

УДК 630*587.2:691.316

Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев,
Ю. А. Полевщикова, С. А. Незамаев, Е. Н. Демишева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ ДРЕВОСТОЕВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОТХОДАМИ СИЛИКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для оценки степени загрязнения лесных насаждений отходами силикатного производства в Республике Марий Эл использованы спутниковые снимки высокого разрешения ALOS и RapidEye. С целью повышения разделимости на спутниковых снимках классов лесного покрова, загрязненных известковой пылью, применен алгоритм линейной трансформации MNF (minimal noise fraction). Лучшие результаты неуправляемой классификации были получены для снимка RapidEye, на основе которого разработаны тематические карты загрязненных лесных насаждений. Точность результатов тематического картирования подтверждается критериями геостатистики.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; лесные насаждения; техногенное загрязнение территории; силикатное производство; спутниковые снимки; трансформация изображений.

Введение. Техногенное загрязнение территорий и производство вредных отходов может существенно влиять на окружающую среду и жизнь человека. Это может выражаться в различных последствиях – от нарушения жизнеспособности отдельных участков растительности и загрязнения водных ресурсов, до разрушительного эффекта на региональные экосистемы через загрязнение атмосферы. Долгосрочный наземный мониторинг воздействия техногенных загрязнений на окружающую среду считается дорогостоящим процессом, что приводит к повышению роли альтернативных вариантов мониторинга экосистем, к которым в последние годы относится дистанционное зондирование земли. Об этом также свидетельствует анализ отечественных и зарубежных научных публикаций.

В центральной части Исламской

Республики Иран было проведено

исследование влияния выбросов медного производства на повреждение растительного покрова с использованием разновременных данных спутника Landsat [1]. Данные дистанционного зондирования были использованы при оценке общей надземной биомассы городских лесов, которая в свою очередь в дальнейшем была использована для оценки замещения воздушных частиц в городской черте листовой пылью [2].

Регрессионный анализ показал высокую точность (до 85 %) при оценке воздействия загрязнения воздуха выхлопными газами (NO) автомобильного транспорта в эпидемиологических исследованиях [3]. В качестве одного из компонентов уравнений были использованы показатели зелени (greenness) и яркости (brightness) почв, полученные по данным дистанционного зондирования. Эти показатели имели

высокую корреляцию с данными концентрации газов NO_x вдоль автомобильных дорог.

Исследования, основанные на совмещении описательных статистик и кластерного анализа методом к-средних данных NDVI, показали, что нарушение растительного покрова хорошо прослеживается в сторону преобладающего направления ветров. Одной из современных причин нарушений (ухудшения состояния) растительного покрова во всем мире является загрязнение воздушного пространства. Высокая концентрация токсических соединений и других элементов наблюдается в почвах и растительности вблизи от металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий, а также химических комбинатов [4–7]. При этом в последние годы оценка воздействия этих процессов на растительный покров эффективно отслеживается при помощи данных дистанционного зондирования. Анализ мультиспектральных изображений и различные методы выявления изменений позволяют оценить процессы нарушения экосистем в исторической динамике и значительно сократить затраты на проведение полевых исследований [8].

Многочисленными исследованиями было выявлено, что стресс и снижение жизнеспособности растительности влияет на их спектральные характеристики, которые имеют тенденции снижения в ближней инфракрасной зоне спектра (NIR) и повышения в видимой зоне [9]. Для изучения состояния растительности обычно применяются различные вегетационные индексы, имеющие тесную корреляцию с содержанием хлорофилла, листовой поверхностью, фотосинтетической активностью и потоками углерода [10, 11]. Из всех вегетационных индексов наиболее широкое применение нашел нормализованный разностный индекс растительности NDVI [12–14].

Китайские ученые предложили биогеохимическую модель дистанционного

зондирования для изучения окружающей среды и природных ресурсов [15]. По данным радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) были определены временная изменчивость и пространственное распределение оптической глубины аэрозолей (Aerosol optical depth) между 2003 и 2008 гг. в китайской провинции Хубей [16]. На основе самоорганизующихся карт (Self-organizing maps) и линейных моделей в дальнейшем была проанализирована взаимосвязь между оптической глубиной аэрозолей, NDVI, рельефом местности и плотностью населения. Результаты свидетельствуют о том, что высокие показатели оптической глубины аэрозолей наблюдались в югоцентральной части Китая, которая характеризуется небольшими превышениями на местности, низкими показателями NDVI и высокой плотностью населения. При этом китайские ученые установили, что наибольшее влияние на оптическую глубину аэрозолей оказывает рельеф (превышения на местности). Другие исследователи считают, что на оптическую глубину аэрозолей также влияют климат и социально-экономическая активность в изучаемой местности [17, 18]. Однако спутниковые данные подвержены ошибкам в связи с калибровкой сенсоров, атмосферными шумами или влиянием атмосферных аэрозолей и облаков. В связи с этим для повышения точности исследований динамики фенологии растительности на спутниковых изображениях требуется подтверждение этих данных на основе постоянных и долгосрочных наземных работ [19, 20].

Ученые из университетов Йокохамы и Тсукубы [21], оценившие четыре вегетационных индекса и фенологическое состояние древесного полога хвойных лесов Японии, пришли к выводу о том, что при изучении сезонных изменений фотосинтетической производительности лесов более информативным является индекс GRVI (Вегетационный индекс соотношения зеленого и красного – green-red ratio

vegetation index). В изучаемых хвойных лесах Японии отражательные характеристики зеленого и красного каналов сильно зависят от изменений в пигментной составляющей кроны деревьев.

Канадские ученые провели оценку корреляции между водонепроницаемыми поверхностями (impervious surfaces) и соединениями хлоридов, возникающих при использовании соли для дорог [22]. Для этого они применили технику неуправляемой классификации на серии разновременных спутниковых снимков Landsat, что позволило определить точные площади на территории исследований. Данные по загрязненности территории хлоридами выявляли наземными работами. Исследования показали увеличение концентрации хлоридов в три раза на водонепроницаемых поверхностях между 1990 и 2005 гг., что также влияет на качество поверхностных вод.

В последние годы для изучения нарушений, происходящих в лесных насаждениях, были разработаны несколько методик по выявлению изменений (change detection) на основе разновременных изображений спутника Landsat [23– 27]. Эти алгоритмы демонстрируют высокую автоматизацию при дешифрировании изменений в лесах, а также меньшую чувствительность к помехам в результате регистрации изображений, сезонным эффектам и двулучевой функции отражательной способности (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF). Несмотря на то, что такие новые индексы, как лесной интегрированный Z-значения (Integrated Forest Z-score, IFZ) [28] и индекс нарушенности (Disturbance Index, DI) [29, 30] также могут снижать влияние на изображение, фенологию и BRDF путем их нормализации через ранее полученные полевые данные, они могут иметь проблемы при обработке данных, полученных в разные вегетационные сезоны, или расположенных в пределах разнородных площадей, на

которых произрастают хвойные и широколиственные леса [31].

Таким образом, технологии дистанционного зондирования могут обеспечить наземной оценке альтернативный и автоматический мониторинг за нарушением и гибелью растительности [32–34].

Целью работы была разработка и апробация методики идентификации площадей лесных насаждений, загрязненных отходами силикатного производства ЗАО «Марийский завод силикатного кирпича» (ЗАО «МЗСК»), по мультиспектральным изображениям высокого разрешения, для достижения которой решены следующие **задачи**:

- заложены тестовые участки в лесных насаждениях на территории, прилегающей к ЗАО «МЗСК», с описанием степени их загрязнения известковой пылью;

- проведено линейное трансформирование снимков высокого пространственного разрешения Alos и Rapid Eye по алгоритму MNF;

- разработана методика анализа мультиспектральных спутниковых снимков и тематического картирования для оценки площади загрязнения выбросами известковой пыли.

