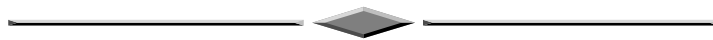


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.77:504.054 (571.122)

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-60-71

Методика автоматизированного дешифрирования нефтяных загрязнений для территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

Ю. В. Белова^{1✉}, В. А. Добрякова¹, Д. В. Козлова¹,
В. О. Исаева¹, К. В. Гетман¹

¹ Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация
e-mail: y.v.belova@utmn.ru

Аннотация. В работе предложена, а затем протестирована методика дешифрирования нефтяных загрязнений для территории ХМАО – Югры автоматизированными методами в программном комплексе ERDAS Imagine 2015. Подбор методики осуществлялся на основе данных спутника Landsat 5 за 2011 г. на территорию Ершового месторождения. Для оценки качества классификации использованы данные о фактических площадях и локализации нефтяных разливов в 2011 г. Предлагаемая методика включает в себя подготовку исходных данных, создание мультиспектрального изображения в комбинации каналов RED-NIR-SWIR, создание обучающей выборки для классов объектов, классификацию мультиспектрального изображения методом Maximum Likelihood, оценку качества классификации. Предложенная схема дешифрирования может применяться для оценки последствий аварий, связанных с утечкой нефти при ее добыче и транспортировке в условиях заболоченной местности Западной Сибири.

Ключевые слова: нефтяные загрязнения, мониторинг нефтезагрязненных земель, автоматизированное дешифрирование, контролируемая классификация, обработка космических снимков

Введение

Загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами – одна из экологических проблем нефтедобывающих регионов. Попадание нефти и нефтепродуктов в почву приводит к деградации почвенного и растительного покровов, сокращению видового биоразнообразия и загрязнению подземных и поверхностных вод в местах добычи [1]. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра – один из крупнейших нефтедобывающих регионов мира и по разведанным запасам углеводородного сырья, возможностям добычи и рентабельности освоения останется им на ближайшие десятилетия. Несмотря на внедрение природосберегающих технологий, усиление контроля в сфере охраны окружающей среды и в целом снижение

уровня добычи, степень негативного воздействия на окружающую среду по-прежнему довольно высока. Аварии на нефтепроводах с разливом нефтепродуктов – один из факторов загрязнения окружающей среды. Для минимизации последствий воздействия разливов нефтепродуктов на окружающую среду необходимо оперативно идентифицировать загрязненный участок, определить его точные границы и площадь, оценить степень нанесенного ущерба окружающей среде и составить рекомендации по рекультивации. Необходимость разработки оперативного, эффективного, с возможностью многократного применения и уменьшения временных затрат метода обнаружений нефтяных разливов обусловлена обширными площадями месторождений, большой протяженностью трубопро-

водных сетей, сильной заболоченностью территории, что усложняет полевые обследования, а также вводом в эксплуатацию новых лицензионных участков. Для решения данной задачи применяются методы дистанционного зондирования Земли, которые обеспечивают удаленное получение необходимой информации, большой пространственный охват, возможность многократно наблюдать исследуемые районы [2]. Комплексная обработка космических снимков позволяет обеспечить качественную оценку состояния территории и прогноз возможных изменений окружающей природной среды под влиянием антропогенной нагрузки [3].

Для целей дешифрирования, как правило, используются космические снимки, полученные в разных участках электромагнитного спектра (Landsat, Sentinel) [4–8]. Чаще всего используют сочетания синего, красного, ближнего и коротковолнового инфракрасного каналов [4, 8–11]. Помимо этого, для получения информации о трансформации поверхности вследствие воздействия углеводородов, используются различные индексы (NDVI, SAVI, SWVI) [4, 6, 7, 12, 13], данные радарной съемки [11], а также возможности нейронных сетей и глубокого обучения [14].

Индексные изображения были отклонены как малоэффективные при дешифрировании нефтезагрязненных земель на заболоченных территориях из-за схожих спектральных характеристик болот и нефтяных разливов.

Целью данного исследования является подбор метода автоматизированного дешифрирования, который позволил бы наиболее точно идентифицировать нефтяные загрязнения и эффективно работал в условиях заболоченной местности.

Методы и материалы

Для проведения исследования выбран участок Ершового месторождения с характерным для территории округа типом ландшафта (рис. 1). Он расположен в Нижневартовском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 42 км к северо-востоку от города Нижневартовска. Участок эксплуатируется с 1986 г. По размерам запасов относится

к классу средних, по степени промышленной освоенности – к разрабатываемым.

Лицензионный участок находится на заболоченной равнинной территории в условиях континентального климата. Малые уклоны рельефа, мерзлые грунты замедляют процесс разложения и просачивания органических веществ, в частности углеводородов, что приводит к их накоплению в местах аварий [15].

Участок расположен в средней тайге и характеризуется типичными для этой подзоны растительными комплексами: темнохвойно-сосновыми и темнохвойно-березовыми кустарничково-зеленомошными лесами в сочетании с грядово-мочажинными и осоково-сфагновыми болотами, степень заболоченности равна 30–40 % [16].

