

Оценка загрязнений древостоев отходами силикатного производства по снимку RapidEye

Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова

*Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
E-mail: kurbanovea@volgatech.net*

В работе использован алгоритм линейной MNF (Minimum Noise Fraction) трансформации и неуправляемой классификации для спутникового снимка высокого разрешения RapidEye 2011 г. с целью изучения пространственного распределения и различной степени загрязнения лесных экосистем отходами силикатного производства в Республике Марий Эл. В исследовании также использованы тестовые лесные участки, заложенные во время летних полевых работ 2012 г. в районе изучаемого предприятия. Результаты исследований свидетельствуют о высокой разделимости классов лесного покрова после проведения MNF трансформации и точности созданной тематической карты загрязнений лесных экосистем, прилегающих к силикатному производству.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, загрязнение лесов, силикатное производство, снимок RapidEye, трансформация изображений, лесные экосистемы.

Введение

Оценка воздействия техногенных загрязнений на окружающую среду и ее долгосрочный наземный мониторинг являются сложными и дорогостоящими мероприятиями. В связи с этим возрастает роль альтернативных вариантов мониторинга экосистем, к которым в последние годы относится дистанционное зондирование земли, что подтверждает анализ многочисленных научных публикаций.

Влияние выбросов медного производства на повреждение растительного покрова в центральной части исламской республики Ирана было проведено с использованием разновременных данных спутника Landsat (Rastamanesh et al., 2010). 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 (Qiu et al., 2009).

Регрессионный анализ показал высокую точность (до 85%) при оценке воздействия загрязнения воздуха выхлопными газами (NO) автомобильного транспорта в эпидемиологических исследованиях (Jason et al., 2009). 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.

Высокая концентрация токсических соединений и других элементов наблюдается в почвах и растительности вблизи от металлургических и нефтеперерабатывающих предприятий, а также химических комбинатов (Токарева, Касьянов, 2011; Полищук, Токарева, 2010; Корец и др., 2006). Анализ мультиспектральных изображений и различные методы выявления изменений позволяют оценить процессы нарушения экосистем в исторической динамике и значительно сократить затраты на проведение полевых исследований (Курбанов и др., 2011).

Многочисленными исследованиями было установлено, 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 (Барталев и др., 2012). Для изучения состояния растительности обычно применяются различные вегетационные индексы, имеющие тесную корреляцию с содержанием хлорофилла, листовой поверхностью, фотосинтетической активностью и потоками углерода (Buschmann, Nagel, 1993; Nagai et al., 2012). Из всех вегетационных индексов наиболее широкое применение нашел нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Ji et al., 2008; Wang et al., 2012; Воробьев и др., 2012).

По данным радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в Китайской провинции Хубей была определена временная изменчивость и пространственное распределение оптической глубины аэрозолей (aerosol optical depth) между 2003 и 2008 гг. (Guo et al., 2012). Китайские ученые установили, что наибольшее влияние на оптическую глубину аэрозолей влияет рельеф (превышения на местности). Другие исследователи считают, что на оптическую глубину аэрозолей также влияют климат и социально-экономическая активность в изучаемой местности (Kaufman et al., 2002; Li et al., 2010). 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 анализ этих данных на основе постоянных и долгосрочных наземных работ (Gamon et al., 2006; Курбанов и др., 2010).

Целью нашего исследования было разработка и апробация методики идентификации лесных насаждений, загрязненных отходами силикатного производства ЗАО «Марийский завод силикатного кирпича» (ЗАО «МЗСК»), на мультиспектральном спутниковом снимке RapidEye, для чего были решены следующие задачи:

- разработана методика оценки площади загрязнения лесов выбросами известковой пыли для изучаемой санитарной зоны на основе анализа спутниковых данных RapidEye;
- проведена оценка достоверности полученных результатов тематического картирования изучаемой местности.

Техника эксперимента и методика исследований

Объектами исследования явились лесные насаждения, расположенные на сопредельной территории с ЗАО «МЗСК», являющимся одним из ведущих предприятий по производству строительных материалов в Республике Марий Эл с 1953 г. Производственная мощность ЗАО «МЗСК» в год составляет 100 млн. шт. кирпичей и 20 тыс. м³ газосиликатных блоков. В то же время завод является одним из загрязнителей атмосферы и приграничных лесных экосистем в Медведевском районе Республики Марий Эл (Ежегодный доклад..., 2010). Основным компонентом выбросов этого предприятия является оксид кальция (известь негашеная), пыль известняка и диоксида кремния (Демаков и др., 2012).

