На правах рукописи

Рихтер Андрей Александрович

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

Специальность 25.00.34 – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» Министерства образования и науки Российской Федерации под научно-методическим руководством Российской академии наук

Научный руководитель	**Шахраманьян Михаил Андраникович,** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Ведешин Леонид Александрович** доктор технических наук, профессор Старший научный сотрудник Института космических исследований РАН ИКИ РАН
	Наполов Олег Борисович кандидат технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник лаборатории экологического сопровождения и экспертизы проектов Центра экологической безопасности, энергоэффективности и охраны труда ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
Ведущая организация	Акционерное общество «Научно-исследовательский и производственный центр «Природа»

Защита состоится «31» мая 2018 г. в 14^00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии «МИИГАиК» и на сайте:
http://www.miigaik.ru/upload/iblock/791/791903c31813a06a6fa95d7e9abe0cb2.pdf

Автореферат разослан «___» _____2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Беленко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования определяется наличием большого количества объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов (ОЗО), распределённых на территории Российской Федерации, для которых трудно обеспечить экологический мониторинг традиционными методами. К действующим способам экологического мониторинга относятся в основном маршрутные наблюдения, полевые, лабораторно-аналитические и камеральные работы. Их принципиальная особенность состоит в том, чтобы детально и на месте оценить состояние атмосферного воздуха, почвенного покрова и грунтовых вод, исследовать и проанализировать состав свалочного вещества, определить размеры и границы участка, административно-территориальную и муниципальную принадлежность объекта и т.д. По этой причине применение данных методов имеет существенное ограничение при мониторинге обширных территорий Российской Федерации.

Дистанционный мониторинг ОЗО основан на методах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и он имеет ряд преимуществ перед контактными методами. Помимо того что они экономически выгодны при решении задач мониторинга обширных территорий, отсутствует прямой контакт с объектами исследования, дистанционный мониторинг может быть проведен в труднодоступных местах (горные районы, северные территории и др.), для которых наземный мониторинг крайне затруднен или невозможен.

Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют или в недостаточной степени разработаны методики и алгоритмы цифровой обработки, связанные с автоматизированной оценкой параметров объектов размещения отходов и их влияния на окружающую среду по данным космических изображений.

Степень разработанности темы исследования. К авторам, проводившим работу в области космического мониторинга объектов размещения отходов или близко к ней, относятся: Оши С., Яцуока Я., Тамура М. (2000-2003 гг.); Аристов М.В., Готынян В.С., Томченко О.В., Миколенко Л.И. (2006-2010 гг.); Бровкина О.В., Григорьева О.В., Мочалов В.Ф., Легомина А.И. (2006-2012 гг.); Липилин

Д.А., Погорелов А.В. (2011-2015 гг.); Шешукова Л.В., Абросимов А.В., Охотин А.Л., Тимофеева С.С., Никольский Д.Б. (2011-2015 гг.); Байдулова М.К., Гарифзянов Р.Д., Волкова И.В., Боронина Л.В. (2012-2017 гг.); Зверев А.Т., Фисенко Е.В. (2011-2014 гг.).

В работах авторов усилия направлены в основном на проведение космического мониторинга совместно с контактным мониторингом, обработкой данных аэрофотоснимков, визуальным дешифрированием космических и аэрофотоснимков. Обработка цифровой информации проводится с использованием стандартных программных пакетов (ENVI, ERDAS, ArcGis, Scanex Processor и др.). В этом случае используются общепринятые методы и алгоритмы цифровой обработки и могут быть дешифрованы только отдельные характеристики объектов размещения отходов, что не даёт комплексного автоматизированного подхода к их дешифрированию, в частности, к оценке параметров свалок. Имеет место высокая стоимость исходных данных мониторинга (космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения, облёт местности и аэрофотосъёмка участков поверхности земли с воздушных средств и др.).

Объект исследования: объекты захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов.

Предмет исследования: методы автоматизированного обнаружения и оценки параметров объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов и влияния этих объектов на природную среду.

Целью диссертационного исследования является разработка комплексной методики автоматизированного обнаружения и оценки параметров ОЗО по данным космической съёмки.

Задачи, которые необходимо было решить для достижения данной цели: 1) провести аналитический обзор существующих методов мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов и оценки их влияния на природную среду, и предложить на основе этого подходы к построению комплексной методики в области космического мониторинга ОЗО,

устраняющие выявленные недостатки существующих методов; 2) разработать комплексную методику мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов, позволяющую в автоматизированном режиме детектировать ОЗО и давать оценку их параметров, а также дополнительно проводить оценку влияния свалок на природную среду по данным космического мониторинга; 3) провести апробацию разработанной методики на примере конкретных полигонов твёрдых коммунальных и промышленных отходов Московского региона; 4) в результате апробации провести оценку эффективности разработанной методики.

Методы исследования: методы регрессионного анализа, цифровой обработки изображений, системного анализа и математического моделирования, статистической и тематической обработки.

Информационная база исследования: 1) метеоданные, полученные с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД); 2) космические снимки низкого пространственного разрешения Landsat 4, 5 TM, 7 +ETM, 8 OLI, TIR, включая метаданные, полученные с сайта архивов геоданных National Aeronautics and Space Administration (NASA) за период с 1980 по 2017 гг.; 3) изображения высокого пространственного разрешения WorldView2 и GeoEye, приобретенные в компании Совзонд (отдельные изображения для области покрытия Балашихинского и Люберецкого районов за 2012-2015 гг.); 4) геоинформационные данные об основных полигонах твёрдых коммунальных отходов (ТКО) Московского региона, взятые из Интернета; 5) научные работы, связанные с контактным и дистанционным мониторингом объектов размещения отходов.

Научная новизна диссертационной работы: 1) впервые предложена методика автоматизированного детектирования ОЗО, которая разделена на три последовательные стадии: обнаружение местоположения ОЗО, выделение ОЗО и выделение компонент ОЗО; 2) впервые разработаны индексы реакции растительности и почвы на условия окружающей среды, рассчитываемые по

данным космических съемок и наземных обследований, применённых в задаче оценки влияния ОЗО на окружающую природную среду по данным космического мониторинга; 3) впервые проведено комплексирование методов цифровой обработки изображений для решения задач автоматизированного детектирования, оценки параметров ОЗО и оценки их влияния на природную среду по данным космических изображений.