Для работы использовались космические снимки спутника Landsat-5 за июль 2011 г. Для верификации результатов исследования применялись эталонные значения нефтезагрязненных земель за этот же период, предоставленные недропользователем в рамках отчетности по Постановлению Правительства ХМАО – Югры от 14 января 2011 г. № 5-п «О требованиях к разработке планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти, нефтепродуктов, газового конденсата, подтоварной воды на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры». Эталоны представлены в виде shp-файлов.

Дешифрирование выполнялось в программном комплексе ERDAS Imagine, работа с векторными данными проводилась в ArcGIS Pro.

В качестве основного метода автоматизированного дешифрирования выбран метод контролируемой классификации. В качестве входных параметров данный метод позволяет указать спектральные свойства нефтезагрязненных земель, обеспечивая тем самым более точную их идентификацию [4, 5], в отличие от классификации без обучения, в результате выполнения которой может наблюдаться потеря значительной части данных [17].

Классификация выполнялась по мультиспектральному изображению (Layer stack) с предварительным подбором комбинации каналов, обеспечивающим наилучшую идентификацию нефтяных загрязнений.



Рис. 1. Местоположение лицензионного участка Ершового месторождения (граница обозначена красным)

Предварительно для объектов, участвующих в классификации (нефтезагрязненные земли, лесные и болотные комплексы, гидрографические и антропогенные объекты), были получены спектральные профили, анализ которых позволил сделать вывод, что классы объектов наиболее различимы в каналах RED, NIR, SWIR и SWIR-2 (рис. 2). Наиболее отчетливо нефтезагрязнения на данной территории видны при сочетании каналов RED-NIR-SWIR, RED-NIR-BLUE, SWIR2-NIR-GREEN (рис. 3).

По итогам анализа спектральных профилей была выбрана комбинация RED-NIR-SWIR как наиболее контрастная. Из комбинации этих каналов создавалось мультиспектральное изображение (Layer Stack).

Поскольку нефтяные загрязнения чаще образуются в определенных местах (вдоль трубопроводов, в местах их стыка, рядом с эксплуатируемыми скважинами и т. п.) [18],

в программном комплексе ArcGIS Pro были созданы буферные зоны к нефтепроводам радиусом 1 000 м. Данная операция позволила сократить время для последующей компьютерной обработки снимка (рис. 4).

Для контролируемой классификации при помощи инструментария AOI и редактора сигнатур Signature Editor формировалась обучающая выборка (эталон) путем выделения на растровом изображении участков, относящихся к конкретному классу. Выделяемые эталонные области должны соответствовать ряду критериев: они должны быть однородными, равномерно распределяться по снимку, для каждого класса должно формироваться не менее пяти обучающих выборок [19]. Обучающие выборки создавались для всех классифицируемых объектов, в результате было получено 6 классов сигнатур.

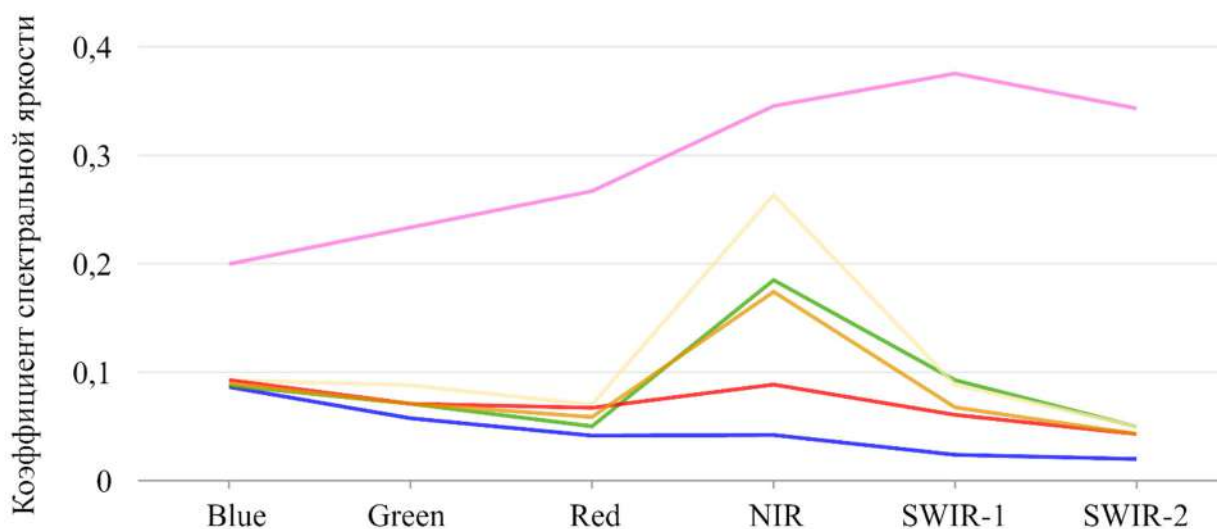


Рис. 2. Спектральные профили различных объектов:

розовый цвет – антропогенные объекты; зеленый – лес; синий – гидрография; бежевый – осоково-сфагновое болото; коричневый – грядово-мочажинное болото; красный – нефтезагрязненные земли

