

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.71:551.556

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73>

Статистический анализ влияния скорости ветра на возникновение прибрежного апвеллинга в море Лаптевых по материалам космических съемок

К. К. Лоссов¹, В. А. Малинников¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: lssksn@gmail.com

Аннотация. Целью представленного исследования является статистическая оценка связи между скоростью ветра и температурой поверхности моря (ТПМ) в зоне прибрежного апвеллинга вблизи дельты р. Лены в море Лаптевых, а также анализ прогностического потенциала приземных полей ветра для выявления условий, благоприятных для его возникновения. В качестве исходных данных использованы спутниковые измерения ТПМ прибором SLSTR спутника Sentinel-3, а также данные реанализа ERA5 (ECMWF), характеризующие приземную скорость ветра. Для описания зависимости ТПМ от скорости ветра применена полиномиальная регрессия, степень полинома выбиралась по значению скорректированного коэффициента детерминации (Adjusted R²). Установлено, что кубическая модель наилучшим образом описывает нелинейную связь между ТПМ и скоростью ветра (Adj.R² = 0,3876, SE = 1,34 °C). Показано, что ветер в секторах В/ЮВ и ЗСЗ со скоростью более 7 м/с за двое суток до события является статистически значимым предиктором апвеллинга в исследуемом районе.

Ключевые слова: апвеллинг, море Лаптевых, скорость ветра, температура поверхности моря, полиномиальная регрессия, ERA5, Sentinel-3

Для цитирования:

Лоссов К. К., Малинников В. А. Статистический анализ влияния скорости ветра на возникновение прибрежного апвеллинга в море Лаптевых по материалам космических съемок. *Вестник СВУГиТ*. 2026. Т. 31, № 5. С. 64–73. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73>

Wind velocity as a primary predictor of Laptev Sea upwelling: a remote sensing assessment

К. К. Lossov¹, V. A. Malinnikov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: lssksn@gmail.com

Abstract. The study presents a statistical assessment of the relationship between wind speed and sea surface temperature (SST) within the coastal upwelling zone adjacent to the Lena River delta in the

Laptev Sea. Furthermore, it evaluates the prognostic utility of surface wind fields for the early identification of upwelling-favorable conditions. The analysis leverages satellite-derived SST observations from the sea and land surface temperature radiometer (SLSTR) aboard Sentinel-3, complemented by surface wind velocity fields from the ERA5 reanalysis product (ECMWF). The functional dependence of SST on wind speed was modeled using polynomial regression, where the optimal polynomial degree was determined by maximizing the adjusted coefficient of determination (Adj. R^2). The obtained results indicate that a cubic model provides the best fit for the non-linear relationship between the variables (Adj. $R^2 = 0.3876$, SE = 1.34 °C). Crucially, the analysis identifies wind in the easterly/southeasterly (E/SE) and west-northwesterly (WNW) sectors with speeds exceeding 7 m/s, observed 48 hours prior to the event, as a statistically significant predictor of upwelling onset in the study region.

Keywords: upwelling, Laptev Sea, wind speed, sea surface temperature, polynomial regression, ERA5, Sentinel-3

For citation:

Lossov K. K., Malinnikov V. A. (2026). Wind velocity as a primary predictor of Laptev Sea upwelling: a remote sensing assessment. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 64–73. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-64-73>

Введение

Прибрежный апвеллинг представляет собой океанографическое явление, при котором глубинные воды поднимаются к поверхности в результате экмановского переноса [1], вызванного действием ветра. В морях северных широт апвеллинг играет исключительно важную роль: он обеспечивает вертикальный перенос питательных веществ из глубинных слоев в фотическую зону, стимулируя первичную продукцию фитопланктона и поддерживая функционирование всей пищевой цепи арктических экосистем [2–4]. В отличие от хорошо изученных апвеллинговых систем умеренных и тропических широт (побережья Калифорнии, Перу, Западной Африки) [5], прибрежный апвеллинг в арктических шельфовых морях до сих пор остается недостаточно исследованным.