Техника эксперимента и методика исследований. Объектами исследования явились лесные насаждения, расположенные на сопредельной территории с ЗАО «МЗСК», являющегося одним из ведущих предприятий по производству строительных материалов в Республике Марий Эл с 1953 года. Производственная мощность предприятия составляет 100 млн. шт. кирпича и 20 тыс. м³ газосиликатных блоков в год. Продукция востребована всеми строительными организациями Республики Марий Эл. Большим спросом продукция завода также пользуется в других регионах России – Татарстане, Чувашии, Нижегородской, Кировской, Костромской, Московской областях. Между тем завод является одним

из загрязнителей атмосферы и приграничных лесных экосистем в Медведевском районе Республики Марий Эл [35]. Основным компонентом выбросов этого предприятия является оксид кальция (известь негашеная), пыль известняка и диоксида кремния [36].

Характеристика экспериментальных данных. Для исследования и тематического картирования загрязнённой местности использовались разновременные мультиспектральные спутниковые снимки высокого пространственного разрешения ALOS и RapidEye. Снимки прошли процедуру геометрической и радиометрической калибровки. Для формирования однородных изображений на изучаемую территорию для обоих снимков была проведена атмосферная коррекция в модуле FLAASH в программном комплексе ENVI-5.0. Оба снимка были приведены к единой системе координат (WGS84, zone 38N) (табл. 1).

Методика. Геопространственная привязка тестовых участков и трансект изучаемых объектов на спутниковых сценах проводилась по координатам GPS и хорошо опознаваемым точкам на местности (опушки леса, пересечение дорог и т. п.) (рис. 1). Вблизи от ЗАО «МЗСК» были заложены тестовые участки, на которых определялись основные таксационные показатели древостоя. Оценка санитарного состояния древостоя по характерным признакам изменений и степени деградации определялась на основе существующих нормативов [37]. Степень загрязнения лесного покрова известковой пылью от ЗАО «МЗСК» оценивалась визуально по 3 классам: 1 – сплошное покрытие известковой пылью, 2 – частичное покрытие (50–70 % растительности), 3 – отсутствие покрытия (рис. 2).

Таблица 1

Характеристика используемых спутниковых снимков

Спутник	Время съемки	Пространственное разрешение, м	Формат снимка	Облачность
Alos	Июнь 2010 г.	10	GeoTiff	5 %
RapidEye	Июль 2011 г.	5	GeoTiff	Отсутствует

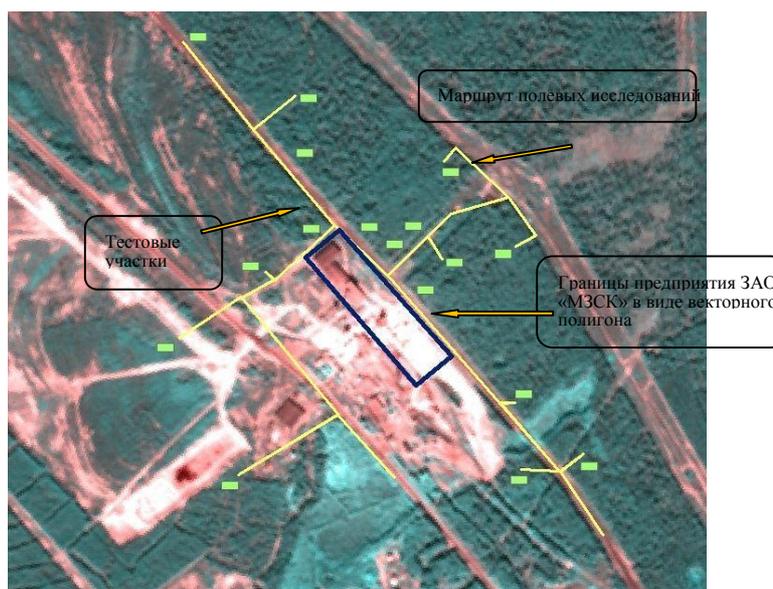


Рис. 1. Фрагмент синтезированного изображения RapidEye 2011 г. в псевдоцветах (RED+NIR) на территорию ЗАО «МЗСК» и прилегающие лесные насаждения

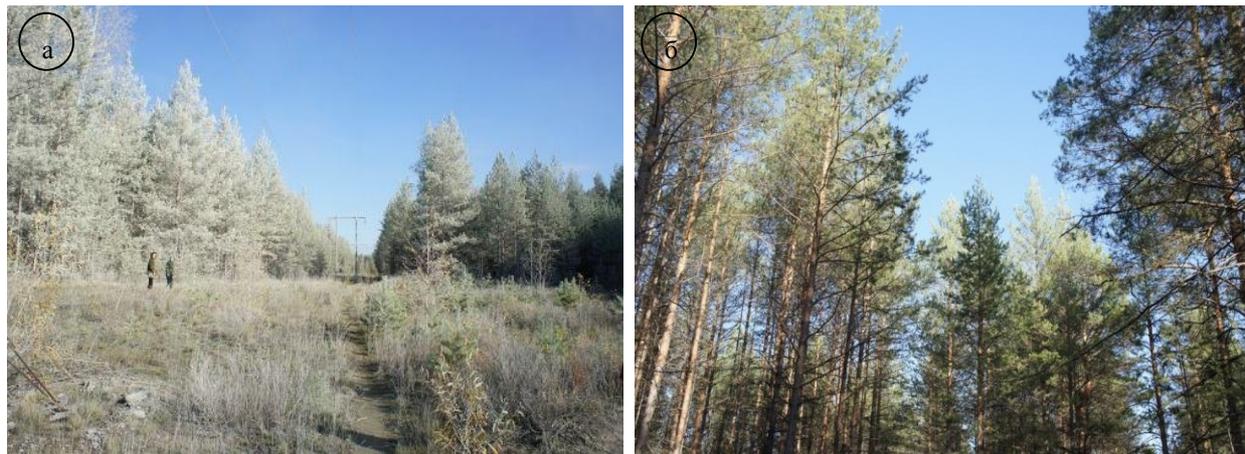


Рис. 2. Степень покрытия известковой пылью сосновых насаждений вблизи от ЗАО «МЗСК»: а) 1 класс – сплошное, б) 2 класс – частичное

Синтез изображений, оценка спектральных характеристик тестируемых участков, управляемая и неуправляемая классификация, оценка точности тематического картирования проводились в программных комплексах ENVI-5.0 и Arc GIS10.0. В работе использованы статистические методы оценки полученных результатов, наиболее точно представляющие динамику и границы распределения загрязнения в пределах исследуемой территории.

Оценка загрязнения лесных насаждений отходами силикатного производства в виде известковой пыли по снимкам разного пространственного разрешения состояла из следующих этапов:

- обработка спутниковых изображений с использованием алгоритма спектральной трансформации (минимизации) шумовых помех MNF (Minimum noise fraction) в модуле Forward MNF программного комплекса ENVI-5.0;

- обработка снимка RapidEye с помощью алгоритма «Estimate noise statistics from data» (оценка статистики шумов по данным) в программном комплексе ENVI-5.0;

- графическая и статистическая оценка спектральной разделимости классов лесного покрова, подвергнувшихся загрязнению

известковой пылью, на изучаемых спутниковых снимках;

- проведение неуправляемой классификации для трансформированных спутниковых изображений ALOS и Rapid Eye, оценка точности результатов тематического картирования;

- формирование полигона санитарно-защитной зоны (СЗЗ) вокруг объекта исследования с целью анализа пространственного распределения участков загрязнения на снимке RapidEye.