Теоретическая значимость диссертации заключается в комплексном автоматизированном подходе к дешифрированию объектов захоронения отходов по материалам многозональной космической съёмки, в возможности представления объектов захоронения отходов в многомерном признаковом пространстве, включающем в себя яркостные температуры на синем, зелёном, красном, ближнем инфракрасном и тепловом каналах, в разработке индексов реакции растительности и почв, позволяющих оценивать состояние растительности по её реакции на изменчивость факторов среды по данным космического мониторинга и наземных обследований.

Практическая значимость заключается в том, что результаты диссертационных исследований могут быть использованы в природоохранных ведомствах и организациях для решения задач обнаружения несанкционированных ОЗО и контроля правильности эксплуатации полигонов твёрдых коммунальных и промышленных отходов в соответствие с действующими нормативно-правовыми документами, для определения очередности ликвидации существующих полигонов, в зависимости от степени их негативного влияния на окружающую природную среду. Результаты исследований могут быть также использованы в образовательном процессе с применением различных программных средств и ГИС-приложений (MatLab, ArcGis, ENVI и др.).

Личный вклад автора состоит в его непосредственном участии на всех этапах теоретических и экспериментальных исследований, в получении исходных данных и их обработке, в подготовке основных публикаций по

выполненной работе, в разработке программ автоматизированной обработки данных космического и подспутникового мониторинга, в апробации (участие в научных конференциях, выступления на заседаниях кафедры, разработка учебно-методического пособия), внедрении и практическом применении (разработка и проведение учебного курса, проектная деятельность в общеобразовательных учреждениях, применение в научно-исследовательских работах) результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту: 1) методика автоматизированного детектирования объектов захоронения отходов, основанная на методе контролируемой классификации, состоящая из трёх последовательных стадий детектирования – обнаружение объектов, выделение объектов, выделение классов поверхности; 2) методика оценки параметров объектов захоронения отходов, таких как температура поверхности, площадь, объём и др., и их изменения во времени, основанная на методах цифровой обработки космических изображений, в автоматизированном режиме; 3) методика автоматизированной оценки влияния свалок на природную среду, основанная на использовании разработанных индексов реакции растительности на факторы окружающей среды, такие как температура.

Достоверность результатов проведенных научных исследований определяется сопоставлением результатов цифровой обработки космических изображений с данными наземного обследования исследуемых мест складирования отходов, материалами Росреестра по картографированию объектов размещения отходов, корректным применением методов статистической и цифровой тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли, согласованностью полученных научных результатов с более ранними научными исследованиями, выполненными Бровкиной О.В., Аристовым М.В., Липилиным Д.А и другими исследователями в области дистанционного мониторинга ОЗО.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные выводы и положения диссертации отражены в 19 научных статьях и 10 докладах на 8 научно-технических конференциях. Имеется 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных. В рамках проведенных диссертационных исследований было разработано учебно-методическое пособие «Методы и технологии космического мониторинга объектов захоронения отходов в интересах обеспечения экологической безопасности территорий» (2013 г.).

Внедрение результатов диссертационного исследования. По материалам пособия был разработан и апробирован на кафедре геологии РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина учебный курс для студентов 3-4 курса «Геоэкологический мониторинг полигонов производственных и бытовых отходов» (2014-2015 гг.). Отдельные положения и результаты диссертационных исследований были применены в 5 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах. Результаты диссертационных исследований были применены в проектных работах в общеобразовательных учреждениях г. Москвы. Работы принимали участие в различных школьных конференциях, олимпиадах и конкурсах. Результаты исследований были доложены в Министерстве экологии и природопользования Московской области (март, 2016 г.), в котором отметили актуальность и важность предлагаемой работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 166 наименований, из которых 34 – иностранных, и списка иллюстрационного материала, включающего 77 рисунков и 11 таблиц. Содержание изложено на 203 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определены актуальность темы и основные направления исследований, степень разработанности, цель и задачи, научная новизна,

достоверность результатов, теоретическая и практическая значимость, положения диссертации, выносимые на защиту.

В первом разделе **«Анализ методов экологического мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов»** проведен анализ литературных источников, описывающих существующие методы и технологии выявления и оценки параметров объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов и их влияния на природную среду, определено основное направление диссертационного исследования. По результатам анализа сформулирована научная задача диссертационного исследования.

На рисунке 1 приведена общая классификация методов экологического

Рисунок 1 – Методы экологического мониторинга свалок

мониторинга объектов размещения отходов. Смешанные методы – комбинирование различных методов друг с другом, например, цифровая обработка снимков с воздушных и космических аппаратов, верификация результатов космического мониторинга по данным наземного.

ОЗО легко обнаруживаются на видимых изображениях, т.к. они резко отличаются от фона и имеют характерные прямые и косвенные визуальные дешифровочные признаки, что позволяет проводить мониторинг свалок

дистанционно (см. рисунок 2). Для свалок имеет место случайный характер: контура объекта, распределения частей объекта на поверхности, пространственного распределения спектральной яркости текстуры объекта. Текстура ОЗО зернистая, имеет характерные цвета, основные и неосновные оттенки, примеси, которые зависят от накладываемых поверхностей и условий освещённости. Свалки технологически не изолированы и пространственно привязаны к объектам инфраструктуры: дорогам, промышленным зонам, деревням, рынкам и т.д.

Анализ существующих работ в области дистанционного мониторинга ОЗО показывает, что усилия исследователей направлены в основном на использование традиционных методов обработки данных дистанционного зондирования. В частности, авторы применяют методы пороговой фильтрации, контролируемой классификации, спектрального и текстурного анализа «в лоб», без учёта специфики изучаемого объекта. В работах разные методы цифровой обработки изображений рассматриваются обособленно и не сведены к единому комплексу, позволяющему решать сразу несколько задач мониторинга свалок. Исследователи ставят в основном задачу обнаружения объектов по данным совместного использования космических и аэрофотоснимков, а также визуального детектирования. Не проработана в достаточной степени задача оценки параметров свалок и оценки их влияния на природную среду по данным космических снимков низкого и высокого пространственного разрешения.