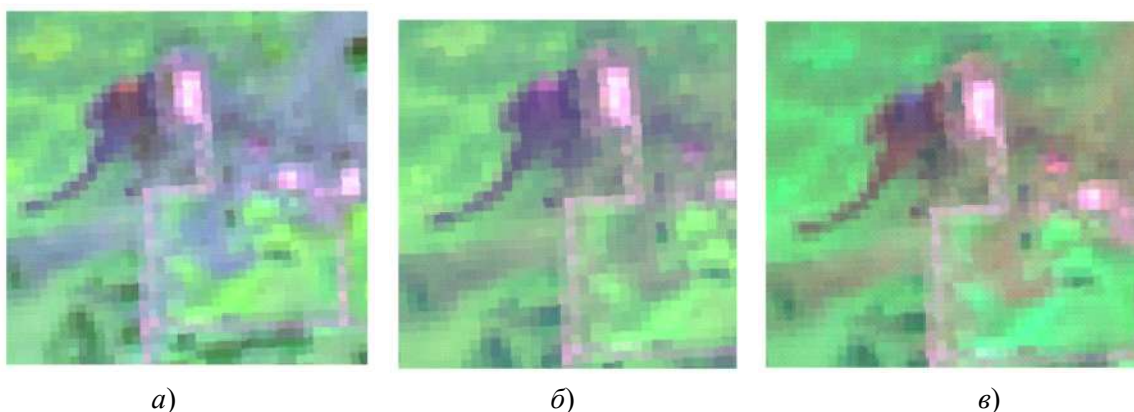


Рис. 3. Вид нефтяного загрязнения в различных комбинациях спектральных каналов:
 а) RED-NIR-SWIR; б) RED-NIR-BLUE; в) SWIR2-NIR-GREEN

Для каждого класса сигнатур был построен спектральный профиль (в Signature Editor инструмент Signature Mean Plot) (рис. 5). Инструмент позволяет увидеть относительное положение классов относительно друг друга, проверить, пересекаются ли они между собой.

Спектральное отражение классов наиболее различимо для канала NIR, класс нефтезагрязнений хорошо отделим от остальных классов, следовательно, данные сигнатуры могут быть использованы для последующей тематической обработки.

Для поиска наиболее подходящего способа проверялись методы классификации:

- 1) максимального правдоподобия (Maximum Likelihood);
- 2) расстояний Махаланобиса (Mahalanobis Distance);
- 3) минимальных расстояний (Minimum Distance);
- 4) спектрального угла (Spectral Angle Mapper).

Соответствующие инструменты запускались со следующими параметрами.

1. В качестве определяющего правила указывается параметрическое правило [20].

2. В строках с указанием правила принятия решения о перекрытии (Overlap Rule) и отнесении неклассифицированных пиксе-

лей к тому или иному классу (Unclassified Rule) указывается Parametric Rule.

3. В пункте Non-parametric Rule устанавливается режим None.

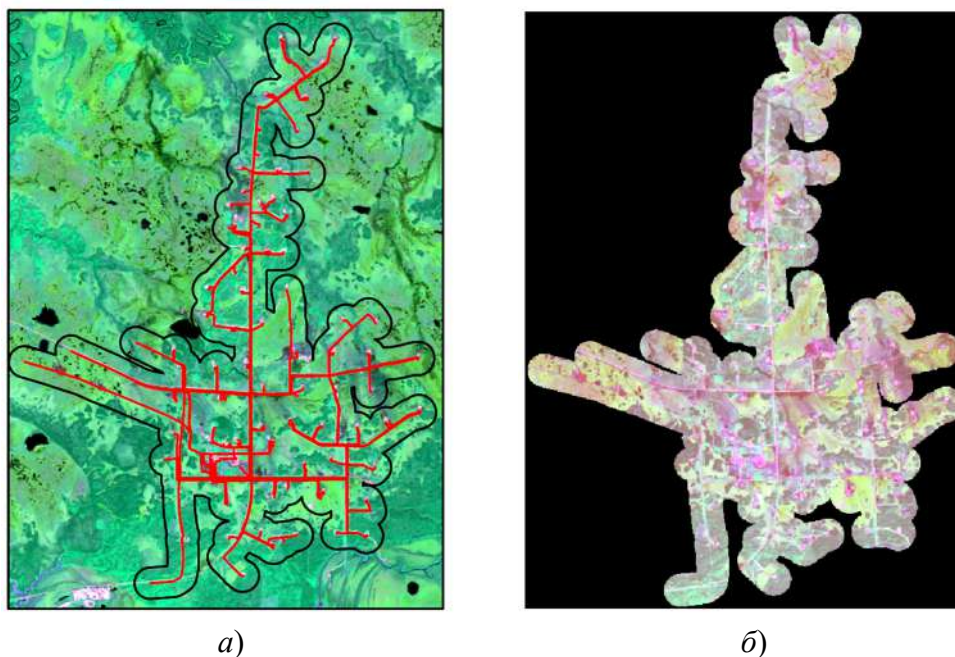


Рис. 4. Выделение потенциально загрязненных земель:

а) создание буферной зоны в ArcGIS Pro, красными линиями обозначены трубопроводы, черными – контур буферной зоны; б) растр, обрезанный по буферу

