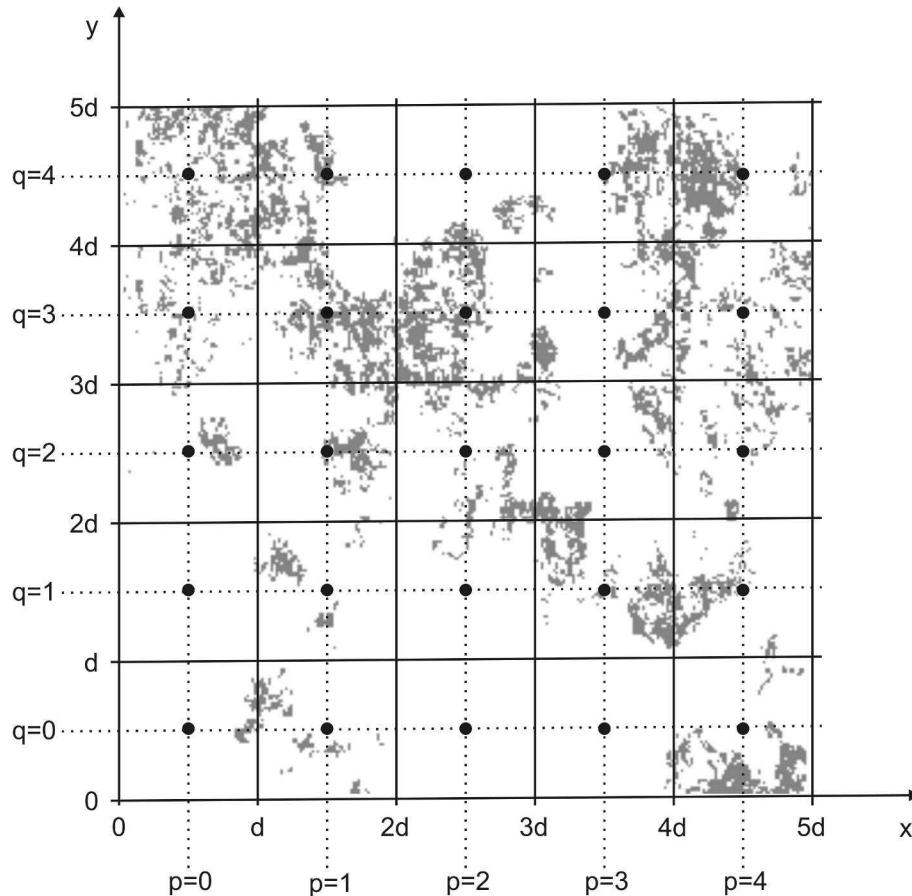


Рис. 2. Локализация сингнатур классов

Первоначально для каждого узла  $G(p; q)$  на основе расположенных в границах ближайшей клетки эталонных пикселов вычисляются следующие величины:

$S_k^i(p; q)$  – сумма значений  $i$ -го признака  $k$ -го класса;

$C_k^{i,j}(p; q)$  – сумма произведений значений  $i$ -го и  $j$ -го признаков  $k$ -го класса;

$N_k(p; q)$  – количество эталонных пикселов  $k$ -го класса.

Указанные величины используются для оценки элементов  $Cov_k^{i,j}(p; q)$  ковариационной матрицы  $\Sigma_k(p; q)$  на основе следующего выражения:

$$Cov_k^{i,j}(p; q) = \frac{C_k^{i,j}(p; q)}{N_k(p; q)} - \frac{S_k^i(p; q)}{N_k(p; q)} \frac{S_k^j(p; q)}{N_k(p; q)} \quad (1)$$

Оценка элементов  $Cov_k^{i,j}(p; q)$  ковариационной матрицы и средних значений признаков на основе  $S_k^i(p; q)$  и  $N_k(p; q)$  позволяет получить параметры сигнатур  $U_k(p; q)$  и  $\Sigma_k(p; q)$ .

