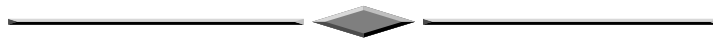


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.85:528.721.28

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-102-114

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аловсат Шура-оглы Гулиев

Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики (ГНКАР), AZ1000, Азербайджан, г. Баку, пр. Гейдара Алиева 121, старший геодезист, тел. (99450)492-93-18, e-mail: alov_soc@yahoo.com

Татьяна Александровна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

Статья посвящена исследованию флуктуационных характеристик радиолокационных изображений водной поверхности. Целью статьи ставилось выполнение исследований в области полуавтоматического анализа изображений, позволяющего определять площади нефтяных загрязнений в шельфовых акваториях с использованием разновременных данных радиолокатора с синтезированной апертурой и многозонального совмещенного изображения с пространственным разрешением 10 м. Объектом исследования являлись методы дистанционного зондирования Земли, используемые для обнаружения и картографирования разливов нефти. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что при совместной обработке многозональных и временных рядов радиолокационных изображений одной и той же территории представляется возможным обработать множество идентифицируемых объектов водной поверхности и распознать зоны нефтеразливов на ранних стадиях, что позволит своевременно их ликвидировать и значительно снизить экологические и экономические последствия.

Ключевые слова: Sentinel-1A, Sentinel-2A, радиолокационные снимки, многозональные космические снимки, мониторинг нефтяных загрязнений

Введение

Подстилающая или деятельная поверхность – это верхний слой земной коры, включающий все виды водоемов, ледники и почву, который участвует в различных природных процессах. Проблема загрязнения нефтью и ее производными является одной из наиболее важных при разработке месторождений и транспортировке углеводородов. В последнее время значимость этой проблемы возрастает, так как произошло несколько экологических катастроф вследствие разливов нефти [1–6].

Со времени начала использования материалов дистанционного зондирования все большее число исследований по обнаружению и картографированию нефтяных разливов используют эти данные для мониторинга, оценки рисков и управления ими [7–9].

Возможность систематического анализа областей, представляющих интерес, а также возможность использовать несколько компонент способствовали развитию разнообразных методов обработки изображений, которые позволяют извлекать различные характеристики исследуемых объектов [10–12].

Методы, используемые в исследовании, опираются на вероятностно-статистическую модель яркости пикселей нескольких изображений, полученных разными сенсорами [13]. Подход к получению этой статистической модели отличается от известных подходов, поскольку находится на стыке математического моделирования, математической статистики и машинного обучения, которые позволяют эффективно обрабатывать даже неструктурированные данные.

Основой для построения моделей являются выборки случайного объема и результаты в области предельных теорем для сумм и максимумов случайных величин, а также различных возникающих при этом смешанных распределений. Значительный вклад в развитие указанных направлений теории вероятностей и математической статистики внесли российские математики, среди которых следует упомянуть А. Н. Колмогорова [14], А. Н. Ширяева [15], В. М. Круглова [16] и др.

Постановка задачи

Цель исследования – определение возможности кластеризации и обнаружения объектов с объединенными данными от различных сенсорных датчиков космического аппарата и длинными временными рядами, а также поиск решений для исследуемой области (Каспийского моря). Основное внимание в исследовании уделялось малоизученным аспектам такой обработки. В результате исследований планировалась разработка новых или усовершенствование существующих методов, которые получат дальнейшее развитие.

Сенсорные системы – радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), работающие в разных диапазонах электромагнитного спектра, широко используются для получения сценариев обнаружения нефтяных пятен и других явлений на подстилающей поверхности моря [17, 18].

Созвездия спутниковой группировки, такие как Sentinel-1A, состоят из двух спутников, расположенных на полярной орбите, оснащенных одним РСА С-диапазона, работающим без эксклюзивных режимов обнару-

жения, с различным разрешением (от 5 м до 22 м) и зоной действия (до 400 км) [19, 20].

Методы и материалы

Многозональные изображения и спутниковые данные РСА были взяты на район Нефтяных Камней (исключительной экономической зоны Азербайджанского сектора Каспийского моря). Использовалась одна сцена Sentinel-2A и временной ряд данных Sentinel-1A, охватывающий 2017–2018 годы.

Для анализа данных дистанционного зондирования Земли использовалась система ERDAS Imagine 6.7 и SNAP Desktop (Sentinel Application Platform 8.0.0). Для данных временных рядов Sentinel-1A в качестве функций использовались некоторые статистические показатели. Вычисления, необходимые для анализа временных рядов, бесплатно выполнялись средствами доступного набора инструментов Matlab.

В рамках исследований проводилась обработка серии изображений, полученных в период с июня 2017 г. по ноябрь 2018 г. В частности, для целей обработки радиолокационной интерферометрии с наиболее точным повторным покрытием учитывались только изображения, полученные с одного и того же спутникового датчика Sentinel-1A. Все данные группировки спутников Sentinel, которые использовались в исследованиях, доступны на сайте «Центр открытого доступа Copernicus» [21].

Контролируемая и неконтролируемая классификация применительно к интерферометрической когерентности

Выходное изображение когерентности состоит из двух различных полос, содержащих значения интерферометрической когерентности (от 0 до 1) для двух поляризаций (VV и VH). На растровом изображении этого типа можно выделить вид объектов (вода, нефть), применяя для их анализа инструментарий обработки цифровых изображений, в частности методики анализа многоспектральных данных (контролируемые и неконтролируемые алгоритмы классификации). После преобра-

зования данных с Sentinel-2A и Sentinel-1A получен многозональный снимок, который использовался для дальнейшей обработки.

В случае классификации с обучением на многозональном космическом снимке были оцифрованы области интереса (ОИ) (рис. 1).