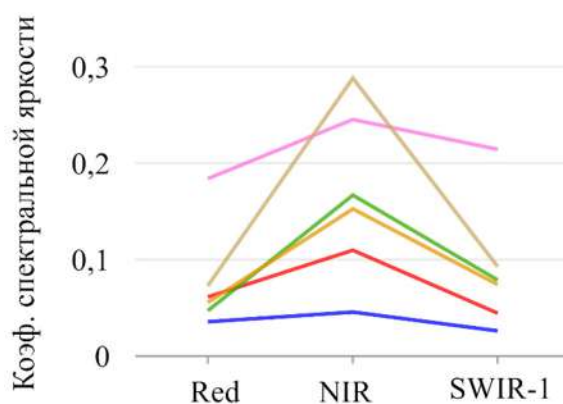


Рис. 5. Спектральный профиль для каждого класса сигнатур:

розовый цвет – антропогенные объекты; зеленый – лес; синий – гидрография; бежевый – осоково-сфагновое болото; коричневый – грядово-мочажинное болото; красный – нефтезагрязненные земли

Для оценки точности метода рассчитывались ошибки первого и второго рода при помощи функции Evaluate – Contingency, доступной в редакторе сигнатур.

Результат классификации может быть получен в виде матрицы ошибок, в процентах или в количестве точек. Ошибка первого рода проявляется в появлении на объектах класса точек по-

сторонних классов. Ошибка второго рода проявляется в появлении точек этого класса на других объектах [20]. Наибольшая сходимость результатов соответствует методам максимального правдоподобия и расстояний Махаланобиса.

Важным критерием выбора метода классификации является различимость классов болот и нефтяных разливов (рис. 6, а). Метод

минимального расстояния и метод спектрального угла были отклонены именно из-за того, что алгоритм ошибочно определил в класс нефтяного загрязнения большой участок гря-

дово-мочажинного болота (рис. 6, з, д). Методы расстояний Махаланобиса и максимального правдоподобия показали в целом схожие результаты (рис. 6, б, в).

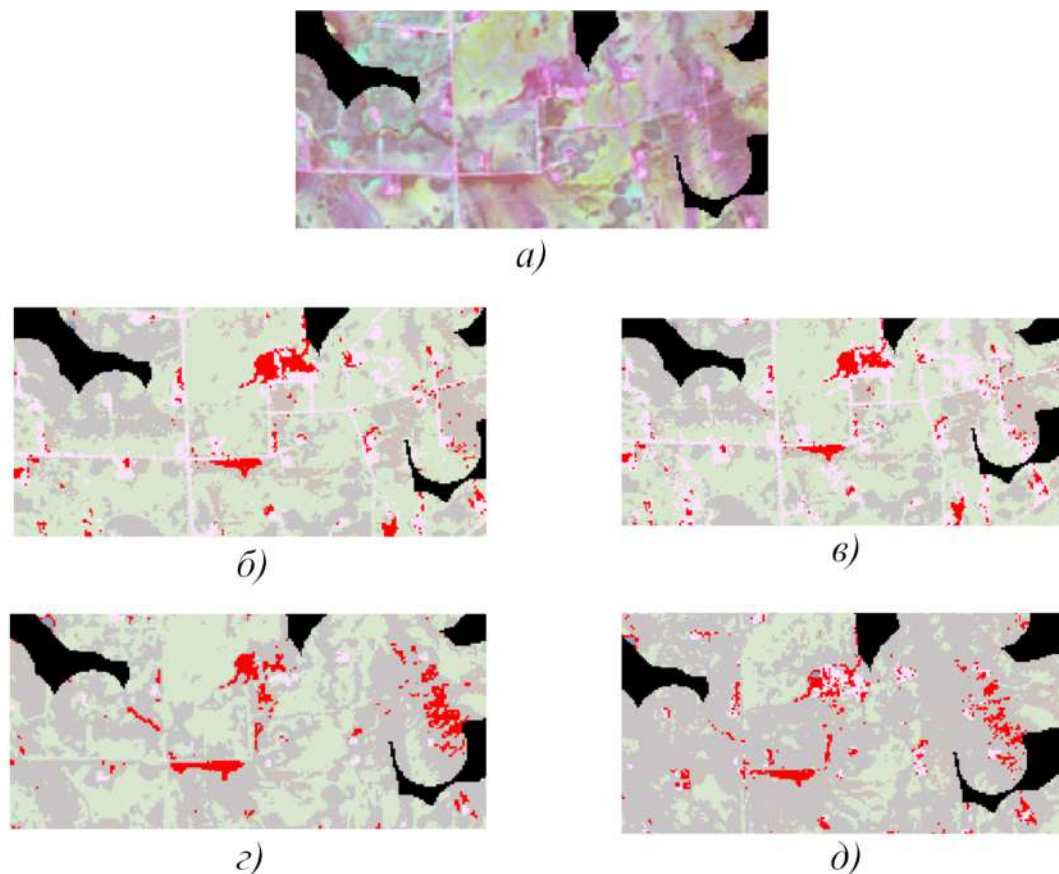


Рис. 6. Фрагменты результата классификации различными методами: а) исходное растровое изображение; б) метод максимального правдоподобия; в) метод расстояний Махаланобиса; з) метод минимального расстояния; д) метод спектрального угла

Для дальнейшей работы был выбран метод максимального правдоподобия. Выбор сделан по результатам оценки ошибок первого и второго рода; кроме того, метод считается наиболее универсальным [21], следовательно, с большей вероятностью будет давать хорошие результаты в другие сезоны года или на других участках. Кроме того, данный метод уже применялся на аналогичных территориях и хорошо зарекомендовал себя при полевой заверке результатов дешифрирования [22].

