

## Методы совместной обработки комплексных радиолокационных интерферограмм и мультиспектральных оптических снимков в условиях высокой временной декорреляции

*А. Ш. Гулиев<sup>1</sup>, Т. А. Хлебникова<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup> Государственная Нефтяная Компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджан

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

**Аннотация.** В статье обоснована актуальность исследования характеристик при совместном использовании материалов оптической мультиспектральной съемки, данных радиолокационной интерферометрии и частичной поляриметрии, выявлена область применения дешифрирования радарно-оптического композита, построенного по оптическим и радарным данным, приведена математическая модель обработки изображения акватории водной поверхности. Количественная оценка этих автоматизированных или полуавтоматизированных методов не уступает точности традиционных методов оценки состояния морской среды шельфовых акваторий. Показано, что наиболее эффективным подходом является прямое использование алгоритма глубокого обучения ResNet-10 на сценах при совместном использовании комплексных (амплитуда и фаза) радиолокационных изображений сантиметрового диапазона и мультиспектральных оптических снимков платформ Sentinel. Такой подход дал возможность обнаружить 86,72 % всех пятен в сценах и имел среднюю точность 75,35 %. Выявлено, что подход имеет сниженную способность обнаружения пятна, когда скорость ветра ниже 2 м/сек или выше 12 м/сек.

**Ключевые слова:** интерферометрическая когерентность, матрица рассеяния когерентности и ковариации, поляриметрическое радиолокационное изображение, релятивистская инвариантность

## Methods of joint processing of complex radar interferograms and multispectral optical images under temporal decorrelation

*A. Sh. Guliyev<sup>1</sup>, T. A. Khlebnikova<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup> State Oil Company of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

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

**Abstract.** This article substantiates the relevance of the study, the characteristics of the joint use of optical multispectral survey, radar interferometry and partial polarimetry, identifies the scope of interpretation of the radar-optical composite built by optical and radar data, and provides a mathematical model for image processing of the water surface area. The quantitative assessment of these automated or semi-automated methods is not inferior to the accuracy of traditional methods for assessing the state of the offshore marine environment. It was shown that the most efficient approach is the direct use of the ResNet-10 deep learning algorithm on scenes when combined with complex (amplitude and phase) centimeter-range radar images and multispectral optical images of Sentinel platforms. This approach made it possible to detect 86.72% of all spots in the scenes and had an average accuracy of 75.35%. The approach has also showed a significantly reduced ability to detect patches when the local wind speed was below 2 m/s or above 12 m/s.

**Keywords:** interferometric coherence, scattering matrix of coherence and covariance, polarimetric radar image, relativistic invariance

## *Введение*

В настоящее время в мире масштаб загрязнения окружающей среды нефтепродуктами приближается к критическому уровню. К настоящему времени разработаны и созданы различные методы и новейшие технические средства дистанционного зондирования (НТСДЗ) для обнаружения нефтяных загрязнений и измерения их характеристик [1]. В условиях ограничения доступа для наземных исследований эти средства могут быть использованы для мониторинга загрязнений нефтепродуктами (пластовыми водами) на территории нефтяных месторождений. При этом применение данных НТСДЗ не исключает необходимости планирования наземных наблюдений, не позволяет их более точно локализовывать и получать аннотированные данные более разряженно во времени и в пространстве.

Сегодня в государствах дальнего и ближнего зарубежья заметно активизировалось применение данных НТСДЗ, которые начинают приобретать популярность и в Азербайджанском секторе Каспийского моря. В частности, были выполнены исследования по картографированию пленочных загрязнений нефтепродуктами (пластовыми водами) [2–3].

