

## Метод комплексного мониторинга лесов на основе оптических и радиолокационных данных ДЗЗ

М.В. Черемисин, В.Д. Бурков

*Московский государственный университет леса*

*Мытищи, Московская обл., Россия*

*E-mail: ch\_maksimus@mail.ru*

В настоящей статье анализируются текущие подходы глобального и регионального мониторинга лесов. Обсуждаются их положительные и отрицательные особенности. Предлагается метод мониторинга на основе дистанционно-ориентированных выделов (ДОВ) по оптическим и СВЧ-данным активного и пассивного зондирования. Приводится модель формирования ДОВ. Реализация метода апробируется на тестовом полигоне ОЛХ «Русский лес» с подробным описанием каждого этапа. Описывается вариант программной реализации метода и перспектива его использования.

**Ключевые слова:** мониторинг лесов, ДЗЗ, радиолокация, дистанционно-ориентированные выделы, государственная инвентаризация лесов, вегетационный индекс.

### Введение

В вопросах изучения лесов важную роль играют информационные мониторинговые системы глобального или регионального действия, основными отличиями которых являются масштаб и степень детальности предоставляемой информации. К современным системам глобального изучения лесов можно отнести:

- USGS – геологическая служба США, научная организация, распространяющая информацию о глобальных изменениях экосистем, состоянии природных ресурсов, доступ на сайт по ссылке: <http://www.usgs.gov>;
- Geoland 2 – инициатива Европейской комиссии по созданию глобальной системы мониторинга окружающей среды, доступ на сайт по ссылке: <http://www.geoland2.eu>;
- Global Land Cover Facility – информационный ресурс университета Мэриленд (США): доступ на сайт по ссылке, <http://glcf.umiacs.umd.edu>.

Общим для этих систем является наличие первичной спутниковой информации свободного пользования (MODIS, Landsat и др.) и производных тематических продуктов, характеризующих состояние и классификацию растительности. Для нужд РФ наибольший интерес представляют системы регионального мониторинга лесов, которые способны повысить уровень детальности и актуальности информации. На сегодня можно выделить два класса систем, которые проводят анализ лесов в масштабах всей территории РФ. Первый класс представлен ведомственной отраслевой системой государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) в сочетании с ежегодным дистанционным мониторингом лесопользования. Второй класс представлен сервисами спутникового мониторинга, которые создаются на базе веб-портальных решений по технологии GeoSMIS разработки ИКИ РАН («Вега», Terra Norte и др.). Данные подходы, обладая существенными различиями, ставят перед собой, на наш взгляд, весьма близкие задачи по эффективному исследованию лесных ресурсов страны.

## Мероприятия государственной инвентаризации лесов РФ

ГИЛ выполняется силами ФГУП «Рослесинфорг» (филиалы Центрлеспроект, Севзаплеспроект, Севлеспроект, Поволжский леспроект и др.) для получения актуальной информации о состоянии лесов и их биологической продуктивности, которая необходима для эффективного управления в лесной отрасли в масштабах крупных территорий (страны, региона) (Методические указания..., 2011). ГИЛ в части мониторинга лесопользования делится на полевые исследования и ДЗЗ. Оперативность полевых исследований ввиду трудоемкости является наиболее низкой и выполняется на основании предварительно проведенного ДЗЗ. На сегодняшний день поставка спутниковых данных осуществляется на оконтуренные территории (векторные слои), сделанные на основе планшетных данных полевых исследований силами ФГУП «Рослесинфорг».

Под дистанционным мониторингом использования лесов подразумевается ежегодное слежение за лесом для выявления случаев нарушения лесного законодательства на основе контурного и аналитического дешифрирования материалов ДЗЗ (визуально-экспертного анализа по синтезированным разновременным снимкам). Объектом ежегодных работ является лесничество или его часть. При мониторинге лесов применяются современные материалы аэрокосмических съемок с пространственным разрешением не хуже 5 м текущего года (года проведения ГИЛ). Съемка выполняется в вегетационный период, процент облачности в материалах аэрокосмических съемок не должен превышать 5% (Методические указания..., 2011).

