

УДК [528.71:528.8]+[553.982.2:504](479.24)
DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61

Разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли (на примере акватории азербайджанского сектора Каспийского моря)

А. Ш. Гулиев¹, Т. А. Хлебникова^{2✉}, А. И. Каленицкий²

¹ Государственная Нефтяная компания Азербайджанской Республики,
г. Баку, Азербайджанская Республика

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: t.a.hlebnikova51@gmail.com

Аннотация. Для устойчивого развития прибрежной территории Каспийского моря и защиты окружающей среды этого региона актуальны исследования по космическому мониторингу. В статье приведены результаты разработки методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны азербайджанского сектора Каспийского моря на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли разных съемочных систем. Повышение достоверности определения границ зон нефтяных загрязнений осуществляется за счет устранения неоднородности и немонотонности спектрального фона изображений. Это достигается при использовании многозональных оптических и радиолокационных изображений, полученных разными съемочными системами, интеграции нескольких наборов данных, глубоком обучении, а также реализации такого подхода на облачной платформе. Результаты исследований могут быть использованы при обработке материалов космических съемок для поиска потенциально уязвимых районов шельфовой зоны Каспийского моря и в других районах шельфовых зон мирового океана.

Ключевые слова: Sentinel-1A, Sentinel-2A, многозональные оптические снимки, радиолокационные снимки, дешифрирование, нейронная сеть, мониторинг нефтяных загрязнений

Для цитирования:

Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А., Каленицкий А. И. Разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли (на примере акватории азербайджанского сектора Каспийского моря) // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 53–61. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61

Введение

Уровень экологической загрязненности внутренних и внешних водоемов с каждым годом вызывает все большую озабоченность среди населения, ученых и общественных деятелей. Наиболее критическая ситуация сложилась в нефтегазовом секторе, что вызвано повышением объемов строительства подводных нефте- и газопроводов, растущим числом перевозок углеводородного сырья танкерами, вводом в эксплуатацию новых объектов добычи нефти и газа, а также выносом реками вредных

веществ. Проблема загрязнения нефтью одна из наиболее важных проблем при эксплуатации нефтяных скважин. Так как нефть в Республике Азербайджан добывается в море, то необходимо осуществлять как периодический, так и оперативный контроль состояния поверхности моря, окружающей среды, нефтяных скважин. Эта проблема стала особенно актуальной после аварии в Мексиканском заливе, спровоцировавшей всемирно известную экологическую катастрофу [1].

Области загрязнения нефтью и ее производными в Каспийском море представляют

угрозу для экологической ситуации. Несмотря на это, число исследований в этой области недостаточно [2–5].

В XXI в. началось международное сотрудничество в области улучшения техногенных условий Каспийского шельфа. В г. Тегеран (Исламская республика Иран) была принята стратегическая программа действий, известная как «Тегеранская Конвенция» [6]. «Тегеранская Конвенция» дает возможность развивать сотрудничество сторон, содействовать рациональному использованию ресурсов Каспийского моря, изучать и сохранять его природную среду.

В настоящее время анализ последствий загрязнения мест нефтедобычи природными и техническими факторами проводится на уровне экспертов, когда характеристики изменений уже известны. Такой подход не ориентирован на оперативную оценку масштабов воздействия и его возможные последствия после воздействия загрязнений на морскую воду и не позволяет принять своевременные меры по контролю за состоянием водной поверхности морской экологической службе.

Для реализации мер по защите прибрежных территорий, шельфа Каспийского моря необходима актуальная и достоверная информация об их состоянии. Использование технологий обработки материалов ДЗЗ позволяет проводить исследования и получать информацию о состоянии водной поверхности шельфа, окружающей среды оперативнее и с наименьшими затратами [7–9].

Мониторинг – это регулярное наблюдение и сбор информации с использованием авиационной и космической техники для оценки и прогноза состояния объектов и процессов. При мониторинге шельфовых зон материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются для создания и обновления баз пространственных данных для исследуемой территории.