Как видно из рисунка 2, обучающая выборка эталонных пикселов, созданная на основе тематической карты, имеет пространственно неравномерное распределение. При этом в случае отсутствия эталонных пикселов  $k$ -го класса в окрестности узла  $G(p_0; q_0)$  вычисление параметров  $U_k(p_0; q_0)$  и  $\Sigma_k(p_0; q_0)$  оказывается невозможным. Кроме того, при малых значениях  $N_k(p_0; q_0)$  возрастает влияние случайных ошибок в обучающей выборке. Для учета этого фактора метод предусматривает задание порога репрезентативности  $T$ , характеризующего минимально допустимое количество эталонных пикселов для оценки локальных сигнатур классов. Это приводит к появлению узлов не обеспеченных значениями параметров сигнатур некоторых классов и, как следствие, к необходимости проведения второго этапа обучения локальноадаптивного классификатора.

На втором этапе для каждого не преодолевшего порог репрезентативности ( $N_k(p_0; q_0) < T$ ) узла  $G(p_0; q_0)$  проводится обработка данных соседних клеток. Количество используемых соседних клеток зависит от величины  $T$ , числа эталонных пикселов в клетке  $N_k(p_0; q_0)$  и соседних клетках  $N_k(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$ . Кроме того, методом предусмотрено задание параметров  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$ , ограничивающих число используемых соседних клеток снизу и сверху соответственно. Число используемых соседних клеток итеративно увеличивается, начиная с  $L_{\min}$  до величины, соответствующей достижению порога репрезентативности  $T$ . Если порог  $T$  не был преодолен при достижении числа ближайших клеток значения  $L_{\max}$ , то сигнтура узла  $G(p_0; q_0)$  для класса  $k$  считается несуществующей.

Расширение анализируемой для оценки параметров локальной сигнатуры класса окрестности осуществляется дискретно путем последовательного включения соседних клеток, находящихся на одинаковом удалении от узла  $G(p_0; q_0)$ , и обобщения полученных на первом этапе обучения величин  $S_k^i(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$ ,  $C_k^{i,j}(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$  и  $N_k(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$ . При этом новые характеристики узла  $S_k^*(p_0; q_0)$ ,  $C_k^{i,j}*(p_0; q_0)$  и  $N_k^*(p_0; q_0)$  вычисляются как суммы соответствующих величин, полученных для соседних узлов на первом этапе обучения.

По результатам второго этапа обучения, для класса  $k$  в узлах, для которых справедливо выражение  $N_k^*(p; q) \geq T$ , определяются с использованием выражения аналогичного (1) параметры сигнатур  $U_k^*(p; q)$  и  $\Sigma_k^*(p; q)$  для последующей обучаемой классификации.

В основу алгоритма локально-адаптивной классификации могут быть положены различные решающие правила классификации, такие как, например, методы максимального правдоподобия, минимального расстояния или параллелепипеда [8, с. 152]. К настоящему времени в составе описанного ниже программного комплекса распознавания типов земного покрова реализован и прошел апробацию алгоритм классификации, основанный на использовании метода максимального правдоподобия.

В соответствии с решающим правилом максимума правдоподобия, пиксел  $P(x; y)$  относится к множеству  $\omega_l$  пикселов класса  $l$  в том случае, если для всех  $k=1, 2\dots m$  выполняется условие:

$$p(\omega_l)p(P(x; y) | \omega_l) \geq p(\omega_k)p(P(x; y) | \omega_k), \quad (2)$$

где:  $p(\omega_l)$ ,  $p(\omega_k)$  – априорные вероятности классов  $l$  и  $k$ ;

$p(P(x; y) | \omega_l)$ ,  $p(P(x; y) | \omega_k)$  – плотности вероятности отнесения пикселя  $P(x; y)$  к множеству пикселов класса  $l$  и множеству пикселов класса  $k$ .