Для исследования и тематического картирования загрязненной местности использовался мультиспектральный снимок высокого пространственного разрешения RapidEye, сделанный в 2011 г. Снимок прошел процедуру геометрической и радиометрической калибровки, а также атмосферной коррекции в модуле FLAASH программного комплекса ENVI-5.0.

Геопроостранственная привязка тестовых участков и полевых трансект на спутниковой сцене проводилась по координатам GPS и хорошо опознаваемым точкам на местности. Оценка санитарного состояния древостоя определялась на основе существующих нормативов по характерным признакам изменений и степени деградации леса (Методические рекомендации..., 2013). На местности степень загрязнения лесного покрова известковой пылью от ЗАО «МЗСК» оценивалась визуально по трем классам: 1 – сплошное покрытие известковой пылью; 2 – частичное покрытие (50–70% растительности); 3 – отсутствие покрытия (рис. 1).



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

Синтез изображений, оценка спектральных характеристик тестируемых участков, управляемая и неуправляемая классификация, графическая и статистическая оценка разделимости загрязненных классов лесного покрова на изучаемом снимке, тематическое картирование и оценка его точности проводились в программных комплексах ENVI-5.0 и Arc GIS-10.0. Подготовка снимка RapidEye для тематического картирования проводилась с помощью алгоритмов «Estimate Noise Statistics from Data» (оценка статистики шумов по данным) и спектральной трансформации «Minimum Noise Fraction» (минимизации шумовых помех).

Обработка изображений с использованием алгоритма спектральной трансформации (минимизации) шумовых помех MNF

Важным моментом точного дешифрирования лесных участков, загрязненных выбросами промышленных отходов известковой пыли, является их выявление в виде тематических классов на спутниковом снимке. Стандартные методы управляемой и неуправляемой классификации не позволили выявить на изучаемых снимках четкие границы участков загрязнений в сосновых древостоях вокруг ЗАО «МЗСК», поэтому в работе был использо-

ван 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, которое позволяет нормализовать каждый из диапазонов спектральных каналов спутникового снимка посредством снижения шумовых показателей (перемешивание спектральных значений). При этом происходит снижение большого объема спектральных данных спутникового изображения, что облегчает процесс классификации и дальнейшей идентификации исследуемых объектов (Sunyugr, 2006).

С целью предварительной оценки делимости классов наземного покрова на снимке после алгоритма MNF трансформации были выделены полигоны обучающей выборки на основе учетных площадок, заложенных во время полевых исследований (рис. 2). 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 определенных случаях не проявляются при работе со спутниковым изображением. Работа этого модуля ENVI-5.0 основана на том, что каждый пиксель имеет два значения – сигнал и «шум», в то время как соседний пиксель обладает схожим сигналом, но имеет разные характеристики «шума». Оценка этих характеристик проводится на основе разницы средних значений соседних пикселей, расположенных справа и выше каждого оцениваемого пикселя. При этом лучшие результаты по выявлению «шума» и основного сигнала получаются при оценке разницы статистических данных, взятых из однородной области, а не всего изображения.

