

УДК 528.88; 551.465; 551.463.8

Канд. техн. наук  
Канд. техн. наукБ.Э. Бекмухамедов <sup>1</sup>  
Л.А. Балакай <sup>1</sup>  
И.В. Каипов <sup>1</sup>**МОНИТОРИНГ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА АКВАТОРИИ  
КАСПИЙСКОГО МОРЯ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

**Ключевые слова:** нефтяное загрязнение, спик, дистанционное зондирование, космический мониторинг, радиолокационные снимки, детектирование, радиометрическая коррекция

*На основе метода дистанционного зондирования Земли с использованием радиолокационных данных, проведено детектирование и мониторинг нефтяных разливов на Каспийского море. Выявлено 16 случаев возможного загрязнения казахстанской части моря. Дешифрованные спики классифицированы по степени достоверности нефтяного загрязнения. Определено, что максимальные площади нефтяного загрязнения имеют спики со средней степенью достоверности.*

**Введение.** Нефтяные разливы на море, чаще всего носят антропогенный характер и возникают вследствие сброса судами и танкерами балластных вод, из-за выноса нефтяных спиков в со стоком рек, промышленных стоков, при авариях судов и танкеров, при прорыве морских нефтепроводов, при сбросе буровых шламмов и авариях вследствие разведочного бурения и промышленной добычи [4, 6]. Нефтяные пленки в прибрежных зонах оказывают пагубное воздействие на флору и фауну, приводят к загрязнению береговых линий, что влечет большие материальные потери, связанные с очисткой данных территорий. Особенно чувствительна к нефтяным загрязнениям морская экосистема Каспийского моря, закрытого водоема, способность которого к самоочищению очень низкая.

Одним из наиболее эффективных методов оперативного обнаружения нефтяных разливов на море является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса [2, 5]. Этот метод и лежит в основе данной работы и применяется для мониторинга нефтяного загрязнения акватории казахстанского

---

<sup>1</sup> АО «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы, Казахстан

сектора Каспийского моря с использованием радиолокационных изображений (РЛИ) с европейского спутника Sentinel-1A.

### **Методы детектирования нефтяных загрязнений на основе данных ДЗЗ**

Множество существующих способов детектирования нефтяных загрязнений по радиолокационным снимкам может быть разделено на три основные группы:

- методы, основанные на экспертной оценке, представляющие собой визуальный анализ радиолокационного снимка оператором с привлечением набора критериев соответствия;
- интерактивные методы, заключающиеся в предварительной автоматизированной обработке снимка и его дальнейший анализ с активным участием оператора;
- автоматизированные методы, представляющие собой выполнимые модули или программные средства, автоматически распознающие нефтяные пленки на снимке без участия оператора.

Методы экспертной оценки и интерактивные методы в настоящее время являются наиболее распространенными. При использовании этих методов изначально производят предварительную обработку радиолокационного снимка, а затем визуальное или машинное выделение темных пятен, похожих на нефтяное загрязнение. Предварительная обработка снимка обычно включает в себя набор стандартных последовательных процедур, таких как радиометрическая коррекция, геометрическая коррекция по орбитальным данным, сглаживание спекл-шума путем фильтрации изображений и другие процедуры.

Процедура выделения нефтяного пятна состоит из ряда последовательных этапов, в процессе которых оператор опирается на следующие критерии [7-10]:

- линейные размеры слика (его длина, ширина, отношение первого ко второму);
- площадные характеристики слика;
- радиолокационный контраст – слик – чистая вода;
- характеристики границы слика (четкая, размытая, перьевидная);
- скорость и направление ветра в момент съёмки;
- гидродинамические условия;
- наличие вблизи слика других зон выглаживания морской поверхности, связанных с явлениями в атмосфере, с подводной топографией и геологией;

- положение слика относительно нефтяной инфраструктуры: судовых трасс, скважин, платформ, островов, портов;
- наличие вблизи слика морских судов;
- повторяемость слик у одного источника и/или во времени.

При использовании методов экспертных оценок, включающих тот или иной набор критериев соответствия, существует некоторая вероятность того, что в качестве нефтяного слика будет дешифровано выглаживание морской поверхности иной природы.