Оптические и микроволновые материалы ДЗЗ являются преобладающими в методах мониторинга разливов нефти [4]. Однако, нефтяная пленка на поверхности моря динамична, и ее сложно распознать. Сложности, возникающие при картографировании последствий разливов, часто связаны с завышенной оценкой из-за механической неоднородности (быстро меняющимися физическими и химическими характеристиками) загрязненных нефтью территорий. В то же время на них влияют световые условия и солнечные блики, которые вносят неопределенность в обнаружение морских разливов нефти методами дистанционного зондирования по оптическим изображениям [5]. Часто средствами статистических или математических методов бывает сложно отличить пятна от других областей на поверхности моря. Это создает проблему при использовании программ автоматической идентификации пятен, т.е. без вмешательства человека.

Необходим поиск новых подходов и эффективных мер по улучшению автоматизации методик обнаружения и картографирования пластовой воды, что может быть реализовано при совместном использовании комплексных (амплитуда и фаза) радиолокационных изображений сантиметрового диапазона и мультиспектральных оптических снимков. Ее решению посвящено данное исследование, в котором изложены научно обоснованные технологические решения по использованию дистанционных методов для картографирования и оценки интерференции тонкой пленки пластовых вод.

## *Методы и материалы*

Исследования проводились в районе нефтепромысла «Нефтяные Камни» в 35 км к востоку от Апшеронского полуострова на подводном пороге, разделяющем Среднюю и Южную части Каспийского моря. Географические координаты

наты исследуемой территории 40°26'N, 50°30'E – 40°01'N, 51°07'E, общая площадь – 2354 кв. км [6–9].

Обработка выбранных снимков выполнялась средствами системы анализа данных ДЗЗ (ENVI (Harris Geospatial), ERDAS Imagine версии 2014 (Hexagon Geospatial), SNAP (Sentinels Application Platform) 8.0.0. и пакета прикладных программ Matlab.

В районе исследований проводились работы на эталонных площадках. Получена количественная оценка условий объединения данных. Анализ данных, полученных при дешифрировании совмещенных снимков, способствует формированию количественных эталонов для обучения «искусственного интеллекта», распознаванию различных характеристик зондируемой поверхности.

Исследовались три различных подхода, основанных на двух алгоритмах. На рис. 1 показана блок-схема рабочего процесса метода слияния изображений.

Для создания комбинированного набора данных использовались Sentinel-1A (VV\_dB, VH\_dB) и Sentinel-2A (ближний инфракрасный, красный и зеленый). Затем оба набора данных с измененным размером были объединены путем применения оператора наложения слоев для создания уникальной комбинации наборов изображений, включая оптические изображения и изображения радиолокатора с синтезированной апертурой.