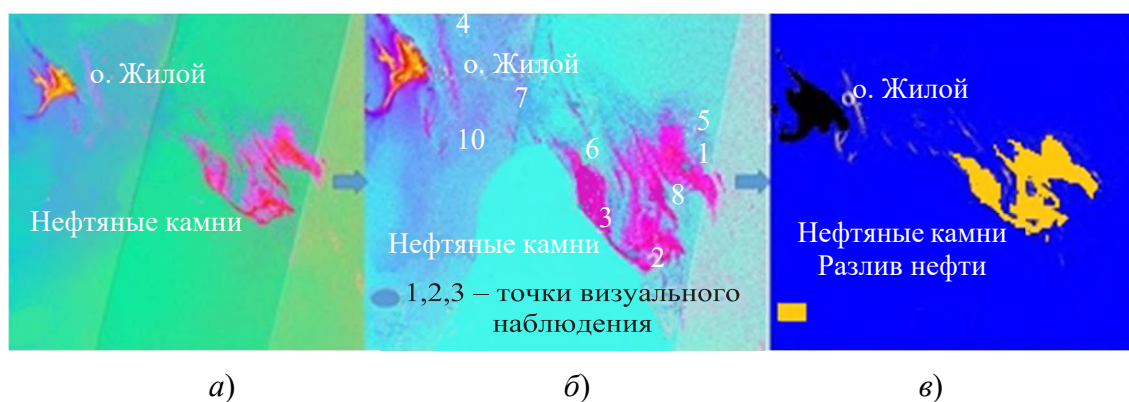


Рис. 1. Фрагменты результатов комплексного дешифрирования [13]:

а) фрагмент многозонального совмещенного изображения с пространственным разрешением 10 м; б) фрагмент многозонального совмещенного изображения с данными визуального наблюдения; в) фрагмент разлива нефти (05.06.2017 7:26:21)

В исследованиях ставилось целью сравнение только двух классов, то есть чистой морской воды и темных пятен. Класс «темное пятно» включал в себя два подкласса, а именно – «вероятные нефтяные пятна» и «вероятные похожие» (рис. 1, в).

В исследованиях были использованы алгоритмы неконтролируемой классификации, в частности кластеризация классификатором k -средних, в которой не предусматривается оцифровки ОИ, а требуется только количество классов (или кластеров), установленных для карты классификации. Устанавливаются только два класса для алгоритма классификатора k -средних, исходя из предположения, что эти классы будут автоматически отнесены к обнаружению пленок искусственного происхождения (нефтяных пятен), и это позволит получить хорошие результаты в случае естественных оттоков нефти [22, 23].

Схема этапов экспериментальных исследований показана на рис. 2.

Достоверная область была сначала извлечена из данных. Затем в справочных данных были определены тренировочные и тестовые участки. Далее объекты были выбраны из наборов данных, используемых для класси-

фикации. С помощью данных обучения эти признаки были использованы для классификации признаков нефтепроявлений. Вторая классификация была проведена путем объединения двух наборов данных дистанционного зондирования. Далее все классификации были проверены на тестовых участках.

В исследовании использовались три версии алгоритма ближайшего соседа. Первые два были k NN с $k = 1$ и $k = 9$. Это означает, что первый использовал для классификации одного соседа (1-NN), второй – девять соседей (9-NN). В третьем методе использовались средние значения областей обучения (далее MDM). Также использовался метод максимального правдоподобия.

В этом методе вычислялось среднее значение всех обучающих пикселей в классе, и эти значения сравнивались с пикселями с неизвестной классификацией для присвоения класса. Средние значения рассчитывались отдельно для каждого изображения. Наиболее близкое среднее значение по сравнению с пикселем с неизвестным классом определяет присвоенный класс. Этот классификатор также называется минимальным расстоянием до средних значений [24].