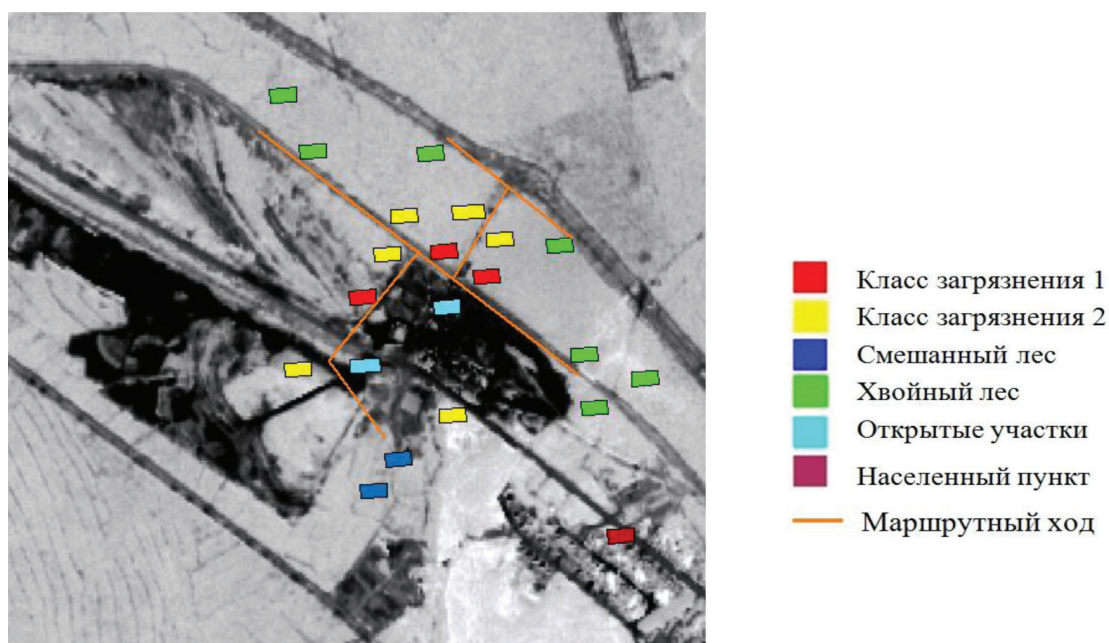


Рис. 2. Набор полигонов обучающей выборки основных классов наземного покрова на спутниковой сцене RapidEye

После MNF трансформации, предварительной оценки делимости классов и использования алгоритма «Estimate Noise Statistics from Data» 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) (Губаев и др., 2011).

Анализ распространения загрязнения лесного покрова известковой пылью проводился для различных зон, расположенных вокруг ЗАО «МЗСК». На основе санитарно-эпидемиологических правил и нормативов (Санитарно-защитная зона..., 2003; Система нормативных документов..., 1999) на тематической карте была выделена санитарно-защитная зона (СЗЗ). На основании визуальной оценки спутникового снимка, полевых исследований и с целью более полной оценки загрязнения лесных насаждений отходами силикатного производства в работе принята СЗЗ радиусом 300 и 500 м. Форма полигона СЗЗ на тематической карте определялась с учетом диаграммы розы ветров.

Результаты

Высокая пространственная детализация спектральных различий изучаемых объектов, полученная за счет использования дополнительных алгоритмов по снижению «шумов» на снимках высокого разрешения, позволяет использовать их при анализе различий близких по своим характеристикам объектов наземного покрова. Как видно на *рис. 3*, для спутникового изображения RapidEye исследуемые классы растительного покрова обладают ярко выраженными спектральными характеристиками, что свидетельствует о высоком уровне их делимости.

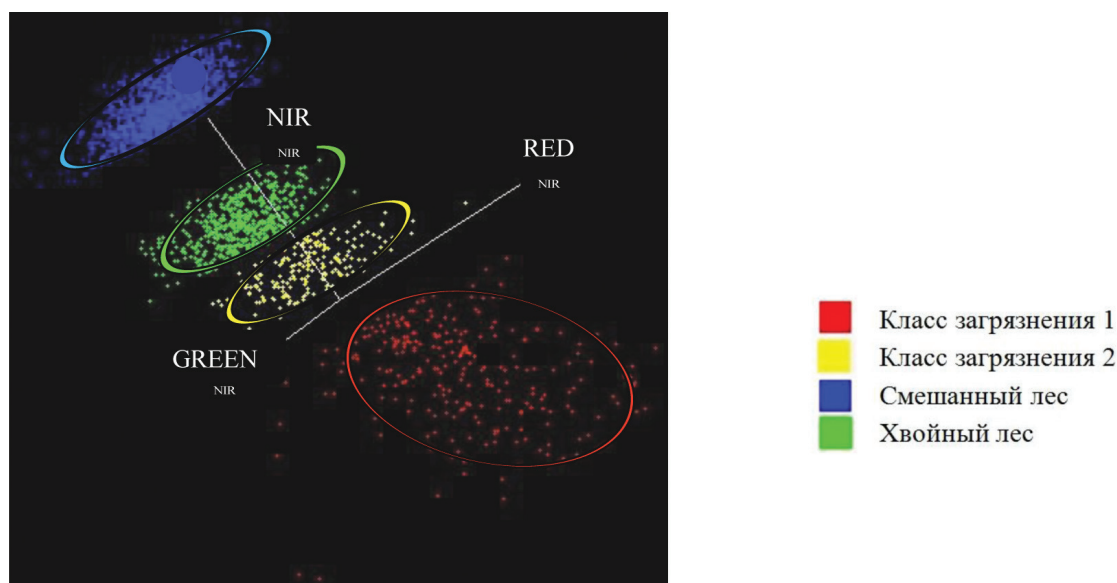


Рис. 3. Облака спектральных характеристик эталонных классов наземного покрова в n-Dimensional (N-D) пространстве диаграммы рассеивания для сцены RapidEye

