

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ АПВЕЛЛИНГА НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЗНАКОВ ХАРАЛИКА

Лоссов К.К., Малинников В.А.

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

e-mail: Lssksn@gmail.com

В статье проведена верификация применения признаков Харалика, с помощью которых описываются текстурные характеристики изображений. Данные для исследования получены с помощью спутниковых спектрорадиометров MODIS и Sentinel.

Для анализа использовались матрицы признаков Харалика, сформированные на основе фрагментов изображений, содержащих и не содержащих зоны апвеллинга. В результате были вычислены 14 признаков Харалика, таких как контраст, корреляция, дисперсия и энтропия и т. д., что позволяет оценить текстурные различия между изображениями. Основное внимание уделялось попарному сравнению норм разностей матриц признаков Харалика, включая норму Фробениуса и p -нормы ($p=1, 2, \infty$). Наиболее значительные различия были выявлены при использовании p -нормы с $p=\infty$, что позволило сделать вывод о различии изображений, содержащих и не содержащих явление апвеллинга. Результаты показали, что различия норм разностей матриц для изображений с апвеллингом и без него достигали 50%.

В статье подчеркивается, что текстурные признаки Харалика, в особенности имеющие высокую корреляцию со средней температурой поверхности моря (ТПМ), могут служить эффективным инструментом для мониторинга явлений апвеллинга. Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейших исследований в области дистанционного зондирования и управления морскими экосистемами, а также предлагают методику для оперативного обнаружения апвеллинга на основе анализа текстурных характеристик спутниковых изображений.

Ключевые слова: апвеллинг, текстурные признаки Харалика, матричные вычисления, корреляция, дистанционное зондирование.

VERIFICATION OF THE METHODOLOGY FOR DETECTING UPWELLING PHENOMENA ON THE OCEAN SURFACE BASED ON SATELLITE IMAGERY USING HARALICK FEATURES

Lossov K.K., Malinnikov V.A.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

This study investigates the potential of using Haralick texture features to detect upwelling events in the Southeast Baltic and the Laptev Sea regions. A strong correlation between sea surface temperature (SST) and certain Haralick features was established in previous research [4], suggesting that a methodology based on this relationship could be effective for detecting upwelling. Using matrix computations, the study verifies the applicability of Haralick features for identifying upwelling phenomena. The most effective method for distinguishing between Haralick feature matrices derived from satellite images containing and not containing upwelling zones was found to be the p -norm of the differences with $p=\infty$.

Data from MODIS (Aqua, Terra) and Sentinel spectroradiometers were utilized, focusing on four infrared images of the Lena River delta region, two of which exhibited upwelling. A sliding window approach was employed to extract image fragments, and 14 Haralick features were calculated for each fragment, resulting in 14×10 matrices. Pairwise comparisons of the norms of these matrices revealed significant differences, particularly when analyzing the difference variance and entropy features.

The results indicate that the choice of sliding window parameters may be region-specific, and further analysis confirmed the effectiveness of Haralick features in detecting upwelling events. The study proposes a methodology for regional coastal upwelling detection based on pairwise comparisons of Haralick feature matrices, contributing to improved monitoring and understanding of coastal marine dynamics.

Keywords: Upwelling, Haralick features, matrix calculations, correlation, remote sensing.

Введение

Прибрежный апвеллинг (ПА) – морское явление конвективного характера, часто встречающееся в прибрежных водах. ПА переносит глубинные, часто холодные и соленые воды, богатые питательными веществами и углеродом, а также играет жизненно важную роль в локальном газообмене и теплообмене между воздухом и морем, поддержании морской экосистемы и физической динамике

океана. Именно прибрежные апвеллинги среди всех типов конвективных явлений оказывают непосредственное влияние на человеческую деятельность, так как эти явления поддерживает биоразнообразие за счет влияния на первичную (фитопланктон) [1] и вторичную (моллюски, пелагические виды рыб и т.д.) [2,3] продукцию.