#### **Детектирование нефтяных загрязнений на Каспийском море на основе данных радиолокационного спутника Sentinel-1A**

Sentinel-1A – европейский спутник дистанционного зондирования Земли, который входит в космическую группировку спутников по Глобальному мониторингу окружающей среды и безопасности «Copernicus». Продукты Sentinel-1A доступны в режиме реального времени, бесплатно для всех пользователей, включая широкую общественность, научных и коммерческих пользователей. На борту космического аппарата Sentinel-1A установлена радиолокационная аппаратура с синтезированной апертурой C-SAR, созданная компанией «Astrium», которая обеспечивает всепогодную (независимо от дня или ночи) поставку космических снимков. Съемка выполняется в C-диапазоне (длина волны 6 см) в одной поляризации (HH или VV) и двойной поляризации (HH + HV или VH + VV).

Для распознавания нефтяных пленок на водной поверхности используют поляризацию VV [1], в данной поляризации углеводородные пленки на поверхности воды отображаются более контрастными областями черного цвета на фоне обычной водной поверхности серого цвета.

На рис. 1 в виде схемы представлен алгоритм распознавания нефтяного загрязнения моря, который включает три основных этапа:

- получение снимков;
- обработка снимков в ПО Sentinel-1 Toolbox;
- размещение векторизованных слик в базе геоданных.

Процедура получения снимков заключается в формировании поискового запроса на указанную дату или период времени на сайте Европейского Космического Агенства (ESA) - Sentinel-1A Scientific Data Hub. В частности, для исходной задачи формировались запросы на поиск РЛИ, которые охватывают акваторию казахстанской части Каспийского моря.

Обработка РЛИ осуществляется в программном продукте Sentinel Toolbox и включает последовательное выполнение следующих этапов.



Рис. 1. Алгоритм распознавания возможных нефтяных пленок на морской поверхности.

**Радиометрическая коррекция снимка SAR Processing->Radiometric-> Colibrate**, осуществляется для устранения аппаратных радиометрических искажений, обусловленных характеристиками используемого съемочного прибора.

**Геометрическая коррекция снимка SAR Processing->Ellipsoid Correction-> Geolocation Grid**, необходима для корректного отображения РЛИ в выбранной системе координат с привязкой к высотам.

**Спекл-фильтрация**, необходима для уменьшения эффекта «соль-перец», присущего всем РЛИ. Данная процедура осуществляется применением процедуры SAR Processing-> Speckle Filtering.

**Проведение анализа зон выглаживания морской поверхности.** На этом этапе осуществляется классификация зон выглаживания, которые условно можно разделить на три класса:

- слики, возникшие за счет морских явлений (причинами могут быть: внутренние волны, вихревые структуры, апвеллинг, начало льдообразования и т.д.),

- слики, вызванные атмосферными процессами (штилевые зоны, ветровые тени вблизи берегов, дождевые ячейки, гравитационные волны и т.д.)

- слики, образованные веществами, способными изменять силы поверхностного натяжения. Это пленки различных органических соединений, в том числе нефти, нефтесодержащих продуктов, пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ), пленки биологического происхождения (биогенные пленки), и пленки синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ).

С целью классификации сликов анализируются метеорологические условия (скорость ветра, направление и скорость течений, ледовый режим), соответствующие дате съемки батиметрические данные, данные по нефтяной инфраструктуре, форма и размеры слика.

Ветер, как основной генератор волнения на море играет существенную роль при анализе обнаруженных пленок [3]. При малых скоростях ветра (от 2 м/с до 4...5 м/с) слики ПАВ формируют самые тонкие, в несколько мономолекулярных слоев пленки, которые легко переносятся течениями. Они обычно существуют в виде длинных (десятки – сотни километров), часто искривленных или спиральных полос. Существует трудность в распознавании нефтяных сликов в зонах большого скопления биогенных пленок.

**Анализ ледового режима** и совместное рассмотрение РЛИ и батиметрических данных, позволяет отсеять случаи ошибочного дешифрирования

отдельных кусков льда и выглаживания морской поверхности, вызванное подводной топографией, которое выглядит как нефтяное загрязнение.