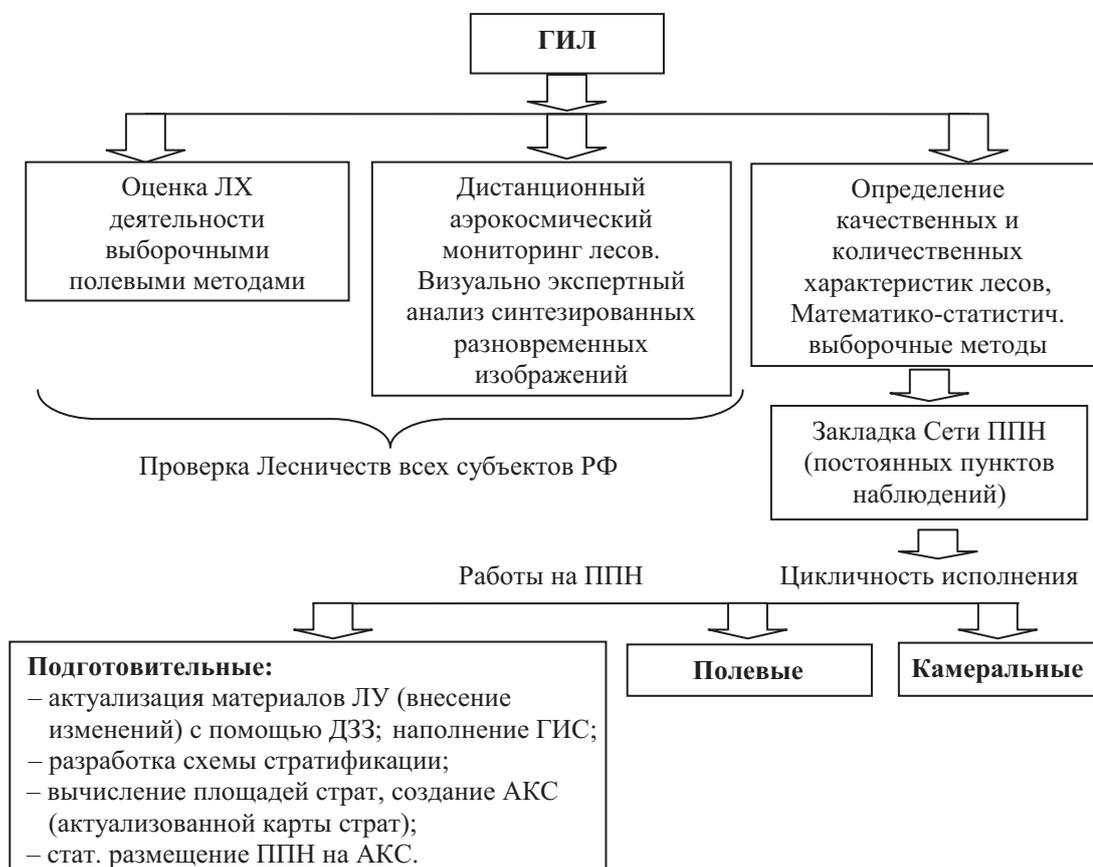


Рис. 1. Мониторинг лесов в рамках ГИЛ

В ГИЛ ДЗЗ применяется для актуализации прежней лесоустроительной информации (коррекция контуров выделов лесных территорий визуальным экспертным анализом синтезированных разновременных изображений), т.е. ДЗЗ применяется только для выявления повреждений (незаконных рубок, гарей, ветровалов) лесов. Общая схема мониторинга лесов в рамках ГИЛ представлена на *рис. 1*.

Периодичность повторных наблюдений на пробных площадях составляет 10–15 лет. Стратификация проводится на основе повыделных данных последнего лесоустройства путем группирования лесных насаждений (лесотаксационных выделов) в относительно однородные группы (лесные страты), в пределах которых дисперсия запасов древесины меньше, чем между стратами генеральной совокупности. Лесные страты формируются на основе следующих таксационных показателей: преобладающая порода, класс возраста, класс бонитета, относительная полнота. Практика применения информации высокодетальных космических снимков в лесоустройстве аналогична использованию аэрофотоснимков. Главными методами дешифрирования при актуализации таксационных показателей выступают экспертные визуальные оценки по прямым или косвенным признакам на снимках леса. Методы автоматического дешифрирования не распространены, и их применение в отрасли остается открытым на сегодня. К основным недостаткам системы можно отнести долготелый период повторных исследований качественных и количественных характеристик леса (раз в 10–15 лет); низкую степень автоматизации процедур обработки; большие временные и финансовые затраты сбора и обработки данных; низкую наглядность и прозрачность результатов мониторинга.

*Спутниковый сервис мониторинга растительности  
на примере системы «Вега»*

«Вега» – это web-сервис разработки ИКИ РАН, основанный на технологии GeoSMIS и предназначенный для анализа состояния растительности и ее оперативного мониторинга в течение всего сезона вегетации. Технология GeoSMIS является универсальной платформой построения интерфейсов для работы с пространственной информацией в системах дистанционного мониторинга. В основу сервиса «Вега» легли архивные спутниковые данные о состоянии растительности на территории России и соседних стран. По любому району этой территории в архивах имеются как оперативные данные, так и данные с начала XXI в. В качестве показателя состояния растительного покрова используются вегетационный индекс (NDVI) и характер его поведения в течение сезона вегетации в сравнении с другими сезонами. Для выбранных полей пользователь может получить временной ход вегетационного индекса NDVI в пределах выбранных объектов в течение вегетационного периода за 2000–2012 гг., информацию о развитии растительности в конкретной точке в различные годы, временной ход набора метеопараметров. Пользователь может также получить перечисленные виды информации, осредненные по региону в целом, или по административным районам, или же по отдельному объекту (Барталев и др., 2012). Доступ осуществляется через адрес в Интернете: <http://vega.smislab.ru/>. По этой же ссылке можно более подробно ознакомиться с принципами реализации системы.