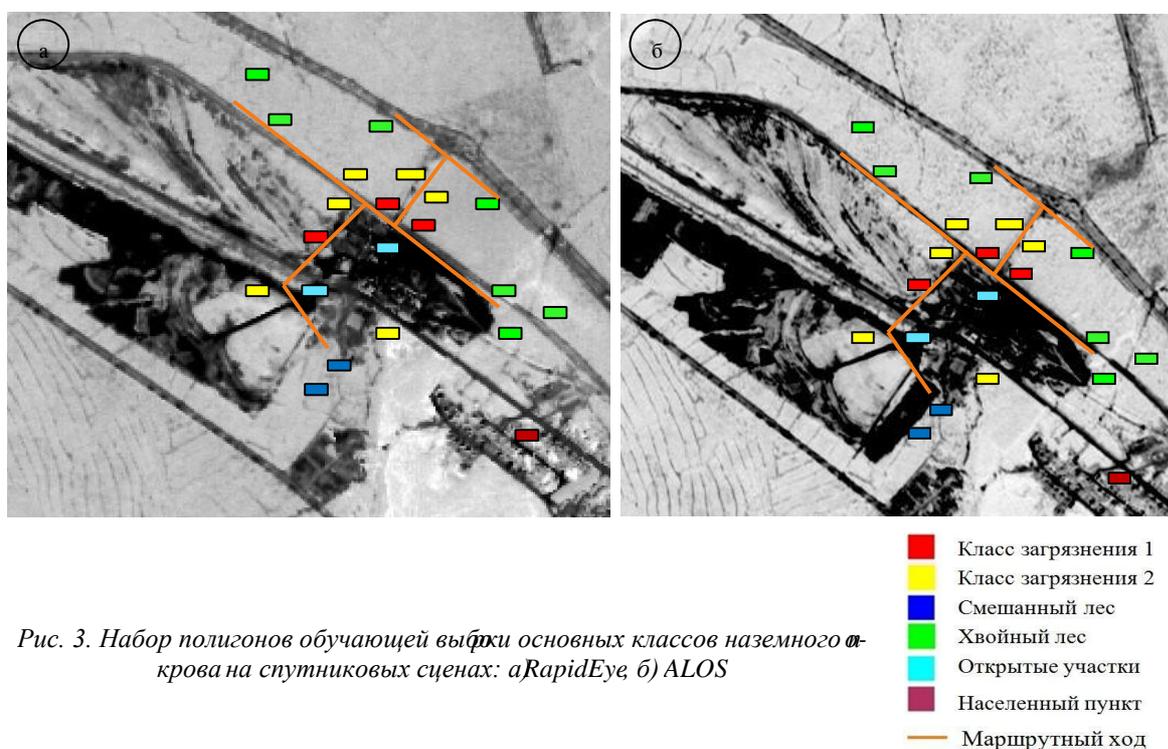
Обработка изображений с использованием алгоритма спектральной трансформации (минимизации) шумовых помех MNF. Одним из важных моментов точного дешифрирования лесных участков, загрязненных выбросами промышленных отходов, является выявление их в виде тематических классов на спутниковом снимке. Стандартные методы управляемой и неуправляемой классификации не позволяют выполнить эту задачу. В связи с этим в работе был использован дополнительный модуль комплексного пакета ENVI-5.0 MNF (Minimum noise fraction), представляющий собой алгоритм спектральной трансформации (минимизации) шумовых помех. Этот алгоритм обычно применяется для оценки наземных экосистем, находящихся в стрессовых ситуациях. Процедура MNF трансформации

предшествует классификации изображений и представляет собой линейное регрессионное выравнивание (нормализацию) спектральных каналов спутникового снимка. При этом достигается минимизация шумовых показателей (перемешивание спектральных значений) и сжатие большого объема спектральных данных спутникового изображения, что облегчает процесс классификации и дальнейшей идентификации исследуемых объектов [38].

Для более детального выявления участков леса различной степени загрязнения известковой пылью был также использован алгоритм «Estimate noise statistics from data» (оценка статистик шумов по данным) программного комплекса ENVI-5.0. Этот алгоритм позволяет выявлять «шумы», которые в некоторых случаях не проявляются при работе со спутниковым изображением. Известно, что каждый пиксель изображения имеет два значения – сигнал и «шум», в то же время соседний пиксель, обладая схожим сигналом, может иметь разные характеристики

«шума». Соответственно оценка этих характеристик осуществляется на основе разницы средних значений соседних пикселей, расположенных справа и выше каждого оцениваемого пикселя. Считается, что лучшие результаты по выявлению «шума» и основного сигнала получаются при оценке разницы статистических данных, взятых из однородной области, а не от всего изображения [39]. Таким образом, алгоритм «Оценка статистик шумов по данным» позволяет повысить точность тематического картирования и, соответственно, определять «невидимые» при обычной классификации объекты на местности.

С целью предварительной оценки делимости классов наземного покрова изучаемой территории, выровненных по алгоритму MNF трансформации, на спутниковых изображениях ALOS и RapidEye были выделены полигоны для обучающей выборки на основе учетных площадок, заложенных во время полевых исследований (рис. 3).



Предварительная оценка разделимости спектральных классов на изучаемых изображениях проводилась в n-D визуализаторе (n-D Visualization) программы ENVI-5.0, где n – это количество каналов, участвующих в анализе. Каждый из исследуемых классов может быть представлен в виде облака точек в пространстве диаграммы рассеивания спектральных значений. Координаты точек в пространстве признаков представляют собой спектральные значения пикселей изучаемого канала. Распределение этих точек в n-D пространстве признаков позволяет проводить оценку количества пикселей каждого исследуемого класса наземного покрова и спектральных различий между ними на основе степени перекрытий этих облаков. Одновременно проводилась визуальная оценка разделимости классов на основе Z - профиля значений спектральных характеристик, полученных в результате MNF-трансформации спутниковых изображений.

После MNF-трансформации, предварительной оценки разделимости классов на спутниковых снимках и использования алгоритма «Estimate noise statistics from data» (оценка статистик шумов по данным) для трансформированных изображений была проведена стандартная неуправляемая классификация по алгоритму ISODATA. Оценка точности классификации спутниковых изображений проводилась на основе матрицы различий (Confusion Matrix) и коэффициента Каппа (Kappa Index) [40].

Пространственный анализ распространения загрязнения лесного покрова известковой пылью проводился для прилегающих насаждений и двух санитарнозащитных зон (СЗЗ) ЗАО «МЗСК». Согласно существующим нормативам [41, 42], исходный радиус СЗЗ для завода должен составлять не менее 300 м. С целью более полной оценки загрязнения лесных насаждений отходами силикатного

производства в работе были использованы два радиуса (300 и 500 м) СЗЗ вокруг ЗАО «МЗСК». Форма полигона СЗЗ на тематической карте устанавливалась с учетом диаграммы розы ветров [43].

Результаты исследований. MNF-трансформация, графический и статистический анализ спектральных данных спутниковых изображений показали, что лучшие результаты по разделимости классов наземного покрова и степени загрязнения лесного покрова известковой пылью получены на спутниковом снимке RapidEye. Как видно из рис. 4, б и 5, б, для спутникового изображения RapidEye исследуемые классы растительного покрова обладают ярко выраженными спектральными характеристиками, что свидетельствует о высоком уровне их разделимости на тематической карте. В то же время классы растительного покрова на снимке ALOS (рис. 4, а и 5, а) имеют тенденцию к смешиванию, что также подтверждается более высокими значениями дисперсии и средних значений спектральных характеристик классов 1 и 2 на этих снимках по сравнению с данными RapidEye (табл. 2). Как видно из таблицы 2, стандартные отклонения каналов RED и NIR снимку ALOS значительно превышают значения, полученные по снимку Rapid Eye.

Последующая неуправляемая классификация также подтвердила невозможность выделения класса 2 на спутниковом изображении ALOS, трансформированном по алгоритму MNF. На тематической карте этого спутникового изображения удалось выделить только класс 1, соответствующий участкам максимальных загрязнений выбросами известковой пыли (рис. 6, а), в то время как на спутниковом снимке RapidEye были хорошо выделены оба класса лесного покрова максимальной и средней степени загрязнения известковой пылью (рис. 6, б). В связи с этим в дальнейших исследованиях по оценке

степени и площади загрязнения лесных насаждений вокруг ЗАО «МЗСК» был использован спутниковый снимок RapidEye. Точность проведенной оценки площадей загрязнений на полученной тематической карте подтверждается высоким значением коэффициента Каппа (0,82), что свидетельствует о значительном соответствии проведенной классификации полевым (эталонным) данным.