В Азербайджанской Республике мониторинг нефтяных загрязнений в основном проводится с использованием микроволновых спутниковых данных в одинарной поляризации без подтверждения факта загрязнения авиационными или судовыми наблюдениями. Существующие методы автоматизированного де-

шифрирования материалов ДЗЗ не позволяют с достаточной достоверностью выделять границы объектов загрязнения нефтью на водной поверхности, поэтому необходимо совершенствовать методику космического мониторинга оценки нефтяных загрязнений с учетом специфики шельфовой зоны.

Исследования, рассматриваемые в данной статье, представляют собой продолжение работ [10–13].

Цель исследования, постановка задачи

Цель исследований заключалась в разработке методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны, обеспечивающей повышение достоверности обнаружения и надежности картографирования границ объектов загрязнения нефтью на водной поверхности шельфа, что позволит оперативно принимать управленческие решения в области охраны окружающей среды.

При мониторинге и оценке состояния месторождений нефти имеет место значительное число потенциально существующих неопределенностей классов объектов, более 30 % которых возникают впервые. Источниками такого рода неопределенностей (дефектов) на изображениях являются: изменение физико-химических характеристик процессов, протекающих в водных бассейнах, вызванных факторами естественного, природного и антропогенного характера; технические и программно-аппаратные сбои сенсоров, средств контроля исследуемой подстилающей поверхности и ошибки, обусловленные человеческим фактором.

Анализ литературных источников показал, что системы обработки ДЗЗ, включающие существующие методы, статичны и ориентированы на поиск известных, точно описываемых объектов (явлений) состояний водных поверхностей морей или шельфов, при этом часто не определяют ранее неизвестные неопределенности классов объектов в ДЗЗ. Последнее делает их применение малоэффективным.

Повышение достоверности обнаружения границ зон нефтяных загрязнений предложено осуществлять за счет устранения неоднородности и немонотонности спектрального фона

изображений. Это достигается средствами совместной обработки оптических многоспектральных и радиолокационных изображений, интеграции нескольких наборов данных, глубоким обучением, а также реализацией такого подхода на облачной платформе.

Исследования, проведенные ранее, показали, что интеграция многозональных снимков и радиолокационных изображений с синтезированной апертурой (РСА) позволяет уменьшить неопределенность при дешифрировании, возникающую из-за освещения окружающей среды, солнечных лучей на поверхности воды в шельфовых местах, а также малой глубины [14, 15]. Термин «неопределенность» имеет достаточно разные понятия. Есть много прагматических определений неопределенности. Они отличаются научным уровнем и техническими деталями [16, 17].

В данном исследовании использовано определение неопределенности по ИСО 9000 [18]. Термины «несоответствие» и «неопределенность» связаны и часто могут быть использованы в качестве синонимов. Для простоты в исследовании не различаются несоответствие и неопределенность и несоответствия называются неопределенностью. Примеры неопределенностей показаны на рис. 1.

В зонах шельфа чаще всего встречаются следующие типы неопределенности: точечные, континентальные, временные, совместные и коллективные. Неопределенности интерпретируются как N – неопределенность математической модели знаний обучения и тестирования; M – неопределенность данных, потенциально существующих в исходных данных аэрокосмического мониторинга.

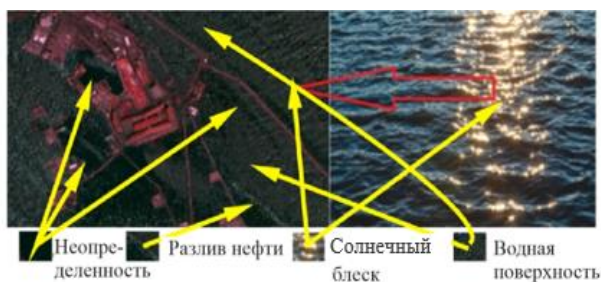


Рис. 1. Примеры некоторых неопределенностей

Методы и материалы

Экспериментальные работы по исследованию предложенной методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений выполнялись на азербайджанской береговой территории суши и шельфовой зоны акватории Нефтяные Камни сектора Каспийского моря.

