

Оригинальная статья / Original article

УДК 574.5: 528.8

DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-159-172

Изучение апвеллинга по содержанию хлорофилла *a* в фитопланктоне западного Каспия за 2017 г. по данным дистанционного зондирования

Надира О. Гусейнова, Абдулмеджид А. Багомаев, Лейла Ш. Ахмедова, Башир М. Курамагомедов
Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

Контактное лицо

Надира О. Гусейнова, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и биоразнообразия, Институт экологии и устойчивого развития Дагестанского государственного университета; 367000 Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, 21.

Тел. +79887715041

Email nadira_guseynova@mail.ruORCID <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>

Формат цитирования

Гусейнова Н.О., Багомаев А.А., Ахмедова Л.Ш., Курамагомедов Б.М. Изучение апвеллинга по содержанию хлорофилла *a* в фитопланктоне западного Каспия за 2017 г. по данным дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2021. Т.16, N 4. С. 159-172. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-159-172

Получена 28 июня 2021 г.

Прошла рецензирование 4 сентября 2021 г.

Принята 6 сентября 2021 г.

Резюме

Цель. Изучение апвеллинга на основе пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в западной части Каспия за 2017 по материалам космических съемок.

Материалы и методы. Космоснимки получены из специализированных центров Ocean Color NASA, Earth Science Data Systems NASA и SATIN. Данные дистанционного зондирования обработаны в программах SeaDAS и ArcGIS. Наземные данные получены из фондов Единой государственной системы информации об обстановке в мировом океане (ЕСИМО). Создана база данных в ArcGIS, составлены карты.

Результаты. Первый апвеллинг проявляется 9-17 июня. Минимальная температура воды в районе Махачкалы равна 14°C при повышении солёности до 12‰, площадью 1500 км². Зафиксировано увеличение содержания растворенного кислорода до 9,70 мг/л и pH 8,64. Вначале концентрация хлорофилла *a* более 10 мг/м³, затем снижается до 2,5 мг/м³, но при этом значительно увеличивается площадь распространения хлорофилла с таким показателем. Для прибрежной полосы показатель хлорофилла 5 мг/м³. Второй апвеллинг средней интенсивности был с 19 июня по 1 июля при минимуме t=17,9°C при повышении солёности на 1‰. Площадь поверхности 454 км². Концентрация хлорофилла *a* повысилась с 4 до 8-12 мг/м³, доходя 24 июня до 23 мг/м³. Третий случай апвеллинга зафиксирован с 26 августа по 1 сентября и характеризуется снижением температуры воды на 7,4°C и у берега составила 17,1°C. Среднее повышение солёности на 0,32‰, концентрация O₂ – 8 мг/л, площадь акватории – 500 км². Резкое увеличение площади и концентрации хлорофилла *a* наблюдается к 29 августа. В последующем концентрация хлорофилла на всей акватории равномерно распределено в диапазоне 1-5 мг/м³.

Заключение. Для Каспийского моря характерна пространственная неоднородность океанологических параметров, что можно зафиксировать по результатам обработки космоснимков и их верификации по наземным данным. В западной части апвеллинг носит периодический и разномасштабный характер. Всего на базе возможностей многофакторного геоинформационного моделирования выделены и подтверждены по спутниковым данным 3 апвеллинга.

Ключевые слова

Геоданные, космические снимки, дистанционное зондирование, ГИС, ArcGIS, Каспийское море, апвеллинг, хлорофилл, пигменты, фитопланктон, биопродуктивность.

Upwelling study of chlorophyll *a* content in phytoplankton of the western Caspian in 2017 based on remote sensing data

Nadira O. Guseynova, Abdulmedzhid A. Bagomaev, Leyla Sh. Akhmedova and Bashir M. Kuramagomedov

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

Principal Contact

Nadira O. Guseynova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology and Biodiversity, Institute of Ecology and Sustainable Development, Dagestan State University; 21 Dakhadaev St, Makhachkala, Russia 367000.

Tel. +79887715041

Email nadira_guseynova@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>

How to cite this article

Guseynova N.O., Bagomaev A.A., Akhmedova L.Sh., Kuramagomedov B.M. Upwelling study of chlorophyll *a* content in phytoplankton of the western Caspian in 2017 based on remote sensing data. *South of Russia: ecology, development*. 2021, vol. 16, no. 4, pp. 159-172. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-159-172

Received 28 June 2021

Revised 4 September 2021

Accepted 6 September 2021

Abstract

Aim. Study of upwelling based on spatio-temporal variability of chlorophyll *a* concentration in the western part of the Caspian Sea in 2017 based on space survey images.

Materials and methods. Space images were obtained from the specialized centers of Ocean Color NASA, Earth Science Data Systems NASA and SATIN. Remote sensing data was processed using SeaDAS and ArcGIS programmes. Ground data were obtained from the Unified State System of Information on the Situation in the World Ocean (ESIMO). ESIMO is an inter-agency information system designed to integrate data and services of marine systems of Russia and to provide integrated information support to maritime activities of the Russian Federation. The database was created in ArcGIS and maps compiled accordingly.