Море Лаптевых, являющееся одним из окраинных морей Северного Ледовитого океана, характеризуется рядом уникальных физико-географических особенностей. Более 53 % его акватории приходится на мелководный шельф с глубинами менее 50 м. Основным источником пресноводного стока является река Лена, среднемноголетний расход которой варьируется от 463 до 663 км³/год, формируя обширный распресненный плум в южной части моря. Безледный период в дан-

ном регионе приходится на июль – сентябрь, в это время создаются условия, благоприятные для развития ветрового апвеллинга.

Механизм прибрежного апвеллинга в море Лаптевых основан на экмановском переносе, индуцируемом ветрами, направленными от берега. При ветрах восточного и юго-восточного направлений относительно берегов дельты Лены происходит сгон поверхностных распресненных вод в открытое море. В результате в прибрежной зоне возникает дефицит воды, компенсируемый подъемом более холодных и соленых глубинных вод. Этот процесс приводит к характерному понижению ТПМ и повышению солености в прибрежной полосе, что фиксируется методами спутникового дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне. Помимо классического экмановского механизма, описан апвеллинг, возникающий в зоне между плюмами рек Лены и Оленёк при северо-западных ветрах [6].

В работе [7] на основе спутниковых данных Sentinel-3 SLSTR проводилась идентификация серии апвеллинговых событий вблизи дельт крупных рек в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, продемонстрировав, что направленные от берега ветры скоростью более 6–8 м/с, действующие в течение 1–3 суток, способны вызвать значительное понижение ТПМ. В работе [6] детально исследовали структуру и изменчивость плюмов Лены и Оленёк. Несмотря

на достигнутый прогресс, количественная связь между характеристиками ветра и интенсивностью апвеллинга в море Лаптевых остается недостаточно изученной.

Целью настоящей статьи является количественная оценка связи между скоростью ветра и температурой поверхности моря в зоне прибрежного апвеллинга вблизи дельты р. Лены. Для достижения цели использованы спутниковые данные ТПИМ (Sentinel-3 SLSTR, GHRSSST MUR L4 SST) и данные реанализа ветра ERA5. Основным методический инструмент, использованный в рамках данного исследования, – полиномиальная регрессия с оптимизацией степени полинома по критерию Adjusted R².

Район исследования и данные

Район исследования расположен в южной части моря Лаптевых, в зоне непосредственного влияния пресноводного плюма р. Лены. Данный район характеризуется мелководным шельфом с глубинами преимущественно 10–30 м, значительной пространственной изменчивостью гидрологических параметров в безледный период и высокой чувствительностью к ветровому воздействию (табл. 1). Для анализа апвеллинговых событий была определена траектория из 12 контрольных точек (рис. 1) от координат 74,53° с. ш., 123,08° в. д. до 74,07° с. ш., 127,91° в. д. (табл. 2).

Таблица 1. Данные по скорости ветра и значениям ТПИМ вдоль траектории

Точка	Скорость ветра м/с (лаг 2 дня)	Значение ТПИМ
Дата: 15.07.2022 – апвеллинг отсутствует		
1	2,9	5,4
2	2,9	6,3
3	2,9	5,7
4	3,5	5,4
5	2,9	5,5
6	2,3	5,1
7	2,9	6
8	3,5	7,5
9	3,5	7,05
10	3,8	7,05
11	2,9	7,5
12	2,9	6,45
Дата: 25.07.2023 – апвеллинг присутствует		
1	7,54	4,5
2	7,5	4,65
3	7,49	4,8
4	7,66	4,95
5	7,61	5,1
6	7,57	5,25
7	8,19	5,4
8	8,11	5,7
9	8,48	6,0
10	8,26	6,3
11	8,96	6,45
12	9,11	6,6