В свою очередь, плотность вероятности определяется по формуле:

$$p(P(x; y) | \omega_k) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(B(x; y) - U_k^*(p; q))^T \Sigma_k^*(p; q)^{-1}(B(x; y) - U_k^*(p; q))\right)}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_k^*(p; q)|^{1/2}}, \quad (3)$$

где:  $B(x; y)$  – вектор признаков пикселя  $P(x; y)$ ;

$n$  – число признаков.

При классификации используются параметры  $U_k^*(p; q)$  и  $\Sigma_k^*(p; q)$  локализованных сигнатур, вычисленных на втором этапе обучения. Для классификации пикселя  $P(x; y)$  ис-

пользуются сигнатуры ближайшего узла  $G(p; q)$ , порядковые номера которого в строках и столбцах регулярной сетки с шагом  $d$  определяются по формулам  $p = x / d$  и  $q = y / d$ .

Наряду с сигнатурами, характеризующими локализованные значения признаков классов, при классификации используются априорные вероятности, полученные на основе данных об ареалах распространения различных типов земного покрова в пределах рассматриваемой территории. В решающем правиле (2) априорная вероятность класса используется в качестве коэффициента, определяемого в виде дробной величины в диапазоне от 0 до 1 для каждого класса и каждого пикселя территории. Априорные вероятности могут быть получены в результате обобщения обучающей выборки таким образом, что в окрестности эталонных пикселов заданного класса ее значения максимальны и снижаются по эмпирически подобранным правилам по мере удаления.

### **Функциональные возможности программного комплекса LAGMA**

Отсутствие программного обеспечения, позволяющего выполнять распознавание по спутниковым данным типов земного покрова на основе описанного выше алгоритма локально-адаптивной обучаемой классификации, сделало необходимой разработку специализированного программного комплекса.

Разработанный комплекс LAGMA (от английского Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) состоит из программных модулей, выполняющих вычислительные процедуры, необходимые для использования метода распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной классификации спутниковых изображений. Модули предназначены для запуска в режиме командной строки под управлением ОС Linux. Такое устройство программного комплекса упрощает указание необходимых параметров работы, а также автоматизированный запуск модулей.

*Модули вычисления локализованных сигнатур.* В соответствии с разработанным алгоритмом, вычисление локализованных сигнатур осуществляется в два этапа, каждый из которых реализован в виде отдельного модуля. Входными данными на первом этапе является обучающая выборка, представляющая собой растровый тематический слой для картографируемой территории, а также спутниковые изображения или производные признаки распознавания, а на втором – данные, полученные на первом этапе. Входными параметрами являются: на первом этапе – шаг регулярной сетки, на втором – минимальный объем обучающей выборки, минимальная и максимальная площадь сбора данных. Кроме того, для реализации возможности распараллеливания обработки, предусмотрена обработка заданного участка изображения или заданного класса обучающей выборки.

*Модуль локально-адаптивной классификации.* Модуль использует в качестве входных данных локализованные сигнатуры, спутниковые изображения и априорные вероятности встречаемости типов земного покрова. В качестве параметра возможно задание границ участка классификации.

*Модуль поиска различий между версиями опорных сигнатур.* Сравнение различных версий опорных сигнатур позволяет выявить перечень узлов регулярной сетки, для которых изменились обучающие данные и, таким образом, определить участки, требующие повторной классификации.

*Модуль гистограммной фильтрации.* Модуль применяется для поиска и исключения возможных ошибок в обучающей выборке. В основе работы модуля лежит построение многомерных гистограмм спектральных яркостей классов, разграничение областей в пространстве признаков между классами и обнаружение в обучающей выборке предположительно ошибочных пикселов.

*Модуль моделирования спектральных смесей.* При наличии в обучающей выборке эталонов двух однородных классов возможен автоматический поиск эталонов переходных классов, являющихся их спектральными смесями в различных соотношениях. Для этого по сигнатурам однородных классов определяются границы допустимых значений яркостей переходных классов, и осуществляется поиск пикселов изображения, удовлетворяющих этому условию. Дополнительно задается ареал возможного распространения переходных классов.