Постклассификационная обработка включала в себя пространственное сглаживание при помощи функции «Анализ ближайших соседей» (Neighborhood) [23].

Для последующего анализа (например, для вычисления площади), растровые данные целесообразно перевести в векторное представление при помощи инструмента Raster to Shapefile.

Так как целью работы является выявление нефтяных загрязнений, оценка точности классификации осуществлялась только для этого класса объектов. Верификация результатов осуществлялась путем сравнения с контрольными данными (данными о фактических площадях и локализации нефтяных разливов) (рис. 7).

Методом максимального правдоподобия была выявлена значительная часть нефтезагрязненных земель. Совпадение с контрольными данными составляет 67 %, что можно считать удовлетворительным [24].

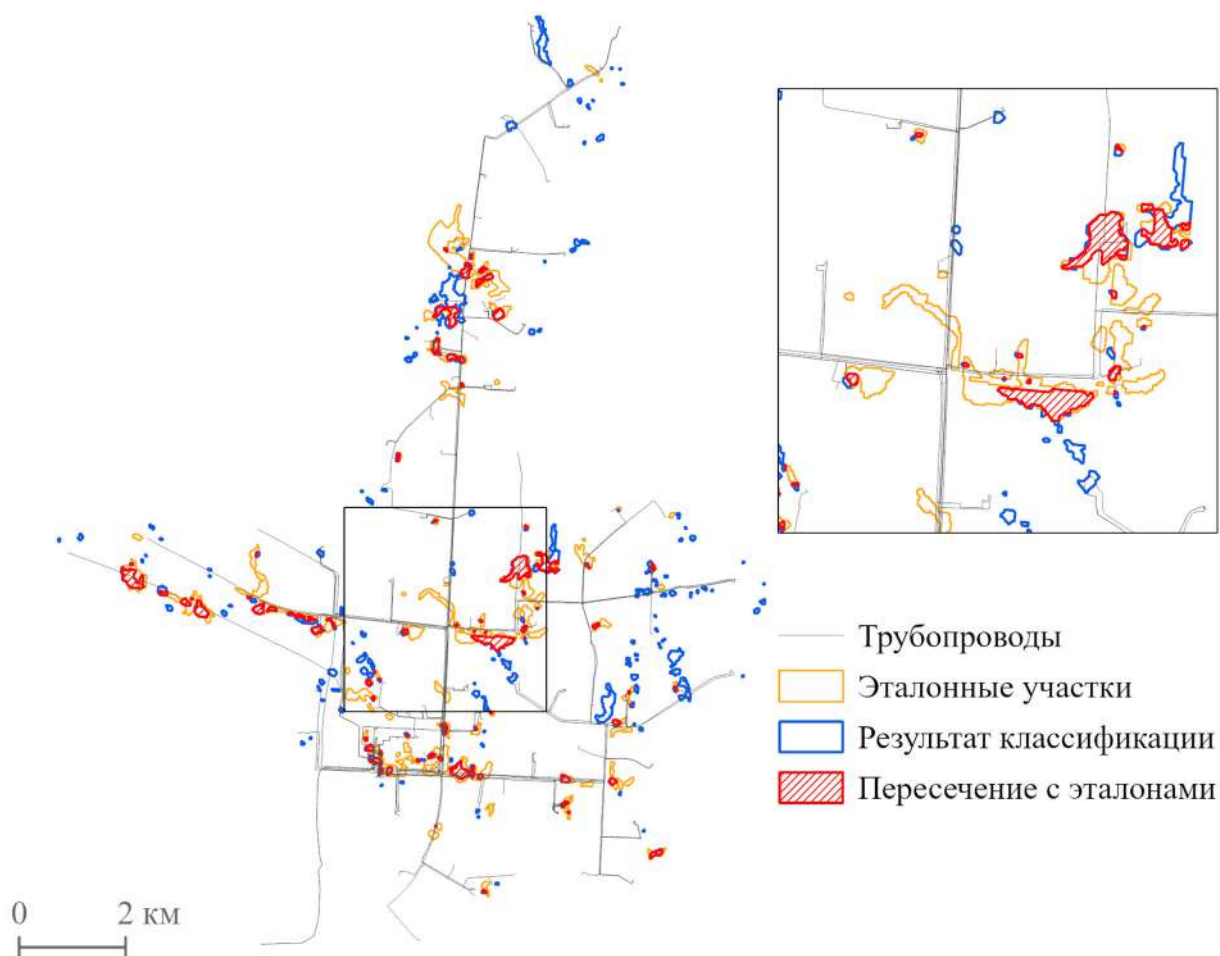


Рис. 7. Оценка качества классификации

Результаты и их обсуждение

Предлагаемая методика включает:

- 1) подготовку исходных данных;
- 2) создание мультиспектрального изображения в комбинации каналов RED-NIR-SWIR;
- 3) создание буферной зоны вокруг трубопроводов;
- 4) создание обучающей выборки для классов объектов;
- 5) классификацию мультиспектрального изображения методом Maximum Likelihood;
- 6) постобработку полученных результатов.

Для косвенного подтверждения эффективности предлагаемой методики был выполнен мультитременной анализ результатов классификации на лицензионном участке по космическим снимкам спутников Landsat 5, 7, 8 за период с 1990 по 2020 г. Снимки отбирались с временным интервалом в 5 лет.