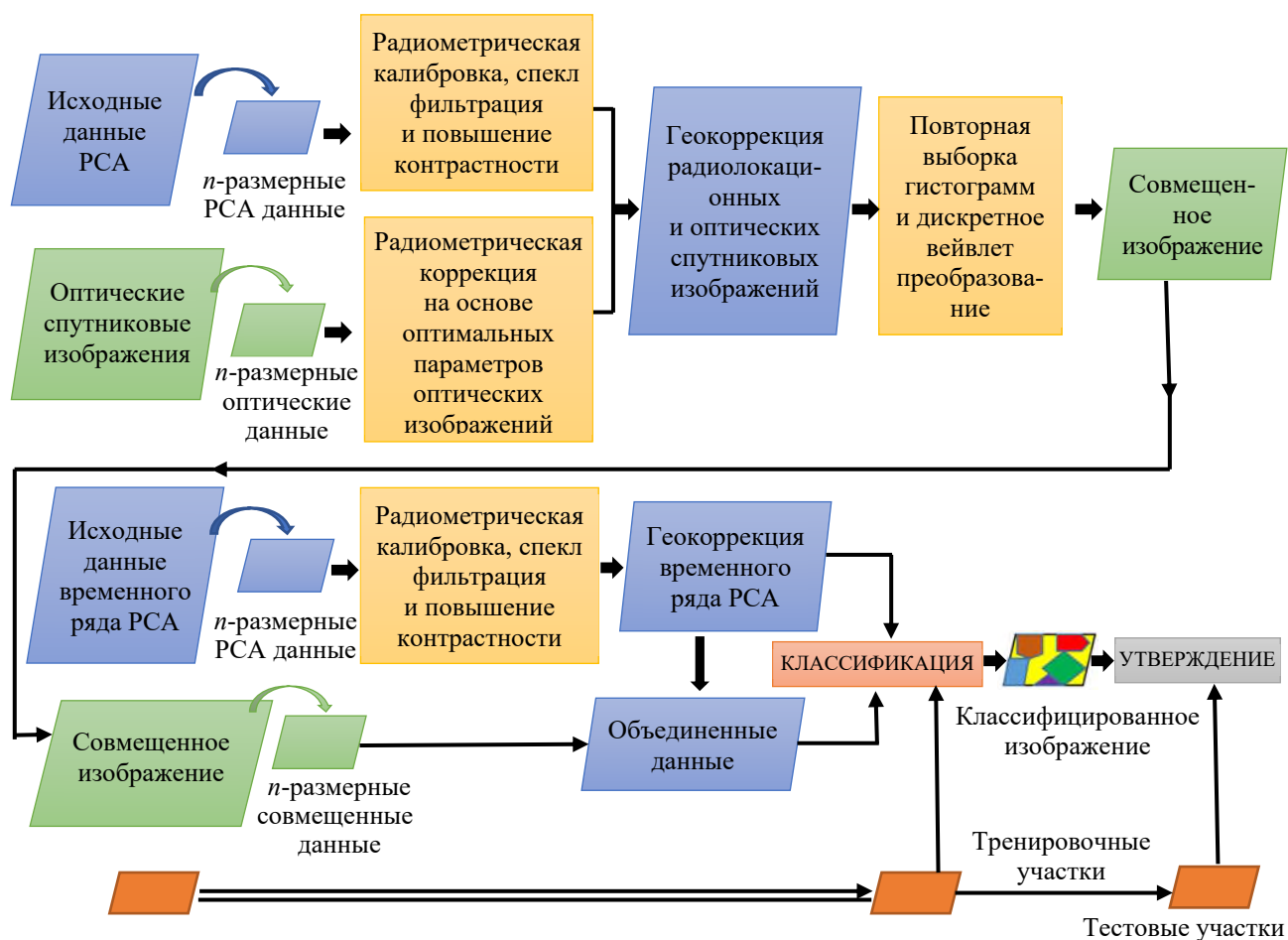


Рис. 2. Изображение схемы этапов экспериментальных исследований

Эти методы классификации были применены к различным наборам данных для получения устойчивых значений коэффициентов, преобразующих пространство измерений (яркости пикселей) в пространство признаков (чистая вода, темные пятна). Сводные результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3.

Многозональное совмещенное изображение с пространственным разрешением 10 м описывалось с помощью спектральных индексов, которые затем можно было использовать в качестве признаков [25].

Это привело к восьми функциям Sentinel-1A на поляризации и четырем функциям многозонального совмещенного изображения с пространственным разрешением 10 м (после преобразования данных с Sentinel-2A и Sentinel-1A получен многозональный снимок для дальнейшей обработки). Затем они были использованы на следующих этапах классификации.

Выбор функций был выполнен на извлеченных функциях РСА и как выбор сцены для изображений РСА. Выбор производился с использованием дискриминантного отношения Фишера и ступенчатой регрессии. Расчеты были выполнены с характеристиками, нормализованными к нулевому среднему и стандартному отклонению, равному единице. Для выбора функции использовались только данные обучения и тестирования, так как класс входных данных должен быть известен – априорная информация о типах объектов и эталонных значениях спектральных характеристик этих объектов. В пошаговой регрессии допуск вероятности ошибочной оценки (вероятность отклонения нулевой гипотезы при 5-процентной значимости) на вход был установлен на $\alpha = 0,05$, а допуск на выход был установлен $\alpha = 0,1$. Данные обеих поляризаций от одной даты были объединены в один объект, за исключением случая выбора только одной сцены.