*Вспомогательные модули.* Функциональные возможности, реализованные во вспомогательных модулях, включают:

- слияние в один слой результатов обработки данных на разных компьютерах;
- интерактивный просмотр численных значений сигнатур;
- преобразование локализованных сигнатур в изображения с глубиной цвета 16 бит на канал для просмотра в ГИС-пакетах;
- визуализацию пикселов классифицированного изображения цветом, соответствующим средним значениям признаков распознавания класса в локализованных сигнтурах.

## **Особенности реализации программного комплекса LAGMA**

Программные модули написаны на языке C++ и скомпилированы с помощью GNU C Compiler. Уникальность структуры данных, содержащихся в локализованных сигнтурах, большой размер обрабатываемых изображений, а также потребность в высокой производительности обусловили необходимость разработки специализированной библиотеки доступа к данным, используемой в разработанных программах. Библиотека реализована

в виде набора классов на языке C++, обеспечивающих обращение к рассмотренным далее типам объектов.

*Слой изображения* хранится на диске в виде пары файлов: простого бинарного файла данных и текстового файла метаданных. Метаданные включают размер файла по ширине и высоте, число бит на пиксель и ссылку на бинарный файл данных. Реализована поддержка слоев изображений с целочисленными пикселями глубиной 8, 16, 32 и 64 бита.

Ориентированность на задачи глобального картографирования сопряжена с необходимостью обработки изображений, превышающих по размеру объем оперативной памяти компьютера. Вспомогательный объект «диспетчер кэша» осуществляет управление выделением оперативной памяти для объектов типа «слой изображения», загрузки данных отдельными блоками заданного размера, мониторинг востребованности загруженных блоков и выгрузку неиспользуемых блоков с освобождением объема памяти для загрузки новых блоков.

*Сигнатура* представляет собой сложный объект, содержащий для всех типов земного покрова локализованные параметры  $S_k^i(p; q)$ ,  $C_k^{i,j}(p; q)$  и  $N_k(p; q)$ . Для представления указанных данных сигнатур включает в себя одномерные, двумерные и трехмерные массивы объектов типа «слой изображения».

Кроме прямого доступа к данным слоев изображений разработанная библиотека классов обеспечивает интерфейс для вычисления произвольных характеристик в рамках скользящего окна. Класс «скользящее окно» спроектирован при предположении, что размер окна достаточно велик, и повторное вычисление характеристик может занимать существенное время. Поскольку алгоритмы обработки изображений, как правило, работают построчно, наиболее вероятная последовательность запросов на обработку скользящего окна также будет характеризоваться поступательным изменением координат центра скользящего окна. Оптимизация вычислений характеристик в пределах скользящего окна основана на использовании предыдущей вычисленной величины, добавления данных, не учтенных в предыдущем положении окна, и вычитании данных, оставшихся за пределами окна при его следующем положении.

Класс «скользящее окно» может использоваться не только для вычисления локальных сумм или средних значений, но и любых других характеристик, обладающих свойством аддитивности или выражаемых через такие величины. Для реализации такой возможности достаточно определить методы добавления и изъятия пикселов из скользящего окна, соответствующим образом изменяющие вычисляемые величины.

Класс «*гистограмма*» наследует механизм работы со скользящим окном и реализует построение в памяти локализованных многомерных спектральных гистограмм типов земного покрова. Метод вычитания гистограмм используется для гистограммной фильтрации обучающей выборки.

Для реализации вычислений на основе операций с матрицами использована библиотека с открытым исходным кодом Newmat10 (<http://www.robertnz.net/nm10.htm>). В частности, данная объектная модель применяется при вычислении функции правдоподобия в модуле локально-адаптивной классификации.