В связи с тем, что стали доступны данные Европейского космического агентства (ЕКА) в рамках проекта, направленного на создание автономной многоуровневой системы наблюдения за экологической обстановкой на Земле, в исследовании использовались разновременные космические снимки со спутников съемочных систем Sentinel-1A и Sentinel-2A [19], а также другие дополнительные материалы. В качестве последних применялись: аналоговые топографические карты суши, морские карты масштаба 1 : 50 000, цифровые сейсмические карты, карты ветрового поля, батиметрические данные, геологические и геофизические карты, полевые данные визуального наблюдения на территории исследования, архивные цифровые аэрофотоснимки масштаба 1 : 40 000. Также использовались данные глобальной нормализации, позволяющие осуществлять определение двойников и сложных форм нефтяных разливов в различных масштабах.

Разработка технологической схемы методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны

Аэрокосмический мониторинг, выполняемый для оценки нефтяных загрязнений шельфовой зоны, в обобщенном виде состоит из следующих этапов:

- сбор, проверка и подготовка исходных данных и материалов;
- исследование состояния мест нефте-разработок шельфовых зон и проведение оценки;
- визуализация и подготовка картографических ресурсов;
- сбор геоинформационных данных;
- полевые изыскания;
- обнаружение неопределенностей на космических изображениях.

Технологическая схема методики аэрокосмического мониторинга нефтеразливов на водной поверхности будет состоять из нескольких функционально связанных

между собой этапов (рис 2). Блоки, выделенные на схеме зеленым цветом, предложены А. Ш. Гулиевым и исследованы авторами.