Наличие устойчивой корреляционной зависимости между средней температурой поверхности

моря (ТПМ) и некоторыми текстурными признаками Харалика было получено в результате исследования, представленного в статье [4]. Исходя из этих результатов можно предположить, что одной из возможных методик обнаружения явлений апвеллинга является методика на основе установления зависимости между этими параметрами. В настоящей статье, с применением средств матричных вычислений произведена верификация возможности использования признаков Харалика для детектирования явлений апвеллинга в регионах Юго-Восточной Балтики и моря Лаптевых. Наибольшую эффективность для определения различия матриц признаков Харалика, построенных на основании фрагментов спутниковых изображений, содержащих и не содержащих зоны апвеллинга, показала p -норма разностей матриц с $p=\infty$. В качестве исходных данных были использованы данные о состоянии морской поверхности, полученные с помощью спектрорадиометров MODIS (Aqua, Terra) и Sentinel. Наилучшее соотношение значений норм разностей матриц снимков с присутствием апвеллинга и значений норм разностей матриц снимков с отсутствием апвеллинга продемонстрировали матрицы признаков Харалика, максимально коррелирующих с ТПМ. Такой подход позволил разработать методику для обнаружения региональных прибрежных апвеллингов на основе попарного сравнения норм разностей матриц текстурных признаков Харалика для фрагментов изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования в ИК диапазоне (ГИС Copernicus, инструмент Sentinel-3 OLCLI).

Данные и методы

Для данного исследования было выбрано четыре изображения региона моря Лаптевых в инфракрасном диапазоне, полученные с использованием ГИС Copernicus и инструмента Sentinel-3 OLCLI [6]. Из этих изображений два были сделаны в условиях проявления явления апвеллинга, а два других – в период его отсутствия. Даты наблюдений явления апвеллинга распределены по годам.



Рис. 1. Траектория скользящего окна 128*128 (белая линия) для региона моря Лаптевых

По аналогии с исследованием из статьи [6] в качестве исходных данных используются 10 фрагментов каждого из изображений, полученных с помощью скользящего окна 128x128 пикселей вдоль выбранной траектории (рис. 1).

Для оцифрованных изображений были вычислены 14 признаков Харалика, описанных в [6]. После этого для каждого из десяти фрагментов были сформированы четыре матрицы Харалика [7] размером 14x10.

С помощью попарного сравнения норм разностей матриц (в качестве нормы использовались: норма Фробениуса и p -норма с $p=1, 2, \text{inf}$. Подробное описание которых представлено в [8]) по всей совокупности признаков Харалика не удалось выявить явного различия между изображениями, содержащими апвеллинг, и его не содержащими (*Изображение 1 – Изображение 2, Изображение 3 – Изображение 4, Изображение 2 – Изображение 3, Изображение 1 – Изображение 4* см. матрицы Харалика табл. 1-4). Полученные значения нормы разностей матриц для пар изображений *Изображение 1 – Изображение 2* и *Изображение 3 – Изображение 4* были выше, чем значения норм разностей матриц для пары изображений *Изображение 2 – Изображение 3*.

После этого было выполнено сравнение попарно матриц размером (2x10) с использованием нескольких сочетаний двух признаков Харалика :

- суммарная дисперсия и суммарная энтропия
- разностная дисперсия и разностная энтропия
- контраст и корреляция

Результаты сравнения описаны, соответственно, в таблицах 1, 2 и 3.

В первом столбце таблиц отражен факт наличия апвеллинга на двух сравниваемых изображениях.

При сравнении норм разностей (использовались все нормы, указанные выше) матриц по признакам суммарной дисперсии и суммарной энтропии (табл. 1) не удалось выявить явного различия между изображениями, содержащими апвеллинг,

Таблица 1

Значения нормы разностей матриц (p -норма с $p=2$) для признаков Харалика (окно 128*128 региона моря Лаптевых) – Суммарная дисперсия и суммарная энтропия

Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	24.85
Изображение 3 - Изображение 4	28.66
Изображение 2 - Изображение 3	21.65
Изображение 1 - Изображение 4	36.33

Таблица 2

Значения нормы разностей матриц (p -норма с $p=2$ и $p=\inf$) для признаков Харалика (окно 128*128 региона моря Лаптевых) – Разностная дисперсия и Разностная энтропия

Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	1.14
Изображение 3 - Изображение 4	1.00
Изображение 2 - Изображение 3	1.29
Изображение 1 - Изображение 4	1.57

Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	2.91
Изображение 3 - Изображение 4	2.63
Изображение 2 - Изображение 3	3.63
Изображение 1 - Изображение 4	4.31

Таблица 3

Значения нормы разностей матриц (p -норма с $p=2$ и $p=\inf$) для признаков Харалика (окно 128*128 региона моря Лаптевых) – контраст и корреляция

Норма $P=2$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	1.20
Изображение 3 - Изображение 4	1.07
Изображение 2 - Изображение 3	1.35
Изображение 1 - Изображение 4	1.66

Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	3.04
Изображение 3 - Изображение 4	2.78
Изображение 2 - Изображение 3	3.78
Изображение 1 - Изображение 4	4.51

и не содержащими. Полученные результаты были аналогичны результатам сравнения матриц для полного набора признаков Харалика – значения нормы разностей матриц для пар изображений *Изображение 1 – Изображение 2* и *Изображение 3 – Изображение 4* были выше, чем значения норм разностей матриц для пары изображений *Изображение 2 – Изображение 3*.