### **Система управления распределенными вычислениями**

Решение задач глобального картографирования требует обработки больших объемов данных. В то же время, процесс разработки продукта картографирования связан с необходимостью многократно производить классификацию, экспертную оценку результатов и исправление ошибок. Данное обстоятельство делает особенно актуальным вопрос минимизации затрат времени на классификацию. В настоящей работе для этого одновременно применяются следующие подходы:

- частичная повторная классификация территории (участки, на которых обучающая выборка осталась без изменений, повторно не классифицируются);
- распределение вычислений между несколькими компьютерами;
- автоматическое управление вычислительными процессами (с момента подачи обучающих данных на вход до момента получения результатов классификации участие человека не требуется).

Разработанная система управления распределенными вычислениями предназначена для работы на нескольких компьютерах (обрабатчиках), оснащенных многоядерными процессорами. Полная последовательность необходимых для классификации действий описывается в виде списка задач трех уровней иерархии (рис. 3):

- задачи уровня вычислительного комплекса;
- задачи уровня обработчика;
- задачи уровня процессорного ядра.

К уровню вычислительного комплекса относятся задачи, требующие однократного выполнения, такие как выявление участков, требующих классификации, планирование вычислений, объединение результатов работы разных обработчиков. Эти задачи выполняются только на одном компьютере, несущем функцию главного обработчика. К уровню обработчика относятся вспомогательные задачи, имеющие отношение к каждому обработчику и вы-

исполняемые на каждом из них один раз. Они включают, в основном, задачи, связанные с приемом входных данных с главного обработчика и передачей результатов работы обратно. Задачи уровня процессорного ядра запускаются на обработчиках в нескольких экземплярах (в соответствии с количеством ядер) с целью полного использования процессорной мощности.