Окончание табл. 1

Точка	Скорость ветра м/с (лаг 2 дня)	Значение ТПМ
Дата: 31.08.2019 – апвеллинг присутствует		
1	8,3	2,25
2	7,7	2,55
3	7,7	2,85
4	7,7	2,85
5	8,3	2,85
6	8,3	1,2
7	7,7	3,3
8	7,7	3,15
9	6,8	2,85
Дата: 22.08.2019 – апвеллинг присутствует		
1	5,9	7,65
2	5,9	7,95
3	5,9	7,95
4	5,9	7,5
8	5,9	7,65
9	5,3	7,65
10	5,3	6,3
11	5,3	7,35
12	5,9	7,5
Дата: 31.07.2018 – апвеллинг отсутствует		
1	5,2	6,3
2	5,2	7,35
3	5,2	5,55
4	5,2	5,25
5	5,2	6,75
6	5,2	6,9
7	5,2	5,25
8	5,2	5,55
9	5,2	6,15
10	5,2	3,9
11	5,2	5,85
12	5,2	6,75
Дата: 06.08.2018 – апвеллинг присутствует		
1	10,7	4,95
2	9,8	3,75
3	10,1	4,8
4	10,1	3,75
5	10,1	2,85
6	10,1	2,85
7	10,1	3,6
8	10,1	3,0
9	10,7	4,5



Рис. 1. Расположение контрольных точек траектории апвеллинга в море Лаптевых (район дельты р. Лены)

Таблица 2. Координаты контрольных точек траектории апвеллинга

Точка	Широта, °N	Долгота, °E
1	74,5294	123,0837
2	74,4364	123,3758
3	74,3833	123,7121
4	74,2848	124,1237
5	74,2815	124,3980
6	74,2550	124,6016
7	74,2208	125,4661
8	74,1930	125,9248
9	74,1322	126,5399
10	73,9452	127,1241
11	74,1765	127,2706
12	74,0691	127,9074

В качестве основного источника данных о ТПМ использованы спутниковые снимки прибора SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) спутников серии Sentinel-3 [8] с пространственным разрешением около 1 км и точностью 0,3 °C. Дополнительно для валидации привлекался продукт GHRSSST MUR L4 SST [9] с разрешением 0,01° (~1 км).

Данные о приземном ветре получены из реанализа ERA5 [10, 11] (ECMWF). Используются компоненты зонального (u_{10}) и меридионального (v_{10}) ветра на высоте 10 м, осредненные за сутки. Доступ к данным осу-

ществлялся через Open-Meteo Historical API [12]. При формировании выборки учитывался временной лаг 2 суток.

Анализ охватывал четыре подтвержденных события апвеллинга, а также контрольные даты без его признаков. Визуальная верификация событий проводилась с использованием сервиса NASA Worldview [13] (рис. 2).



Рис. 2. Спутниковый снимок ТПМ (GHRSSST MUR L4 SST, NASA WorldView) за 09.08.2018

Методика

Формирование выборки осуществлялось следующим образом: для каждого спутникового снимка в каждой из 12 контрольных точек траектории измерялись значения ТПМ и скорости ветра (с лагом 2 суток). Скорость ветра вычислялась по формуле

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (1)$$

направление определялось по стандартной метеорологической конвенции. Итоговая выборка составила $n = 63$ наблюдения.

Для описания зависимости ТПМ от скорости ветра использована полиномиальная регрессия вида

$$T = b_0 + b_1 \cdot v + b_2 \cdot v^2 + \dots + b_k \cdot v^k, \quad (2)$$

где T – ТПМ (°C); v – скорость ветра (м/с); k – степень полинома.

Для выбора оптимальной степени полинома использовались коэффициент детер-

минации R^2 , скорректированный коэффициент детерминации

$$\text{Adjusted } R^2 = \frac{1 - (1 - R^2) \cdot (n - 1)}{(n - k - 1)} \quad \text{и стандартная ошибка регрессии } S_E = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n - k - 1}}.$$

Дополнительно проводился анализ остатков регрессии: нормальность распределения оценивалась по Q-Q-графику (Normal Probability Plot), однородность дисперсии проверялась по графику «остатки от предсказанных значений» (Predicted vs. Residuals).

Тестировались полиномиальные модели степеней от 1 до 5. Оптимальной признавалась модель с максимальным Adj.R² при условии случайности остатков и отсутствия признаков переобучения. Вычисления выполнены в MATLAB R2024a.

Результаты

Результаты полиномиальной регрессии для степеней от 1 до 5 сведены в табл. 3 и рис. 3. Данные демонстрируют немонотонную зависимость скорректированного коэффициента детерминации от степени полинома, что указывает на существование оптимальной степени сложности модели.