Сравнение норм разностей матриц по разностной дисперсии и разностной энтропии показало наиболее явные отличия.

При этом сравнение норм разностей матриц по контрасту и корреляции так же выявило различие между изображениями, содержащими апвеллинг, и не содержащими. Лучших результатов удалось достичь путем использования матричной нормы с $p=\inf$ (бесконечность) для сравнения разностной дисперсии и разностной энтропии. Различие норм

между изображениями, содержащими апвеллинг, и не содержащими для данного эксперимента составило 37%.

С целью подтверждения целесообразности применения текстурных признаков Харалика для выявления явлений апвеллинга в других регионах был проведён анализ пар изображений Юго-Восточной Балтики (ЮВБ), как содержащих, так и не содержащих апвеллинга.

Аналогично анализу изображений апвеллинга в регионе моря Лаптевых, вдоль траектории скользящего окна размером 64×64 (рис. 2) было выделено по 10 фрагментов для каждого из четырёх изображений, в результате чего были сформированы матрицы признаков Харалика размером 14×10 (таблица 4 а, б, в, г).

После этого было выполнено сравнение попарно матриц размером (2×10) с использованием

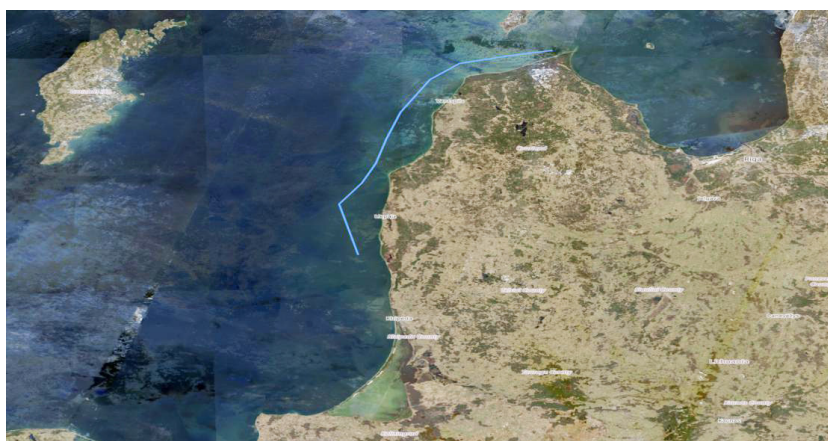


Рис. 2. Траектория (синяя линия) скользящего окна 64*64 в регионе ЮВБ

Таблица 4

Матрицы признаков Харалика для фрагментов изображения с присутствующим апвеллингом в регионе Юго-Восточной Балтики

Изображение 1										
Дата съемки 07.07.2018 (апвеллинг присутствует)										
Признак Харалика	Фрагмент изображения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.3796	0.3800	0.6199	0.2967	0.1847	0.2232	0.1371	0.1268	0.1226	0.2794
2	1.1312	1.5469	1.2299	1.5923	1.2490	1.4509	0.4608	0.5744	0.5595	1.3338
3	0.8754	0.7201	0.7506	0.7992	0.8769	0.8628	0.9571	0.9454	0.9462	0.8362
4	25.3361	23.5963	20.6941	20.3813	27.1632	24.8318	25.8388	27.9798	23.3510	26.1757
5	0.9255	0.8453	0.9254	0.8358	0.8400	0.8450	0.8874	0.8600	0.8628	0.8529
6	9.1518	9.1600	8.5702	8.1349	9.4311	8.8730	9.0794	9.5635	8.5531	9.4345
7	80.9627	72.7969	70.2512	58.4277	76.0745	71.4343	69.3581	74.6924	60.6470	77.2319
8	1.1559	1.2043	0.7205	1.4893	1.8794	1.6803	2.1272	2.2007	2.1951	1.5425
9	1.7495	1.9094	1.1190	2.3379	2.9390	2.6080	3.2472	3.4072	3.3739	2.3942
10	1.0727	1.4336	1.1676	1.4732	1.1474	1.3415	0.4103	0.5078	0.4947	1.2335
11	0.3317	0.4588	0.3042	0.5482	0.7667	0.5568	0.5687	0.6812	0.6510	0.5784
12	-0.6596	-0.3959	-0.4766	-0.4638	-0.5207	-0.5487	-0.6846	-0.6183	-0.6467	-0.5311
13	0.9062	0.7812	0.7096	0.8696	0.9347	0.9278	0.9828	0.9760	0.9799	0.9072
14	0.8972	0.7297	0.7586	0.8088	0.8882	0.8945	0.9660	0.9477	0.9641	0.8713