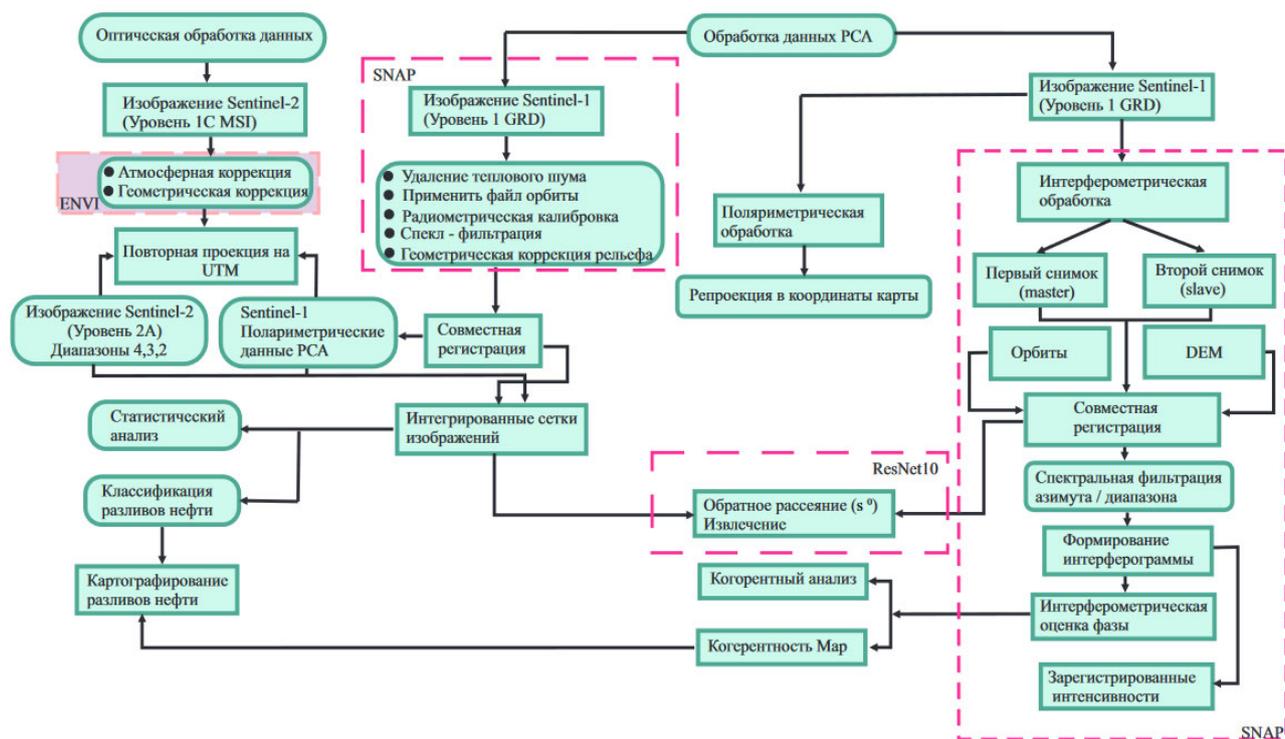


Рис. 1 Алгоритм обработки применительно к данному исследованию

Подробный рабочий процесс интегрированной обработки состоит из нескольких этапов и показан на рис. 1, 2.

Процесс обработки данных можно разделить на три основных этапа:

- предварительная обработка данных;
- классификация с использованием моделей ML и ResNet-10;
- проверка и сравнение результатов.

Модель ResNet-10 (рис. 2) полностью связана выходным слоем с функцией активации (softmax). Имеется два набора (типа) основных характеристик. Одним из них являются локальные информационно-рецептивные поля, то есть нейроны скрытого поля, которые связаны только с локальным изображением, а информация о глобальном изображении может быть синтезирована локальным восприятием каждого нейрона. Другим – разделенные веса, т.е. каждый нейрон в скрытом слое использует одно и то же ядро для свертки изображения, и все нейроны в одной и той же плоскости признаков имеют одинаковый вес, что эффективно уменьшает количество параметров в сети и делает модель неизменной при тех или иных смещениях (релятивистская инвариантность).

Для обучения моделей на входных данных и оценки эффективности классификации, обучающие и тестовые данные были случайным образом извлечены из входных данных. Обучающие и тестовые данные не пересекаются друг с другом.