Анализ тематической карты, созданной на основе спутникового снимка RapidEye для 5 классов наземного покрова, свидетельствует о значительной площади загрязнений лесных насаждений известковой пылью. При этом загрязнение распространяется на лесные насаждения, расположенные даже за пределами 500 м СЗЗ. На рис. 7 хорошо видны отдельные фрагменты загрязнений средней степени (класс 2), расположенные далеко от их источника. Максимальная концентрация загрязнений лесного полога приходится на 300 и 500 м СЗЗ вокруг ЗАО «МЗСК». В пределах 300 и 500 м СЗЗ преобладающим является класс 2 (средней степени загрязнения) (табл. 3). Для 300 м СЗЗ ЗАО «МЗСК» сумма 1 и 2 классов загрязнений составляет 51 % от площади лесных насаждений, в то время как для 500 м СЗЗ

это значение доходит до 26,5 %. Основное пространственное распространение известковой пыли на лесные насаждения наблюдается в северо-западном направлении, что также соответствует розе ветров исследуемой территории. Следует отметить, что полученная тематическая карта пространственного распределения участков загрязнений является результатом влияния промышленных выбросов производства силикатного кирпича на окружающие древостои в течение длительного периода времени. За 60 лет существования ЗАО «МЗСК» окружающие древостои подвергались интенсивному воздействию выбросов известковой пыли и других загрязнителей, особенно в пределах 300 м СЗЗ.

Большая концентрация участков загрязнения класса 1 (максимально загрязненные участки) наблюдается вдоль периметра всего завода. Тем не менее, их можно обнаружить на тематической карте (рис. 7) и за пределами двух СЗЗ предприятия. Это связано с тем, что движение облака известковой пыли зависит от многих факторов: плотности выброса, силы ветра, влажности и других естественных и физических природных условий.

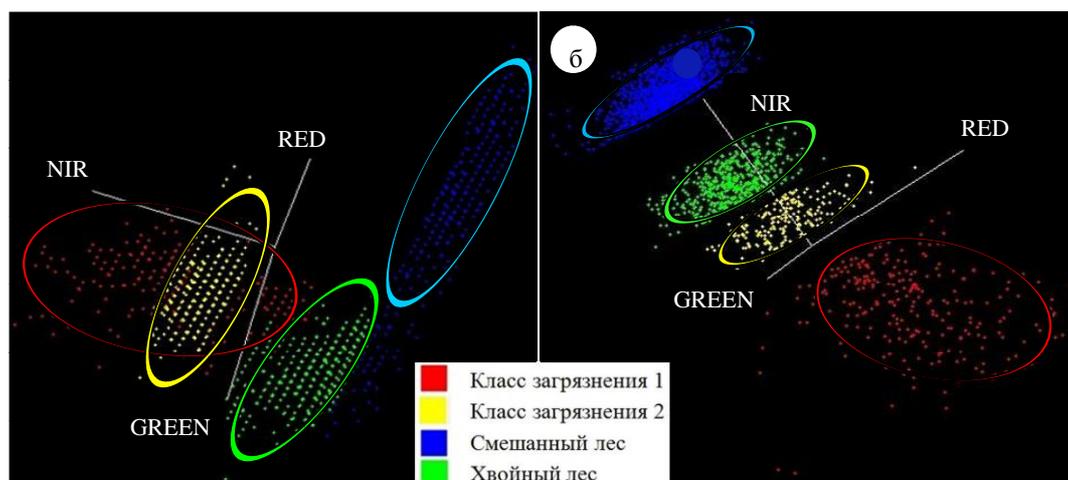


Рис. 4. Облака значений спектральных характеристик эталонных классов наземного покрова в n -Dimensional (N -D) пространстве диаграммы рассеивания для фрагментов спутниковых сцен: а) ALOS и б) Rapid Eye

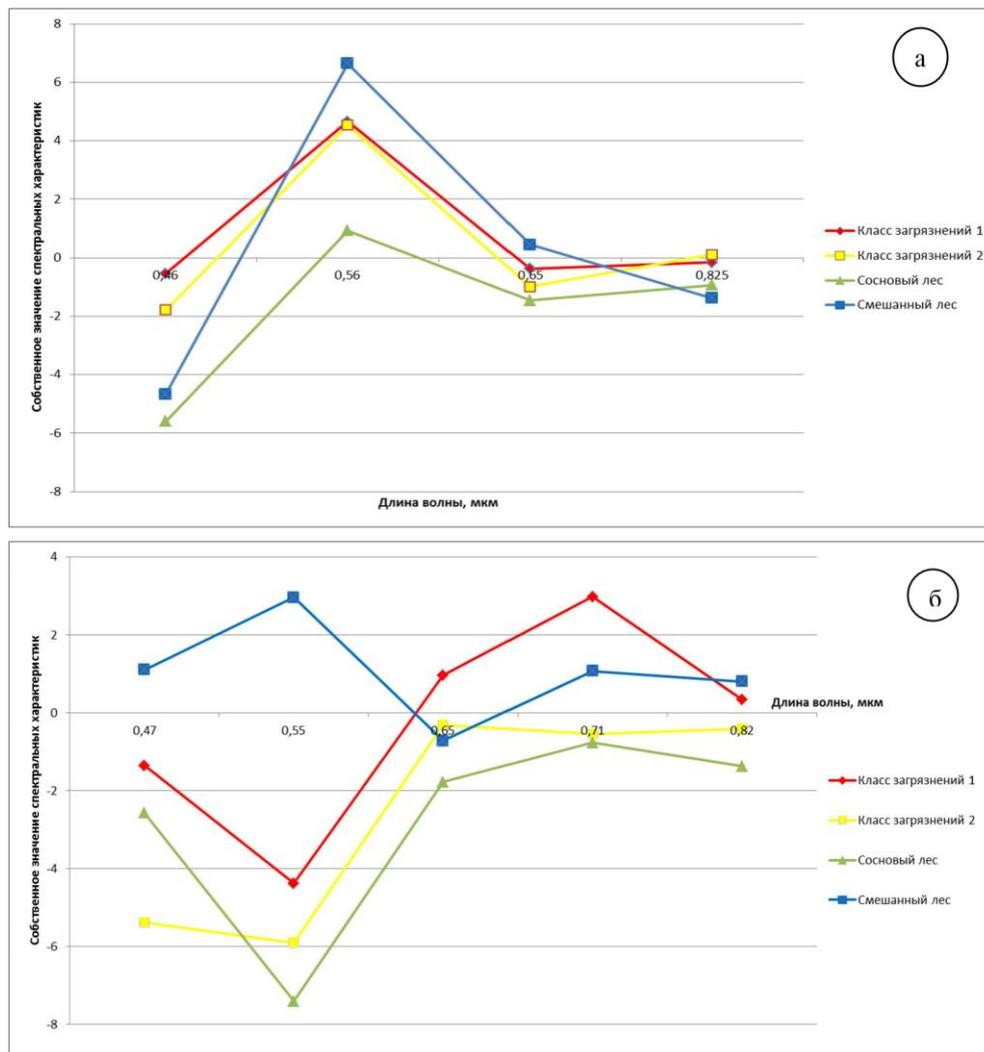


Рис. 5. Спектральные кривые классов (эталонные полигоны) растительного покрова для фрагмента сцены трансформированных изображений: а) ALOS, б) RapidEye

Таблица 2

Статистические данные спектральных характеристик каналов RED и NIR для 1 и 2 классов загрязнений известковой пылью лесного покрова на снимках RapidEye и ALOS

Спектральный канал/тематический класс	Спектральные характеристики			Стандартное отклонение
	Минимальное	Максимальное	Среднее	
RapidEye				
3 (RED) Класс_1	- 2,96	3,12	1,59	0,56
4 (NIR) Класс_1	- 2,36	1,91	0,05	0,99
3 (RED) Класс_2	- 2,44	2,89	1,04	0,53
4 (NIR) Класс_2	-3,00	3,62	0,07	0,18
ALOS				
3 (RED) Класс_1	- 7,72	3,56	- 0,96	1,73
4 (NIR) Класс_1	- 4,14	3,77	0,05	0,96
3 (RED) Класс_2	- 5,64	2,00	- 1,10	1,29
4 (NIR) Класс_2	- 6,99	3,92	- 0,18	1,40