К основным ограничениям системы можно отнести: однофакторный анализ растительности без использования других вегетационных индексов (ВИ); применение геопространственных данных только оптического диапазона длин волн.

Рассмотренные системы имеют постоянный тренд развития, в которых постепенно внедряются новые тематические продукты и методики обработки информации.

### **Метод мониторинга лесов на основе дистанционно-ориентированных выделов (ДОВ)**

Существует два основных подхода одновременного наращивания информативности систем ДЗЗ и при этом сокращения объемов обрабатываемой и хранимой информации на ГИС-серверах. Первый подход предполагает оптимизацию участвующих в мониторинге каналов ДЗЗ приборов, используя максимально информативные для конкретного объекта исследования. Второй подход основан на объектно-ориентированных принципах, при которых анализ и классификация изображений происходят не на уровне пикселей, а на уровне объектов, групп пикселей, объединенных на основе определенной совокупности критериев.

Для осуществления ускоренного мониторинга лесов с многофакторным анализом растительности предлагается использовать систему, которая дает пользователю сжатую, но в то же время максимально полезную информацию о лесе. Главные задачи, решаемые системой, формулируются исходя из описанных выше ограничений аналогичных систем. К этим задачам можно отнести:

- многофакторный анализ текущего состояния древесного полога с использованием нескольких видов ВИ и радиолокационных данных;
- оценка степени нарушения полога (измерение площадей гарей, вырубок);
- выявление критичных изменений леса относительно принятой шкалы состояния (стрессовость, усыхание, повреждение насекомыми);
- упрощенная web-интеграция результатов мониторинга.

Система мониторинга реализуется на основе модели формирования ДОВ, которая использует алгоритм кластерного анализа. Предлагаемый подход дает возможность максимально автоматизировать мониторинг лесов с сохранением приемлемого уровня детальности и актуальности информации.

#### *Модель формирования ДОВ*

Исходя из основного определения лесного выдела в лесоустроительных работах и учета принципов ДЗЗ, создаются специально адаптированные для космического мониторинга выделы на основе классификации полей значений ВИ, РЯТ (радиояростной температуры) и УЭПР (удельной эффективной поверхности рассеяния) лесного участка без участия эксперта в автоматическом режиме. Такие выделы предлагается именовать как

дистанционно-ориентированные выделы (ДОВ). ДОВ – это относительно однородные группы, в пределах которых общая изменчивость ВИ, РЯТ и УЭПР меньше чем в общей совокупности.

ВИ (вегетационный индекс) – показатель, рассчитываемый в результате операций с разными каналами оптического спектрального диапазона и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Некоторые ВИ имеют косвенное отношение к растительности, при этом затрагивая вопросы атмосферной коррекции, состава почвы и водной поверхности. Текущее состояние тематической обработки дистанционных данных о лесах во многом определяется разработкой и валидацией вегетационных индексов. Эффективность ВИ определяется особенностями отражения электромагнитных волн, пространственным и спектральным разрешением датчика. Индексы выведены, главным образом, эмпирически, применяются на каждом конкретном участке с определёнными особенностями. Известно более 150 видов различных ВИ, однако из опыта мониторинга лесов центрального региона РФ число ключевых и самых распространенных ВИ сокращается до 5–10.

Радиоизлучение земных покровов и атмосферы носит в СВЧ-диапазоне тепловой характер. Радиоволны в отличие от инфракрасной радиации и волн светового диапазона имеют возможность всепогодного использования при отсутствии видимости из-за облачности. Интенсивность радиотеплового излучения в системах пассивного СВЧ зондирования характеризуется радиояркостной температурой (РЯТ), или радиояркостью, которая определяется температурой нагрева и степенью черноты излучающего объекта. Яркость радиоизлучения, как и в оптическом диапазоне, представляет собой энергию излучения, проходящую через единичную площадку за единицу времени при изменении энергии в единичной полосе частот.

Основным количественным параметром при анализе радиолокационных изображений (активное СВЧ зондирование) является удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) каждого элемента изображения. Само ЭПР – это мера отражающей способности цели, рассчитываемая через отношения плотностей мощности радиолокационного сигнала, рассеянного целью в направлении приемника, и сигнала, облучающего цель, с учетом их векторных свойств. Определяется как площадь некоторой фиктивной поверхности, являющейся идеальным изотропным отражателем, который, будучи помещенным в точку расположения цели нормально по направлению облучения, создает в точке расположения РЛС ту же плотность потока мощности, что и реальная цель (Лагарьков, Погосян, 2003). Величина имеет размерность площади и измеряется обычно в квадратных метрах. УЭПР – это ЭПР единичной площади, или единичного объема распределенной цели, линейные размеры которой не укладываются внутрь элемента разрешения РЛС.