Во втором разделе **«Разработка комплексной методики автоматизированного обнаружения и оценки параметров объектов захоронения отходов по данным космической съёмки»** рассмотрена комплексная методика автоматизированного выявления и оценки параметров ОЗО по данным космической съёмки, состоящая из трех методик (блоков): А) детектирование свалок; Б) оценка их параметров; В) оценка влияния свалок на природную среду. Методика детектирования ОЗО по данным космических изображений позволяет в автоматизированном режиме выявлять свалки с определением места нахождения и образования объекта, области, занимаемой

объектом и его компонентами (классами поверхности). Методика оценки параметров по данным космических изображений позволяет в автоматизированном режиме оценивать ряд параметров ОЗО: поверхностная температура и её сезонные и хронологические изменения, перемещение границ, площадь, концентрация замусоривания, объем, высота и др., динамика изменения этих параметров во времени. Методика оценки влияния свалок на природную среду позволяет в автоматизированном режиме по данным индексов реакции растительности (ИРР) и индексов реакции почвы (ИРП) давать оценку состояния природной среды в окрестности ОЗО.

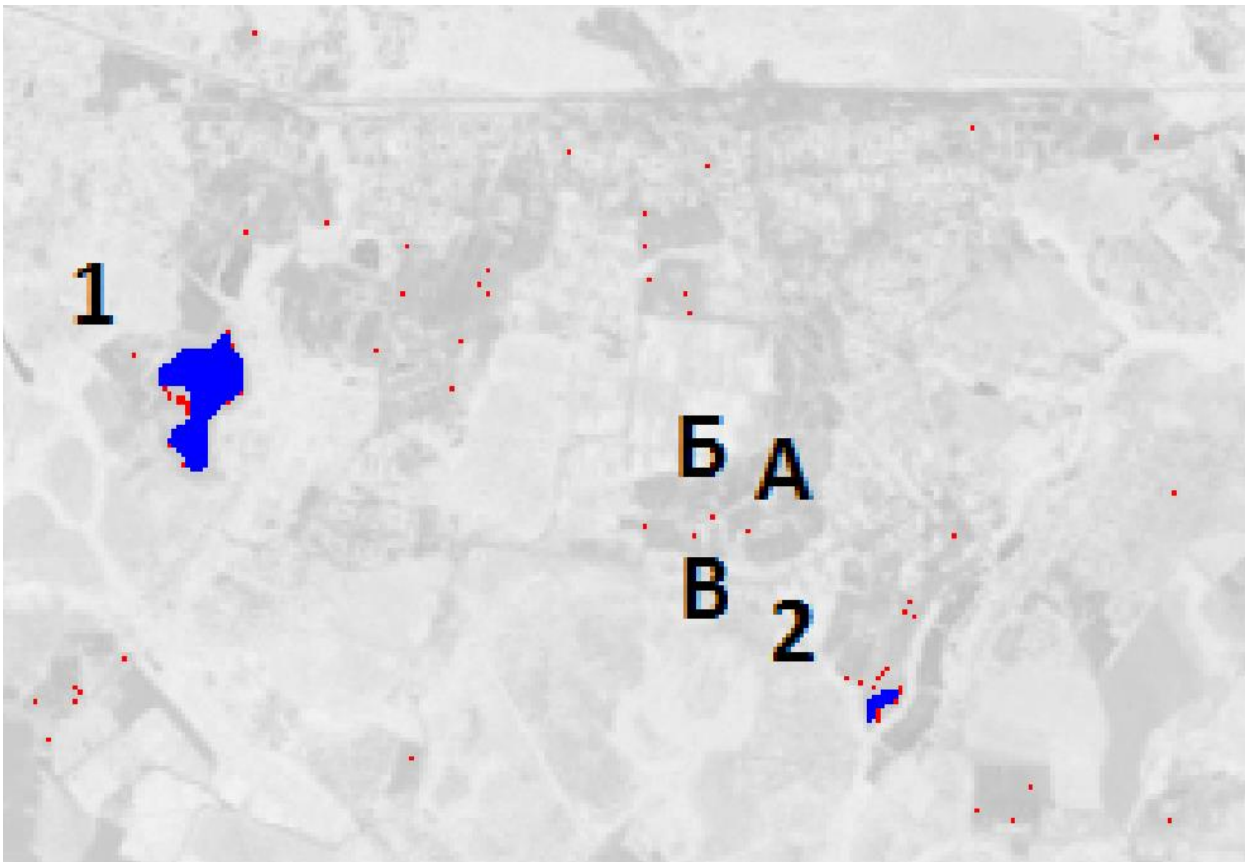
Общие требования к входным изображениям: отсутствие экранирования поверхности земли (снежным покровом, облачностью, задымлённостью и др.); съёмка в дневное время суток; отсутствие элементов брака (распиленные края, регулярные полосы, «размытие» изображений и др.) на снимке и неинформативных пикселей (областей с нулевыми значениями яркости); изображения прошли предобработку (геопривязка, ортотрансформирование, коррекция); пространственное разрешение – до 60 м; необходимые спектральные каналы – синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный, тепловой.

Детектирование ОЗО включает в себя три стадии: обнаружение объектов по эталонным значениям спектральной яркости (ЭЗСЯ); выделение обнаруженных объектов по ИРР; выделение компонентов выделенных объектов по матрицам информационных признаков (МИП). На первой стадии детектирования выделяются следы (местоположения) свалок, на второй – участок захоронения в окрестности каждого следа, на третьей – компоненты замусоривания на выделенном участке захоронения (классы поверхности).

В основе детектирования следов замусоривания лежит метод максимального правдоподобия. Он состоит в оценивании значения векторного аргумента функции правдоподобия, при котором она достигает экстремума. Детектирование следов замусоривания, т.е. признаков наличия свалок, по космическим изображениям состоит в выделении пикселей с ЭЗСЯ. Данные значения получаются для эталонных областей, занятых известными ОЗО. Для

этого строится характеристическая матрица исходного многоканального изображения, в которой равным элементам соответствует одна комбинация значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) пикселей на каналах.