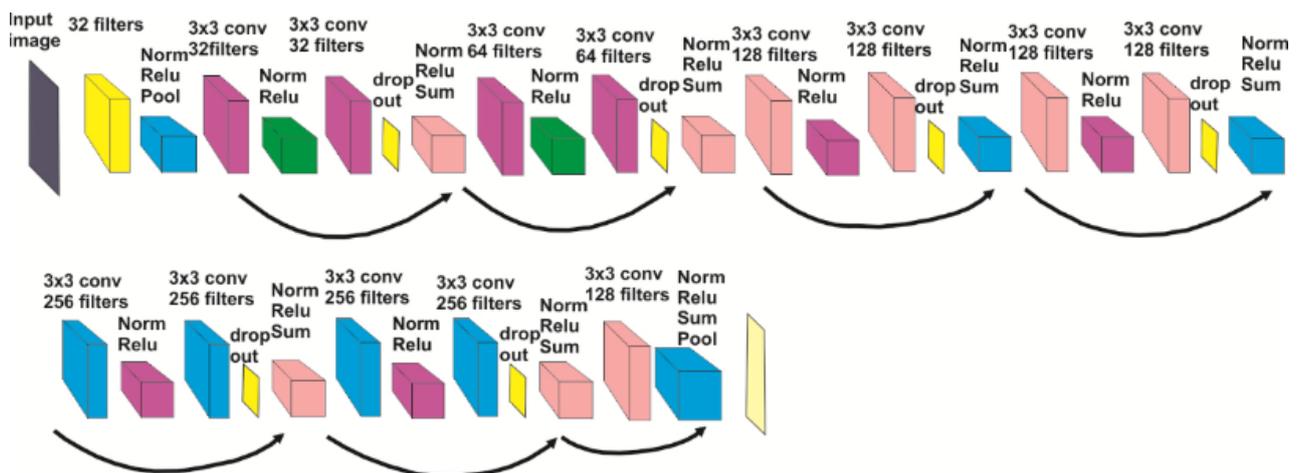


Рис. 2 Модель ResNet-10

### Результаты и обсуждения

В представленном исследовании изучались возможности использования комплексных (амплитуда и фаза) радиолокационных изображений сантиметрового диапазона и мультиспектральных оптических снимков для обнаружения и картографирования пластовых вод.

Существенной разницы между двумя классификационными картами обнаружить не удалось. Однако классификация ML была хуже, чем по моделям ResNet-10. Прогнозируемые пропорции между поверхностью моря, разливам нефти и пластовых вод в среднем составили примерно 65,19 % и 51,21 %. В модели ResNet-10 86,72 % и 75,35 % (рис. 3).

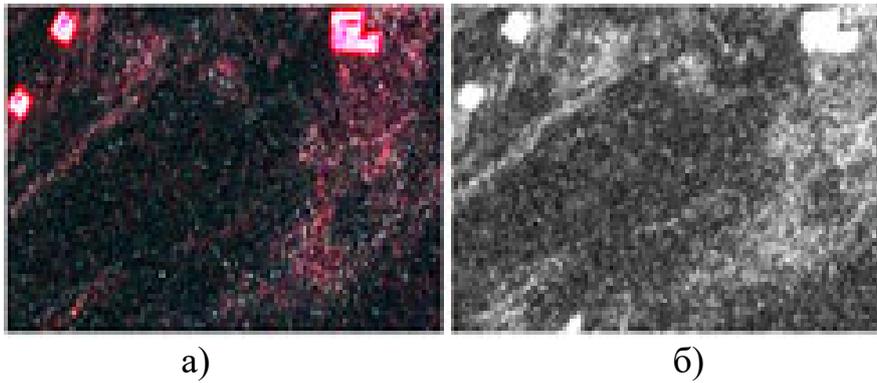


Рис. 3. Изображения, используемые для выявления нефтезагрязнений:  
 а) Sentinel-2A, б) Sentinel-1A, Sentinel D-InSAR (С- диапазон)

Результаты анализа свидетельствуют о том, что при проведении процедуры слияния изображений коэффициент корреляции между итоговыми спектрально-радиолокационными изображениями оказывается больше чем тот же коэффициент для исходных изображений (рис. 4).

Полученные результаты указывают на принципиальную возможность использования ко-поляризованной когерентности и текстурной карты в виде дополнительных данных, в области просачивания пластовых вод для повышения эффективности автоматизированной методики выявления участков нефтезагрязнений (рис. 5, 6).