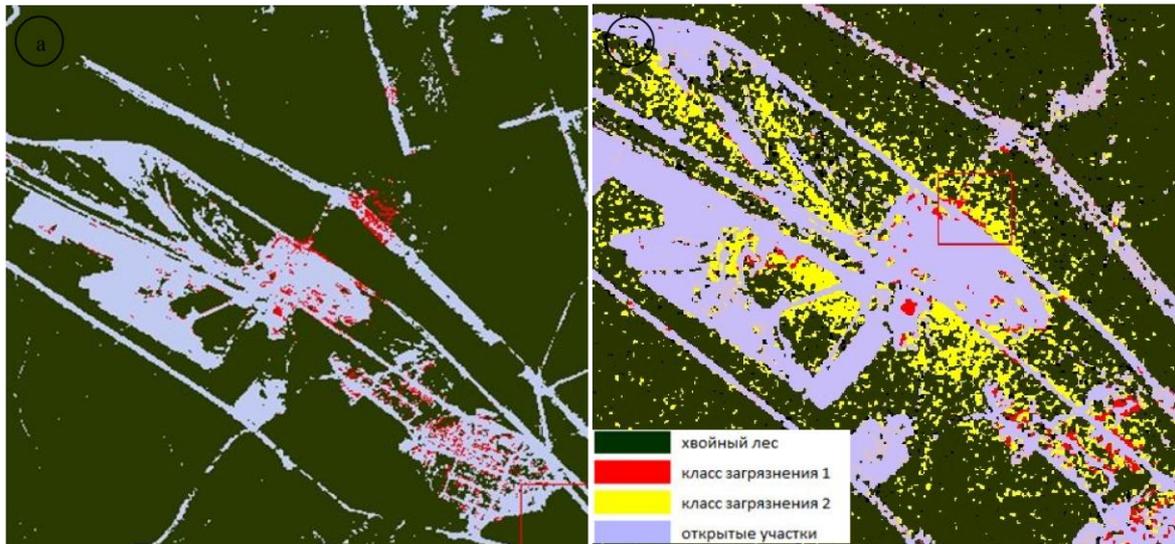


Рис. 6. Тематические карты изучаемой местности на спутниковых снимках: а) ALOS, б) RapidEye

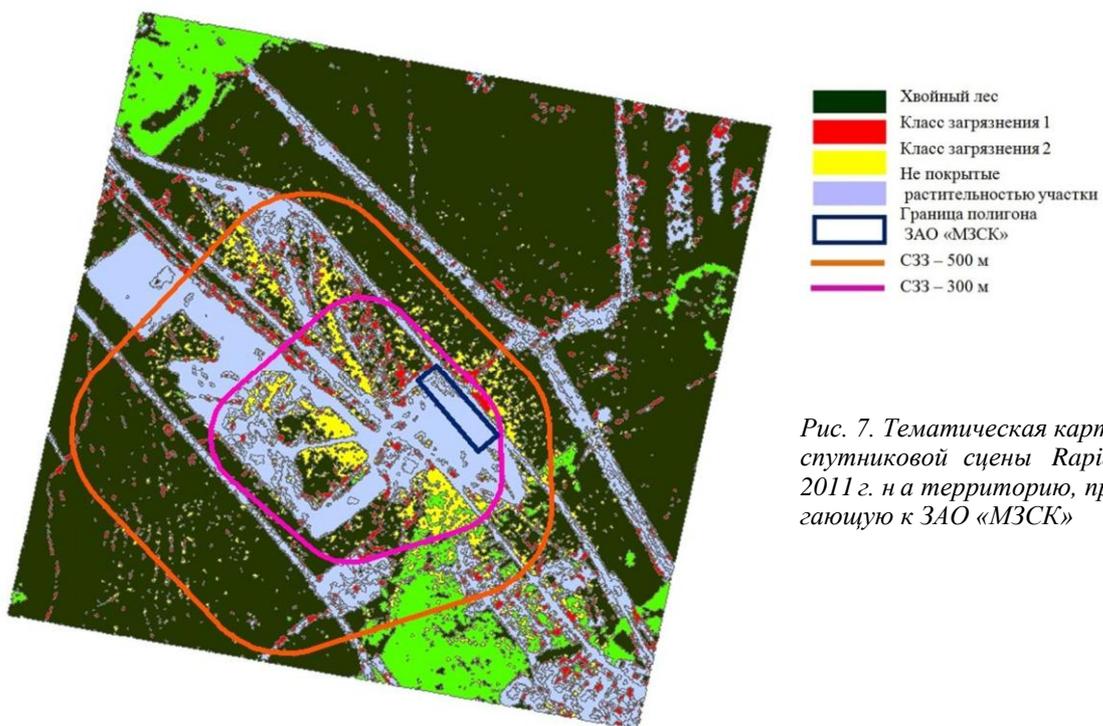


Рис. 7. Тематическая карта спутниковой сцены RapidEye 2011 г. на территорию, прилегающую к ЗАО «МЗСК»

Таблица 3
Распределение классов наземного покрова в пределах ССЗ ЗАО «МЗСК»

Класс наземного покрова	Площадь ССЗ на 300 м		Площадь ССЗ на 500 м	
	га	%	га	%
Участки загрязнения 1	12,1	17,1	25,1	9,2
Участки загрязнения 2	23,5	33,9	47,4	17,3
Чистый лес	35,6	49	200,6	73,5
Лес, всего	71,2	100	273,1	100

Анализ делимости классов в n-D пространственном визуализаторе и в пространстве признаков на основе эталонных участков при изучении различной степени загрязнения лесных насаждений отходами силикатного производства выявил явное преимущество использования спутникового изображения более высокого разрешения. Графический и статистический анализ спектральных характеристик различных классов наземного покрова, расположенных в пределах ЗАО «МЗСК», подтверждает лучшие возможности использования Rapid Eye 2011 г. для классификации загрязнений на изучаемой территории.

Различия в пространственном разрешении на 5 м делают снимки Rapid Eye по сравнению с ALOS более приемлемыми в решении вопросов детальной классификации спутников снимков при выделении классов лесных насаждений, загрязненных отходами силикатного производства, и других объектов на местности. Высокая

пространственная детализация спектральных различий изучаемых объектов, достигнутая за счет использования дополнительных алгоритмов по снижению «шумов» на снимках RapidEye, позволяет использовать их при анализе различий близких по своим характеристикам объектов наземного покрова.

Полученные в исследовании результаты могут быть полезны службе санитарного контроля на предприятии и Департаменту экологической безопасности Республики Марий Эл при работе по оценке состояния лесных насаждений в зоне влияния предприятия, а также при мониторинге пространственного распределения максимально- и среднезагрязненных участков леса. Кроме того, разработанная методика будет способствовать повышению точности дешифрирования лесных насаждений по спутниковым снимкам при проведении лесоустройства и оперативной оценке состояния лесов.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение № 14.В37.21.1245 Министерства образования и науки Российской Федерации «Дистанционный мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений по спутниковым снимкам» и тематического плана Министерства науки и образования РФ на 2012-2014 гг. «Оценка, мониторинг и прогнозирование биологической продуктивности лесов по данным спутниковой съемки».

Список литературы

1. Rastamanesh, F. Monitoring deterioration of vegetation cover in the vicinity of smelting industry, using statistical methods and TM and ETM + imageries, Sarcheshmeh copper complex, Central Iran / F. Rastmanesh, F. Moore, M. Kharrati-Kopaei, M. Behrouz // Environmental Monitoring and Assessment. – 2010. – Vol. 163. – № 1. – P. 397-410.
2. Qiu, Y. Capture of heavy metals and sulfur by foliar dust in urban Huizhou, Guangdong Province, China / Y. Qiu, , D. Guan, W. Song, K. Huang // Chemosphere. – 2009. – Vol. 75(4). – P. 447-452.
3. Jason, G.S. Predicting traffic-related air pollution in Los Angeles using a distance decay regression selection strategy / G.S. Jason, M. Jerrett, B. Beckerman, M. Wilhelm, J.K. Ghosh, B. Riz // Environmental Research. – 2009. –Vol. 109. – № 6. – P. 657-670.