На рисунке 2 показан пример обработки исходных изображений –



А

Б

В

Рисунок 2 – Пример детектирования следов ОЗО: фрагмент области наблюдения и изображения свалок А-В (картографические данные © Google, окрестность микрорайона Саввино, городской округ Железнодорожный)

фрагменты снимков Landsat 5 TM. В качестве эталона (синий цвет) взяты 4 области – участки известных полигонов ТКО Балашихинского и Люберецкого районов (Московский регион): Кучино (1), Торбеево (2), Саввино, Балластный карьер. Данный эталон воспроизвел 144 ОЗО (красный цвет).

К группам основных параметров свалок, оцениваемых по космическим изображениям, относятся: тепловые; геометрические на плоскости; геометрические в пространстве.

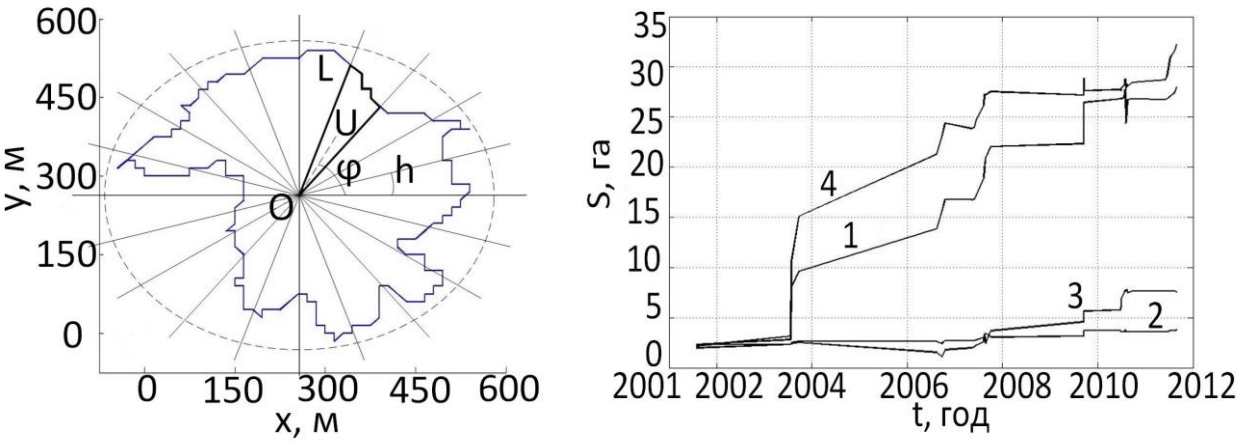
К тепловым параметрам и характеристикам относятся: временные изменения температур (сезонные, хронологические и суточные изменения температур, разностные температуры); пространственные распределения температур (тепловые изолинии, термоизоплеты, тепловые эпицентры, пространственно-временные изменения); температурные аномалии (риск возгораний, тлений, разброс температур, тепловые всплески); температурные тенденции (температура и время стабилизации, тепловой тренд, цикл и шум, корреляция температуры с параметрами погоды, параметры прогнозирования). К геометрическим параметрам и характеристикам на плоскости относятся: общие геометрические параметры (площадь, периметр, географические координаты); параметры статистического распределения (центр масс, моменты инерции, концентрация замусоривания); параметры по направлению (концентрация по направлению, вытянутость по направлению, линия контура); динамические параметры (перемещение, скорость, фазовая траектория); параметры прогнозирования (модель прогнозирования, линия регрессии). К геометрическим параметрам и характеристикам в пространстве относятся: общие геометрические параметры (площадь основания, высота, угол откоса, объем, шероховатость поверхности, площадь поверхности, пространственный периметр); параметры статистического распределения (пространственный центр масс, осевые и центральные моменты инерции); параметры по направлению (концентрация и вытянутость в пространственных направлениях, фигура поверхности); динамические параметры (перемещение, скорость изменения формы тела в пространстве); параметры прогнозирования (модель прогнозирования роста, поверхность регрессии).

Для расчета каждого параметра или характеристики – свой внутренний алгоритм (процедура) обработки, на входе которого могут быть не только данные космических изображений, но и внешние данные (метеоданные, метаданные,

сведения из Интернет-ресурсов и т.д.). Для расчета разных параметров требуются разные типы изображений (например, тепловых параметров – тепловые каналы, геометрических параметров на плоскости – бинарные изображения свалки-фон, в пространстве – высотные изображения). На базе рассчитанного массива параметров и характеристик формируется детальное представление ОЗО (структура текста, рисунков, таблиц, графиков, диаграмм и др. форм информации).

Область ОЗО строится в разные моменты времени t, что дает функции геометрических параметров, таких как площадь s(t) или периметр p(t) во времени (временные изменения геометрических параметров). Наложение координатной сетки в полярной системе координат на область детектирования дает функцию геометрических параметров по направлению, таких как площадь s(φ) или периметр p(φ).

На рисунке 3, а показана координатная сетка z в полярной системе



(а) (б)

Рисунок 3 – Оценка динамики границы свалки: а) привязка сетки к области свалки (границы свалки – август, 2011 г.); б) перемещение границ свалки в направлениях: северо-восток (1), северо-запад (2), юго-запад (3) и юго-восток (4) (полигон ТКО Кучино, 2001-2011 гг.)

координат, привязанная к центру масс O свалки с радиальным шагом h и отсекаемыми областями U. График линии контура L построен процедурой прослеживания контура. Радиальные изменения геометрических параметров строятся нахождением их мгновенных значений в каждой области U. Так,

площадь замусоривания S по направлению φ пропорциональна числу пикселей, принадлежащих области U и занятых ОЗО. Получив S(φ) для разных моментов времени t на одной сетке, для той или иной свалки можно найти радиально-временные изменения S(φ,t). Анализ таких изменений позволит определить динамику формы ОЗО в заданных направлениях, например, по сторонам света (рисунок 3, б).

Отметим такие пространственные геометрические параметры свалок, как площадь поверхности, вместимость, объем, угол откоса (максимальный, минимальный и средний), пространственный периметр, высота (максимальная, минимальная, средняя), шероховатость поверхности, параметры эквивалентного эллипсоида (вытянутость, ориентация и др.).