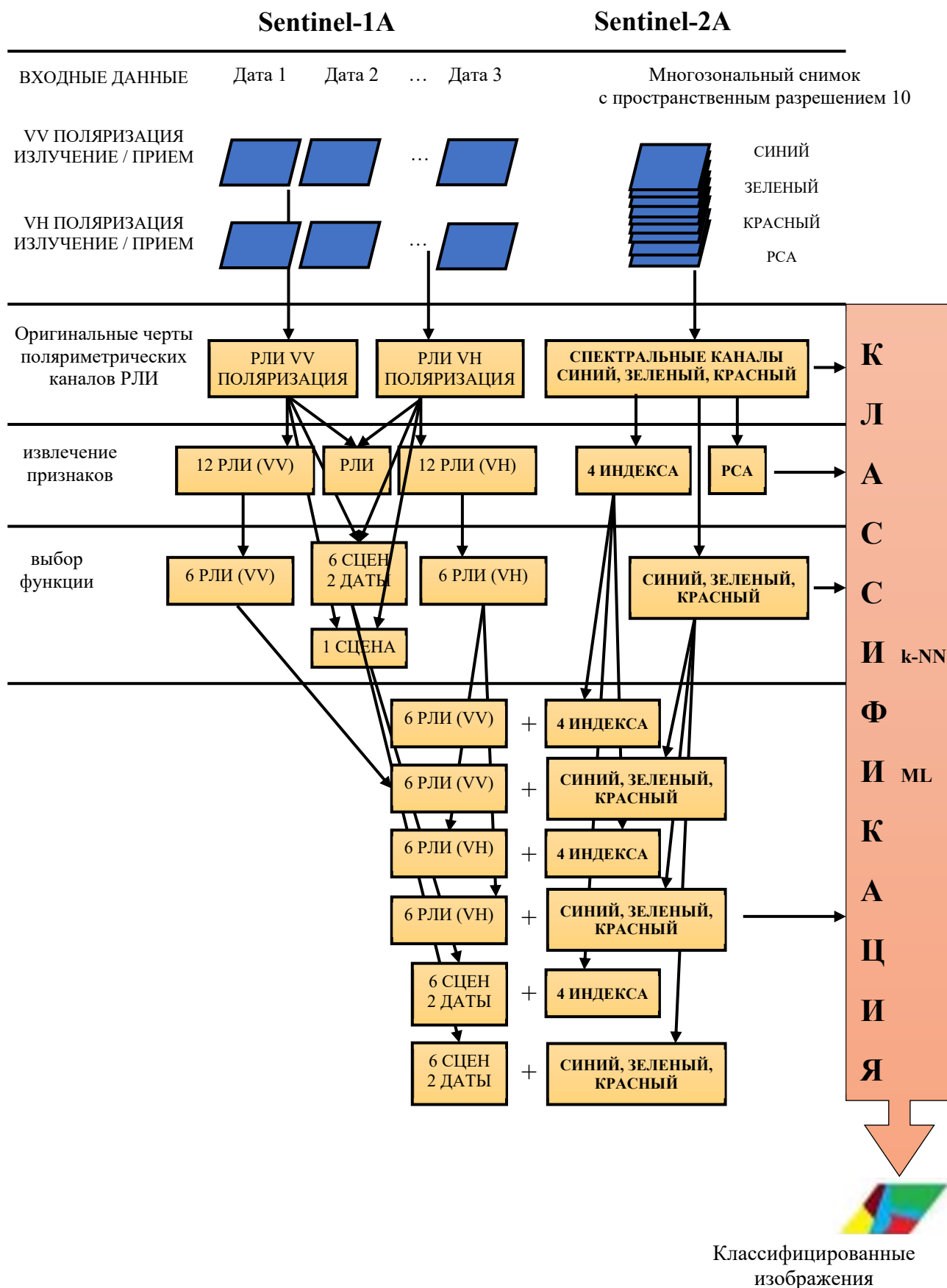


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований

Извлеченные функции PCA сначала были ранжированы с помощью дискриминантных отношений Фишера (табл. 1). Для классификации были выбраны четыре характеристики с наибольшими значениями: минимальное, среднее, среднее квадратичное и энтропия. Ранжирование также проводилось с пошаговой регрессией. Количество итераций было ограничено четырьмя, чтобы обеспечить нужное количество функций. На этом этапе к модели были добавлены четыре функции. Значения ρ изменяются на каждой итерации, поэтому четыре наименьших значения не при-

надлежат этим четырем характеристикам. Выбранными характеристиками были: стандартное отклонение, максимальное значение, минимальное значение и эксцесс.

В табл. 1 приведены линейные дискриминантные отношения Фишера для характеристик PCA, рассчитанные по поляризованным данным VV и VH, и ρ -значения в пошаговой регрессии для характеристик PCA после четырех итераций (VV и VH поляризаций вместе). Результаты дискриминантного отношения Фишера даны в табл. 2, где показаны восемь лучших соотношений.

Таблица 1

Результаты обработки характеристик PCA

Характеристики	Дискриминантное отношение Фишера	ρ -значение
Минимальное значение	0,819 6	0,014 08
Среднее значение	0,431 8	0,640 10
Среднее квадратичное значение	0,405 4	0,576 62
Энтропия	0,311 6	0,064 35
Максимальное значение	0,262 9	0,000 02
Стандартное отклонение	0,249 7	0,000 62
Эксцесс	0,125 2	0,009 90
Асимметрия	0,108 5	0,004 07

Таблица 2

Шесть лучших значений дискриминантных отношений Фишера для дат сцен PCA и ρ -значения в пошаговой регрессии для сцен PCA после двух итераций

Изображение Sentinel-1	Дискриминантное отношение Фишера	ρ -значение VV (поляризация на излучение / прием)	ρ -значение VH (поляризация на излучение / прием)
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170612T142845	1,4996	0,04113	0,0190
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170612T142846	–	3,0975e-04	1,2481e-05
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171102T024356	1,3405	6.7135e-64	1,3235e-13
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170822T024354	–	0,4350	0,0162
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171010T142851	1,4522	3,8776e-04	2,3395e-04
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170711T143657	–	0,00385	1,93457e-07
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180425T143659	–	0,0842	8,6255e-05
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180706T143703	–	0,0377	2,6332e-04
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180817T024401	–	0,9893	0,0085
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180823T143706	1,2502	2,02026e-08	0,00528
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180823T142857	1,2372	0,8951	0,0069
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181004T024402	1,2295	0,7678	0,0796

Подобный выбор функций был выполнен для немодифицированных сцен РСА. Сначала была выбрана лучшая сцена из доступных 12 сцен. При использовании дискриминантного отношения Фишера это была поляризованная сцена с комбинаций поляризации VV от 12.06.2017. Результаты показывают, что ни одна из поляризаций не кажется значительно лучше. В расчетах для пошаговой регрессии количество итераций ограничивалось одной. Это привело к выбору поляризованной сцены с комбинаций VV от 02.11.2017 (табл. 2).

Затем был произведен отбор сцен для поиска четырех лучших сцен. Поскольку поляризации объединены для одной даты, было использовано 12 сцен. Цель состояла в том, чтобы найти две лучшие сцены (даты). Результаты дискриминантного отношения Фишера приведены в табл. 2, где показаны шесть лучших соотношений. Этот метод привел к выбору сцен от 12.06.2017 и 11.02.2017. При использовании ступенчатой регрессии использовались снимки 04.10.2018 и 23.09.2018. В этом случае количество итераций ограничено двумя. Полученные p -значения показаны в табл. 2.

Выбор метода выбора функций оказывает влияние на результирующие функции. В этом случае оба метода приводят к разным результатам при выборе функций.

Классификация

На следующих этапах исследования оценивались результаты работы этих функций при классификации. Были сделаны классификации с поляризованными изображениями (комбинации поляризации вместе VV + VH) с помощью 9-NN и ML.

Полученные результаты также показывают много ложной классификации (далее – шума). ML имеет меньше шума, чем при использовании поляризованных изображений VV. Изменились и характеристики шума. Комбинация поляризации 9-NN привела к результату с дополнительным шумом, что добавляет ограничения в обнаружении разливов нефти на морской поверхности, которые контрастируют с яркостью окружающего моря без наличия разливов.

Для уменьшения размерности данных Sentinel-1A три основных компонента были рассчитаны из 12 поляризованных изображений VV и VH. Это должно привести к изображениям с наиболее важной информацией. Три вычисленных компонента включают 53,2 % дисперсии в исходных 12 изображениях. Эти три компонента затем были использованы для классификации. На рис. 4 показаны два результата: 9-NN и ML. Шум присутствует, особенно в измененных зонах компонентов водной поверхности. Однако по сравнению с предыдущими результатами ложных классификаций в этом случае больше в однородных районах. Соответствующая достоверность классификации составляет 63,2 и 64,4 %.