Таблица 3. Метрики полиномиальной регрессии для различных степеней полинома

Степень полинома	R ²	Adj. R ²	Std. Error, °C
1	0,3006	0,2891	1,4425
2	0,3192	0,2965	1,4350
3	0,4172	0,3876	1,3388
4	0,4173	0,3772	1,3502
5	0,4231	0,3725	1,3553

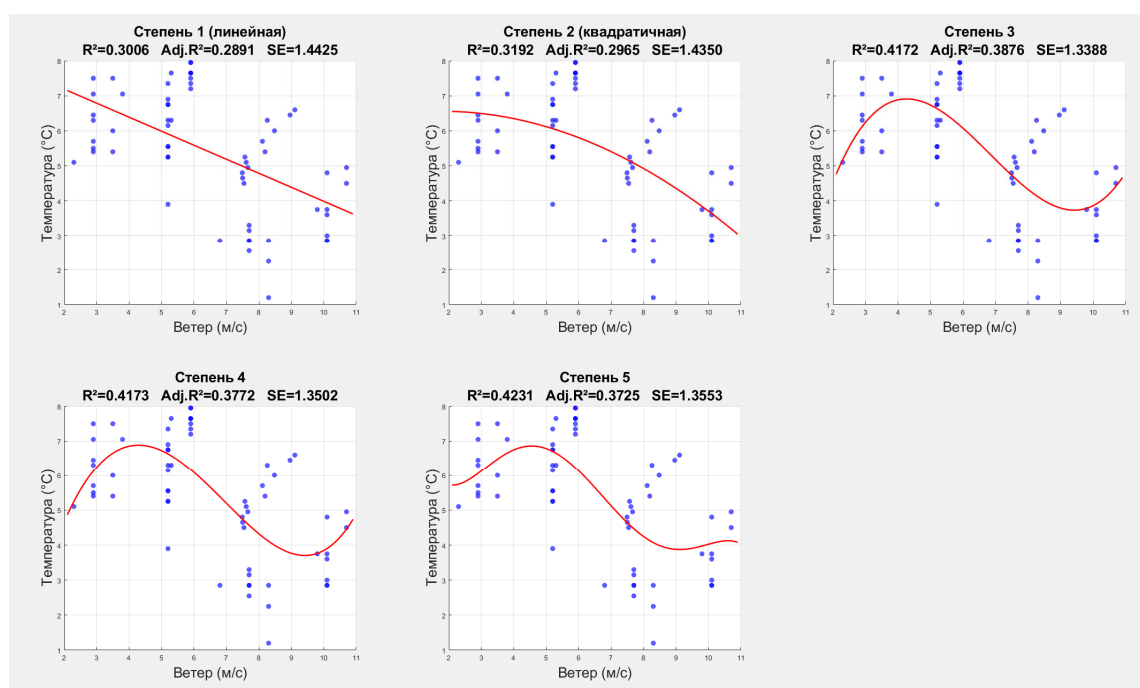


Рис. 3. Сравнение полиномиальной регрессии степеней 1–5: scatterplot Температура ~ Ветер с аппроксимирующими кривыми $n = 63$

Линейная модель (степень 1) показывает $R^2 = 0,30$ и $\text{Adj.}R^2 = 0,29$. Квадратичная модель (степень 2) обеспечивает лишь минимальный прирост качества: $\text{Adj.}R^2$ увеличивается на 0,007. Кубическая модель (степень 3)

демонстрирует качественный скачок: $\text{Adj.}R^2$ достигает 0,3876, стандартная ошибка снижается до 1,34 °C. Кубическая кривая отражает характерную трехфазную нелинейную зависимость ТПМ от скорости ветра (рис. 4).