В основе методики оценки влияния свалки на природную среду лежит расчет ИРР по аэрокосмическим изображениям, показывающих реакцию растительности на различные внешние факторы среды:

$$\Im = X' - Y', \quad Y' = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}, \; X' = \begin{cases} \dfrac{X - X_1}{X_m - X_1}, & X < X_m \\ \dfrac{X_2 - X}{X_2 - X_m}, & X \geq X_m \end{cases}. \qquad (1)$$

$\Im$ – ИРР, X – значение фактора в каждой точке p(x,y) изображения I, снятого в момент времени t, X' – нормированное, X_1 и X_2 – минимальное и максимальное (диапазон выживания), X_m – оптимальное значение X; Y – значение реакции растительности в точке p, Y' – нормированное, Y_1 и Y_2 – минимальное и максимальное значения Y (рисунок 4). X и Y рассчитываются в каждой точке изображения. Характерные значения $\{X_1, X_2, Y_1, Y_2, X_m\}$ находятся эмпирически по статистическим зависимостям попиксельно между индексами вегетации и значениями фактора среды. В качестве реакции может выступать вегетационный индекс, примеры факторов – температура, влажность, освещённость.

Стабильное изменение ИРР во времени дает общую оценку изменения выработки растительного покрова в разных точках поверхности земли с учётом внешних факторов. Для этого вводится ИРП в виде:

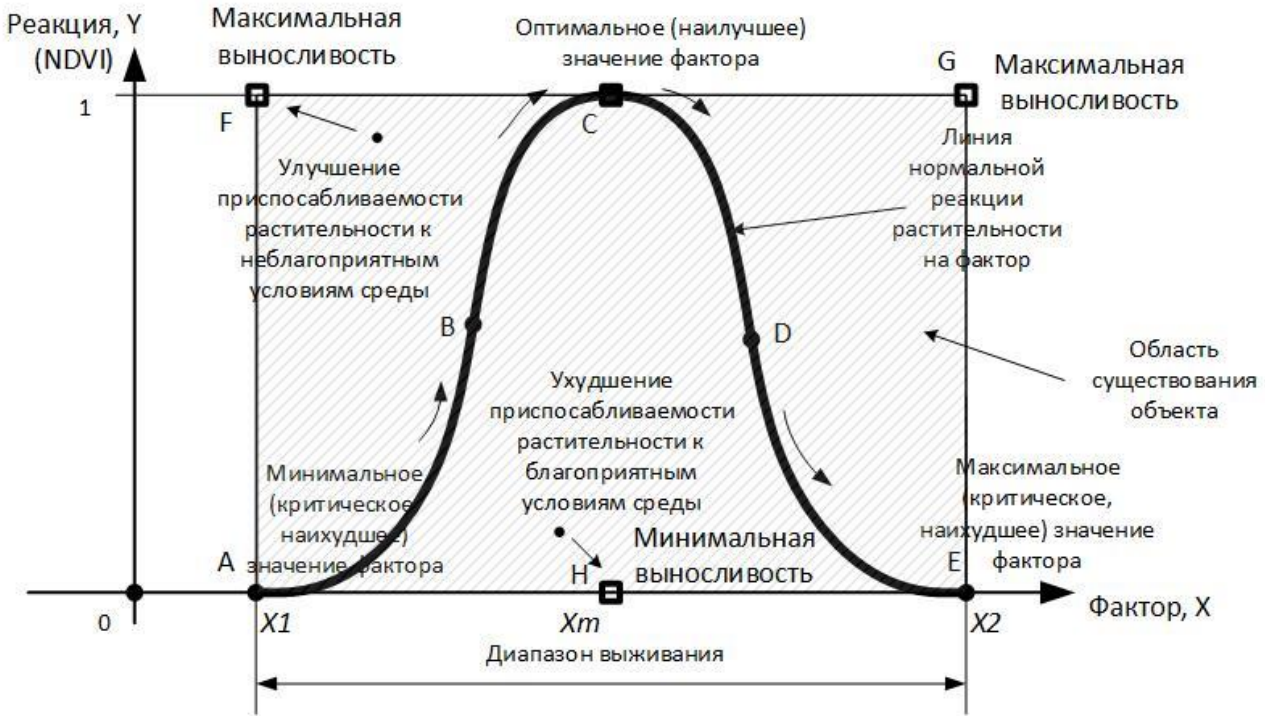


Рисунок 4 – Зависимость между факторами, воздействующими на растительность, и реакцией растительности на эти факторы по космическим изображениям

$$\aleph = \frac{\partial \Im(t)}{\partial t}, \quad \aleph = \begin{cases} \dfrac{k}{k_1}, & k < 0 \\ 0, & k \approx 0 \\ \dfrac{k}{k_2}, & k \geq 0 \end{cases}, \quad k_1 = \min(k < 0), k_2 = -\max(k > 0). \qquad (2)$$

k – коэффициент наклона линии регрессии временного ряда значений ИРР в каждой точке p. При $\aleph > 0$ происходит ухудшение реакции растительности на благоприятные значения фактора, при $\aleph < 0$ – улучшение, при $\aleph \approx 0$ – состояние растительности существенно не меняется.

Как показали многочисленные исследования, значения ИРР и ИРП коррелируют с расстояниями до антропогенных объектов, негативно воздействующих на окружающую среду (свалок, карьеров, промзон, объектов капитального строительства и др.). В связи с этим можно предположить, что изменения состояния растительности могут быть вызваны этими объектами. По представленной модели (1)-(2) основное влияние на растительность оказывают условия географической среды, а опосредованное – прилегающие объекты.

Оценка эффективности разработанной методики выполнена по шести критериям: достоверность обнаружения объектов; площадь области

детектирования; время обработки данных; экономическая эффективность; визуальная оценка; качественная оценка. Так, при оценке времени обработки данных в результате использования предлагаемой методики ожидается сокращение затрат времени на мониторинг на 80%. Экономическая эффективность была получена сопоставлением денежных затрат при ручной и автоматизированной обработке изображений. С ростом площади области наблюдения экономическая эффективность растёт. В случае однократного покрытия территории Московского региона финансовые затраты уменьшаются на 94% по сравнению с ручной обработкой снимков.

Точность оценки параметров свалок определяется ошибкой измерительной аппаратуры, пространственным и высотным разрешением, а также моделью их оценки. Так, для оценки пространственных параметров были использованы картографические данные проекта SRTM (высотная съёмка поверхности земного шара в феврале 2000 г.). Пространственное разрешение картографических данных – 90 м, разрешение по высоте – 1 м. Для территории Евразии абсолютная ошибка в плане – 8.8 м, по высоте – 6.2 м на доверительном интервале 90%. Точность оценки объёма, угла откоса, площади поверхности, пространственного периметра и других рассчитываются исходя из данных показателей.