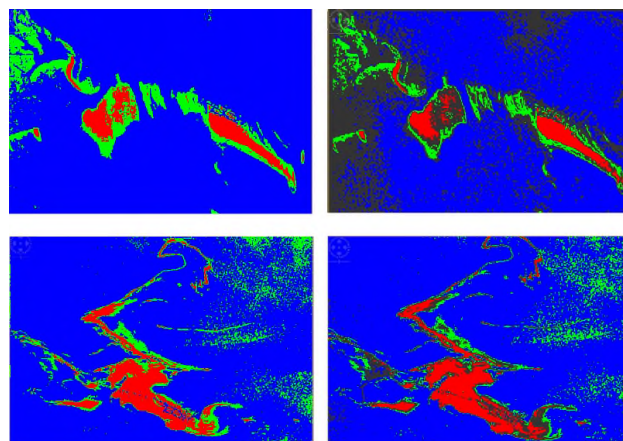


Рис. 4. Классификация одной сцены Sentinel-1A (одна дата, одна поляризация) с 9-NN (слева) и ML (справа):

■ – признаки нефтепроявлений; ■ – водная поверхность; ■ – неправильно идентифицированные объекты

Другой способ уменьшить размерность – выделить сцену. В этом случае сначала была выбрана одна сцена с помощью двух представленных методов выбора признаков. Выбранная сцена была использована для классификации (см. рис. 4). Дискриминантное отношение Фишера привело к выбору поляризованной сцены комбинации VV от 17.08.2018, тогда как пошаговая регрессия привела к выбору поляризованной сцены комбинации VV от 23.09.2018. Визуальные результаты получаются очень шумными. Только положитель-

ная корреляция между распределением различий характеристик разливов нефти и фракции воды на морской поверхности, которые контрастируют с яркостью окружающего моря без наличия разливов, способствует обнаружению. Классификация сцены комбинации VV от 17.08.2018 привела к появлению большой площади территории фракции воды на морской поверхности, которая контрастирует с яркостью окружающего моря без наличия разливов. Окончательная достоверность дешифрирования для сцен, выбранных с помощью пошаговой регрессии, выше (54,4 и 51,6 % по сравнению с 40,1 и 42,9 %).

Сцены для верхнего ряда (см. рис. 4) от 17.08.2018 выбираются с помощью дискриминантного отношения Фишера, а сцены для нижнего ряда от 23.09.2018 – с пошаговой регрессией. Обе сцены были поляризованы VV.

Также был произведен выбор сцены, чтобы найти четыре изображения (две даты, обе поляризации). Используя дискриминантное отношение Фишера, были выбраны сцены от 06.12.2017 и 11.02.2017, тогда как пошаговая регрессия привела к выбору сцен с 23.09.2018 и 23.08.2018. Затем для обоих наборов данных были выполнены четыре классификации. Полученные значения точности показаны в табл. 3, а две классификации для каждого набора данных показаны на рис. 5.

В результате получено, что оба набора данных привели к зашумленным классификациям. Однако сцены, выбранные с помощью дискриминантного отношения Фишера, содержат еще больше площадей, ошибочно классифицированных как загрязняющие вещества, и много ошибочно классифицированных как загрязняющие вещества, и много дополнительных зон, классифицированных как фракция воды на морской поверхности, которые контрастируют с яркостью окружающего моря без наличия разливов. Сцены, выбранные с пошаговой регрессией, также привели к большей достоверности (58,8 и 61,6 % по сравнению с 57,6 и 62,8 %).

Количество функций может быть уменьшено извлечением признаков с последующим их выбором. При вычислении новых характеристик по значениям амплитуды каждый пиксель получил уменьшенное количество функций. Затем функции были снова уменьшены выбором функций. В этом эксперименте для каждой поляризации были рассчитаны четыре характеристики, и две из них были выбраны для классификации.

Выбранные признаки были использованы для классификации, выполненной четырьмя методами. Результаты классификации при использовании изображений с поляризацией VV показаны на рис. 6, а соответствующие значения достоверности классификации – в табл. 3.

Таблица 3

Результаты классификации данных Sentinel-1A

Параметры классификации	MDM	1-NN	9-NN	ML
	%			
Поляризация вместе (VV + VH)	68,4	71,2	67,2	44,4
Три изображения PCA, рассчитанные на основе всех поляризованных изображений (VV и VH)	73,2	71,2	63,2	64,4
Выбор сцены (1 дата, одна поляризация):				
– использование коэффициента Фишера (17.08.2018, VV поляризовано)	45,6	33,2	40,1	42,9
– использование пошаговой регрессии (23.09.2018, VV поляризовано)	54,8	53,2	54,4	51,6
Выбор сцены (2 даты, обе поляризация):				
– использование коэффициента Фишера (среднее, минимальное, среднее квадратическое, энтропия)	40,0	55,2	57,6	62,8
– использование пошаговой регрессии (std, max, min, эксцесс)	47,6	59,2	58,8	61,6

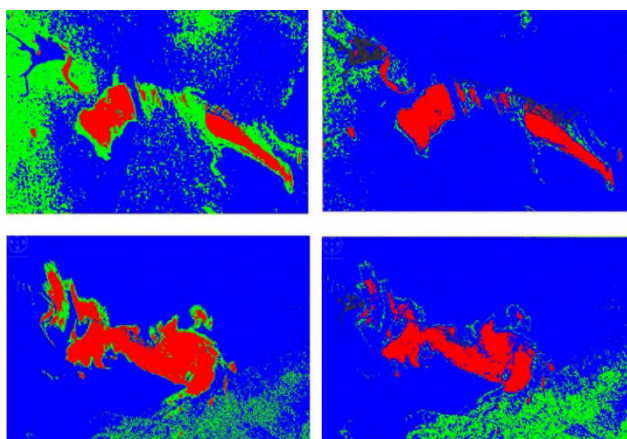


Рис. 5. Классификация четырех сцен Sentinel-1A (две даты, обе поляризации) с 9-NN (слева) и ML (справа). Сцены 06.12.2017 и 11.02.2017 выбираются с помощью дискриминантного отношения Фишера:

■ – признаки нефтепроявлений; ■ – водная поверхность; ■ – неправильно идентифицированные объекты