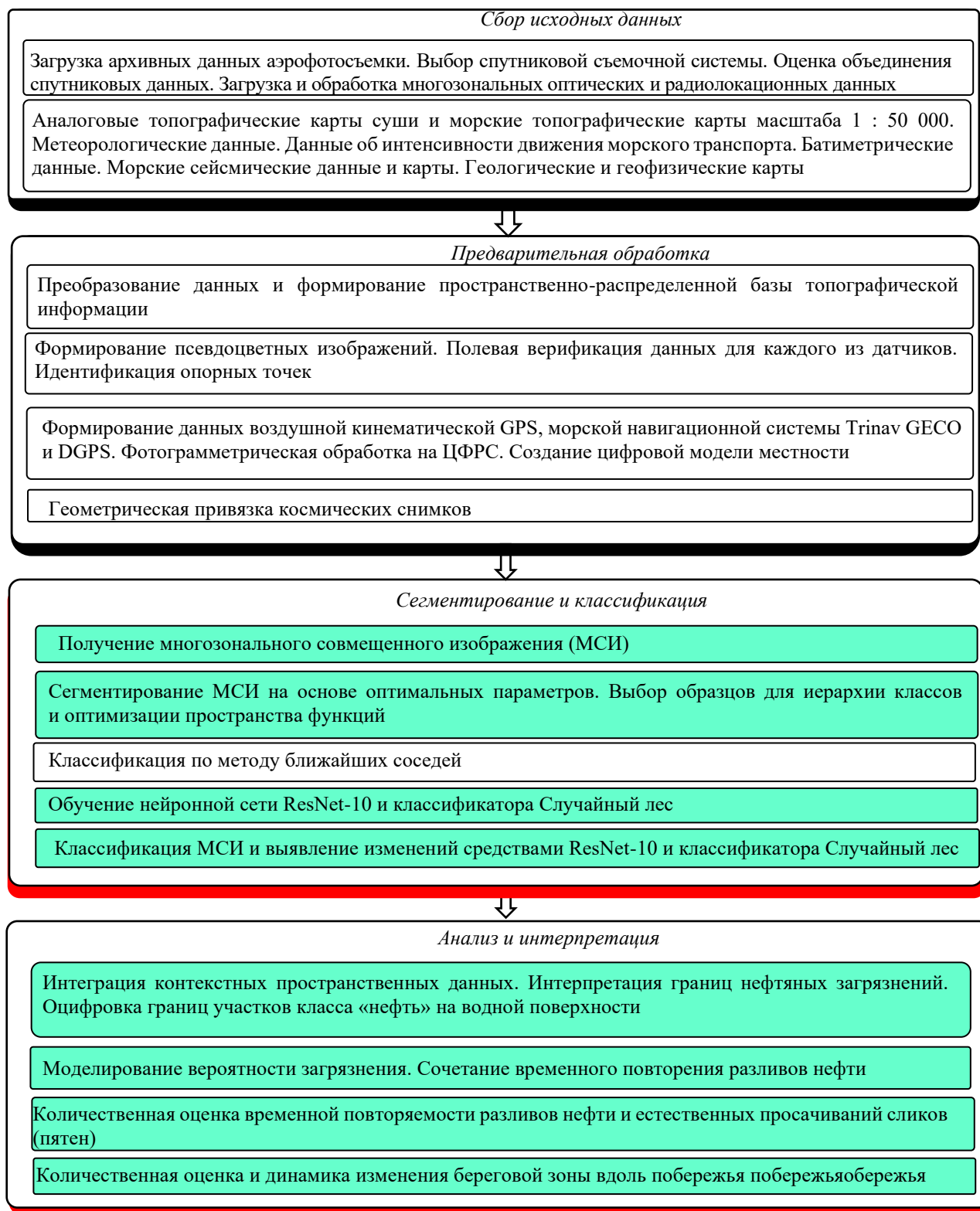


Рис. 2. Технологическая схема методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений шельфовой зоны

Обработка космических изображений и дополнительных материалов проводится с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ: ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine (Hexagon Geospatial), SNAP Desktop (Sentinel Application), MapInfo Pro 2021, ArcGIS (ESRI Inc.), ResNet-10, а также морской навигационной системы TRINAV GECO и пакета прикладных программ Matlab. В зависимости от исходных материалов и данных для реализации предлагаемой методики не всегда нужно использовать все перечисленное ПО.

В результате обработки исходных материалов формируется цифровая пространственно-распределенная база топографической информации (БТИ). Для преобразования исходных материалов и формирования БТИ выполняется сканирование аналоговых топографических карт, векторизация растровых изображений, конвертирование результатов векторизации в соответствующие форматы. По архивным материалам аэрофотосъемки выполняется фотограмметрическое сгущение сети опорных точек в соответствии с требованиями Инструкции по фотограмметрическим работам [20].

Результаты фототриангуляции используются для формирования географически ориентированных пространственно-совмещенных временных рядов многоспектральных космических снимков в формате многослойных изображений. В процессе предварительной обработки массивов данных пробелы на полученных изображениях компенсируются стандартными функциями. Далее по радиолокационным снимкам рассчитываются распределения коэффициентов обратного рассеяния, а также формируются псевдоцветные изображения для всего ряда радиолокационных изображений.

Псевдоцветное изображение – это снимок, полученный из синтеза поляризационных каналов радиолокационного изображения. Формирование таких изображений может выполняться различными способами, исходя из числа поляризации и частоты временного ряда, особенностей исследований.

Анализируя преобразованные пары оптических и радиолокационных изображений, из БТИ выбираются три наиболее информатив-

ных канала и один диапазон радиолокационного изображения путем комбинации. Далее средствами системы обработки изображений (использована система ERDAS IMAGINE) получают многозональное совмещенное (слитое) изображение (МСИ), которое позволяет обнаружить участки разлива нефти за счет повышения разрешения синтезированного многозонального изображения и уменьшения искажений цветопередачи. После получения совмещенного изображения интерпретация по выявлению изменений выполняется средствами нейронной сети ResNet-10 (Residual neural network). Обучение нейронных сетей является процессом, когда параметры устанавливаются средствами моделирования среды, в которой встроена эта сеть.

Процесс подготовки и обучения – это предъявление сетевой выборке примеров обучения. Каждый шаблон подается на вход сети, затем проходит обработку внутри структуры нейронной сети (НС), и вычисляется выходной сигнал сети, который сравнивается с соответствующим значением целевого вектора, представляющего собой требуемый выход сети.

А. Ш. Гулиевым предложены усовершенствования методики целостного многомасштабного обучения, а также тестирование автоматического обнаружения нефтеразлива на водной поверхности моря нейронной сетью ResNet-10 по оптико-электронным и радиолокационным спутниковым снимкам.

Предложенные усовершенствования для ResNet-10 заключаются во введении дополнительных подсказок в архитектуру сети, способствующих улучшению качества дешифрирования. То есть, после ввода данных в сеть ResNet-10, сеть выделяет функции разного масштаба в четыре этапа, которые являются свертками каждой оставшейся части.