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 для пяти классов наземного покрова, созданной на основе спутникового снимка RapidEye, свидетельствует о значительном загрязнении площади лесных насаждений известковой пылью. При этом загрязнение распространяется на лесные насаждения, расположенные даже за пределами 500 м СЗЗ. На *рис. 4* хорошо видны отдельные фрагменты лесных участков средней степени загрязнения (класс 2), разбросанные далеко от их источника. Максимальная концентрация загрязнений лесного полога приходится на 300 и 500 м СЗЗ вокруг ЗАО «МЗСК». Преобладающим в пределах СЗЗ является класс 2, на который приходится до 34% лесных насаждений в пределах 300-метровой СЗЗ (*табл. 1*). Для 300 м СЗЗ ЗАО «МЗСК» сумма 1 и 2 классов загрязнений составляет 51% площади лесных насаждений, в то время как для 500 м СЗЗ это значение доходит до 26,5%. Основное пространственное распространение известковой пыли наблюдается в северо-западном направлении, что также соответствует розе ветров исследуемой территории. Полученные данные свидетельствуют о том, что загрязнение лесных насаждений, расположенных в приграничной с ЗАО «МЗСК» территории, выходит за рамки существующих нормативов по выделению СЗЗ вокруг промышленных предприятий.

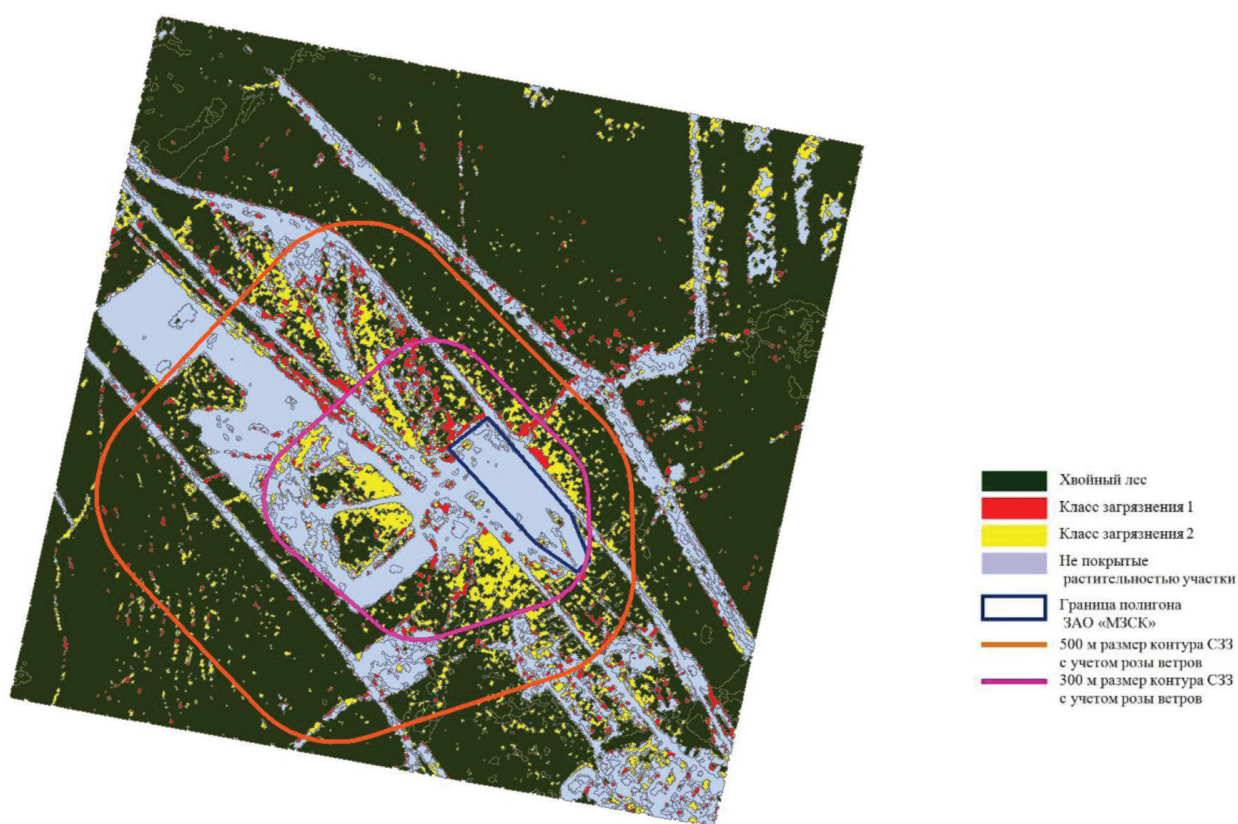


Рис. 4. Тематическая карта спутниковой сцены RapidEye 2011 г. на территорию ЗАО «МЗСК»

Таблица 1. Распределение классов лесного покрова в пределах СЗЗ ЗАО «МЗСК»

<i>Класс наземного покрова</i>	<i>Площадь СЗЗ радиусом 300 м</i>		<i>Площадь СЗЗ радиусом 500 м</i>	
	<i>га</i>	<i>%</i>	<i>га</i>	<i>%</i>
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	69,3	100	273,1	100

Наибольшее количество лесных участков класса 1 (максимального загрязнения) наблюдается вдоль периметра всего завода. Тем не менее, эти участки встречаются и в удаленных местах от территории предприятия. Это объясняется тем, что перемещение облака известковой пыли зависит от многих факторов: концентрации выброса, силы ветра, влажности и других природных условий.