References

1. Rastamanesh F., Moore F., Kharrati-Kopaei M., Behrouz M. Monitoring deterioration of vegetation cover in the vicinity of smelting industry, using statistical methods and TM and ETM + imageries, Sarcheshmeh copper complex, Central Iran. Environmental Monitoring and Assessment. 2010. Vol. 163. No 1. P. 397-410
2. Qiu Y., Guan D., Song W., Huang K. Capture of heavy metals and sulfur by foliar dust in urban Huizhou, Guangdong Province, China. Chemosphere. 2009. Vol. 75(4). P. 447-452.
3. Jason G.S., Jerrett M., Beckerman B., Wilhelm M., Ghosh J.K., Riz B. Predicting traffic-related air pollution in Los Angeles using a distance decay regression selection strategy. Environmental Research. 2009. Vol. 109. No 6. P. 657-670.

4. Ettlér, V. Contrasting lead speciation in forest and tilled soils heavily polluted by lead smelting / V. Ettlér, A. Vanke, M. Minaljević, P. Bezdickal // *Chemosphere*. – 2005. – № 58. – P. 1449–1459.
5. Токарева, О.С. Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли / О.С. Токарева, И.В. Касьянов // *Вестник науки Сибири*. – 2011. – № 1(1). – С. 268–272.
6. Полищук, Ю.М. Картографирование экологических рисков воздействия нефтедобычи на растительный покров с использованием спутниковых данных / Ю.М. Полищук, О.С. Токарева // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2010. – Т 7 (3). – С. 269–274.
7. Корец, М.А. Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISATMERIS и SPOT-Vegetation/ М.А. Корец, В.А. Рыжкова, С.А. Барталев // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2006. – Т 2. – С. 330–334.
8. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев и др. // *Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. – 2011. – № 3. – С. 17–24.
9. Price, K.P. Shrub dieback in a semiarid ecosystem: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation change / K.P. Price, D.A. Pyke, L. Mendes // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1992. – № 58(4). – P. 455–463.
10. Buschmann, C. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation / C. Buschmann, E. Nagel // *International Journal of Remote Sensing*. – 1993. – № 14. – P. 711–722.
11. Nagai, S. In situ examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan / S. Nagai, T.M. Saitoh, H. Kobayashi, M. Ishihara, R. Suzuki, T. Motohka, K.N. Nasahara, H. Muraoka // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 33. – № 19. – P. 6202–6214.
12. Ji, L. Agreement evaluation of AVHRR and MODIS 16-day composite NDVI data sets / L. Ji, K. Gallo, J.C. Eidenshink, J. Dwyer // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – № 58. – P. 1449–1459.
5. Tokareva O.S., Kasyanov I.V. Otsenka dinamiki sostoyaniya rasteniy-bioindikatorov atmosfernogo zagryazneniya na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Dynamics Assessment of Condition of Plants – Bioindicators of Atmospheric Pollution on the Base of Earth Remote Sensing Data]. *Vestnik nauki Sibiri [Vestnik of Siberia Science]*. 2011. No 1(1). P. 268–272.
6. Polishchuk Yu.M., Tokareva O.S. Kartografirovaniye ekologicheskikh riskov vozdeystviya nefte dobychi na rastitelnyy pokrov s ispolzovaniem sputnikovyykh dannykh [Mapping of Environmental Risks of Oil Extraction Impact on Vegetation Cover with the Use of Satellite Data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Methods of Earth Remote Sensing]*. 2010. V 7 (3). P. 269–274.
7. Korets M.A., Ryzhkova V.A., Bartalev S.A. Otsenka sostoyaniya rastitelnogo pokrova v zone vozdeystviya promyshlennykh predpriyatiy s ispolzovaniem dannykh ENVISAT-MERIS i SPOT-Vegetation [Assessment of Vegetation Cover Condition in an Industrial Zone with the Use of ENVISATMERIS and SPOT-Vegetation Data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Methods of Earth Remote Sensing]*. 2006. V. 2. P. 330–334.
8. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., etc. Distantsionnyy monitoring dinamiki narusheniy lesnogo pokrova, lesovozobnovleniya i lesovosstanovleniya v Mariyskom Zavolzhe [Remote Monitoring of Dynamics of Forest Cover Deviance, Reafforestation and Restoration in Mari Forests]. *Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management]*. 2011. No 3. P. 17–24.
9. Price K.P., Pyke D.A., Mendes L. Shrub dieback in a semiarid ecosystem: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1992. No 58(4). – P. 455–463.
10. Buschmann C., Nagel E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*. 1993. No 14. P. 711–722.
11. Nagai S., Saitoh T.M., Kobayashi H., Ishihara M., Suzuki R., Motohka T., Nasahara K.N., Muraoka H. In situ examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan. *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33. No 19. P. 6202–6214.
12. Ji L., Gallo K., Eidenshink J.C., Dwyer J. Agreement evaluation of AVHRR and MODIS 16-day composite NDVI data sets. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. No 58. P. 1449–1459.

- of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29. – № 16. – P. 4839-4861.
13. Wang, H. Study on the relationship between sub-pixel percentage cover and multi-temporal NDVI / H. Wang, H. Lin, J. Chen, F. Chen // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33. – № 17. – P. 5615-5628.
14. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев и др. // Вестник ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1. – С. 12-22.
15. Xu, R.S. Remote sensing research in biogeochemistry of the Hetai gold deposit, Guangdong Province, China / R.S. Xu, Y.L. Ma // International Journal of Remote Sensing. – 2004. – № 25(2). – P. 437-454.
16. Guo, Y. Spatial distributions and temporal variations of atmospheric aerosols and the affecting factors: a case study for a region in central China / Y. Guo, S. Hong, N. Feng, Y. Zhuang, L. Zhang // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33. – № 12. – P. 3672-3692.
17. Kaufman, Y.J. A satellite view of aerosols in the climate system / Y.J. Kaufman, D. Tanre, O. Boucher // Nature. – 2002. – № 419. – P. 215-223.
18. Li, B.G. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006 / B.G. Li, H.S. Yuan, N. Feng, S. Tao // International Journal of Remote Sensing. – 2010. – № 31. – P. 1801-1817.
19. Gamon, J.A. A mobile tram system for systematic sampling of ecosystem optical properties / J.A. Gamon, Y. Cheng, H. Claudio, L. Mackinney, D.A. Sims // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 103. – P. 246-254.
20. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, и др. // Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 2(9). – С. 14-20.
21. Nagai, S. In situ examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan / S. Nagai, T.M. Saitoh, H. Kobayashi, M. Ishihara, R. Suzuki, T. Motohka, K.N. Nasahara, H. Muraoka // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33. – № 19. – P. 6202-6214.
22. Amirsalari, F. Investigation of correlation between remotely sensed impervious surfaces and chloride concentrations / F. Amirsalari, J. Li, X. Guan, W.G. Booty // International Journal of Remote Sensing. – 2013. – Vol. 34. – № 5. – P. 1507-1525.
23. Goodwin, N.R. Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data / N.R. Goodwin, N.C. Coops, M.A. Wulder, T.A. Gillanders Schroeder, T. Nelson // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 29. No 16. P. 4839-4861.
13. Wang H., Lin H., Chen J., Chen F. Study on the relationship between sub-pixel percentage cover and multi-temporal NDVI. International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33. No 17. P. 5615-5628.
14. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., etc. Distantionnyy monitoring lesnykh garey v Mariyskom Zavolzhe [Remote Monitoring of Burns in Mari Forests]. Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management.]. 2012. No 1. P. 12-22.
15. Xu R.S., Ma Y.L. Remote sensing research in biogeo-chemistry of the Hetai gold deposit, Guangdong Prov-ince, China. International Journal of Remote Sensing. 2004. No 25(2). P. 437-454.
16. Guo Y., Hong S., Feng N., Zhuang Y., Zhang L. Spatial distributions and temporal variations of atmospheric aerosols and the affecting factors: a case study for a region in central China. International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33. No 12. P. 3672-3692.
17. Kaufman Y.J., Tanre D., Bou-cher O. A satellite view of aerosols in the climate system. Nature. 2002. No 419. P. 215-223.
18. Li B.G., Yuan H.S., Feng N., Tao S. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006. International Journal of Remote Sensing. 2010. No 31. P. 1801-1817.
19. Gamon J.A., Cheng Y., Claudio H., Mackinney L., Sims D.A. A mobile tram system for systematic sampling of ecosystem optical properties. Remote Sensing of Environment. 2006. No 103. P. 246-254.
20. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., etc. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy El lesnoy rastitelnostu po sputnikovym snimkam [Assessment of Forest Colonization of Reserve Lands of the Republic of Mari El by Satellite Shots]. Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management.]. 2010. No 2(9). P. 14-20.
21. Nagai S., Saitoh T.M., Kobayashi H., Ishihara M., Suzuki R., Motohka T., Nasahara K.N., Muraoka H. In situ examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan. International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33. No 19. P. 6202-6214.
22. Amirsalari F. Li J., Guan X., Booty W.G. Investigation of correlation between remotely sensed impervious surfaces and chloride concentrations. International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34. No 5. P. 1507-1525.
23. Goodwin N.R., Coops N.C., Wulder M.A., Gillanders Schroeder T.A., Nelson T. Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data. Remote Sensing of Environment. 2008.