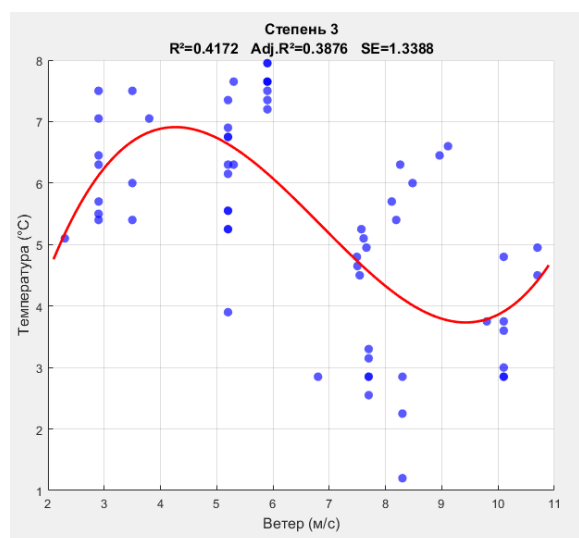


Рис. 4. Оптимальная кубическая модель (степень 3): зависимость ТПМ от скорости ветра (лаг 2 суток)

Модели степеней 4 и 5 не приводят к улучшению: Adj.R² составляет 0,3772 и 0,3725 соответственно – оба значения ниже, чем у кубической модели. На диагностических графиках появляются крупные выбросы, аппроксимирующие кривые начинают осциллировать, что является характерным признаком переобучения.

Таким образом, кубическая полиномиальная модель (степень 3) признана оптимальной по совокупности критериев: максимальное Adj.R², минимальная стандартная ошибка, нормальность и случайность остатков (рис. 5).

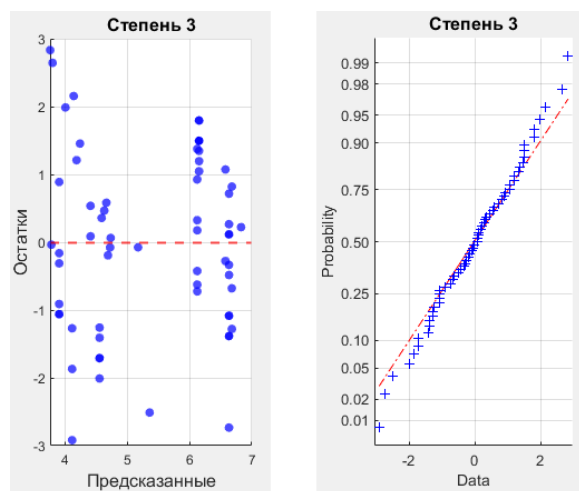


Рис. 5. График остатков (Predicted vs Residuals) и Normal Probability Plot кубической модели (степень 3)

Данные табл. 4 показывают, что три из четырех подтвержденных событий апвеллинга сопровождались ветром скоростью более 7 м/с в секторах В/ЮВ или ЗСЗ/З за двое суток до регистрации понижения ТПМ. Событие 20.07.2023 представляет исключение: ветер имел скорость 3,6–4,7 м/с и юго-юго-западное направление. Данное наблюдение может объясняться иным механизмом, а именно апвеллингом между плунами рек Лены и Оленёк при северо-западных ветрах, описанным в [6].

Таблица 4. Характеристики ветра для подтвержденных событий апвеллинга

Дата события	Дата ветра (лаг –2 дня)	Средняя скорость, м/с	Направление	Апвеллинг
09.08.2018	07.08.2018	~9,2	В/ЮВ	ДА
03.08.2019	01.08.2019	~7,7	В/ЮВ	ДА
20.07.2023	18.07.2023	3,6–4,7	ЮЮЗ	ДА
25.07.2023	23.07.2023	7,5–9,1	ЗСЗ/З	ДА

Дополнительно была выполнена оценка связи между средней скоростью ветра за 48 ч до события и текстурными признаками Харалика [14]. Коэффициенты корреляции Пирсона между скоростью ветра и четырьмя признаками Харалика (контраст, корреляция, максимальный коэффициент корреляции, энтропия) по модулю не превысили 0,11, что указывает на отсутствие выраженной линейной связи между скоростью ветра и текстурными дескрипторами ТПМ в пределах анализируемой выборки.

Обсуждение

Полученная кубическая модель объясняет приблизительно 39 % дисперсии ТПМ в зоне апвеллинга. Оставшийся 61 % дисперсии определяется объемом и температурой речного стока Лены, степенью стратификации водной толщи, ледовой обстановкой, интенсивностью солнечного облучения поверхности моря, а также пространственной неоднородностью батиметрии. Тем не менее выявленная статистически значимая связь подтверждает ключевую роль ветрового воздействия.