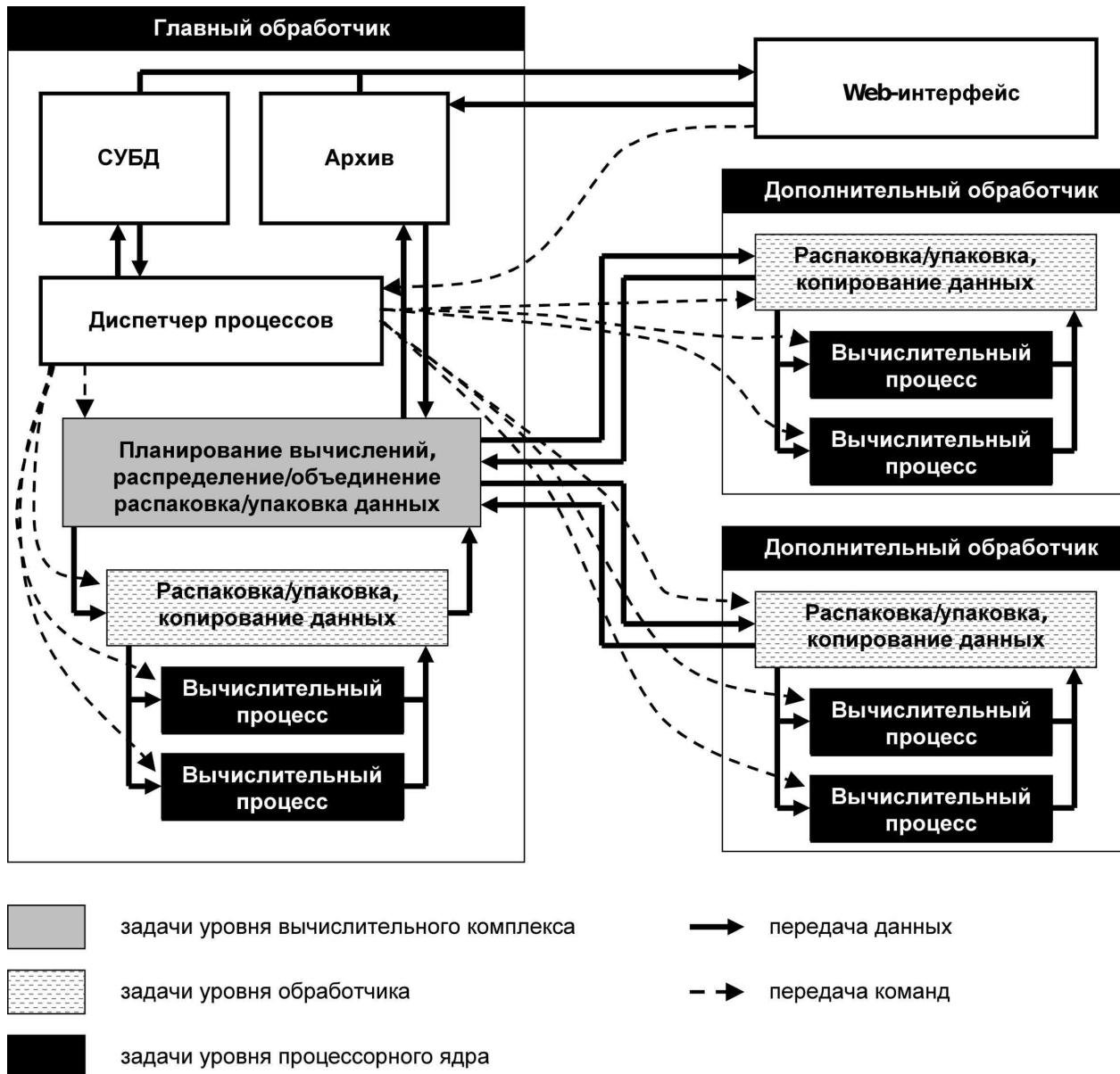


Рис. 3. Структура системы управления распределенными вычислениями

Все запускаемые процессы контролируются главным обработчиком, а команды передаются по протоколу SSH (secure shell). Диспетчер процессов написан на языке Perl и использует для хранения информации о задачах СУБД MySQL. Для управления комплексом, подачи входных данных и доступа к результатам классификации реализован web-интерфейс (рис. 4).