Обобщенно модель формирования ДОВ отражена на схеме *рис. 2*.

Первый этап создания ДОВ заключается в автоматизированном формировании полей доступных ВИ оптических данных, РЯТ при пассивном СВЧ зондировании и УЭПР радиолокационных данных исследуемой области леса.

Процесс объединения однородных групп полей признаков (ВИ, РЯТ, УЭПР) осуществляется на втором этапе с помощью алгоритма кластерного анализа ISODATA.

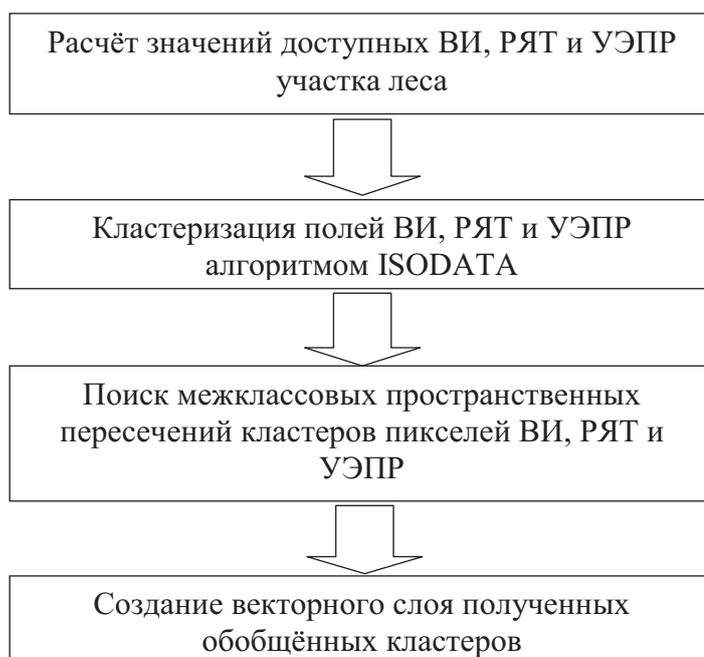


Рис. 2. Модель формирования ДОВ

На третьем этапе окончательно сформированные кластеры поля значений ВИ1 запоминаются для поиска пересечений с кластерами полей значений ВИ2, РЯТ и УЭП, которые формируются аналогично вышеописанной процедуре.

Наполняется таблица классов (табл. 1) признаков (ВИ, РЯТ, УЭП) для каждого пикселя снимка с поиском их совпадений (пересечений).

Таблица 1. Таблица классов формирующих признаков ДОВ

Пиксель (координата)	Класс ВИ1 (5)*	Класс ВИ2 (4)	...	Класс УЭП (4)	Класс РЯТ (4)	Пересечение
54°57'2.67"N, 37°33'26.26"E	2	4	.....	1	3	—
54°53'3.11"N, 37°33'28.46"E	1	1	.....	1	2	3
· · ·			.....			
54°53'3.11"N, 37°33'28.46"E	<b>2</b>	1	.....	<b>2</b>	1	<b>2</b>

\* В скобках обозначено общее число получившихся классов признака в результате кластеризации их значений.

Нормировка кластеров различных признаков (формирование общей ранговой шкалы классов) учитывается при непосредственном проведении алгоритма кластеризации ISODATA, однако эвристическое определение некоторых входных параметров алгоритма может привести к несовпадению итогового числа полученных классов. Пусть ВИ1 имеет все пять заданных класса, а признак ВИ2 – только три. В случае такого несовпадения предусмотрена дополнительная классификация. Кластеры с меньшим числом классов ВИ2 (3) проверяются на близость к классам большего ВИ1(5) по показателю дисперсии. Оценка близости выполняется на основании расчета минимального расстояния  $r$  (обычное Евклидово расстояние в пространстве

значений дисперсий каждого признака). Поочередно высчитываются разности дисперсий  $D$  по формуле 1, минимальное значение характеризует принадлежность искомого кластера признака ВИ2 к соответствующему классу признака ВИ1.

Одновременное совпадение большего числа классов признаков означает их пересечение в пространстве снимка с формированием ДОВ (рис. 3).

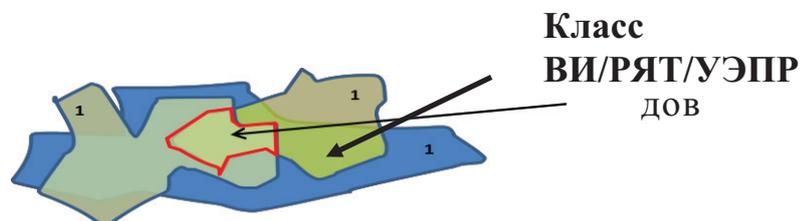


Рис. 3. Пространственное пересечение кластеров признаков

Формирование ДОВ может быть выполнено после поиска пространственных пересечений большего числа кластеров различных ВИ, однако в этом случае снижается возможность их пересечения для выделения общего участка. В случае отсутствия пространственных пересечений кластеров ДОВ формируется на основе приоритетного ВИ, который выбирается экспертом.