Методикой детектирования можно установить местоположение свалки, область, занимаемую свалкой в разные моменты времени съёмки; выделять отдельные компоненты поверхности участка замусоривания и раскладывать поверхностный покров свалки на отдельные классы. Методику оценки параметров свалок образует комплекс более простых и частных методик и алгоритмов оценки отдельных параметров и характеристик. В работе приведены 3 категории параметров (тепловые, геометрические на плоскости и в пространстве), хотя имеют место ряд других категорий, не включённых в работу (параметры почвы и растительности, параметры химических процессов, компонентные параметры и др.). В основе методики оценки влияния ОЗО лежит определение соотношения между условиями окружающей среды и состоянием

растительности, выражаемого ИРР и ИРП. В этой связи, методика применима не только при мониторинге ОЗО, но и окружающей среды в целом.

В третьем разделе **«Детектирование объектов захоронения отходов на примере территории Московского региона»** проведён ряд экспериментов по методике детектирования ОЗО.

Представлена временная серия выделений замусоривания для полигонов ТКО Кучино, Дубна Правобережная, Ашитково, Химки, Непейно, Жирошкино, Торбеево (рисунок 5). В качестве исходных данных ДЗЗ были использованы временные серии космических снимков Landsat 4-5 TM. Разработана карта ОЗО по данным космического мониторинга для участка, включающего городские округа Железнодорожный и Лыткарино, Люберецкий и Балашихинский районы, участки Раменского, Щелковского и Ногинского районов, восточную часть г. Москва (рисунок 6). Проведена классификация поверхности на полигоне ТКО Кучино Московского региона по снимкам WorldView2 (рисунок 7).

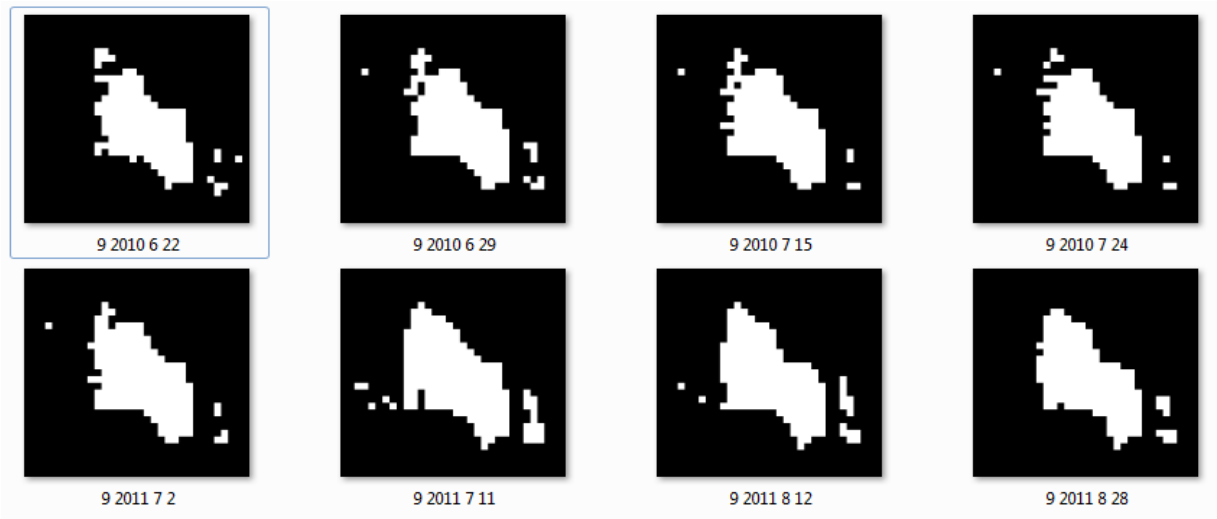
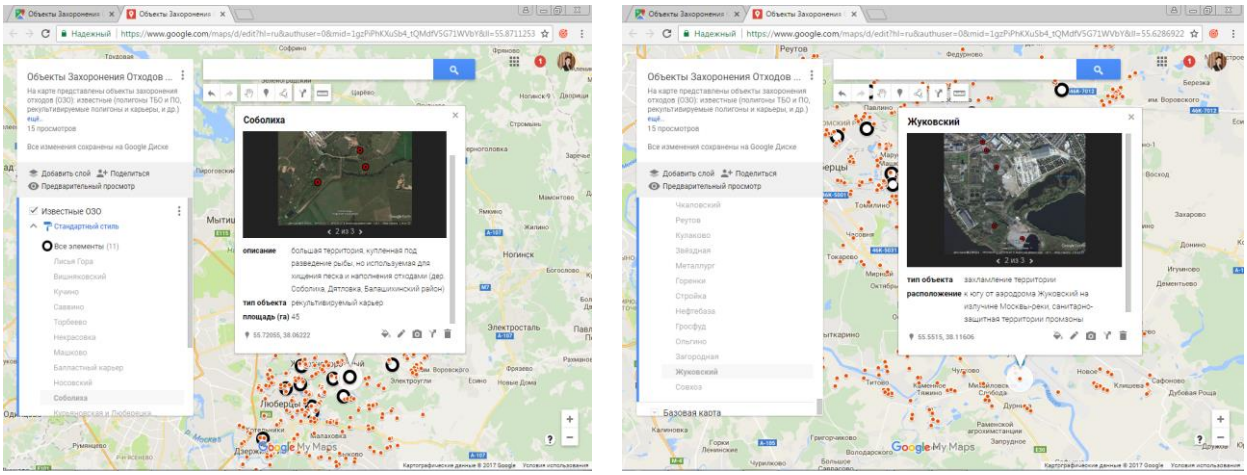