**Большую роль играет привязка нефтяных сликков к производственной инфраструктуре**, включая судовые трассы и перспективные, планируемые к разработке месторождения. Такое рассмотрение, во-первых, дает возможность более уверенно интерпретировать данные радиолокационной съемки, во-вторых, определить вероятный источник нефтяного разлива.

Кроме того, важно рассматривать сам слик с точки зрения его линейных размеров (длина, ширина), площадных характеристик, формы, контраста и типа границы (перьевидная, четкая, размытая).

**Кадрование радиолокационного снимка в случае обнаружения нефтяного загрязнения моря.** Данная процедура необходима для того, чтобы уменьшить время обработки снимка.

**Текстурный анализ РЛИ.** Он осуществляется с использованием одного из фильтров: Gabor filter или GLCM, расположенных по пути: *Image Analyst -> Texture Analyst*. После текстурного анализа значительно возрастает контраст вода – слик, кроме того пиксели внутри слика приобретают однородную черную окраску.

**Выполнение процедуры Oil Spill Detection**, включающей следующие этапы: препроцессинг исходных данных, заключающийся в калибровке и спекл-фильтрации; создание маски вода-земля в автоматическом режиме или загрузка маски в векторном виде; детектирование темных пикселей с применением порогового значения; кластеризация и распознавание нефтяных сликков – соседние пиксели, детектированные на предыдущем шаге как темные пятна, объединяются или удаляются в зависимости от размера кластера, определяемого пользователем. В результате получается тематический слой с дешифрованными сликками. Результат выполнения данной процедуры иллюстрирует рис. 2.

**Конвертация тематического изображения**, содержащего данные по обнаруженным нефтяным пленкам, в текстовый формат для последующей обработки в программном продукте ArcGIS.

Векторизация тематического слоя, содержащего дешифрованные нефтяные сликки и находящегося в формате txt, выполняется в ПО ArcGIS Desktop. Здесь производится конвертация текстового файла в растровое представление данных - грид, затем осуществляется преобразование грида в полигональный слой базы геоданных и заполнение атрибутив-

ных полей, характеризующих слик: дата и время обнаружения слик, место обнаружения, площадь слик, граница слик, координаты центра слика, скорость и направление ветра, степень достоверности.

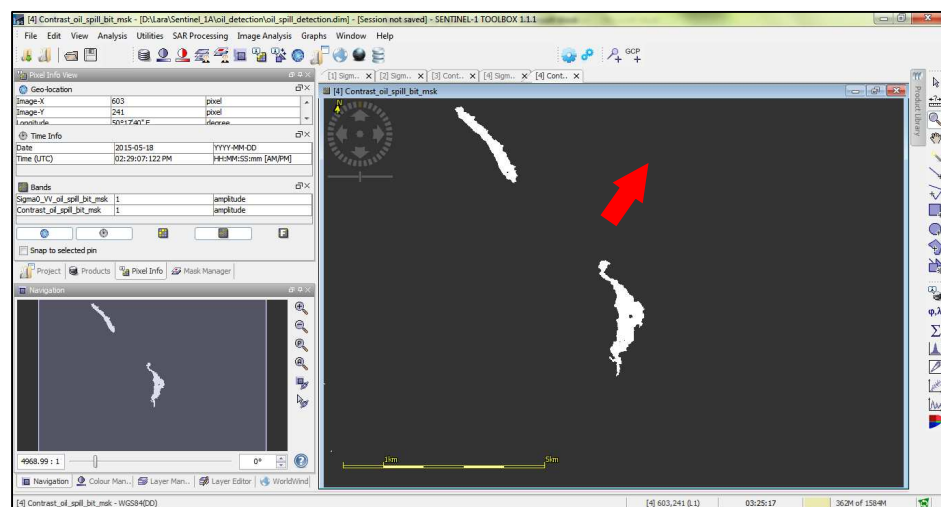


Рис. 2. Фрагмент РЛИ за 18.05.2015 после выполнения процедуры Oil Spill Detection.

### Детектирование нефтяных загрязнений на Каспийском море

Для акватории казахстанского сектора Каспийского моря была создана база данных космических снимков со спутника Sentinel-1A, которые проанализированы на предмет выглаживания морской поверхности с целью выявления нефтяных сликов.