На заключительном этапе модели формирования ДОВ происходит автоматическая векторизация границ пересечений кластеров. Процесс состоит из двух основных этапов: оконтуривание закрашенных областей, векторное представление участков ДОВ.

Оконтуривание областей выполняется с помощью алгоритма «жука» (Абламейко, Лагуновский, 2000), суть которого состоит в отслеживании первой не нулевой точки объекта на исходном изображении. Затем выполняется движение вокруг этой точки в восьми направлениях окрестности по часовой стрелке. Первой анализируемой точкой является точка, с которой «жук» попал в центр окрестности. Движение по окрестности осуществляется до тех пор, пока не будет найдена новая «черная точка». Она принимается за центр окрестности, и процедура повторяется снова. Таким образом, осуществляется движение по контуру до тех пор, пока контур не замкнется, т.е. очередная точка не совпадет с первой точкой контура, с которой началось отслеживание. Затем выполняется поиск нового объекта по координатам, и отслеживание контура повторяется. Пиксели контура заносятся в массив с уникальной идентификацией полигона (ДОВ). Начиная с последнего пикселя контура ДОВ происходит поиск слева направо других заполненных пикселей с проверкой условия: не равен ли пиксель нулю. Если пиксель равен нулю, то поиск продолжается слева направо; иначе проверяется дополнительное условие о принадлежности заполненного пикселя уже сформированному массиву данных ДОВ. Если последнее условие не выполняется, т.е. пиксель не принадлежит ни одному массиву, то происходит аналогичное движение по окрестности; иначе проводится поиск других пикселей.

В заключение процедуры векторизации выполняется формирование векторной модели представления ДОВ. В нашем случае за основу была использована нетопологическая модель векторных данных, которая является разновидностью векторного представления линейных

и полигональных объектов с описанием их геометрии. Полигон при векторизации представляется набором пар координат, у которого первая и последняя точки совпадают. Точка – одна пара координат. Перевод графического изображения в векторную форму происходит при соотношении каждому графическому примитиву (точке, полигону) одной логической записи в базе, записанной как строки переменной длины пар координат. В результате получились полигоны, наделённые уникальными идентификаторами и состоящие из пар координат, соответствующих числу пикселей контура ДОВ, которые образуют его границу в избранной последовательности (например, по часовой стрелке).

### Формирования ДОВ на территорию ОЛХ «Русский лес»

Формирование ДОВ было выполнено на территорию лесного массива тестового полигона ОЛХ «Русский лес». Приведем пример формирования ДОВ участка ОЛХ «Русский лес» на основе двух вегетационных индексов NDVI и NDII по спутниковому снимку Landsat 7 ETM+ за июль 2010 г. и на основе УЭПР радиолокационных данных.

Шаг 1: Общий снимок подвергается управляемой классификации с участием эксперта или используем готовый векторный слой. Выделяется конкретный интересующий лесной массив.

Шаг 2: Проводится вычисление необходимых вегетационных индексов и поля значений УЭПР (рис. 4).

Шаг 3: Выполняется кластеризация полей значений ВИ и УЭПР алгоритмом ISODATA (рис. 5).