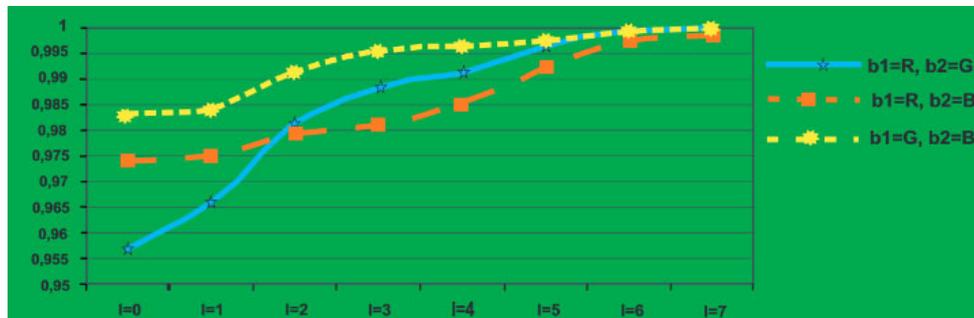


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  между цветными каналами от глубины вейвлет-преобразования  $l$

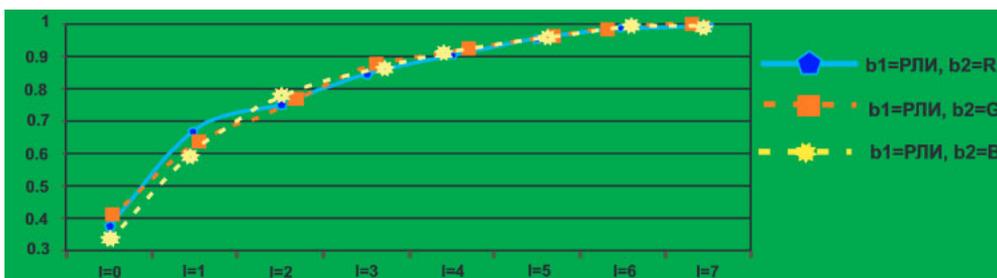


Рис. 5. Зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  между цветными каналами и радиолокационных изображений от глубины вейвлет-преобразования  $l$