На рис. 8 участки нефтяных загрязнений представлены полупрозрачными полигонами, цвет нефтеразливов различается в зависимости от времени их образования: чем старше разлив, тем более холодным оттенком он отображен. Нефтезагрязненные участки 2011 г., для которых ранее была осуществлена сверка с эталонами, выделены красным контуром. Нефтяные загрязнения локализованы вдоль трубопроводов и рядом с местами их стыков. Наибольшие площади загрязнений наблюдаются в 1995 и 2000 гг. Наименьшие площади характерны для 2016 г.

Значительная часть загрязнений из года в год попадает на одни и те же участки (отображенные на карте наиболее темными цветами), что может свидетельствовать о том, что данные участки нефтепровода являются наиболее аварийно опасными.

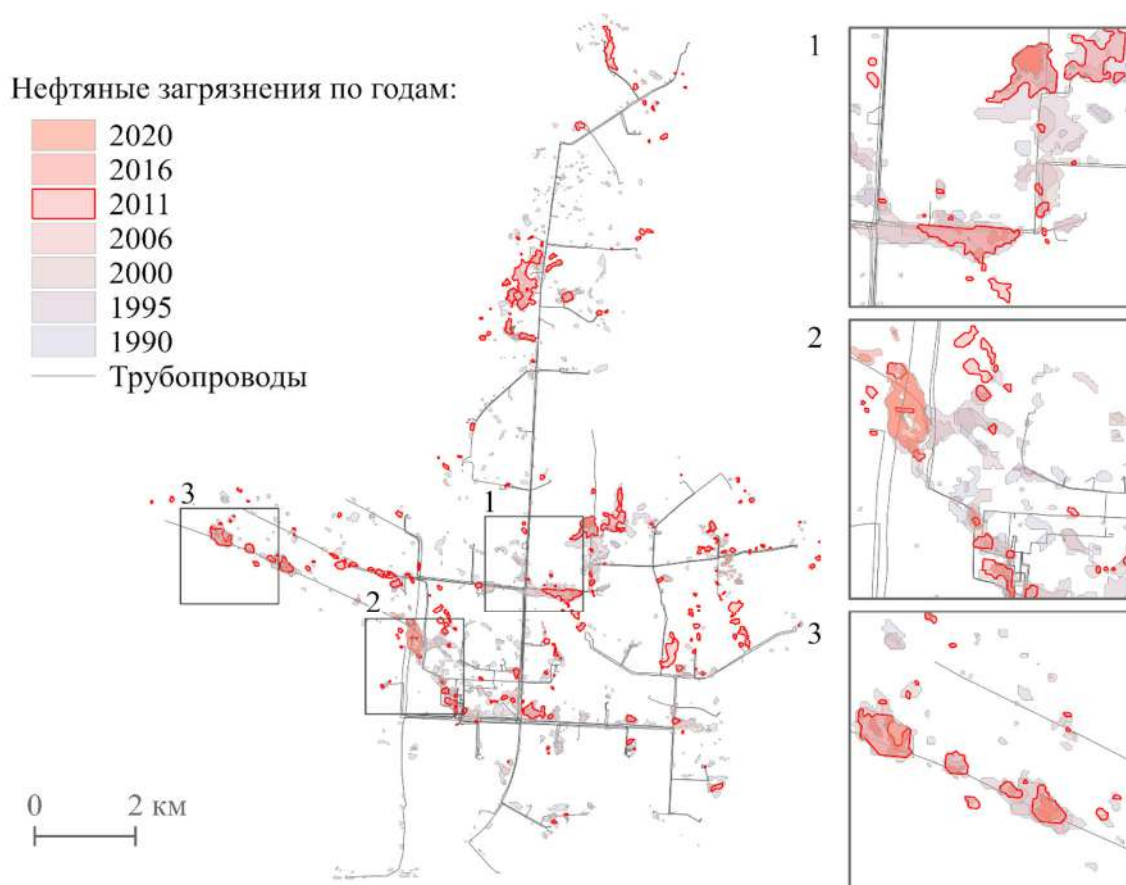


Рис. 8. Изменение площади и локализации нефтезагрязненных земель за период эксплуатации

Заключение

Для дешифрирования нефтезагрязненных земель и максимальной различимости классов наиболее подходящим является цветовой композит с участием ближнего инфракрасного диапазона (NIR), например RED-NIR-SWIR.

Выполнение классификации с обучением методом максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) показало хорошие результаты в процессе выявления нефтезагрязненных земель

на равнинных заболоченных территориях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Создание буферной зоны позволит значительно сократить время на классификацию снимка и фильтрацию полученных результатов.

Методика была апробирована на снимках Landsat, находящихся в открытом доступе, что позволяет применять ее для других территорий со сходными природными условиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников С. И., Жаркова М. Г., Казеев К. Ш., Кутузова И. В., Самохвалова Л. С., Налета Е. В., Зубков Д. А. Оценка экотоксичности тяжелых металлов и нефти по биологическим показателям чернозема // Экология. – 2014. – Т. 45. – № 3. – С. 157–166.
2. Бондур В. Г. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. акад. В. Г. Бондура. – М. : Научный мир, 2012. – С. 560.
3. СОВЗОНД: Геоинформационные системы и космический мониторинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sovzond.ru/files/brochure_OilGas.pdf (дата обращения: 10.06.2023).
4. Гордиенко А. С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования Земли // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 48–55.