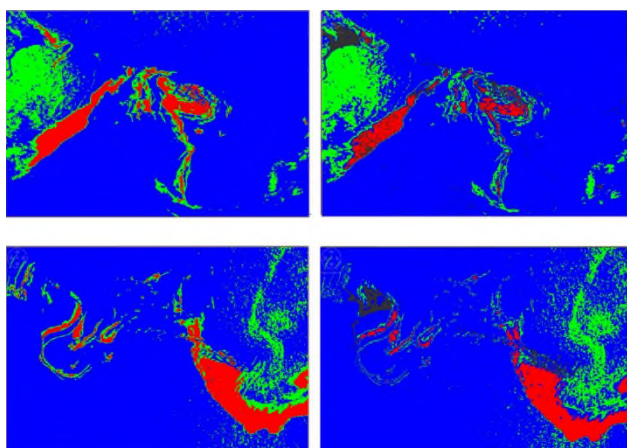


Рис. 6. Классификация четырех сцен Sentinel-1A (две даты, обе поляризации) с 9-NN (слева) и ML (справа). Сцены с 23.09.2018 и 23.08.2018 выбираются с пошаговой регрессией

■ – признаки нефтепроявлений; ■ – водная поверхность; ■ – неправильно идентифицированные объекты

Результаты вновь показывают ложные классификации. Классификации максимального правдоподобия приводят к множеству неправильно классифицированных малоко-

трастных объектов. В целом результаты при использовании функций, выбранных с помощью пошаговой регрессии, точнее. Однако значения достоверности полностью не совпадают, поскольку конечная точность классификации признаков по максимальному правдоподобию на основе дискриминантного отношения Фишера лучше. При этом окончательная точность (см. табл. 3) не дает однозначного решения, какой метод работает лучше, так как лучшая точность варьируется между методами классификации.

Визуальная интерпретация дает хорошее представление о результате классификации, но следует проверить окончательную точность. Данные табл. 3 показывают окончательную точность всех проведенных экспериментов, в том числе не показанных визуально. Метод 9-NN в основном работает так же хорошо, как лучший метод для определенного набора данных, тогда как максимальная вероятность варьируется от явно лучшего до явно худшего. Можно отметить, что уменьшение размерности в основном приводит к худшей точности (за исключением PCA). Однако даже в этих случаях по некоторым классификациям были достигнуты хорошие результаты.

Обсуждение

Образцы для обучения и тестирования были сформированы с визуальной интерпретацией изображений с высоким разрешением. Были извлечены пять обучающих и пять тестовых графиков для каждого класса (каждый из которых содержал девять пикселей в тестовых данных). Этого количества данных было достаточно для выполнения классификации и проверки, но, возможно, было бы лучше иметь большее количество тестовых данных. Проблемы с разделением классов могут привести к сложностям на этапе классификации. Выбор характеристик оказывает значительное влияние на классификацию. В исследованиях были выбраны четыре характеристики как для изображений PCA, так и для оптических данных на этапе объединения данных.

Классификации, выполненные по данным Sentinel-1A, характеризуются большим коли-

чеством шума. Авторы считают, что это вызвано наличием пятен на изображениях SAR из-за смешивания обратного рассеяния от неровных поверхностей. Полученные данные классификаций показывают, что использование всей информации изображений дает лучшие результаты, чем использование только одной или нескольких сцен, или некоторых извлеченных функций.

Это подтверждает идею о том, что изображения PCA сами по себе не содержат достаточной информации, но использование более длинных временных рядов может решить эту проблему.

Ожидалось, что пошаговая регрессия даст лучшие результаты, поскольку она учитывает взаимодействие функций, но функции, выбранные с помощью дискриминантного отношения Фишера, также дали некоторую конкурентоспособную точность.

В табл. 3 приведены значения достоверности автоматизированной классификации участков нефтезагрязнений на исследуемой территории на основе априорных данных о дешифровочных признаках объекта.

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– обработка объединенных данных позволяет уменьшить количество шума, обуслов-

ленного проявлением морских процессов малой интенсивности и получить более достоверные результаты в случае естественных оттоков нефти. Это может быть связано с разными источниками шума в двух наборах данных, которые можно устранить, когда данные используются совместно. Большие площади неправильно обнаруженных разливов нефти значительно уменьшились, и разливы нефти выделяются лучше за счет улучшения вариативности изображений, что, в свою очередь, улучшает описание пикселя;

– результаты визуальной классификации признаков, выбранных с помощью пошаговой регрессии, имеют меньше шума и, следовательно, дают лучшие результаты;

– результаты с одним сенсором в основном хуже.

Таким образом, за счет совместной обработки многозональных и разновременных рядов радиолокационных изображений одной и той же территории появляется возможность обработать множество идентифицируемых объектов водной поверхности и распознать зоны нефтеразливов на ранних стадиях, что позволит своевременно ликвидировать экологические и экономические последствия.

Далее планируется проводить исследования для ситуации, полностью основанной на обучении сегментации текстур с использованием нейронной 2D-сети с длинной кратковременной сетью памяти (LSTM).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lawa R. J., Kelly C. The impact of the "sea empress" oil spill [Electronic resource] // Aquatic Living Resources. – 2004. – Vol. 17. – P. 389–394. – Mode of access: <https://www.semanticscholar.org> (дата обращения 05.12.2020).
2. Palinkas L., Downs M., Petterson J., Russell J. Social, Cultural, and Psychological Impacts of the Exxon Valdez Oil Spill // Human Organization. – 1993. – Vol. 52. – P. 1–13. – DOI: 10.17730/humo.52.1.162688w475154m34.
3. Piatt J. F., Ford G. R. How many seabirds were killed by the Exxon Valdez oil spill? [Electronic resource] // American Fisheries Society symposium. – 1996. – Vol. 18. – P. 712–719. – Mode of access: <https://pubs.er.usgs.gov> (дата обращения 05.08.2020).
4. Picou J. S., Gill D. A., Dyer C. L., Curry E. W. Disruption and stress in an Alaskan fishing community: Initial and continuing impacts of the Exxon Valdez oil spill [Electronic resource] // Organization & Environment. – 1992. – Vol. 6. – P. 235–257. – Mode of access: <https://www.jstor.org> (дата обращения 20.09.2020).
5. Beyer J., Trannum H. C., Bakke T., Hodson P. V., Collier T. K. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review [Electronic resource] // Marine Pollution Bulletin. – 2016. – Vol. 110. – P. 28–51. – Mode of access: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27301686/> (дата обращения 20.09.2020).
6. Li P., Cai Q., Lin W., Chen B., Zhang B. Offshore oil spill response practices and emerging challenges [Electronic resource] // Marine Pollution Bulletin. – 2016. – Vol. 110. – P. 6–27. – Mode of access: <https://europepmc.org/article/med/27393213> (дата обращения 20.09.2020).