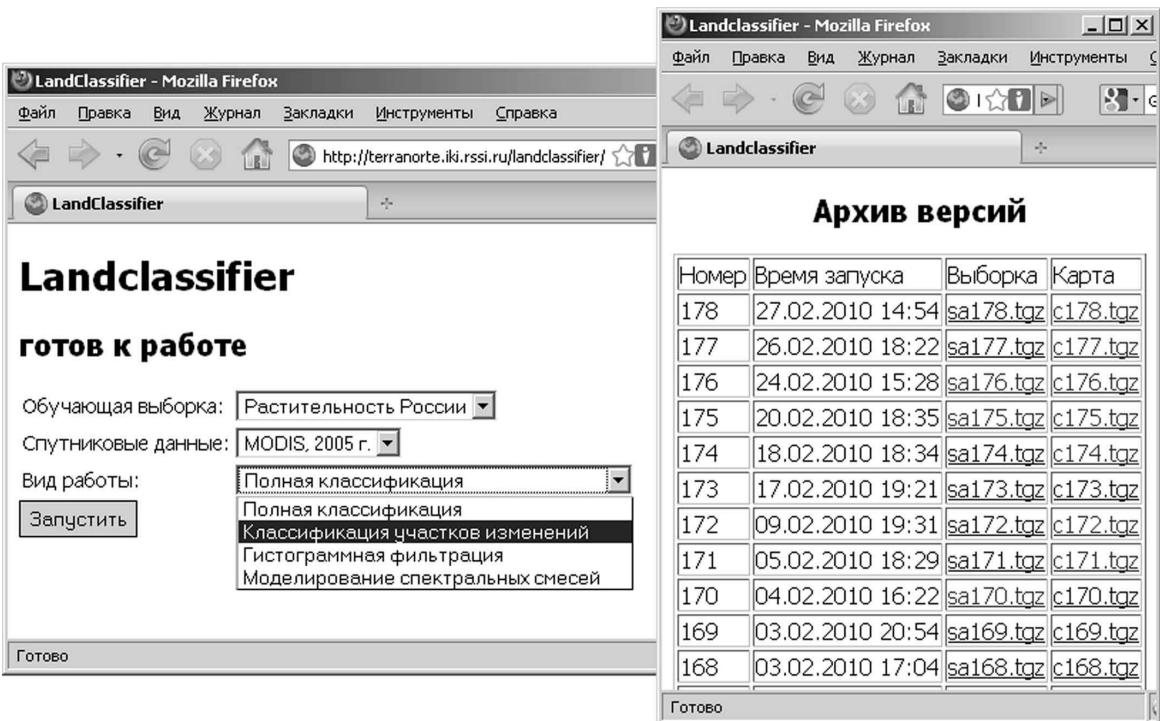


Рис. 4. Web-интерфейс управления вычислительным комплексом

## Литература

1. Loveland, T. R., Zhu, Z., Ohlen, D. O., Brown, J. F., Reed, B. C., and Yang, L. An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1999. Vol. 65. P. 1021 – 1032
2. Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J. R. G. and Sohlberg, R. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. P 1331-1365.
3. Bartholomé, E. and Belward, A. S. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth Observation data // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26. P. 1959-1977
4. Friedl, M. A., D. K. McIver, J. C. F. Hedges, X. Y. Zhang, D. Muchoney, A. H. Strahler, C. E. Woodcock, S. Gopal, A. Schneider, A. Cooper, A. Baccini, F. Gao and C. Schaaf . Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. P. 287-302.
5. Bartalev, S.A., A.S. Belward, D. V. Erchov, and A. S. Isaev. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. 2003 Vol. 24. P. 1977 – 1982

6. Уваров И.А., Барталев С.А. Разработка автоматического регионально-адаптивного алгоритма обучаемой классификации лесов по спутниковым данным MODIS // Аэрокосмические методы и ГИС-технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады IV международной конференции (Москва, 17-19 апреля 2007 г.). М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. С.145-146.
7. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др. Дистанционное зондирование: количественный подход // Пер. с англ. М.: Недра. 1983. 415 с.
8. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований // М.: Академия, 2004. 336 с.
9. Егоров В.А., Барталев С.А. Построение временных серий улучшенных композитных изображений по данным MODIS для мониторинга растительности // Четвертая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 13-17 ноября 2006. Сборник тезисов конференции. 2006. С.210.
10. Уваров И.А., Барталев С.А. Разработка обучаемого алгоритма классификации наземных экосистем по данным Terra-MODIS с использованием опорных тематических данных // Четвертая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 13-17 ноября 2006. Сборник тезисов конференции. 2006. С.238.
11. Уваров И.А., Барталев С.А., Егоров В.А., Медведева М.А. Возможности картографирования наземных экосистем Северной Евразии на основе данных MODIS с использованием метода локально-адаптивной обучаемой классификации // Шестая открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 10-14 ноября 2008. Тезисы докладов. 2008.

# **The algorithm and software suite for land cover types recognition based on locally-adaptive supervised classification of satellite imagery**

**I. Uvarov, S. Bartalev**

*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences*

*117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.*

*E-mail: uvarov@smis.iki.rssi.ru; bartalev@smis.iki.rssi.ru*

Efficient land cover types recognition using satellite imagery for the global and continental scale terrestrial ecosystems mapping strongly depends on availability of specialized classification techniques capable of taking objects' spectral characteristics spatial variability into account. The LAGMA supervised classification algorithm developed in RAS SRI meets the above requirements and is based on computing of local spectral signatures for various land cover types succeeded by the local-adaptive classification. The implementation of the method in a form of a specialized software suite provides the possibility of highly automated creation and update of land cover maps for extensive territories, such as large countries, continents or the whole world. The paper includes the functionality overview of the software suite and specifics of the software implementation and usage.

**Keywords:** satellite observation data, land cover types recognition, supervised classification, adaptive algorithms, distributed computing, software suite