Results. The first upwelling occurred on 9-17 June 2017. The minimum water temperature registered in the Makhachkala region was 14°C with an increase in salinity to 12‰, over an area of 1.500 km². There was an increase in the content of dissolved oxygen up to 9.70 mg/l and a pH of 8.64 was recorded. At first, the concentration of chlorophyll *a* was more than 10 mg/m³, then it decreased to 2.5 mg/m³, while at the same time the area of distribution of chlorophyll with this indicator significantly increased. For the coastal strip, the chlorophyll index was 5 mg/m³. The second upwelling of medium intensity was from 19 June to 1 July 1 2017 with a minimum of *t* = 17.9°C with an increase in salinity of 1‰. The surface area was 454 km². The concentration of chlorophyll *a* increased from 4 to 8-12 mg/m³, reaching 23 mg/m³ on 24 June. The third case of upwelling was recorded from 26 August to 1 September 2017 and was characterized by a decrease in water temperature by 7.4°C (near the coast by 17.1°C). The average salinity increase was 0.32‰, while the O₂ concentration was 8 mg/l and the water area 500 km². A sharp increase in the area and concentration of chlorophyll was observed on 29 August 2017. Subsequently, the concentration of chlorophyll throughout the entire water area was evenly distributed in the range of 1-5 mg/m³.

Conclusion. The Caspian Sea is characterized by spatial heterogeneity of oceanological parameters, which can be recorded based on the results of processing satellite images and their verification using ground data. In the western part of the sea, the upwelling is periodic and of different scales. In total, on the basis of the capabilities of multifactor geoinformation modeling, 3 upwellings were identified and confirmed using satellite data.

Key Words

Geodata, satellite imagery, remote sensing, GIS, ArcGIS, Caspian Sea, upwelling, chlorophyll, pigments, phytoplankton, bioproductivity.

ВВЕДЕНИЕ

Важное место в функционировании экосистем моря занимает явление вертикального движения водных масс – апвеллинг и даунвеллинг. Апвеллингом принято считать процесс подъема глубинных масс воды на поверхность водоема, т.е. вертикальное перемещение водных объемов с различными свойствами. Эти свойства могут быть выражены через характеристики: температура, соленость, плотность и т.д. [1].

Научное обоснование механизма возникновения апвеллинга впервые нашло отражение в работах норвежского мореплавателя и исследователя Отто Свердрупа. Данное явление он связывал с дрейфовыми течениями в океане, природа которых объяснена в 1905 г. шведским геофизиком Экманом [2].

Механизм возникновения апвеллинга до сих пор однозначно не установлен. Некоторые исследователи считают, что данных океанологических наблюдений, подтверждающих генерацию апвеллинга ветром, очень мало, но гораздо больше информации, ставящей эту гипотезу под сомнение. Это дало основание предполагать, что основное явление, генерирующее апвеллинг и даунвеллинг – не ветер, а вдольбереговые течения.

О проявлении апвеллинга судят по резкому изменению параметров воды в течение суток: температуры, гидрохимическому составу и биологической продуктивности.

Первый параметр, позволяющий выявить апвеллинг – это температура. При апвеллинге наблюдается опускание тёплых поверхностных вод на глубину с замещением их более холодными глубинными водами. Т.е. для района с апвеллингом характерна значительная отрицательная аномалия температуры в районе его проявления.

Вторым важным параметром апвеллинга выступает химический состав воды. При погружении теплых вод на глубину на поверхность поднимаются богатые биогенными веществами (фосфор и азот) водные массы. Соответственно, меняется и солевой состав водной толщи [2; 3].

Основным видом апвеллинга является прибрежный апвеллинг, при котором на поверхность поднимаются воды в узкой вдольбереговой зоне. Масштабы подъема зависят от параметров ветра, а именно: скорости, продолжительности, разгона и направления. Однако поднявшиеся воды и их влияние на океанографические условия могут распространяться на десятки километров. Кроме того, интенсификация проявления апвеллинга зависит от времени года.

Наконец, третьим признаком, по которому можно идентифицировать апвеллинг, является содержание фитопланктона в воде. Фитопланктон фиксируется видимой и ближней инфракрасной частями электромагнитного излучения с точностью до 5%. Это становится возможным благодаря прекращению процесса фотосинтеза, когда пигмент хлорофилл начинает флуоресцировать.

Зоны апвеллинга отличаются высокой биологической продуктивностью из-за быстрого развития фитопланктона, активно потребляющего биогенные вещества, диоксид углерода и солнечную энергию для процесса фотосинтеза. Массово размножившийся фитопланктон является начальным звеном пищевых цепей, поставляя энергию для

последующих звеньев: для популяций мелких и крупных животных, находящихся выше в пищевой цепи, включая рыб, морских млекопитающих и морских птиц. Благодаря такому взаимодействию районы апвеллинга – самые богатые районы с рыбными ресурсами. Следовательно, высокая биопродуктивность с частицами донных отложений приводит к изменению оптических характеристик воды, что является еще одним индикатором апвеллинга.