5. Kolokoussis P., Karathanass V. Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery // Journal of Marine Science and Engineering. – 2018. – V. 6 (1) – P. 4.
6. Tysiac P., Strelets T., Tuszyńska W. The Application of Satellite Image Analysis in Oil Spill Detection // Applied Sciences. – 2022. – V. 12 (8) – P. 4016.
7. Кулик Е. Н., Байкин Д. А. Разливы нефтепродуктов на водной поверхности: методы анализа данных дистанционного зондирования Земли при их выявлении // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 61–73.
8. Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 130–149.
9. Борисов Д. В. Дешифрирование нефтезагрязненных территорий при помощи данных дистанционного зондирования // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – С. 261–262.
10. Разакова М. Г. Выявление и картирование нефтяных загрязнений почв по данным дистанционного зондирования // Проблемы информатики. – 2017. – № 4 (37). – С. 4–15.
11. Fingas M., Brown, C. E. A review of oil spill remote sensing // Sensors. – 2018. – V. 18 (1). – P. 91.
12. Гордиенко А. С., Ткач А. В. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 55–63.
13. Зулин К. А., Кулик Е. Н. Использование данных дистанционного зондирования SENTINEL-2В для мониторинга последствий разливов нефти // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 60–66.
14. Krestenitis M., Orfanidis G., Ioannidis K., Avgerinakis K., Kompatsiaris I. Oil spill identification from satellite images using deep neural networks // Remote Sensing. – 2019. – V. 11 (15). – P. 1762.
15. Соромотин А. В. Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири : монография. – Тюмень : ТюмГУ, 2010. – С. 320.
16. Дикунец В. А. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. – Ханты-Мансийск, М. : Роскартография, Мониторинг, 2004. – 152 с.
17. Варфоломеев А. Ф., Кислякова Н. А. Особенности дешифрирования пространственных объектов по космическим снимкам в программе ERDAS Imagine 8.3 // Огарёв-Online. – 2015. – № 4 (45). – С. 7.
18. Владимиров В. А., Дубнов П. Ю. Аварийные и другие несанкционированные разливы нефти // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2013. – Т. 3. – № 1. – С. 365–382.
19. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы – М. : Техносфера, 2008. – С. 312.
20. Чабан Л. Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных : учебное пособие. – М. : МИИГАиК, 2013. – С. 104.
21. Чабан Л. Н. Тематическая классификация многозональных (многослойных) изображений в пакете ERDAS Imagine: методические указания для лабораторного практикума. – М. : МИИГАиК, 2006. – С. 44.
22. Князьков А. С., Москвина Н. Н. Методика автоматического дешифрирования нефтезагрязненных земель // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции (Тюмень – Тобольск, 22–25 августа 2017 г.). – Тюмень : ТюмГУ, 2017. – Т. 2. – С. 447–450.
23. ArcGIS. Processing classified output [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/processing-classified-output.htm> (дата обращения: 10.06.2023).
24. Чабан Л. Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования : учебное пособие. – М. : МИИГАиК, 2016. – С. 94.

Об авторах

Юлия Владимировна Белова – старший преподаватель кафедры картографии и геоинформационных систем.

Валентина Аркадьевна Добрякова – кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформационных систем.

Дарья Владимировна Козлова – студент кафедры картографии и геоинформационных систем.

Владислава Олеговна Исаева – студент кафедры картографии и геоинформационных систем.

Кирилл Викторович Гетман – студент кафедры картографии и геоинформационных систем.

Получено 20.12.2023

© Ю. В. Белова, В. А. Добрякова, Д. В. Козлова,
В. О. Исаева, К. В. Гетман, 2024

Methodology for automated interpretation of oil pollution for the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra

Y. V. Belova¹✉, V. A. Dobryakova¹, D. V. Kozlova¹,
V. O. Isaeva¹, K. V. Getman¹

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

e-mail: y.v.belova@utmn.ru

Abstract. The work proposed and then tested a method for deciphering oil pollution for the territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra using automated methods in the ERDAS Imagine 2015 software package. The selection of the method was carried out on the basis of Landsat 5 satellite data for 2011 for the territory of the Ershovoy field. To assess the quality of classification, data on the actual areas and localization of oil spills in 2011 were used. The proposed methodology includes preparation of initial data, creation of a multispectral image in a combination of RED-NIR-SWIR channels, creation of a training sample for classes of objects, classification of a multispectral image using the Maximum method Likelihood, classification quality assessment. The proposed decoding scheme can be used to assess the consequences of accidents associated with oil leaks during its production and transportation in the wetlands of Western Siberia.

Keywords: oil pollution, monitoring of oil-contaminated lands, automated interpretation, controlled classification, satellite image processing

REFERENCES

1. Kolesnikov, S. I., Zharkova, M. G., Kazeev, K. S., Kutuzova, I. V., Samokhvalova, L. S., Naleta, E. V., Zubkov, D. A. (2014). Ecotoxicity assessment of heavy metals and crude oil based on biological characteristics of chernozem. *Ekologiya. [Ecology]*, 45(3), 157-166 [in Russian].
2. Bondur, V. G. (2012). *Aerokosmicheskii monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace monitoring of oil and gas facilities]*. Moscow: Scientific world Publ., 560 p. [in Russian].
3. Sovzond. (n.d.). Retrieved from https://sovzond.ru/files/brochure_OilGas.pdf.
4. Gordienko, A. S. (2021). Research of the possibility of detecting the negative impact of oil spills on the surrounding vegetation based on remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(6), 48–55 [in Russian].
5. Kolokoussis, P., Karathanass, V. (2018). Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6 (1), 4.