Следует отметить, что полученная тематическая карта пространственного распределения участков загрязнений на 2011 г. является результатом влияния промышленных выбросов производства силикатного кирпича на окружающие древостои в течение значительного периода времени. За 54 года существования ЗАО «МЗСК» окружающие древостои подвергались интенсивному воздействию выбросов известковой пыли и других загрязнителей, особенно в пределах 300 м СЗЗ.

Разработанная методика и полученные данные могут быть полезны департаменту экологической безопасности, природопользования и защиты населения Республики Марий Эл, а также службе санитарного контроля на предприятии для детальной оценки состояния загрязненных лесов в зоне влияния предприятия ЗАО «МЗСК». Полученные материалы также будут способствовать пониманию пространственного распределения максимально и средне загрязненных участков леса на изучаемой территории. Все это позволит в будущем проводить более подробный мониторинг загрязнения лесов с использованием спутниковых снимков высокого разрешения

Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. № 2. Т. 9. С. 343–351.
2. *Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А.* Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье // *Вестник ПГТУ*. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2012. № 1. С. 12–22.
3. *Губаев А.В., Курбанов Э.А., Кранкина О.Н., Воробьев О.Н.* Мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений методами дистанционного зондирования // *Влияние аномальной погоды на природные, социально-экономические и искусственные*

- системы: засуха 2010 года в Поволжье России: материалы международной научной конференции NASA и семинара GOFС-GOLD/NEESPI [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2012. С. 92–98. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>
4. *Демаков Ю.П., Швецов С.М., Майшианова М.И.* Изменение зольного состава хвои, коры и древесины сосны в зоне выбросов завода силикатного кирпича // Вестник ПГТУ. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2012. № 1. С. 85–95.
 5. *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 безопасности, природопользования и защиты населения Республики Марий Эл. Йошкар-Ола. 2010. 190 с.
 6. *Корец М.А., Рыжкова В.А., Барталев С.А.* Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT-MERIS и SPOT-Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 2. С. 330–334.
 7. *Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Незамаев С.А., Александрова Т.А.* Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам // Вестник МарГТУ. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. 2010. № 2 (9). С. 14–20.
 8. *Курбанов Э.А., Нуреева Т.В., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Мифтахов Т.Ф., Незамаев С.А., Полевщикова Ю.А.* Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье // Вестник МарГТУ. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. 2011. № 3. С. 17–24.
 9. *Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов* [Электронный ресурс]. – Пушкино: ВНИЛМ, 2008. 57 с. Режим доступа: http://www.rcfh.ru/userfiles/files/16_massovye_razmnozheniya_stvolovyh_vreditelej.pdf
 10. *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> – 16.03.2013.
 11. *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 16.03.2013.
 12. *Полищук Ю.М., Токарева О.С.* Картографирование экологических рисков воздействия нефтедобычи на растительный покров с использованием спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7 (3). С. 269–274.

13. Токарева О.С., Касьянов И.В. Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестник науки Сибири. 2011. № 1 (1). С. 268–272.
14. 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.
15. 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.
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. 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.
18. 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. 2008. Vol. 29. No. 16. P. 4839–4861.
19. Kaufman Y.J., Tanre D., Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system // Nature. 2002. No. 419. P. 215–223.
20. 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.
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. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.

Estimation of forest contamination by the waste of silicate production on RapidEye image

E.A. Kurbanov, O.N. Vorobyev, S.A. Lezhnin, Y.A. Polevshikova

*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia
E-mail: kurbanovea@volgatech.net*

The MNF (Minimum Noise Fraction) transformation algorithm and unsupervised classification were used on the satellite image of high resolution RapidEye 2011 with the aim to investigate spatial distribution and different level of contamination of forest ecosystems by the waste of silicate production in the Republic Mari El. There also were used sample test forest plots established near the plant during the summer 2012. Research results indicate about high separability of the classes of the forest cover after the MNF transformation and high accuracy of the developed thematic map of contaminated forest ecosystems around the silicate plant.

Keywords: remote sensing, forest contamination, silicate production, RapidEye image, image transformation, forest ecosystems.