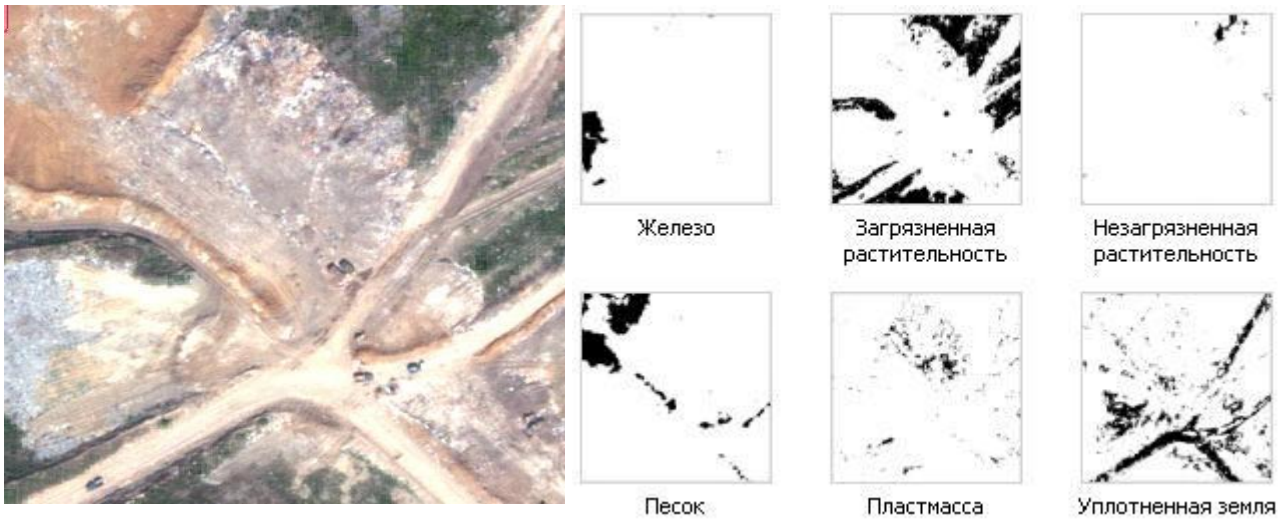
Рисунок 5 – Области детектирования полигона ТКО Дмитровский в разные моменты времени съёмки (Дмитровский район Московской области)

Сопоставление результатов эксперимента с видимыми космическими изображениями и фотографиями местности показывает эффективность обнаружения и выделения свалок и их компонент, которая зависит от качества исходных данных. В частности, чем выше пространственное разрешение, меньше неинформативных пикселей и лучше предобработка исходных снимков, тем выше точность детектирования.



(а) (б)

Рисунок 6 – Выделение известного (а) и неизвестного (б) ОЗО на карте



(а) (б)

Рисунок 7 – Участок поверхности полигона ТКО Кучино Московского региона (а) и его классификация (б) (WorldView2, лето, 2013 г.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие новые результаты.

1. Разработана комплексная методика в области космического мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов, позволяющая: детектировать объекты замусоривания природной среды автоматизированной обработкой космических изображений низкого и высокого пространственного разрешения; оценивать различные параметры ОЗО по данным автоматизированной обработки космических изображений (температура поверхности и ее сезонные и хронологические изменения, периметр, площадь

основания и поверхности, высота, объем, угол откоса и др.); давать оценку влияния свалок на природную среду по данным космических изображений на базе реакции растительности на условия окружающей среды.

2. Проведена апробация разработанной комплексной методики космического мониторинга ОЗО на территории Московской области. В результате апробации выяснено, что данная комплексная методика обладает следующими преимуществами по сравнению с другими: простота алгоритмической и программной реализации ввиду применения известных и наиболее простых методов цифровой обработки изображений; использование в качестве входных данных космических снимков, многие из которых являются бесплатными и общедоступными; возможность её полной автоматизации без участия человека-оператора, что позволяет проводить масштабный контроль замусоривания на больших территориях суши; схема мониторинга состоит в простой последовательности этапов мониторинга: детектирование объектов, оценка параметров объектов на базе полученных областей детектирования, оценка влияния объектов на природную среду в окрестности обнаруженных объектов; многие параметры ОЗО оцениваются впервые не только методами дистанционного, но и контактного мониторинга.

3. Оценена экономическая эффективность использования предлагаемой комплексной методики космического мониторинга ОЗО. Оценка эффективности позволяет сделать вывод о возможности ее практического применения для решения задач выявления несанкционированных свалок, контроля правильности эксплуатации существующих полигонов твёрдых коммунальных и промышленных отходов и оценки влияния свалок на природную среду.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах ВАК, SCOPUS и Web of Science

1. Рихтер, А.А. Разработка алгоритма оценки степени деградации почвы по мультиспектральным изображениям/В.Г. Бондур, А.Б. Мурынин, А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян//Известия ЮФУ. Технические науки. - 2012, № 6

(131). - С. 130-134. https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-otsenki-stepeni-degradatsii-pochvy-po-multispektralnym-izobrazheniyam.

2. Рихтер, А.А. Оценка геометрических параметров областей замусоривания по мультиспектральным космическим изображениям/А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.Б. Мурынин//Фундаментальные исследования. - 2015, № 2 (13). - С. 2866-2870. https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id= 37576.
3. Рихтер, А.А. Разработка метода оценки степени деградации почвы на основе данных долгосрочных наблюдений/А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.Б. Мурынин//Фундаментальные исследования. - 2015, № 2 (14). - С. 3095-3099. https://elibrary.ru/item.asp?id= 23837316.
4. Рихтер, А.А. Метод автоматизации обнаружения и выделения объектов захоронения отходов/М.Л. Казарян, М.А. Шахраманьян, А.А. Рихтер//Фундаментальные исследования. - 2015, № 8 (2). - С. 281-286. https://elibrary.ru/item.asp?id=24081416.
5. Рихтер, А.А. Обработка космических изображений с использованием средств мультимедиа и ее применение в космическом мониторинге объектов захоронения отходов/А.А. Рихтер, М.Л. Казарян, М.А. Шахраманьян//Фундаментальные исследования. - 2015, № 8 (2). - С. 328-332. https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38895.
6. Рихтер, А.А. Выявление очагов замусоривания по данным космических изображений низкого пространственного разрешения Landsat/М.А. Шахраманьян, А.А. Рихтер, М.Л. Казарян//Информация и космос. - 2016, № 3. - С. 91-96. https://infokosmo.ru/file/article/15933.pdf.
7. Рихтер, А.А. Метод автоматизации оценки индексов подстилающей поверхности и их изменения во времени по космическим изображениям и его применение при оценке состояния окружающей среды в окрестности полигонов твердых бытовых отходов/М.Л. Казарян, А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян//Фундаментальные исследования. - 2016, № 8. - С. 52-58. https://cyberleninka.ru/article/n/metod-avtomatizatsii-otsenki-indeksov-podstilayu

schey-poverhnosti-i-ih-izmeneniya-vo-vremeni-po-kosmicheskim-izobrazheniyam-i-ego.