Всего за период с 6 января по 2 октября 2015 г. было обработано 240 снимков, сликообразующие явления наблюдались на 227 снимках и только 13 снимков не имели зон выглаживания. Всего за указанный период было обнаружено 34 эпизода нефтяного загрязнения, и только 10 из них располагались в акватории казахстанской части Каспийского моря. РЛИ с обнаруженными нефтяными пленками, относящиеся к акватории казахстанской части Каспийского моря, обрабатывались согласно описанному выше алгоритму. После дешифрирования сликов осуществлялась их векторизация. На 9 снимках Sentinel-A было зафиксировано 16 случаев возможного загрязнения акватории Каспия нефтяными пленками. Максимальная площадь нефтяного сликa была зафиксирована 10 июня 2015 г., она составила 16,06 км<sup>2</sup> (рис. 3). Пятно было и самым протяженным по длине – 95 км. Степень достоверности этого сликa определена, как средняя. В пользу достоверности говорит тот факт, что данный слик имеет

местами перьевидную границу, а местами четкую, но его очень большая протяженность переводит его из разряда высоко достоверных в средне-достоверные. Вероятнее всего источником данного слика является судно.

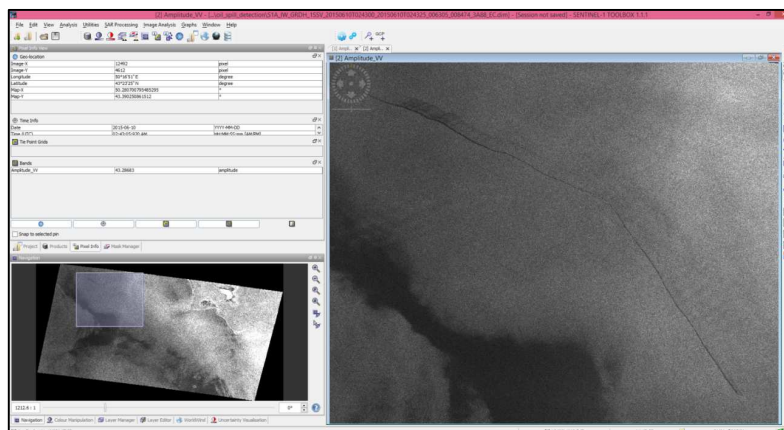


Рис. 3. Возможное нефтяное загрязнение, обнаруженное на снимке Sentinel-1A за 10.06.2015 02:43 GMT.

Севернее месторождения Каламкас-море 3.06.2015 был обнаружен нефтяной разлив, площадь которого составила порядка  $13,7 \text{ км}^2$  (рис. 4). Его степень достоверности характеризуется также как средняя. Он имеет перьевидную границу.

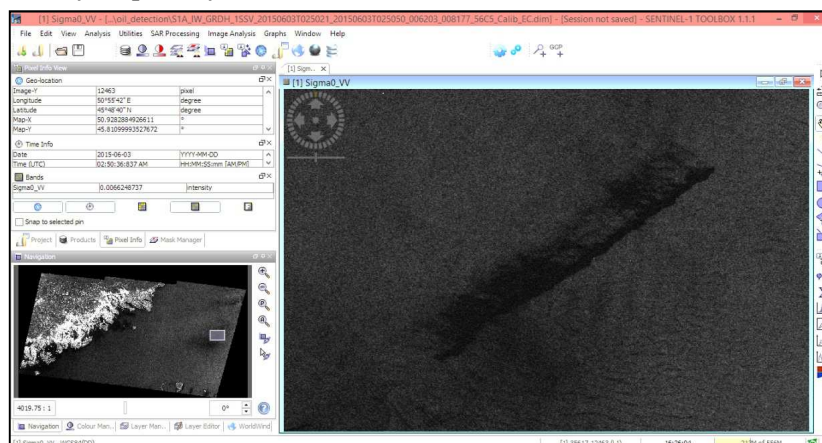


Рис. 4. Возможное нефтяное загрязнение, обнаруженное на снимке Sentinel-1A за 03.06.2015 02:50 GMT.