Environment. – 2008. – № 112. – P. 3680–3689.

24. *Hostert, P.* Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands / P. Hostert, A. Röder, J. Hill // Remote Sensing of Environment. – 2003. – № 87. – P. 183–197.

25. *Kennedy, R.E.* Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan / R.E. Kennedy, Z. Yang, W.B. Cohen, E. Pfaff, J. Braaten, P. Nelson // Remote Sensing of Environment. – 2012. – № 122. – P. 117–133.

26. *Kennedy, R.E.* Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms / R.E. Kennedy, Z. Yang, W.B. Cohen // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114. – № 12. – P. 2897–2910.

27. *Vogelmann, J.E.* Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data / J.E. Vogelmann, B. Tolk, Z. Zhu // Remote Sensing of Environment. – 2009. – № 113. – P. 1739–1748.

28. *Huang, C.* An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks / C. Huang, S.N. Goward, J.G. Masek, N. Thomas, Z. Zhu, J.E. Vogelmann // Remote Sensing of Environment. – 2010. – № 114. – P. 183–198.

29. *Healey, S.P.* Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data / S.P. Healey, Z. Yang, W.B. Cohen, D.J. Pierce // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 101. – P. 115–126.

30. *Masek, J.G.* A Landsat surface reflectance data set for North America, 1990–2000 / J.G. Masek, E.F. Vermote, N. Saleous, R. Wolfe, E.F. Hall, F. Huemmrich et al. // Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2008. – № 3. – P. 68–72.

31. *Zhu, Z.* Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery / Z. Zhu, C.E. Woodcock, P. Olofsson // Remote sensing of environment. – 2012. – № 122. – P. 75–91.

32. *Mahlein, A.K.* Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases / A.K. Mahlein, T. Rumpf, P. Welke, H.W. Dehne, L. Plümer, U. Steiner, E.C. Oerke // Remote Sensing of Environment. – 2013. – № 128. – P. 21–30.

33. *Moshou, D.* Automatic detection of ‘yellow rust’ in wheat using reflectance measurements and neural networks / D. Moshou, C. Bravo, J. West S. Wahlen, A. McCartney, H. Ramon // Computers and Electronics in Agriculture. – 2004. – № 44. – P. 173–188.

34. *Banks, J.R.* Evaluation of MSG-SEVIRI mineral dust retrieval products over North Africa and the Middle East / J.R. Banks, H.E. Brindley // Remote Sensing of Environment. – 2013. – № 128. – P. 58–73.

35. *Ежегодный доклад о состоянии окружающей среды Республики Марий Эл за 2009 год : гос. доклад за 2009 г. / Министерство сельского хозяйства, продовольствия и природопользования Республики Марий Эл. - Департамент экологической*

No 112. P. 3680–3689.

24. *Hostert P., Röder A., Hill J.* Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands. Remote Sensing of Environment. 2003. No 87. P. 183–197.

25. *Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B., Pfaff E., Braaten J., Nelson P.* Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. Remote Sensing of Environment. 2012. No 122. P. 117–133.

26. *Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B.* Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. No 12. P. 2897–2910.

27. *Vogelmann J.E., Tolk B., Zhu Z.* Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. Remote Sensing of Environment. 2009. No 113. P. 1739–1748.

28. *Huang C., Goward S.N., Masek J.G., Thomas N., Zhu Z., Vogelmann J.E.* An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. Remote Sensing of Environment. 2010. No 114. P. 183–198.

29. *Healey S.P., Yang Z., Cohen W.B., Pierce D.J.* Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data. Remote Sensing of Environment. 2006. No 101. P. 115–126.

30. *Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N., Wolfe R., Hall E.F., Huemmrich F., et al.* A Landsat surface reflectance data set for North America, 1990–2000. Geoscience and Remote Sensing Letters. 2008. No 3. P. 68–72.

31. *Zhu Z., Woodcock C.E., Olofsson P.* Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. Remote sensing of environment. 2012. No 122. P. 75–91.

32. *Mahlein A.K., Rumpf T., Welke P., Dehne H.W., Plümer L., Steiner U., Oerke E.C.* Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. Remote Sensing of Environment. 2013. No 128. P. 21–30.

33. *Moshou D., Bravo C., West J., Wahlen S., McCartney A., Ramon H.* Automatic detection of ‘yellow rust’ in wheat using reflectance measurements and neural networks. Computers and Electronics in Agriculture. 2004. No 44. P. 173–188.

34. *Banks J.R., Brindley H.E.* Evaluation of MSG-SEVIRI mineral dust retrieval products over North Africa and the Middle East. Remote Sensing of Environment. 2013. No 128. P. 58–73.

35. *Ezhegodnyy доклад о sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Mariy El za 2009 god: gos.doklad za 2009 god [Annual Report on Condition of Environment in the Republic of Mari El in 2009 : state report for 2009]. Ministerstvo selskogo khozyaystva,*

безопасности, природопользования и защиты населения Республики Марий Эл. – Йошкар-Ола, 2010.

36. Демаков, Ю.П. Изменение зольного состава хвои, коры и древесины сосны в зоне выбросов завода силикатного кирпича /Ю.П. Демаков, С.М. Швецов, М.И. Майшанова // Вестник ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1.– С. 85-95.

37. Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов [Электронный ресурс]. – Пушкино: ВНИЛМ, 2008. – 57с. Режим доступа: http://www.rcfh.ru/userfiles/files/16_massovye_razmnozheniya_stvolovykh_vreditelej.pdf (дата обращения: 16.03.2013)

38. Sunyurp, P. Mapping and Spatial Characterization of Nonnative Grasses in the Big Island, Hawaii Using Hyperspectral Imagery / P. Sunyurp // Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2006: Prospecting for Geospatial Information Integration. Reno, Nevada. – 2006. – Vol. 3. – P. 1028–1035.

39. Программный комплекс ENVI: Учебное пособие. – М.: «Совзонд», 2009. – 320 с. – 190 с.

40. Губаев, А.В. Мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений методами дистанционного зондирования / А.В. Губаев, Э.А. Курбанов, О.Н. Кранкина, О.Н. Воробьев // Влияние аномальной погоды на природные, социально-экономические и искусственные системы: засуха 2010 года в Поволжье России: материалы международной научной конференции NASA и семинара GOF-C-GOLD/NEESPI [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 92-98. – URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>

41. Охрана труда в России [Электронный ресурс]. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Новая редакция». - Введ. 2003-10-04. Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/52/52471/index.php (дата обращения: 16.03.2013).

prodovalstviya i prirodopolzovaniya Respubliki Mariy El [Ministry of Agriculture, Food Provision and Nature Management of the Republic of Mari El]. Departament ekologicheskoy bezopasnosti, prirodopolzovaniya i zashchity naseleniya Respubliki Mariy El [Department of Ecological Safety, Nature Management and Population Protection of the Republic of Mari El]. Yoshkar-Ola, 2010. 190 p.