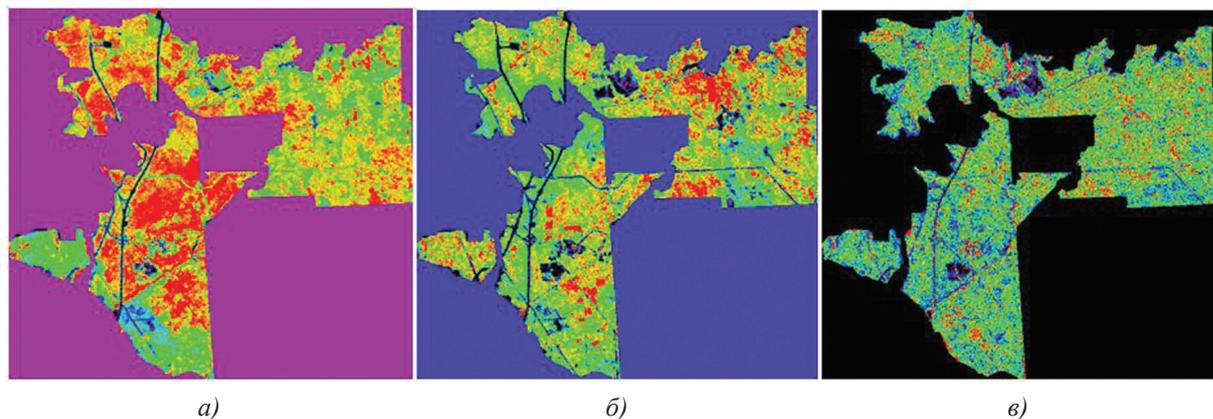


Рис. 4. Поле значений ВИ исследуемого участка леса:  
а) NDVI; б) NDII; в) УЭПР

При его реализации вводится ряд параметров, которые определяют итоговую картину сформированных ДОВ. Первоначально выбирается число итераций, равное 10, и количество классов от 5 до 10. На сегодня остается открытой задача поиска оптимальных значений параметров кластеризации и выработки критериев отбора наилучших вариантов ДОВ, поэтому в нашем случае она возложена на эксперта. При периодичности мониторинга необходимо соблюдать однообразие вводимых параметров.

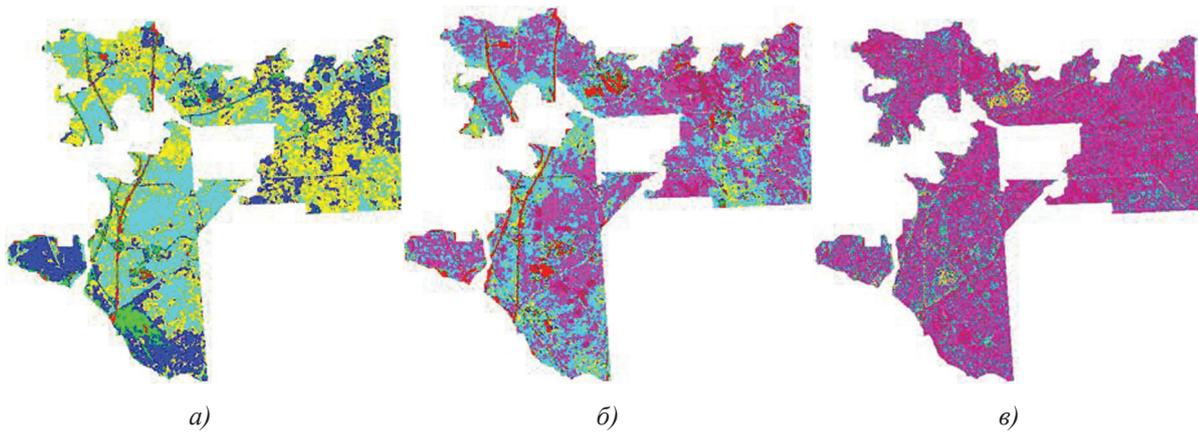


Рис. 5. Кластеризация полей ВИ:  
а) NDVI; б) NDII; в) УЭПП

Шаг 4: На этапе поиска межклассовых пространственных пересечений заполняется таблица. Общее число классов получилось равным 5. Пересекающиеся пиксели с выполненной на последнем шаге автоматической векторизацией представлены на рис. 6.

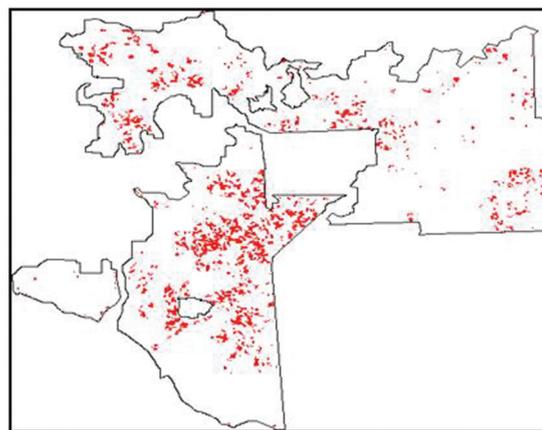


Рис. 6. Сформированные ДОВ лесного участка

#### Вариант программной реализации метода мониторинга на основе ДОВ

Сегодня известны различные программные продукты, выполняющие предварительную и тематическую обработку данных ДЗЗ с близкими показателями эффективности (ERDAS Imagine, ScanEx Image Processor, Photomod и др.). Успешная ценовая политика и динамичная интеграция с мировым лидером программных продуктов ГИС анализа – компанией ESRI (ArcGIS), укрепила обоснованность выбора программного пакета ENVI (Environment for Visualizing Images — среда для отображения снимков) разработки компании ITT Visual Information Solutions (США). Наличие среды программирования (IDL – Interactive Data Language) с интерактивными инструментами управления данными позволяет реализовать предложенный способ мониторинга лесов, как встроенный элемент ENVI (ENVI DOS). Основным шагом интеграции ENVI и ArcGIS стало появление серверного

программного продукта ENVI for ArcGIS Server. Это означает, что многочисленные пользователи продуктов ArcGIS имеют возможность использовать богатый набор инструментов обработки и анализа данных ДЗЗ от ENVI. Продукт позволяет выполнять публикацию инструментов ENVI на сервере, тем самым делая их доступными для всех пользователей внутренней и внешней сети. Инструменты ENVI при этом представляются как сервисы при подключении пользователей к серверу, на котором установлены ArcGIS Server и ENVI for ArcGIS Server (рис. 7).