7. Espedal H. A., Wahl T. Satellite sar oil spill detection using wind history information [Electronic resource] // International Journal of Remote Sensing. – 1999. – Vol. 20. – P. 49–65. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1571919705800278> (дата обращения 05.08.2020).
8. Liu P., Li Y., Liu B., Chen P., Xu J. 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., 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. – Mode of access: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12601-020-0023-9> (дата обращения 02.01.2021).
10. Захаров А. И., Ковалевский Н. П., Синило В. П. особенности методов обработки радиолокационной космической информации [Электронный ресурс] // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 5 (78). – С. 108–113. – Режим доступа: <https://istina.msu.ru> (дата обращения 02.01.2021).
11. Moreira A., Prats -Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Parathanassiou K. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar // IEEE Geoscience and remote sensing magazine. – 2013. – Vol. 1, Issue 1. – P. 6–43.
12. Ouchi K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5, Issue 2. – P. 716–807. – DOI: 10.3390/rs5020716.
13. Аловсат Ш. Г., Хлебникова Т. А. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории Нефтяных Камней (Каспий)) [Электронный ресурс] // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 52–64. – Режим доступа: https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2019_3_52-64 (дата обращения 02.01.2021).
14. Колмогоров А. Н. Избранные труды. Т. 2: Теория вероятностей и математическая статистика [Электронный ресурс]. – М. : Наука, 2005. – 581 с. – Режим доступа: <https://www.livelib.ru/book/1000384446> (дата обращения 02.01.2021).
15. Ширяев А. Н. Вероятность-1 [Электронный ресурс]. – М. : МЦНМО, 2017. – 552 с. – Режим доступа: <http://www.mathnet.ru> (дата обращения 02.01.2021).
16. Круглов В. М., Королев В. Ю. Предельные теоремы для случайных сумм [Электронный ресурс]. – М. : Изд-во Московского университета, 1990. – 269 с. – Режим доступа: <https://istina.msu.ru> (дата обращения 02.01.2021).
17. Fingas M. F., Brown C. E. Review of Oil Spill Remote Sensing // Proceedings of the Sixth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Veridian ERIM International, Ann Arbor, MI. – 2000a. – P. 211–218.
18. Аловсат Ш. Г. Методы аэрокосмического мониторинга для оценки экологического состояния шельфовых объектов нефтегазодобычи [Электронный ресурс] // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения : материалы Второй национальной научно-практической конференции с международным участием (Южно-Сахалинск, 24–26 сентября 2019 г.) / ред. Л. М. Богомолов, В. А. Мелкий; ИМГиГ ДВО РАН, СахГУ. – Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2019. – С. 4–11. – Режим доступа: <http://books.imgg.ru/atlasfull/procl.pdf>.
19. Attema E., Snoeij P., Duesmann B., Davidson M., Floury N., Rosich B., Rommen B., Levrini G. GMES Sentinel-1 mission and system [Electronic resource] // European Space Agency, (Special Publication). – 2009. – Vol. 668. – P. 26–30. – Mode of access: <https://earth.esa.int> (дата обращения 17.04.2021).
20. Snoeij P., Attema E., Torres R., Levrini G. C-SAR Instrument Design for the Sentinel-1 Mission // Proceedings of the 2010 IEEE Radar Conference (10–14 May 2010). – Washington, DC, USA. – P. 25–30. – DOI: 10.1109/RADAR.2010.5494660.
21. ESA Copernicus–Open Access Hub [Electronic resource]. – Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu>.
22. Han B. Screening and validation of new diagnostic ratios of dibenzothiophenes and fluorenes for identification of seriously weathered oil spills // Environmental technology. – 2021. – Vol. 42, No. 1. – P 1–8. – DOI: 10.1080/09593330.2019.1619843.
23. Chua, Candice C. Tiered approach to long-term weathered lubricating oil analysis: GC/FID, GC/MS diagnostic ratios, and multivariate statistics [Electronic resource] // Analytical methods. – 2020. – Vol. 12, Issue 43. – P. 5236–5246. – Mode of access: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ay/d0ay01510e> (дата обращения 17.04.2021).

24. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote sensing and image interpretation / 6th ed. – New York, NY : John Wiley & Sons, 2008.

25. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 3. – P. 379–423.

Получено 10.01.2022

© Аловсат Шура-оглы Гулиев, Т. А. Хлебникова, 2022

STUDY OF THE POSSIBILITIES OF PROCESSING RADAR AND MULTI-ZONE SPACE IMAGES OF THE UNDERLYING SURFACE

Alovsat Shura-ogly Guliyev

State Oil Company of the Azerbaijan Republic (SOCAR), 121, Heydar Aliyev Prospect St., Baku, AZ1000, Azerbaijan, Senior Surveyor, phone: (99450)492-93-18, e-mail: alov_soc@yahoo.com

Tatiana A. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Associate Professor, Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)474-19-70, e-mail: t.a.hlebnikova@ssga.ru

The article is devoted to a detailed analysis of various methods of remote sensing of the Earth, which are used to detect and map oil spills. The purpose of the article is to test various functions that will allow find the optimal combination of classification based on a semi-automatic approach. The article propose and confirm the hypothesis that synthetic aperture radar images by themselves do not contain enough information, but using longer time series this problem can be solved. Thus, the studies carried out made it possible to extract the spatial extent of oil development sites and oil pollution in the shelf waters using multi-temporal data from synthetic aperture radar and a multispectral merged image with a spatial resolution of 10 m. Time series of radar images of the same territory can process many identifiable objects of the water surface and recognize oil spill zones at early stages.