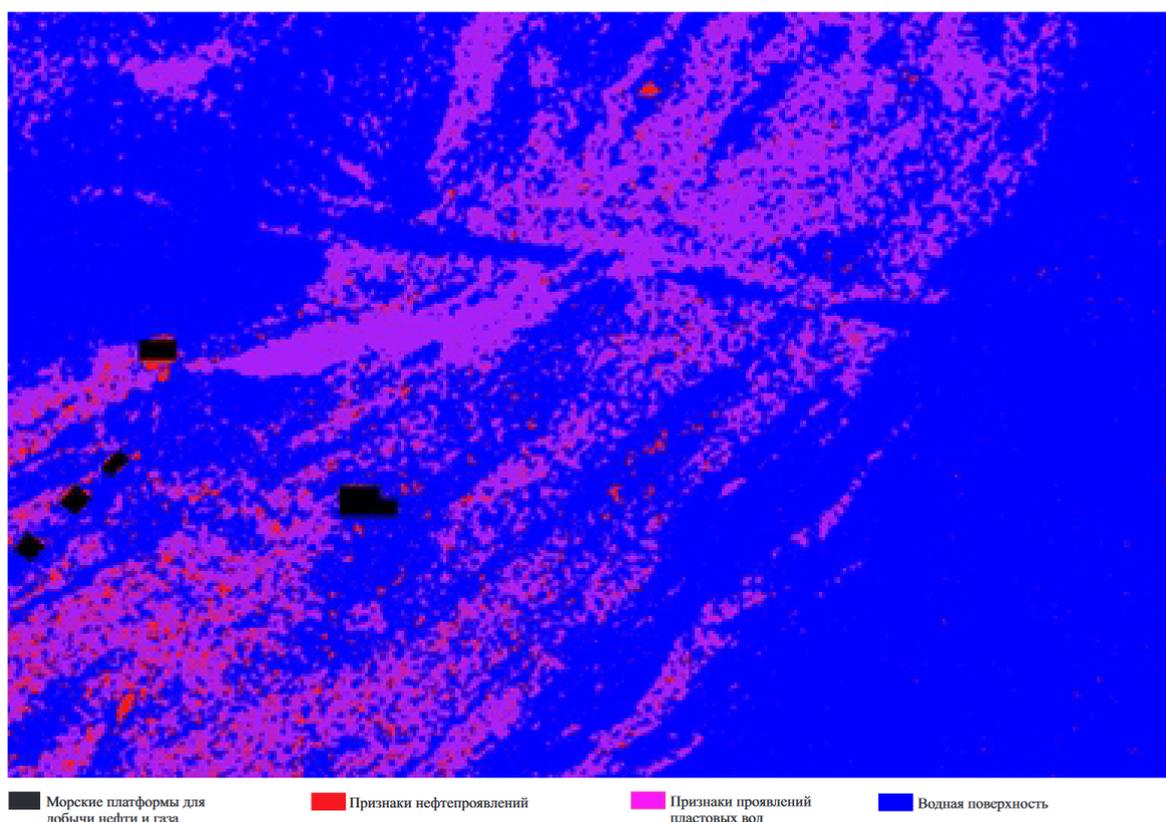


Рис. 6. Фрагмент комплексного дешифрирования мультимодального снимка

### *Заключение*

Результаты, полученные в этом исследовании, показали, что подход к классификации изображений, основанный на интеграции оптических мультиспектральных снимков, радиолокационной интерферометрии и поляриметрии, и методы машинного обучения нейросетевых алгоритмов сверточного типа (ResNet-10) с использованием только наиболее надежных наборов функций, обеспечивает улучшенные результаты, чем при использовании традиционных методов, ограничивающих количество входных переменных.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fingas, M., & Brown, C. Review of oil spill remote sensing. *Marine Pollution Bulletin*, 83, pp.9–23, 2014 doi:10.1016/j.marpolbul.2014.03.059 <https://downloads.spj.sciencemag.org>
2. Ivanov, A. Y., Dostovalov, M. Y., & Sineva, A. A. Characterization of oil pollution around the oil rocks production site in the Caspian Sea using spaceborne polarimetric SAR imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, 48(9), 1014-1026.
3. Bayramov, E. R., Buchroithner, M. F., & Bayramov, R. V. Multi-temporal assessment of ground cover restoration and soil erosion risks along petroleum and gas pipelines in Azerbaijan using GIS and remote sensing. *Environmental earth sciences*, 2016, 75(3), 256.
4. Fingas, M.; Brown, C. Review of oil spill remote sensing. *Mar. Pollut. Bull.* 2014, 83, 9–23. [CrossRef] [PubMed]
5. Lu, Y.C.; Hu, C.M.; Sun, S.J.; Zhang, M.W.; Zhou, Y.; Shi, J.; Wen, Y.S. Overview of optical remote sensing of marine oil spills and hydrocarbon seepage. *J. Remote Sens.* 2016, 20, 1259–1269.

6. Гулиев А.Ш., Хлебникова Т.А. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории Нефтяных Камней (Каспийского моря))// Вестник СГУГ и Т. – 2019. – Т. 24, N 3. – С. 52 – 64. DOI: 10.33764/2411– 52–1759–2019–24–3–52–64.

7. Гулиев А.Ш. Обнаружение и картирование нефтяных slicks в море комбинацией различных источников данных дистанционного зондирования Земли// Вестник Заб.ГУ – 2022. – Т. 28, N 1. – С. 19 – 30. DOI:10.21209/2227-9245-2022-28-1-19-30

8. Аловсат Ш. Г. Материалы второй национальной научно-практической конференции с международным участием Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Технический нефтегазовый институт СахГУ, Южно-Сахалинск, Россия в рамках 23-ой международной конференции и выставки “НЕФТЬ и ГАЗ САХАЛИНА 2019” Южно-Сахалинск 2019 стр. 4-11.

9. Гулиев А. Ш., Т. А. Хлебникова. Многомерная статистическая модель для обнаружения мест нефтезагрязнений по материалам космических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгресс (г. Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.): сб. материалов в 8 т. Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. – Новосибирск: СГУГ, –2021. С. 11–16. URL: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-11-16>.

© А. Ш. Гулиев, Т. А. Хлебникова, 2022