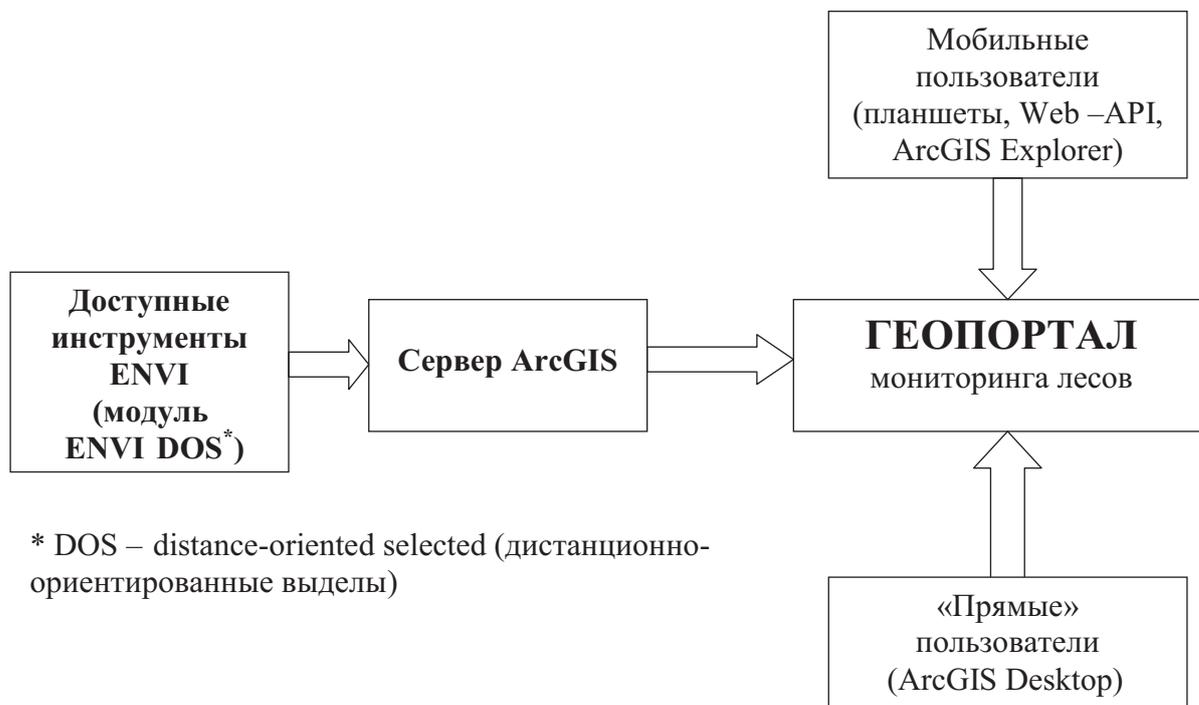


Рис. 7. Схема программной реализации глобального мониторинга лесов

Связка программных продуктов дает возможность создать геопортал по глобальному мониторингу лесов на основе ArcGIS Server и инструмента ENVI DOS. Через ArcGIS Desktop пользователи могут получить доступ к модулю, реализованному на сервере (при этом не требуется установка программы ENVI на локальные компьютеры). Мониторинг лесов с помощью ДОВ осуществляется на стороне сервера без использования ресурсов компьютеров пользователей.

Разработка инструмента ENVI DOS выполнялась на языке программирования IDL в одноименной среде. Была выбрана диалоговая модель взаимодействия с пользователем типа Wizard (рис. 8) аналогично существующим инструментам, в которых осуществляется последовательное выполнение операций / рекомендаций.

Процесс разбит на восемь этапов, последовательность всех операций описывается в стартовом окне инструмента (INTRODUCTION). Этапы снабжены комментариями, кратко поясним сущность каждого.

**Этап 1.** Открытие оптического и радарного снимка. Выбор места хранения результатов и выходного формата. Число читаемых форматов изображений различных приборов в программной среде многочисленно и постоянно пополняется.