Физическая интерпретация кубической зависимости может быть описана следующим образом: в диапазоне слабых ветров (менее 5 м/с) ТПМ определяется инсоля-

цией и теплым речным стоком Лены, что препятствует развитию апвеллинга. При средних скоростях (6–9 м/с) экмановский перенос вызывает интенсивный сгон поверхностных вод и подъем холодных глубинных вод, что дает минимум ТПМ. При дальнейшем усилении ветра (более 9–10 м/с) происходит перемешивание всей водной толщи мелководного шельфа, ТПМ принимает промежуточные значения. Именно эта трехфазная зависимость обуславливает адекватность кубической модели.

Результаты анализа подтверждают, что скорость ветра наряду с его направлением играют критическую роль при формировании апвеллинга. К примеру, В/ЮВ ветры создают классический экмановский апвеллинг, а ветры ЗСЗ/З способствуют апвеллингу между плуями рек Лены и Оленёк, как показано в [6], ветры ЮЮЗ же являются неблагоприятными. Таким образом, скорость ветра является необходимым, но недостаточным условием апвеллинга.

Признаки Харалика в рассматриваемой постановке в большей степени отражают пространственную структуру уже сформировавшейся термической аномалии, чем параметры предшествующего ветрового воздействия. В ранее выполненных исследованиях [15] для изображений, содержащих апвеллинг, была выявлена устойчивая связь признаков Харалика с усредненной ТПМ. Вместе с тем в настоящем исследовании корреляция между скоростью ветра и признаками Харалика оказалась близкой к нулю.

Следует отметить ряд ограничений. Объем выборки ($n = 63$) относительно невелик. Временной лаг зафиксирован на уровне двух суток, тогда как оптимальный лаг может варьироваться. Направление ветра не включено в регрессионную модель в качестве количественного предиктора. Для повышения надежности необходимо расширение выборки за счет данных CMEMS и ERA5 за период 2003–2025 гг. [9, 10], включение направления ветра и оптимизация времен-

ного лага методом кросс-корреляционного анализа.

Заключение

На основании проведенного статистического анализа сформулированы следующие выводы.

1. Кубическая полиномиальная модель (степень 3) наилучшим образом описывает связь между скоростью ветра и ТПМ в зоне апвеллинга: $\text{Adj.R}^2 = 0,3876$, $S_E = 1,34$ °C. Модели степеней 4 и 5 не обеспечивают прироста качества и демонстрируют признаки переобучения.

2. Скорость ветра более 7 м/с в секторах В/ЮВ и ЗСЗ за двое суток до события статистически связана с понижением ТПМ, характерным для прибрежного апвеллинга; три из четырех подтвержденных событий соответствуют данному критерию. Это указывает на принципиальную возможность использования данных о приземном ветре для краткосрочного прогнозирования условий, благоприятных для возникновения прибрежного апвеллинга в исследуемом районе. Вместе с тем фиксированный лаг двое суток следует рассматривать как первое приближение, требующее дальнейшей оптимизации с учетом межгодовой и синоптической изменчивости.

3. Ветер является необходимым, но недостаточным условием развития апвеллинга. Скорость ветра объясняет около 39 % дисперсии ТПМ; оставшаяся часть определяется речным стоком, стратификацией, ледовой обстановкой и другими факторами. Для повышения прогностической способности моделей апвеллинга требуется расширение набора предикторов и уточнение временных лагов между ветровым воздействием и температурным откликом.

Статья выполнена в рамках государственного задания FSFE-2026-0003 Минобрнауки России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stewart R. H. Introduction to Physical Oceanography. Texas A&M University, 2008. Chapter 9: Ekman Transport and Coastal Upwelling.
2. Randelhoff A., Sundfjord A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. Ocean Science. 2018. Vol. 14. P. 293–300. DOI 10.5194/os-14-293-2018.