а

Изображение 2										
Дата съемки 24.06.2020 (апвеллинг присутствует)										
Признак Харалика	Фрагмент изображения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.2133	0.2408	0.3206	0.2779	0.4149	0.5058	0.3473	0.4026	0.3043	0.4179
2	1.3507	1.0025	1.3765	1.3460	2.7599	2.6349	3.1344	1.2837	1.2951	1.2768
3	0.8866	0.8701	0.8006	0.8498	0.6091	0.5386	0.6041	0.8536	0.8824	0.7524
4	25.1864	22.2156	25.9275	21.8513	25.5377	26.3631	21.7393	22.8914	24.5309	21.6149
5	0.8559	0.8714	0.8569	0.8661	0.8363	0.8421	0.8147	0.8958	0.8924	0.8723
6	8.8016	8.6002	9.5129	8.3668	9.4137	9.7282	8.4648	8.6354	8.7550	8.7574
7	73.2048	62.2094	78.7573	65.1462	82.4706	87.0266	67.4882	71.8111	74.9865	67.3200
8	1.6792	1.6881	1.3689	1.3977	0.9810	0.8829	1.0628	1.1815	1.3887	1.1231
9	2.5927	2.5952	2.1410	2.1683	1.5897	1.4419	1.7309	1.8186	2.1312	1.7621
10	1.2500	0.9227	1.2753	1.2498	2.6024	2.4844	2.9537	1.2046	1.2160	1.1860
11	0.5227	0.5959	0.5045	0.4225	0.4757	0.4849	0.5094	0.4266	0.5029	0.4083
12	-0.6089	-0.6021	-0.4826	-0.5508	-0.2959	-0.2409	-0.2833	-0.5739	-0.5915	-0.4574
13	0.9469	0.9450	0.8624	0.8987	0.6514	0.5712	0.6597	0.8767	0.9127	0.8051
14	0.9502	0.9130	0.8259	0.8757	0.6096	0.5387	0.6050	0.8858	0.8848	0.8012

б

Таблица 4 (Продолжение)

Изображение 3										
Дата съемки 08.06.2019 (апвеллинг отсутствует)										
Признак Харалика	Фрагмент изображения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.1781	0.2733	0.3694	0.3441	0.7909	0.3388	0.4121	0.3479	0.3508	0.5998
2	0.7488	1.9896	2.1401	3.0883	0.9095	2.1845	2.4296	2.5312	2.4608	1.3403
3	0.9152	0.8221	0.7649	0.6141	0.5275	0.7442	0.6894	0.6974	0.7059	0.7357
4	22.1915	24.4758	23.7642	19.8629	17.3728	27.3753	24.1471	21.8740	26.6594	23.6931
5	0.8696	0.8572	0.8582	0.8182	0.9323	0.8477	0.8479	0.8398	0.8446	0.9112
6	8.4640	8.7227	8.7979	7.9965	8.1332	9.6448	9.0283	8.4435	9.5129	9.2307
7	60.5638	73.0745	73.1842	61.1446	61.2311	85.2248	75.2596	67.5224	84.3375	79.8897
8	1.8566	1.4631	1.2400	1.0520	0.4983	1.2586	1.1513	1.1412	1.1426	0.7994
9	2.8674	2.2755	1.9415	1.7109	0.7926	1.9839	1.8236	1.8198	1.8168	1.2487
10	0.6799	1.8697	2.0140	2.9108	0.8610	2.0531	2.2887	2.3837	2.3180	1.2671
11	0.5188	0.5823	0.5177	0.4927	0.3140	0.5476	0.5136	0.5257	0.5181	0.3717
12	-0.6129	-0.5269	-0.4732	-0.2920	-0.2723	-0.4358	-0.4422	-0.3708	-0.3840	-0.4431
13	0.9595	0.8965	0.8366	0.6655	0.4702	0.8179	0.8030	0.7505	0.7604	0.7133
14	0.9235	0.8791	0.8100	0.6141	0.5608	0.7626	0.8696	0.6977	0.7074	0.7573