36. Demakov Yu.P., Shvetsov S.M., Mayshanova M.I. Izmenenie zolnogo sostava khvoi, kory i drevesiny sosny v zone vybrosov zavoda silikatnogo kerpicha [Changes in Ash Content of Needle, Bark and Timber of Pines in the Drop out Area of the Plant of Silex Brick]. Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management]. 2012. No 1. P. 85-95.

37. Metodologicheskie rekomendatsii po nadzoru, uchetu i prognozu massovykh razmnozheniy stvolovykh vreditel'ey i sanitarnogo sostoyaniya lesov [Methodological Recommendations on Supervision, Account and Prognostication of Mass Propagation of Bark Pests and Sanitary Condition of Forests]. Pushkino, VNILM, 2008. 57p. URL: http://www.rcfh.ru/userfiles/files/16_massovye_razmnozheniya_stvolovykh_vreditelej.pdf (Reference date: 16.03.2013).

38. Sunyurp, P. Mapping and Spatial Characterization of Nonnative Grasses in the Big Island, Hawaii Using Hyperspectral Imagery. Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2006: Prospecting for Geospatial Information Integration. Reno, Nevada. 2006. Vol. 3. P. 1028–1035.

39. Programmyu complex ENVI : uchebnoe posobie [Program Complex ENVI: Study guide.]. Moscow, «Sovzond», 2009. 320 p.

40. Gubaev A.V., Kurbanov E.A., Krankina O.N., Vorobyev O.N. Monitoring i prognozirovaniye sostoyaniya lesnykh nasazhdeniy metodami distantsionnogo zondirovaniya [Monitoring and Prognostication of Forests Stands by Means of Remote Sensing]. Vliyanie anomal'noy pogody na prirodnye, sotsialnoekonomicheskie i iskusstvennyye sistemy: zasukha 2010 goda v Povolzhe Rossii: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii NASA i seminar GOF-C-GOLD/NEESPI [Influence of Abnormal Weather Conditions on Natural, Social and Economic Systems: Drought-2010 in the Volga Region of Russia: Materials of International Scientific Conference NASA and Seminar GOF-C-GOLD/NEESPI]. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology, 2012. P. 92-98. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>

41. Okhrana truda v Rossii [Protection of Workers in Russia]. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03. «Sanitarnozashchitnyye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatiy, sooruzheniy i inykh obektov. Novaya redaktsiya». Vved. 2003-10-04. [SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03. «Sanitary Protection Zones and Sanitary Classification of the Enterprises and Other Buildings. New version». In action since 2003-10-04.]. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_

42. *Независимый строительный портал* [Электронный ресурс]. СНиП 23-01-99. «Система нормативных документов в строительстве. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Строительная климатология». Режим доступа: <http://www.nsp.su/gosts/snip/d130> (дата обращения: 16.03.2013).

43. *Охрана труда в России* [Электронный ресурс]. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86 ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ: Сogl. Минздравом СССР 7.02.1986 г. № 04-4/259-4. Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2826/index.php (дата обращения: 16.03.2013).

[normativ/52/52471/index.php](http://www.nsp.su/gosts/snip/d130) (Reference date: 16.03.2013).

42. *Nezavisimyy stroitelnyy portal*. SNiP 23-01-99 «Sistema normativnykh dokumentov v stroitelstve. Stroitelnye normy i pravila Rossiyskoy Federatsii. Stroitel'naya klimatologiya» [Independent Portal on Construction. Construction Norms and Rules 23-01-99. «System of Construction Normative Documents. Construction Norms and Rules of the Russian Federation. Construction Climatology»]. URL: <http://www.nsp.su/gosts/snip/d130> (Reference date: 16.03.2013).

43. *Okhrana truda v Rossii* [Protection of Workers in Russia]. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukhe vrednykh veshchestv, sodержashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy: OND-86 LENINGRAD GIDROMETEIOIZDAT: Sogl. Minzdravom SSSR 7.02.1986 № 04-4/259-4. [Methods of Calculation of Repugnant Substance Discharged in the Air by the Enterprises: UMN-86 LENINGRAD GIDROMETEIOIZDAT: Agreed upon with the Ministry of Health of the USSR 7.02.1986 № 04-4/259-4.]. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2826/index.php (дата обращения: 16.03.2013).

Статья поступила в редакцию 06.05.13.

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, руководитель Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – устойчивое управление лесами, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, дистанционное зондирование земли, леса Киото. Автор более 120 научных и учебно-методических работ. E-mail: kurbanovea@volgatech.net

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор более 40 научных и учебно-методических работ. E-mail: vorobievon@volgatech.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – программист кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 15 публикаций. E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

НЕЗАМАЕВ Сергей Александрович – аспирант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, биологическая продуктивность лесов. Автор 15 публикаций. E-mail: nezamayevs@volgatech.net

ДЕМИШЕВА Екатерина Николаевна – магистрант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, оценка загрязненных территорий. E-mail: kls@volgatech.net

KURBANOV Eldar Alikramovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Forestry, Head of the Centre of Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – sustainable

forest management, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by the forest ecosystems, earth remote sensing, Kyoto forests. The author of more than 120 scientific publications and study guides. E-mail: kurbanovea@volgatech.net

VOROBYEV Oleg Nikolayevich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – forest remote sensing, carbon sequestration by the forest ecosystems, forest ecosystems monitoring. The author of more than 40 scientific publications and study guides. E-mail: vorobievon@volgatech.net

POLEVSHCHIKOVA Yuliya Alexandrovna – Programmer at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – earth remote sensing, biological productivity of forest ecosystems. The author of 15 publications. E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

NEZAMAEV Sergey Alexandrovich – Postgraduate Student at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – forest remote sensing, biological productivity of forests. The author of 15 publications. E-mail: nezamayevs@volgatech.net

DEMISHEVA Ekaterina Nikolayevna – Master`s Student at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). Research interest – forest remote sensing, assessment of contaminated and polluted land. E-mail: kls@volgatech.net

E. A. Kurbanov, O. N. Vorobyev, Y. A. Polevshikova, S. A. Nezamayev, E. N. Demisheva

COMPARISON ANALYSES OF SATELITE IMAGES OF HIGH RESOLUTION FOR INTERPRETATION OF FORESTS CONTAMINATED BY WASTES OF SILICATE PRODUCTION

Key words: *remote sensing; forest ecosystems; anthropogenic contamination; silicate production; satellite images; transformation of image.*

The long term terrestrial monitoring of the impact of anthropogenic wastes on the environment is considered to be an expensive procedure. Therefore new alternative options of the ecosystems monitoring are very important. Remote sensing methods are among them. The aim of the research was to develop and approbate of the identification methodology of forest ecosystems contaminated by the wastes of silicate production in Republic Mari El with the use of satellite images of high resolution ALOS and RapidEye. With the aim to separate the classes of forest cover, contaminated by lime dust, the MNF (minimal noise fraction) transformation algorithm was applied on the satellite images. The best results of unsupervised classification were obtained for the RapidEye satellite image, on the base of which thematic maps of contaminated territory were developed. Estimation of the precision of the research results are based on the criteria of geo statistics. The classes of forest cover contaminated by the lime dust were better separated on the RapidEye satellite image. The precision of the contaminated area estimation on the developed thematic map was confirmed by high Kappa coefficient (0.82). Analyses of thematic map based on the RapidEye image for classes of earth cover shows high contamination of the forest areas by lime dust around the silicate plant. Maximum concentration of the contamination of forest ecosystems locates within the 500 m around the plant. The main trend of the spatial distribution of the lime dust on the forest ecosystems was found in the north-western direction, which also corresponds to the wind rose of the investigated territory. Obtained research results could be useful for the department of ecological security of Republic Mari El for estimation of the condition of the forest ecosystems in the area of silicate production, as well during the monitoring of the spatial distribution of different classes of contaminated forest areas.