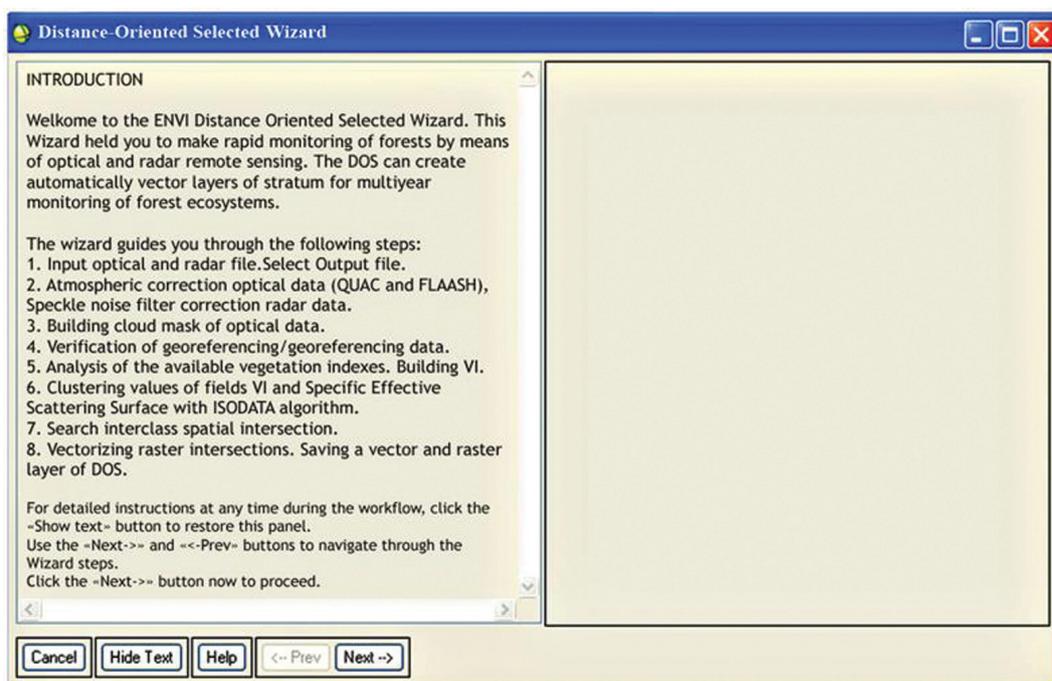


Рис. 8. Панель диалогового окна реализации инструмента формирования ДОВ

**Этап 2.** Атмосферная коррекция оптических данных встроенными инструментами QUAC или FLASH, на выбор пользователя. Если оптический сенсор входит в число шаблонных, то задача упрощается, иначе выполняется ряд пошаговых операций согласно требованию инструмента. Для радарных данных выполняется процедуры коррекции изображений с учетом калибровочных данных о сенсоре и фильтрация спекл-шумов набором доступных фильтров.

**Этап 3.** Построение маски облачности оптического изображения. Для исключения из анализа ярко выраженных не лесных участков необходимо выделить и исключить пиксели, характеризующие облачность. Эта процедура выполняется под контролем оператора, для некоторых типов данных (AVHRR, MODIS, Landsat 7 ETM+ и др.), где применяется межканальное преобразование с получением границ облачности и их последующей векторизацией.

**Этап 4.** Проверка условия географической привязки изображений, в случае ее отсутствия выполняется геопривязка изображений типовыми инструментами раздела MAP ENVI.

**Этап 5.** Анализ доступных ВИ по спектральному разрешению (числу каналов) оптического прибора. Выбор предпочтительных, построение поля значений ВИ.

**Этап 6.** Кластеризация полей выбранных ВИ и УЭПР алгоритмом ISODATA.

**Этап 7.** Поиск пространственных пересечений между классами полученных кластеров.

**Этап 8.** Автоматическая векторизация растровых пересечений, сохранение векторных и растровых слоев ДОВ с учетом даты формирования и вводимых параметров кластеризации.

## Заключение

Предложенный метод мониторинга может стать удобным инструментом при многолетнем ускоренном слежении за изменениями лесов РФ в рамках сформированных дистанционно-ориентированных выделов. Он может быть реализован в дополнение к уже существующим системам, снабдив их новыми возможностями предоставления полезной информации и расширив применение для нужд отрасли.

## Литература

1. *Абламейко С.В., Лагуновский Д.М.* Обработка изображений: технология, методы, применение: Учебное пособие. Мн.: Амалфея, 2000. 304 с.
2. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Лурия Е.А., Толпин В.А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
3. *Лагарьков А.Н., Погосян М.А.* Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестник Российской Академии Наук. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
4. Методические указания по проведению государственной инвентаризации лесов: Проект. Федеральное агентство лесного хозяйства, 2011.

## Method of integrated forest monitoring based on optical and radar remote sensing data

**M.V. Cheremisin<sup>1</sup>, V.D. Burkov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Moscow State Forest University  
E-mail: ch\_maksimus@mail.ru*

This article analyzes the current approaches of global and regional monitoring of forests. Their positive and negative features are discussed. Method of monitoring on the basis of a distance-oriented selected (DOS) for optical and microwave data of active and passive sensing are proposed. The model of DOS are performed. Implementation of the method being tested on the test range EF "Russian Forest" with a detailed description of each stage. The version of the software implementation of the method and the prospect of its use are described.

**Keywords:** forest monitoring, remote sensing, radar, distance-oriented selected, the state forest inventory, vegetation index.