Слик, имеющий высокую степень достоверности и максимальную площадь, был зафиксирован 12 апреля 2015 г. (Рис. 5). Его площадь составила  $3,35 \text{ км}^2$ , а суммарно со сликком, дешифрованным за эту дату чуть южнее, -  $5 \text{ км}^2$ .



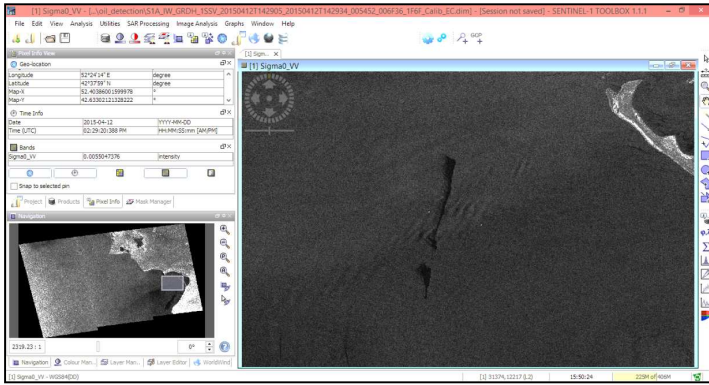


Рис. 5. Возможное нефтяное загрязнение, обнаруженное на снимке Sentinel-1A за 12.04.2015 14:29 GMT.

Рис. 6 иллюстрирует карту возможных нефтяных загрязнений акватории казахстанского сектора Каспийского моря за период с 6 января по 2 октября 2015 г.

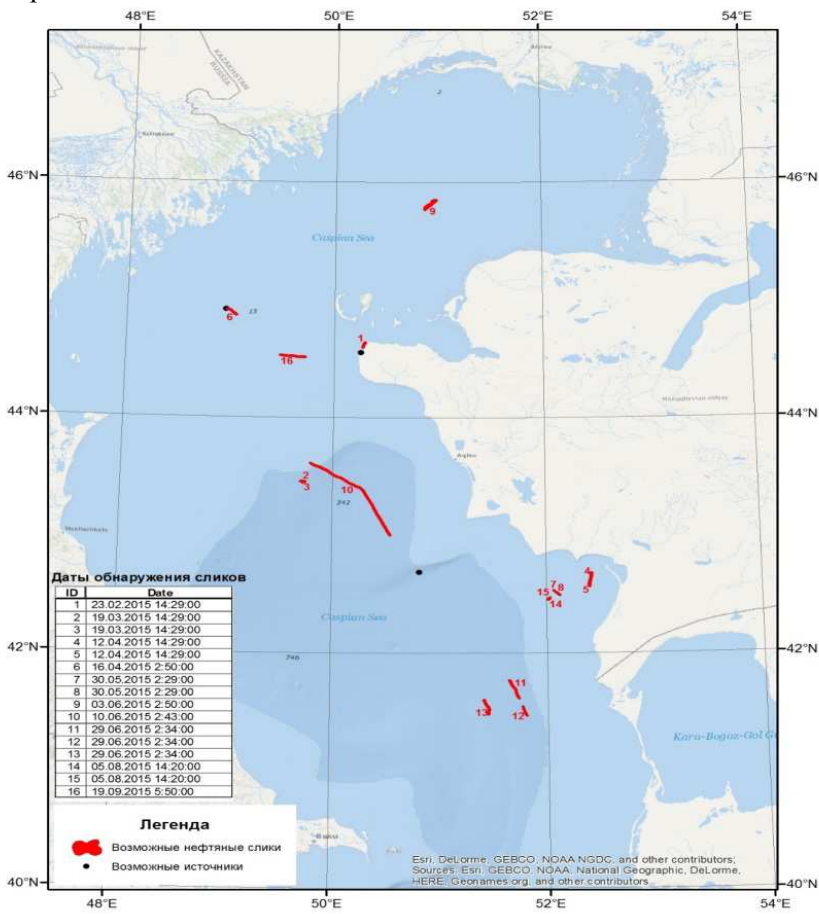


Рис. 6. Карта нефтяных загрязнений акватории Каспийского моря.