3. Tuerena R. E. et al. Nutrient pathways and their susceptibility to past and future change in the Eurasian Arctic Ocean. *Ambio*. 2021. DOI 10.1007/s13280-021-01673-0.
4. Arrigo K. R., van Dijken G. L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*. 2015. Vol. 136. P. 60–70. DOI 10.1016/j.pocean.2015.05.002.
5. Lamont T., Barlow R. G., Brewin R. J. W. Long-term trends in phytoplankton chlorophyll-a and size structure in the Benguela Upwelling System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124. No. 2. P. 1170–1195. DOI 10.1029/2018JC014334.
6. Osadchiev A. A., Savin A. Structure and Variability of the Lena and Olenyok Plumes in the Laptev Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2025. DOI 10.3389/fmars.2025.1681563.
7. Osadchiev A. A., Silvestrova K. P., Korotenko K. A. et al. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 5. P. 844. DOI 10.3390/rs12050844.
8. Donlon C., Berruti B., Buongiorno Nardelli B. et al. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 37–57. DOI 10.1016/j.rse.2011.07.024.
9. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. DOI 10.24381/cds.adbb2d47.
10. GHRST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). NASA JPL PO.DAAC. DOI 10.5067/GHGM-4FJ04.
11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.
12. Open-Meteo. Historical Weather API (based on ERA5). URL: <https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api>.
13. NASA Worldview. EOSDIS. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973. Vol. SMC-3. No. 6. P. 610–621. DOI 10.1109/TSMC.1973.4309314.
15. 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). С. 21–30.

REFERENCES

1. Stewart R. H. Introduction to Physical Oceanography. Texas A&M University, 2008. Chapter 9: Ekman Transport and Coastal Upwelling.
2. Randelhoff A., Sundfjord A. (2018). Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. *Ocean Science*. Vol. 14. P. 293–300. DOI 10.5194/os-14-293-2018.
3. Tuerena R. E. et al. (2021). Nutrient pathways and their susceptibility to past and future change in the Eurasian Arctic Ocean. *Ambio*. DOI 10.1007/s13280-021-01673-0.
4. Arrigo K. R., van Dijken G. L. (2015). Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*. Vol. 136. P. 60–70. DOI 10.1016/j.pocean.2015.05.002.
5. Lamont T., Barlow R. G., Brewin R. J. W. (2019). Long-term trends in phytoplankton chlorophyll-a and size structure in the Benguela Upwelling System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 124. No. 2. P. 1170–1195. DOI 10.1029/2018JC014334.
6. Osadchiev A. A., Savin A. (2025). Structure and Variability of the Lena and Olenyok Plumes in the Laptev Sea. *Frontiers in Marine Science*. DOI 10.3389/fmars.2025.1681563.
7. Osadchiev A. A., Silvestrova K. P., Korotenko K. A. et al. (2020). Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas. *Remote Sensing*. Vol. 12, No. 5. P. 844. DOI 10.3390/rs12050844.

8. Donlon C., Berruti B., Buongiorno Nardelli B. et al. (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 120. P. 37–57. DOI 10.1016/j.rse.2011.07.024.
9. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. DOI 10.24381/cds.adbb2d47.
10. GHR SST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). *NASA JPL PO.DAAC*. DOI 10.5067/GHGMR-4FJ04.
11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.
12. Open-Meteo. Historical Weather API (based on ERA5). Retrieved from <https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api>.
13. NASA Worldview. EOSDIS. Retrieved from <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. SMC-3. No. 6. P. 610–621. DOI 10.1109/TSMC.1973.4309314.
15. Lossov K. K., Malinnikov V. A. (2025). Development of a methodology for using Haralick features to detect upwelling zones on the ocean surface based on satellite imagery // *Monitoring. Nauka i tehnologii [Monitoring. Science and Technologies]* 2025. № 4 (66), pp. 21–30 [in Russian].

Об авторах

Константин Константинович Лоссов – аспирант.

Василий Александрович Малинников – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой космического мониторинга и экологии.

Author details

Konstantin K. Lossov – PhD Student.

Vasily A. Malinnikov – DSc, Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology.

Получено / Received 10.06.2026

Поступила после рецензирования / Revised 24.08.2026

Принята к публикации / Accepted 24.09.2026