Для обучения и оценки результатов работы сети использовались 15 пар оптических и радиолокационных снимков Sentinel-1A и Sentinel-2A. Трансформирование изображений осуществлялось средствами пакета MapInfo Pro 2021 г. Командами «Register» и «Rectify» создана геопривязанная модель растровых изображений в заданной системе координат.

Оценка качества распознавания участков загрязнений нефтью выполнялась путем вы-

бора подбора из исходной выборки, не участвовавшего в обучении. Площади обнаруженных контуров загрязнения нефти сравнивались с аналогичными, полученными средствами алгоритмов традиционных известных методов (k ближайшего соседа, среднее значение областей k ближайшего соседа, метод максимального правдоподобия) обнаружения областей, загрязненных нефтью.

Результаты достоверности распознавания областей текстур разливов нефти по пяти алгоритмам приведены в таблице. В первом случае использованы три версии классифика-

тора ближайших соседей (Nearest Neighbour Classification) по правилам метода ближайшего соседа k -NN и k -9NN, что означает, что для классификации взяты один и девять соседей. Во втором случае использовались средние значения областей обучения (Mean Difference Means (MDM)). В третьем случае использовался алгоритм оценки максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation) значений параметров модели (ML). Четвертый случай – использовался метод случайного леса (Random Forest) с использованием данных Google Earth Engine (GEE).

Результаты обработки по пяти алгоритмам

Датчик/ Sensor	Данные	Классификация ближайших соседей			ML, %	RF, %	ResNet-10, %
		Kn-1NN, %	Kn-9NN, %	MDM, %			
Sentinel-1A	Совмещенное изображение	76,4	67,2	71,8	54,4	83,2	96,5
Sentinel-2A							

Из приведенных в таблице данных следует, что наилучшее значение получено при использовании алгоритма классификации автоматического обнаружения разливов нефти на поверхности воды средствами нейронной сети ResNet-10. По результатам определения областей нефтяных загрязнений обновляются материалы БТИ (НЛ карты, цифровая модель местности, ортофотоплан). По обновленным материалам БТИ оценивается состояние шельфовой акватории и прогнозируется динамика распространения нефтяных загрязнений.

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– области загрязнения нефтью и ее производными в Каспийском море остаются угрозой для экологической ситуации шельфовой зоны. При этом число исследований по мониторингу этой области недостаточно;

– разработана методика аэрокосмического мониторинга границ нефтяных загрязнений шельфовой зоны, включающая способ автоматической классификации исследуемых классов объектов по совмещенным разновременным многозональным оптическим и радиолокационным изображениям и усовершенствованный алгоритм целостного многомасштабного обучения и тестирования автоматического обнаружения границ нефтяных разливов на поверхности моря с помощью нейронной сети ResNet-10 с использованием современных систем анализа данных ДЗЗ;