В

Изображение 4										
Дата съемки 13.07.2020 (апвеллинг отсутствует)										
Признак Харалика	Фрагмент изображения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.2522	0.2031	0.3344	0.3587	0.5424	0.3978	0.6046	0.5598	0.2704	0.1607
2	0.8929	0.8772	1.2790	2.7927	2.3492	2.6870	1.8658	2.3276	2.5176	2.9033
3	0.8971	0.9032	0.8009	0.6489	0.5526	0.6344	0.5782	0.5359	0.6899	0.6815
4	26.1245	26.2807	22.5275	23.3785	21.4787	22.3518	23.2333	24.5165	21.7178	26.4206
5	0.8815	0.8712	0.8632	0.8291	0.8528	0.8359	0.8773	0.8586	0.7751	0.7297
6	9.3666	9.3584	8.8212	8.8408	8.7153	8.6746	9.2011	9.4139	8.4358	9.3829
7	74.6892	74.4951	68.2541	73.0155	69.4431	70.0650	77.1664	81.6015	60.0956	70.7082
8	1.7356	1.7924	1.2922	1.1011	0.8865	1.0554	0.8234	0.8175	1.6256	1.9410
9	2.6633	2.7540	2.0187	1.7719	1.4364	1.6994	1.3199	1.3302	2.6479	3.2031
10	0.8220	0.8026	1.1843	2.6308	2.2135	2.5321	1.7584	2.1955	2.3398	2.6951
11	0.6045	0.6344	0.4943	0.5197	0.5071	0.5196	0.4693	0.4663	0.7953	1.0526
12	-0.6194	-0.6025	-0.5139	-0.3297	-0.2528	-0.3129	-0.2873	-0.2392	-0.3155	-0.2825
13	0.9531	0.9523	0.8674	0.7094	0.5832	0.6838	0.5981	0.5508	0.7932	0.8071
14	0.9413	0.9089	0.9127	0.6520	0.5536	0.6349	0.5790	0.5383	0.7006	0.6821

Г

сочетаний двух признаков Харалика, давших в прошлом эксперименте наиболее значимые результаты (таб. 5).

Сравнение норм разностей матриц подтвердило вышеописанные результаты [4] в части выявления различий между изображениями, содержащими апвеллинг, и изображениями, его не содержащими (таблица 9).

В качестве следующей итерации исследования размеры скользящего окна, используемого для получения изображений первого региона (море Лаптевых), так же было скорректировано до 64*64 пиксела.

Полученные в результате анализа изображений результаты (таблица 6) не позволили сделать явных выводов о наличии различий между изображениями, содержащими апвеллинг, и изображениями,

его не содержащими, т.к. процентное значение отношения значений норм разностей матриц снимков с присутствием апвеллинга и значений норм разностей матриц снимков с отсутствием апвеллинга было менее 30% и составило 14.9% и 15.3% для признаков контраст и корреляция (для $P=2$ и $P=\inf$ соответственно) и 14.9% и 14.6% для признаков разностная дисперсия и разностная энтропия (для $P=2$ и $P=\inf$ соответственно).

На основании данного анализа можно сделать вывод о том, что выбор параметров скользящего окна может быть индивидуален для каждого из регионов.

Чтобы дополнительно проверить состоятельность выводов о возможности обнаружения явлений апвеллинга с помощью текстурных признаков Харалика, решено было проверить корреляцию данных,

свидетельствующих о наличии данных явлений, с данными ТПМ. Для этого для трех изображений из разных регионов (1 изображение из региона дельта реки Лена и два изображения из региона ЮВБ), содержащих апвеллинги, вдоль траектории скользящего окна были получены значения ТПМ в 10 точках, соответствующих координатам изображений, используемых для расчета текстурных признаков Харалика. После этого данные были добавлены к уже сформированным матрицам признаков Харалика в качестве дополнительных параметров.