6. Tysiac, P., Strelets, T., Tuszynska, W. (2022). The Application of Satellite Image Analysis in Oil Spill Detection. *Applied Sciences*, 12 (8), 4016.
7. Kulik, E. N., Baikin, D. A. (2022). Oil spills on the water surface: methods of remote sensing data analysis for their identification. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(4), 61–73 [in Russian].
8. Mityagina, M. I., Lavrova, O. Yu., Bocharova, T. Yu. (2015). Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 12(5), 130–149 [in Russian].
9. Borisov, D. V. (2014). Deciphering petropolluted territories using remote sensing data. *Reshetnevskiy chteniye [Reshetnev readings]*, 1, 261-262 [in Russian].
10. Razakova, M. G. (2017). Detection and mapping of oil pollution of soils according to remote sensing data. *Problemy informatiki [Problems of Informatics]*, 4(37), 4–15 [in Russian].
11. Fingas, M., Brown, C. E. (2018). A review of oil spill remote sensing. *Sensors*, 18 (1), 91.
12. Gordienko, A. S., Tkach, A. V. (2022). Study of the state of the environment in the area of oil production using space images. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(6), 55–63 [in Russian].
13. Zulin, K. A., Kulik, E. N. (2023) Oil spill monitoring using Sentinel-2B remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(2), 60–66 [in Russian].
14. Krestenitis, M., Orfanidis, G., Ioannidis, K., Avgerinakis, K., Kompatsiaris, I. (2019). Oil spill identification from satellite images using deep neural networks. *Remote Sensing*, 11 (15), 1762.
15. Soromotin A. V. (2010). *Vozdeystviye dobychi nefti na tayozhnyye ekosistemy Zapadnoy Sibiri [Impact of oil production on taiga ecosystems of Western Siberia]*. Tyumen: Tyumen State University Publ., 320 p. [in Russian].
16. Dikunets, V. A. (2004). *Atlas Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Atlas of the Khanty-Mansi autonomous area – Yugra]*. Khanty – Mansiysk, Moscow: Roscartography, Monitoring, 152 p. [in Russian].
17. Varfolomeyev, A. F., Kislyakova, N. A. (2015). Decoding features of spatial objects on satellite pictures in ERDAS Imagine 8.3. *Ogarov online [Ogarev-online]*, 4(45) [in Russian].
18. Vladimirov, V. A., Dubnov, P. Yu. (2013). Emergency and other unauthorized oil spills. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya [Civil protection strategy: problems and research]*, 3(1), 365–382 [in Russian].
19. Chandra A. M., Gosh S. K. (2008). *Dstantsionnoye zondirovaniye i geograficheskiye informatsionnyye sistemy [Remote Sensing and Geographic Information System]*. Moscow: Tekhnosfera Publ, 312 p. [in Russian].
20. Chaban, L. N. (2013). *Avtomatizirovannaya obrabotka aerokosmicheskoy informatsii pri kartografirovanii geoprostranstvennykh dannykh [Automated processing of aerospace information when mapping geospatial data]*. Moscow: MIIGAiK Publ, 104 p. [in Russian].
21. Chaban, L. N. (2006). *Tematicheskaya klassifikatsiya mnogozonalnykh (mnogosloynnykh) izobrazheniy v pakete ERDAS Imagine [Thematic classification of multispectral (multilayer) images in the ERDAS Imagine package]*. Moscow: MIIGAiK Publ, 44 p. [in Russian].
22. Knyazkov, A. S., Moskvina, N. N. (2017). Methods of automatic interpretation of oil polluted lands. In *Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii: Landshaftovedeniye: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoye obespecheniye prirodopolzovaniya i ustoychivogo razvitiya [Proceedings of the XII International Landscape Conference: Landscape science: theory, methods, landscape-ecological support of land use and sustainable development]* (pp. 447-450). Tyumen: Tyumen State University Publ. [in Russian].
23. ArcGIS. Processing classified output [n.d.]. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/processing-classified-output.htm>.
24. Chaban, L. N. (2016). *Metody i algoritmy raspoznavaniya obrazov v avtomatizirovannom deshifirovani dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Methods and algorithms for pattern recognition in automated interpretation of remote sensing data]*. Moscow: MIIGAiK Publ, 94 p. [in Russian].

Author details

Yulia V. Belova – Senior Lecturer, Department of Cartography and Geoinformation Systems.

Valentina A. Dobryakova – Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformation Systems.

Darya V. Kozlova – Student, Department of Cartography and Geoinformation Systems.

Vladislava O. Isaeva – Student, Department of Cartography and Geoinformation Systems.

Kirill V. Getman – Student, Department of Cartography and Geoinformation Systems.

Received 20.12.2023

© *Y. V. Belova, V. A. Dobryakova, D. V. Kozlova,
V. O. Isaeva, K. V. Getman, 2024*