– экспериментальные исследования разработанной методики аэрокосмического мониторинга на реальных производственных материалах района нефтепромысла Нефтяные Камни Каспийского моря показали более высокую достоверность определения границ нефтяных загрязнений шельфовой зоны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондур В. Г. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса // Науч.-исслед. ин-т аэрокосм. мониторинга «Аэрокосмос». – М. : Научный мир. – 2012. – 558 с.
2. Lawa R. J., Kelly C. The impact of the «Sea Empress» oil spill // *Aquatic Living Resources*. – 2004. – Vol. 17. – P. 389–394. – DOI 10.1051/alr:2004029.
3. Piatt J. F., Ford R.G. How many seabirds were killed by the Exxon Valdez oil spill? // *American Fisheries Society symposium*. – 1996. – Vol. 18. – P. 712–719.
4. Beyer J., Trannum H. C., Bakke T., Hodson P. V., Collier T. K. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – Vol. 110. – P. 28–51. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.06.027.
5. Li P., Cai Q., Lin W., Chen B., Zhang B. Offshore oil spill response practices and emerging challenges // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – Vol. 110. – P. 6–27. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.06.020.
6. Тегеранская конвенция. Текст Конвенции (CEIC Portal) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tehranconvention.org> (дата обращения 10.05.2024).
7. Espedal H. A., Wahl T. Satellite sar oil spill detection using wind history information // *International Journal of Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 20. – P. 49–65. – DOI 10.1080/014311699213596.
8. Peng Liu, Ying Li, Bingxin Liu, Peng Chen and Jin Xu. Semi-automatic oil spill detection on X-band marine radar images using texture analysis, machine learning, and adaptive thresholding // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – P. 756. – DOI 10.3390/rs11070756.
9. Tong S., Liu X., Chen Q., Zhang Z. and Xie G. Multi-feature based ocean oil spill detection for polarimetric SAR data using random forest and the self-similarity parameter [Electronic resource] // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – P. 451. – DOI 10.3390/rs11040451.
10. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории Нефтяных Камней (Каспийского моря)) // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 52–64. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64.
11. Гулиев А. Ш. Обнаружение и картирование нефтяных slickов в море комбинацией различных источников данных дистанционного зондирования Земли // *Вестник Заб. ГУ* – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 9–30. – DOI 10.21209/2227-9245-2022-28-1-19-30.
12. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Исследование возможностей обработки радиолокационных и многозональных космических изображений подстилающей поверхности // *Вестник СГУГиТ*. – 2022 – Т. 27, № 2. – С. 102–114. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114.
13. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Многомерная статистическая модель для обнаружения мест нефтезагрязнений по материалам космических съемок // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология».* – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 11–16. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-11-16.
14. Brown C. E., & Fingas M. F. New space-borne sensors for oil spill response // *In International Oil Spill Conference Proceedings: Washington D. C.* – 2021. – No. 2. – P. 911–916. – DOI 10.7901/2169-3358-2001-2-911.
15. Karathanassi V. Spectral Unmixing Evaluation for Oil Spill Characterization. *Int. J. Remote Sensing Applications*. – 2014. – Vol. 4. – P. 1–17. – DOI 10.14355/IJRSA.2014.0401.01.
16. Дубнов Ю. А., Булычев А. В. Байесовская идентификация параметров смеси нормальных распределений // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2017. – № 1. – С. 101–111.
17. Бутакова М. А., Климанская Е. В., Янц В. И. Мера информационного подобия для анализа слабоструктурированной информации // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – С. 130–136.

18. ИСО 9000 [Electronic resource]. – URL: <https://www.iso.org> (дата обращения 15.07.2024).

19. Европейское космическое агентство [Электронный ресурс]. – URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/scihub.copernicus.eu> (дата обращения 15.01.2023).

20. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов ГКИНП (ГНТА)-02-036–02. – М. : ЦНИИГАиК. – 2002. – 100 с. – Текст: непосредственный.

Об авторах

Аловсат Шура оглы Гулиев – старший геодезист.

Татьяна Александровна Хлебникова – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Анатолий Иванович Каленицкий – доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии.

Получено 02.08.2024

©А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова, А. И. Каленицкий, 2024

Development of a methodology for aerospace monitoring of oil pollution based on the integration of Earth remote sensing data (using the example of the waters of the Azerbaijani sector of the Caspian Sea)

A. Sh. Guliyev¹, T. A. Khlebnikova^{2✉}, A. I. Kalenizkiy²

¹State Oil Company of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: t.a.hlebnikova51@gmail.com

Abstract. Research on space monitoring is relevant for the sustainable development of the coastal territory of the Caspian Sea and the protection of the environment in this region. The article presents the results of the development of a methodology for aerospace monitoring of oil pollution in the shelf zone of the Azerbaijani sector of the Caspian Sea based on the integration of Earth remote sensing (ERS) data. The reliability of determining the boundaries of oil pollution zones is increased by eliminating the heterogeneity and non-monotonicity of the spectral background of images. This is achieved by using multi-zone optical and radar images obtained by different survey systems, integrating several data sets, deep learning, and implementing this approach on a cloud platform. The research results can be used in processing space survey materials to search for potentially vulnerable areas of the shelf zone of the Caspian Sea.