На основании значений коэффициентов корреляции были выбраны признаки Харалика, продемонстрировавшие максимальное значение корреляции относительно ТПМ (Корреляция и максимальный коэффициент корреляции). Затем для данной пары признаков был выполнен расчет нормы разностей матриц для всех трех изображений при норме $p=\text{inf}$. Результаты расчетов показали, что для всех трех изображений процентное значение отношения значений норм разностей матриц снимков с присутствием апвеллинга и значений норм разностей матриц снимков с отсутствием апвеллинга было примерно равно 50%.

Таким образом, мы смогли подтвердить корреляцию

между значениями признаков Харалика и показателями ТПМ.

Вывод

В данном исследовании был проведен сравнительный анализ пар фрагментов изображений, содержащих и не содержащих явление апвеллинга. Для выделения целевых фрагментов применялись скользящие окна размером 128×128 и 64×64 пикселей, что обеспечивало извлечение по 10 фрагментов из каждого изображения вдоль заданной траектории. Для каждого из 10 фрагментов были вычислены 14 признаков Харалика, на основе которых были сформированы матрицы Харалика размером 14×10 . Основное внимание в исследовании было сосредоточено на попарном сравнении норм разностей этих матриц, включая норму Фробениуса и p -нормы ($p=1, 2, \infty$), что позволило оценить степень различий между фрагментами изображений в контексте явления апвеллинга.

Наиболее значимый результат дает сравнение снимка, подлежащего проверке на наличие апвеллинга с эталонными снимками той же области, на которых явление апвеллинга отсутствует для признаков Харалика, показывающих наибольшую корреляцию с ТПМ. Для получения эталонного снимка,

Таблица 5

Значения нормы разностей матриц (p -норма с $p=2$ и $p=\text{inf}$) для пар признаков Харалика (окно 64×64 региона ЮВБ) Контраст и корреляция (а) и Разностная дисперсия и разностная энтропия (б)

Контраст и корреляция	
Норма $P=2$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	3.55
Изображение 3 - Изображение 4	2.69
Изображение 2 - Изображение 3	3.47
Изображение 1 - Изображение 4	4.07
Норма $P=\text{inf}$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	8.03
Изображение 3 - Изображение 4	6.74
Изображение 2 - Изображение 3	9.58
Изображение 1 - Изображение 4	11.18

а

Разностная дисперсия и Разностная энтропия	
Норма $P=2$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	3.37
Изображение 3 - Изображение 4	2.57
Изображение 2 - Изображение 3	3.29
Изображение 1 - Изображение 4	3.82
Норма $P=\text{inf}$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	7.63
Изображение 3 - Изображение 4	6.32
Изображение 2 - Изображение 3	9.12
Изображение 1 - Изображение 4	10.66

б

Таблица 6

Значения нормы разностей матриц (p -норма с $p=2$ и $p=\inf$) для пар признаков Харалика (окно 64*64 региона моря Лаптевых) Контраст и корреляция (а) и Разностная дисперсия и разностная энтропия (б)

Контраст и корреляция	
Норма $P=2$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	1.29
Изображение 3 - Изображение 4	1.53
Изображение 2 - Изображение 3	1.76
Изображение 1 - Изображение 4	1.66
Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	3.04
Изображение 3 - Изображение 4	3.77
Изображение 2 - Изображение 3	4.35
Изображение 1 - Изображение 4	4.61

а

Разностная дисперсия и Разностная энтропия	
Норма $P=2$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	1.22
Изображение 3 - Изображение 4	1.45
Изображение 2 - Изображение 3	1.67
Изображение 1 - Изображение 4	1.57
Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	2.92
Изображение 3 - Изображение 4	3.61
Изображение 2 - Изображение 3	4.14
Изображение 1 - Изображение 4	4.40

б

Таблица 7

Значения нормы разностей матриц ($p=\inf$) для пар признаков Харалика (Корреляция и Максимальный коэффициент корреляции) для региона моря Лаптевых окно 128*128(а), окно 64*64 (б) и региона ЮВБ окно 64*64 (в)

Корреляция и Максимальный коэффициент корреляции	
Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	0.48
Изображение 3 - Изображение 4	0.59
Изображение 2 - Изображение 3	0.61
Изображение 1 - Изображение 4	0.88

а

Корреляция и Максимальный коэффициент корреляции	
Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	0.73
Изображение 3 - Изображение 4	0.77
Изображение 2 - Изображение 3	0.70
Изображение 1 - Изображение 4	1.16