Keywords: Sentinel-1A, Sentinel-2A, radar images, multi-zone satellite images, oil pollution monitoring

REFERENCES

1. Lawa, R. J., & Kelly, C. (2004). The impact of the "sea empress" oil spill. *Aquatic Living Resources*, 17, 389–394. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org> (accessed December 05, 2020).

2. Palinkas, L., Downs, M., Petterson, J., & Russell, J. (1993). Social, Cultural, and Psychological Impacts of the Exxon Valdez Oil Spill. *Human Organization*, 52, 1–13. Retrieved from <https://doi.org/10.17730/humo.52.1.162688w475154m34> (accessed December 05, 2020).

3. Piatt, J. F., & Ford, G. R. (1996). How many seabirds were killed by the Exxon Valdez oil spill? *American Fisheries Society Symposium*, 18, 712–719. Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov> (accessed August 05, 2020).

4. Picou, J. S., Gill, D. A., Dyer, C. L., & Curry, E. W. (1992). Disruption and stress in an Alaskan fishing community: Initial and continuing impacts of the Exxon Valdez oil spill. *Organization & Environment*, 6, 235–257. Retrieved from <https://www.jstor.org> (accessed September 20, 2020).

5. 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*, 110, 28–51. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27301686/> (accessed September 20, 2020).

6. Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., & Zhang, B. (2016). Offshore oil spill response practices and emerging challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 110, 6–27. Retrieved from <https://europepmc.org/article/med/27393213> (accessed 20, 2020).

7. Espedal, H. A., & Wahl, T. (1999). Satellite sar oil spill detection using wind history information. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 49–65. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1571919705800278> (accessed August 05, 2020).

8. Liu, P., Li, Y., Liu, B., Chen, P., & Xu, J. (2019). Semi-automatic oil spill detection on X-band marine radar images using texture analysis, machine learning, and adaptive thresholding. *Remote Sensing*, 11, P. 756. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs11070756> (accessed January 02, 2021).
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. *Remote Sensing*, 11, P. 451. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s12601-020-0023-9> (accessed January 02, 2021).
10. Zakharov, A. I., Kovalevskiy, N. P., & Sinilo, V. P. (2014). Features of methods for processing radar space information. *Kosmonavtika i raketostroenie [Cosmonautics and Rocketry]*, 5(78), 108–113. Retrieved from <https://istina.msu.ru>. [in Russian] (accessed January 02, 2021).
11. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Parathanassiou, K. A. (2013). Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6–43.
12. Ouchi, K. (2013). Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sensing*, 5(2), 716–807. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs5020716> (accessed January 02, 2021).
13. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2019). Identification of oil pollution sites in the shelf zone based on space survey materials (for example, the water area of Oil Rocks (Caspian Sea)). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 52–64. Retrieved from https://geocartography.ru/source/vestnik_ssugt/2019_3_52-64 [in Russian] (accessed January 02, 2021).
14. Kolmogorov, A. N. (2005). *Izbrannye Trudy: T. 2, Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Selected works: Vol. 2, Probability theory and mathematical statistics]*. Moscow: Nauka Publ., 581 p. Retrieved from <https://www.livelib.ru/book/1000384446> [in Russian] (accessed January 02, 2021).
15. Shiryaev, A. N. (2017). *Veroyatnost'-1 [Probability-1]*. Moscow: MTSNMO Publ., 552 p. Retrieved from <http://www.mathnet.ru> [in Russian] (accessed January 02, 2021).
16. Kruglov, V. M., & Korolev, V. Yu. (1990). *Predel'nye teoremy dlya sluchaynykh summ [Limit theorems for random sums]*. Moscow: Moscow University Publ., 269 p. Retrieved from <https://istina.msu.ru> [in Russian] (accessed January 02, 2021).
17. Fingas, M. F., & Brown, C. E. Review of Oil Spill Remote Sensing. Proceedings of the Sixth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Veridian ERIM International, Ann Arbor, MI (pp. I211-218), 2000a.
18. Guliyev, A. Sh. (2019). Methods of aerospace monitoring for assessing the ecological state of offshore oil and gas production facilities. In *Sbornik materialov Vtoroy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: Neftegazovyy kompleks: problemy i resheniya [Proceedings of the Second National Scientific and Practical Conference with International Participation: Oil and Gas Complex: Problems and Solutions]* (pp. 4–11). L. M. Bogomolov & V. A. Melkiy (Eds.). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG FEB RAS Publ. Retrieved from <http://books.imgg.ru/atlasfull/procl.pdf> [in Russian].
19. Attema, E., Snoeij, P., Duesmann, B., Davidson, M., Floury, N., Rosich, B., Rommen, B., & Levrini, G. (2009). GMES Sentinel-1 mission and system. *European Space Agency (Special Publication)*, 668, 26–30. Retrieved from <https://earth.esa.int> (accessed April 17, 2021).
20. Snoeij, P., Attema, E., Torres, R., & Levrini, G. (2010). C-SAR Instrument Design for the Sentinel-1 Mission. *Proceedings of the 2010 IEEE Radar Conference* (pp. 25–30). Washington, DC, USA. doi: 10.1109/RADAR.2010.5494660 (accessed April 17, 2021).
21. ESA Copernicus – Open Access Hub. (n. d.). Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu>.
22. Han, Bin. (2021). Screening and validation of new diagnostic ratios of dibenzothiophenes and fluorenes for identification of seriously weathered oil spills. *Environmental Technology*, 42(1), 1–8. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1619843> (accessed April 17, 2021).
23. Chua, Candice C. (2020). Tiered approach to long-term weathered lubricating oil analysis: GC/FID, GC/MS diagnostic ratios, and multivariate statistics. *Analytical Methods*, 12(43), 5236–5246. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ay/d0ay01510e> (accessed April 17, 2021).
24. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation* (6th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
25. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 3, 379–423.

Received 10.01.2022

© Alovsat Shura-ogly Guliev, T. A. Khlebnikova, 2022