**Заключение.** На основе анализа существующих методов детектирования нефтяных загрязнений, разработана технология мониторинга нефтяных загрязнений на Каспийском море на основе радиолокационных снимков Sentinel-1A и программного продукта Sentinel Toolbox. Проведен радиолокационный космический мониторинг нефтяных разливов на море и выявлено 16 случаев возможного загрязнения казахстанской части Каспийского моря. Дешифрованные слики классифицированы по степени достоверности нефтяного загрязнения. Определено, что максимальные площади нефтяного загрязнения имеют слики со средней степенью достоверности. Площадь этих сликов составляет 16,06 и 13,72 км<sup>2</sup>. Осуществлено картирование нефтяных загрязнений акватории Каспийского моря с 6 января по 2 октября 2015 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аязбаев Е.Х., Токжанов О.А., Кантемиров Ю.И. Мониторинг нефте-разливов в акватории порта Актау с помощью космических радарных данных COSMO-SkyMed // Геоматика. – 2012. – №1(14). – С. 95-100.
2. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / Новые идеи в океанологии. – М.: Наука, 2004. – С. 55-117.
3. Иванов А.Ю. Слики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 3. – С. 73-96.
4. Израэль Ю.А., Цибань А.В. Антропогенная экология океана. – М.: Флинта: Наука, 2009. – 529 с.
5. Лаврова О.Ю., Митягин М.И. Спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений прибрежной зоны // Земля и Вселенная. – 2008. – №1. – С. 26-34.
6. Проблема химического загрязнения вод Мирового океана Т. 8. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 208 с.
7. Espedal H.A. Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne synthetic aperture radar. Ph.D. thesis, Department of Phys. Univ. Of Bergen and Nansen Environment and Remote Sensing Center, Norway, 1998.
8. Hovland H.A., Jahannessen J.A., Digranes G. Slick detection in SAR images // Proc. IGARSS'94.1994.V.4.P.2038-2040.

9. Skoelv A., Wahl T. Oil spill detection using satellite based SAR, Phase 1B Competition Report. Tech. Rep. Norwegian Defense Research Establishment, 1993.
10. Topouzelis K.N. Oil Spill Detection by SAR Images: Dark Formation Detection, Feature Extraction and Classification Algorithms. // Sensors, 2008, 8, 6642 – 6659 p.

Поступила 23.06.2016

Техн. ғылымд. канд. Б.Э. Бекмухамедов  
Техн. ғылымд. канд. Л.А. Балакай  
И.В. Каипов

### **ҚАШЫҚТЫҚТАН БАРЛАУ ӘДІСТЕРІМЕН КАСПИЙ ТЕҢІЗІ АЙДЫНЫНДАҒЫ МҰНАЙМЕН ЛАСТАНУДЫҢ МОНИТОРИНГІ**

**Түйін сөздер:** мұнаймен ластану, қашықтықтан барлау, ғарыштық мониторинг, радиолокациялық суреттер, детектирлеу, радиометриялық түзету

*Жерді қашықтықтан барлау әдісі негізінде радиолокациялық деректерді пайдалану арқылы Каспий теңізіндегі мұнай төгілулеріне детектирлеу және мониторинг жүргізілді. Теңіздің қазақстандық бөлігінде ықтимал ластанудың 16 жағдайы анықталды. Дешифрленген сликтер мұнаймен ластанудың деңгейлері бойынша жіктелді. Мұнаймен ластанудың ең үлкен алаңы орта деңгейдегі сликтер екендігі айқындалды.*

B.E. Bekmukhamedov, L.A. Balakay, I.V. Kaipov

### **REMOTE SENSING MONITORING OF OIL SPILLS ON THE WATER SURFACE OF THE CASPIAN SEA**

**Keywords:** oil pollution, slick, remote sensing, space monitoring, radar images, detection, radiometric correction

*Based on the method of remote sensing using radar data, the detection and monitoring of oil spills in the Caspian Sea carried out. Sixteen cases of possible contamination of the Kazakh part of the Sea have been identified. Slicks are classified according to the degree of reliability of oil pollution. It was determined that the maximum area of oil pollution slicks have an average level of confidence.*