б

Корреляция и Максимальный коэффициент корреляции	
Норма $P=\inf$	
Сравниваемые изображения	Значение нормы разностей матриц
Изображение 1 - Изображение 2	1.58
Изображение 3 - Изображение 4	0.86
Изображение 2 - Изображение 3	1.28
Изображение 1 - Изображение 4	2.38

в

на котором явление отсутствует, для интересующего региона с потенциально возникающим явлением апвеллинга требуется сделать серию снимков, на достаточном временном промежутке. В случае обнаружения аномального отклонения ТПИМ, которое потенциально может указывать на возникновение апвеллинга, требуется взять изображение за более раннюю дату (t-n) и подтвердить отсутствие апвеллинга с помощью дополнительных измерений (например концентрация Chl A). При поступлении

снимка, подлежащего определению на наличие апвеллинга, следует посчитать процентное значение отношения значения норм разностей матриц определяемого снимка со значениями норм разностей матриц снимков с отсутствием апвеллинга. Если процентное значение данного отношения превышает 30% (+/-2%), то можно констатировать наличие апвеллинга (гипотеза, проверяется при помощи статистических методов).

Список литературы

1. Arrigo K.R. and van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. Prog. Oceanogr. 136. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.002>. Synthesis of Arctic Research (SOAR). 2015.
2. Ryan R. Rykaczewski David M. Checkley, Jr: Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>.
3. Aurelie Jolivet, Lars Asplin, Øivind Strand, Julien Thebault, Laurent Chauvaud: Coastal upwelling in Norway recorded in Great Scallop shells. Limnol. Oceanogr. 60. 2015. 1265-1275.
4. Лоссов К.К., Малинников В.А. Разработка методики использования признаков Харалика для детектирования зон апвеллинга на морской поверхности по материалам космических съемок // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №4 (66).
5. Alexander Osadchiev, Ksenia Silvestrova and Stanislav Myslenkov Wind-Driven Coastal Upwelling Near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. Remote Sens. 2020. 12. 844.
6. М.В. Капустина, А.В. Зимин. Изменчивость характеристик апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в первые два десятилетия XXI века // Морской Гидрофизический Журнал. Том 39. №6. 2023.
7. Haralick R.M., Textural Features for Image Classification, IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. Vol. 3. No. 6. Pp. 610-621.
8. Троицкий А.К. Визуализация текстурных характеристик изображений на базе матрицы Харалика. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия. 2016-3 04.
9. Голуб Ч., Ван Лоун. Матричные вычисления. Москва: «Мир». 1999.

References

1. Arrigo K.R. and van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. Prog. Oceanogr. 136. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.002>. Synthesis of Arctic Research (SOAR). 2015.
2. Ryan R. Rykaczewski David M. Checkley, Jr: Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>.
3. Aurelie Jolivet, Lars Asplin, Øivind Strand, Julien Thebault, Laurent Chauvaud: Coastal upwelling in Norway recorded in Great Scallop shells. Limnol. Oceanogr. 60. 2015. 1265-1275.
4. Lossov K.K., Malinnikov V.A. Development of a methodology for using Haralick features to detect upwelling zones on the ocean surface based on satellite imagery. Monitoring. Nauka i tekhnologii. 2025. No. 4 (66).
5. Alexander Osadchiev, Ksenia Silvestrova and Stanislav Myslenkov Wind-Driven Coastal Upwelling Near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. Remote Sens. 2020. 12. 844.
6. Kapustina M.V., Zimin A.V. Variability of upwelling characteristics in the southeastern Baltic Sea during the first two decades of the 21st century. Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal. V. 39. No. 6. 2023.
7. Haralick R.M., Textural Features for Image Classification, IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973. Vol. 3. No. 6. Pp. 610-621.
8. Troitskiy A.K. Vizualizatsiya teksturnykh kharakteristik izobrazheniy na baze matritsy Kharalika [Visualization of image texture characteristics based on the Haralick matrix]. National Research Nuclear University. Russia. 2016-3 04.
9. Golub Ch., Van Loan. Matrichnyye vychisleniya [Matrix computations]. Moscow: «Mir». 1999.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Лоссов Константин Константинович

аспирант, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Малинников Василий Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Lossov Konstantin Konstantinovich

Graduate Student, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Malinnikov Vasily Alexandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 22.01.2026 г.