Keywords: Sentinel-1A, Sentinel-2A, multi-spectral space images, radar images, interpretation, neural network, oil pollution monitoring

REFERENCES

1. Bondura, V. G. (2012). Aerospace monitoring of oil and gas complex facilities. *Research Institute of Aerospace Monitoring «AEROCOSMOS»*; M. : Scientific world, 558 p. [in Russian] .
2. Lawa, R. J., & Kelly, C., (2004). The impact of the «Sea Empress» oil spill *Aquatic Living Resources*. Vol. 17., pp. 389–394, DOI 10.1051/alr:2004029.
3. Piatt, J. F., & Ford, R. G. (1996). How many seabirds were killed by the Exxon Valdez oil spill? *American Fisheries Society symposium*. Vol. 18. pp. 712–719.
4. Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., & Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review // *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 110., pp. 28–51, DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.06.027.

5. Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., Zhang, B. (2016). Offshore oil spill response practices and emerging challenges. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 110. pp. 6–27, DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.06.020.
6. Tehran Convention. Text of the Convention (CEIC Portal). Retrieved from <http://www.tehranconvention.org> [in Russian].
7. Espedal, H. A., & Wahl, T. (1999). Satellite sar oil spill detection using wind history information. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 20. pp. 49–65, DOI 10.1080/014311699213596.
8. Peng, Liu, Ying, Li, Bingxin, Liu, Peng, Chen & Jin, Xu. (2019). Semi-automatic oil spill detection on X-band marine radar images using texture analysis, machine learning, and adaptive thresholding. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 11. 756 p. DOI: 10.3390/rs11070756.
9. Tong, S., Liu, X., Chen, Q., Zhang, Z. & Xie, G. (2019). Multi-feature based ocean oil spill detection for polarimetric SAR data using random forest and the self-similarity parameter. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 11. 451 p. DOI 10.3390/rs11040451.
10. Guliev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2019). Identification of places of oil pollution in the shelf zone based on space survey materials (using the example of the Neftyaneye Kamni water area (Caspian Sea)). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24 (3). P. 52–64. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64 [in Russian].
11. Guliev, A. Sh. (2022). Detection and mapping of oil slicks in the sea using a combination of various sources of Earth remote sensing data. *Bulletin of Zab. GU [Bulletin of Zab. GU]*, 28(1). P. 9–30. DOI 10.21209/2227-9245-2022-28-1-19-30 [in Russian].
12. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2022). Investigation of the possibilities of processing radar and multi-zone space images of the underlying surface. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(2), 102–114. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114 [in Russian].
13. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2021). Multidimensional Statistical Model for Detection of Oil Contamination Sites Based on Satellite Imagery. *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]* Vol. 4, No. 1. DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-11-16 [in Russian].
14. Brown, C. E., & Fingas, M. F. (2001). New space-borne sensors for oil spill response. *In International Oil Spill Conference Proceedings: Washington D. C. No. 2*, pp. 911–916, DOI 10.7901/2169-3358-2001-2-911.
15. Karathanassi, V. (2014) Spectral Unmixing Evaluation for Oil Spill Characterization. *Int. J. Remote Sensing Applications*. Vol. 4. pp. 1–17. DOI 10.14355/IJRSA.2014.0401.01.
16. Dubnov, Yu. A., & Bulychev, A.V. (2017). Bayesian identification of parameters of a mixture of normal distributions *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy [Information technologies and computing systems]*. No. 1. pp. 101–111 [in Russian].
17. Butakova, M. A., Klimanskaya, E. V., & Yants, V. I. (2013). Information similarity measure for the analysis of weakly structured information. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*. No. 6. pp. 130–136.
18. ISO 9000. Retrieved from <https://www.iso.org> (accessed July15, 2024) [in Russian].
19. Website of the European Space Agency. Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu/dhus/scihub.copernicus.eu>. (accessed July15, 2024) [in Russian].
20. GKINP (GNTA)-02-036-02. (2002). Instructions for photogrammetric works to create digital topographic maps and plans. *Moscow: TSNIIGAIK*. 100 p. [in Russian].

Author details

Alovsat Sh. Guliev – Senior Surveyor.

Tatyana A. Khlebnikova – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Anatolij I. Kalenizkiy – D. Sc., Professor, Department of Space Physical Geodesy.

Received 02.08.2024

© A. Sh. Guliyev, T. A. Khlebnikova, A. I. Kalenizkiy, 2024