8. Рихтер, А.А. Построение 3D-моделей объектов захоронения отходов и оценка их объемных характеристик/М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян, А.А. Рихтер//Информация и космос. - 2017. - № 2. - С. 107-113. https://elibrary.ru/item.asp?id=29668935.
9. Richter, A. Estimation of thermal characteristics of waste disposal sites using Landsat satellite images (Оценка тепловых характеристик на территории и в окрестности полигонов твердых бытовых и промышленных отходов по космическим изображениям LANDSAT)/A. Richter, M. Shakhramanyan, M. Kazaryan, R. Nedkov, D. Borisova, N. Stankova, I. Ivanova, M. Zaharinova//Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences. - 2017, No 70 (2). - P. 253-262. https://elibrary.ru/item.asp?id=29496168.
10. Рихтер, А.А. Методика автоматического детектирования компонент объектов захоронения отходов по космическим изображениям/М.Л. Казарян, А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян//Известия Томского политехнического университета, Инжиниринг георесурсов. - 2017. - Т. 328. - № 3. С. 46-53. https://elibrary.ru/item.asp?id=29095368.
11. Richter, A.A. Pattern recognition algorithm using descriptors combined radio and visible spectra (Методика детектирования объектов захоронения отходов по высотным изображениям)/A.A. Richter, Kazaryan, M.A. Shakhramanyan, V.V. Voronin// Proc. SPIE Vol. 10221, Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 1022107 (2017), doi: 10.1117/12.2262875. http://mm-dsp.com/files/Publication/2017/Pattern%20recognition%20algorithm%20using%20descriptors%20combined%20radio%20and%20visible%20spectra.pdf.
12. Richter, A. Research of generalized wavelet transformations of Haar correctness in remote sensing of the Earth (Исследование обобщенных вейвлет преобразований Хаара на корректность в контексте задачи космического мониторинга Земли)/M. Kazaryan, M. Shakhramanyan, R. Nedkov, A. Richter, D. Borisova, N. Stankova, I. Ivanova, M. Zaharinova//Proc. of SPIE Vol. 10427 - 74

(Conference 10427: Image and Signal Processing for Remote Sensing Conferences: 11–14 September 2017, Warsaw, Poland), P.99. https://spie.org/ERS/conferencedetails/image-signal-processing-remote-sensing#2278572.

13. Richter, A. Quality enhancement of satellite images and its application for identification of surroundings of waste disposal sites (Методика улучшения качества изображений и ее применение при детектировании окрестностей полигонов твердых бытовых отходов)/A. Richter, M. Kazaryan, M. Shakhramanyan, R. Nedkov, D. Borisova, N. Stankova//Proc. SPIE 10444, Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017), 104441N (6 September 2017); doi: 10.1117/12.2277309; http://www.cyprusremotesensing.com/rscy2017/sites/default/files/docs/conference%20program.pdf.
14. Richter, A.A. Space monitoring of the Earth and Haar wavelet transform (Дистанционный мониторинг поверхности Земли и вейвлет-преобразование Хаара)/M.L. Kazaryan, M.A. Schahramanian, A.A. Richter//Future Communication Technology and Engineering. - 2015, No 61. - P. 291-294. https://elibrary.ru/item.asp?id=24209206.
15. Richter, A.A. Space Monitoring of the Earth on the Presence of Solid Domestic Wastes Using a Discrete Orthogonal Transforms (Обработка космических изображений в окрестностях объектов захоронения отходов с использованием ортогональных преобразований)/M.L. Kazaryan, M.A. Schahramanian, A.A. Richter//Serbian journal of electrical engineering. - 2017. - V. 14, No. 3. - P. 343-364. http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_14-3/05-Kazaryan-Shahramanyan-Richter.pdf.

Научные статьи, опубликованные в других изданиях

16. Рихтер, А.А. Метод визуального детектирования в задаче космического мониторинга объектов захоронения отходов/А.А. Рихтер, М.А. Шахраманьян, М.Л. Казарян//Вестник Владикавказского научного центра. - 2015. - Т. 15, № 3. - С. 61-67. http://vestnik-vnc.ru/Portals/141/vnc-2015-3-10.pdf.

17. Richter, A. Information modeling of waste disposal sites (Информационное моделирование объектов захоронения отходов)/A. Richter, M. Kazaryan, M. Shakhramanyan, D. Borisova, N. Stankova, I. Ivanova//Ecological Engineering and Environment Protection. - 2017, No 1. - P. 15-21. http://ecoleng.org/archive/2017/1/15-21.pdf.
18. Richter, A. Evolution of chemical process parameters in waste disposal sites by satellite images (Оценка параметров химических процессов на объектах захоронения отходов по данным космических изображений)/M. Shakhramanyan, A. Richter, M. Kazaryan, R. Nedkov, D. Borisova, N. Stankova, I. Ivanova, M. Zaharinova//Ecological Engineering and Environment Protection. - 2017, No 1. - P. 22-28. http://ecoleng.org/archive/2017/1/22-28.pdf.
19. Richter, A.A. Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on Soils and the Water Environment Associated with Solid Domestic Waste: Scientific and Educational Aspects (Space Environmental Watch) (Космический мониторинг антропогенного влияния объектов захоронения отходов на природную среду: научные и образовательные аспекты)/M.A. Shakhramanyan, M.L. Kazaryan, A.A. Richter//Ecological Engineering and Environment Protection. - 2017, No 10. - P. 5-12. http://ecoleng.org/archive/eContents10.2017.html.

Учебно-методические пособия

20. Рихтер, А.А. Методы и технологии космического мониторинга объектов захоронения отходов в интересах обеспечения экологической безопасности территорий: учеб.-методич. пособие/М.А. Шахраманьян, А.А. Рихтер. - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. - 241 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=23496764.