Главным продуцентом, синтезирующим органические вещества в водоёмах, является фитопланктон. В клетках фитопланктона содержатся различные пигменты – органические вещества белковой природы, благодаря которым осуществляется фотосинтез – несколько разновидностей хлорофилла, каротиноиды, фикобилины, фикоцианины и т.д.

По современным данным о биохимическом механизме фотосинтеза для его осуществления необходим хлорофилл *a*, другие виды хлорофилла и растительных пигментов поглощают энергию солнечного света, трансформируют и передают её той фотосистеме основных фотосинтетических реакций, в которых участвует хлорофилл *a* [4].

По концентрации хлорофилла *a* в составе морского фитопланктона можно оценить первичную биопродуктивность вод Мирового океана: выявлена закономерная связь между количеством хлорофилла и величиной биопродукции фитопланктона [5; 6].

Целью нашей статьи является изучение апвеллинга на основе пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в западной части Каспия за 2017 по материалам космических съемок.

На распределение фитопланктона в море, следовательно, и хлорофилла, оказывают влияние такие факторы, как освещённость, концентрация биогенных элементов, плотностная стратификация и т.д. Интенсивность фотосинтетических процессов связана с рядом условий, определяющих проникновение световых лучей через толщу воды, облачности, прозрачности воздуха, угла падения солнечных лучей на поверхность воды, прозрачности воды и т.д. В море основная роль в обогащении биогенными веществами принадлежит глубинным водам, поднимающимся в верхние слои при вертикальной конвекции водных масс и апвеллинга [7]. В водах с сезонными колебаниями температуры временно возникающая стратификация в период активного прогрева вод оказывает положительное влияние на размножение фитопланктона и биопродуктивность фотосинтеза [8].

Физические основы космической съёмки параметров морей
Первые космические снимки океана начали получать в 1970 г. с помощью специальных спутников Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA).

К началу 1980-х г. на фоне успехов космических методов слежения за состоянием окружающей среды выделилось новое научное направление – дистанционное зондирование океана. Космическая съёмка позволяет выполнять исследования процессов, происходящих как в океанах, так и процессов, возникающих во взаимодействии с другими геосферами [9; 10].

Съемочные сенсоры, которыми оснащены спутники, предназначены для съемки объектов в различных диапазонах электромагнитного излучения. При изучении гидрофизических и гидробиологических параметров воды особо информативен инфракрасный диапазон. Посредством определения содержания в воде фитопланктона, можно рассчитать характеристики биомассы фитопланктона и первичной продукции океанов. Для этого используют голубой (0,44 мкм) и красный (0,675 мкм) каналы спектра, которые поглощаются хлорофиллом.

Различные участки инфракрасного диапазона позволяют фиксировать такие параметры воды, как температура, скорость и направление течения, структура водной поверхности. В микроволновом диапазоне определяются параметры солёности, температуры поверхности и т.д. Кроме того, инфракрасный канал хорошо подходит при разграничении линии вода-суша за счет поглощения водой этой части электромагнитного спектра [9; 11].

Обзор современных съёмочных систем

Существует большое количество спутников, оснащенных сенсорами для фиксации различных диапазонов электромагнитного излучения.

Из функционирующих съёмочных систем специального назначения чаще всего используется гиперспектральный радиометр MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). Он установлен на спутниках серии Terra и Aqua и производит съемку в 36-ти каналах с пространственным разрешением 250-1000 м (диапазон съемки от 0,45 до 14,36 мкм). Получаемые снимки с помощью этой системы в тепловой инфракрасной зоне дают возможность определять температуру водной поверхности с точностью до 0,5°C при пространственном разрешении 1000 м [12].

Другой специальный спутник для океанических исследований – Envisat (Environmental Satellite), на котором установлен датчик MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), фиксирующий оптический диапазон. Основная цель спектрометра – изучать цвет океана, например, для того, чтобы дать оценку концентрации хлорофилла и твёрдых частиц. Спектрометр предназначен для получения изображений со средним спектральным разрешением в 15 каналах. Также спутник Envisat был оснащен усовершенствованным сканирующим радиометром AATSR, предназначенный главным образом для измерения температуры поверхности моря (SST). Данные AATSR имеют разрешение 1 км и получены из измерений отраженного и испущенного излучения, проведенного на следующих длинах волн: 0,55 мкм, 0,66 мкм, 0,87 мкм, 1,6 мкм, 3,7 мкм, 11 мкм и 12 мкм.

Для изучения глобальных процессов широко применяются спутники серии NOAA – NOAA-18 и NOAA-19. На них установлена сканирующая система – радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Он производит съемку в узком диапазоне (6 каналов VIS, NIR, IR) и позволяет проводить мониторинг, как морей, так и облаков, подстилающей поверхности, в том числе детектировать пожары, мощные кучево-дождевые облака, границы снежного покрова, а также определять температуру верхней границы облачности [3; 10; 13; 14].

Для крупномасштабных исследований с малым охватом территорий используются большое количество

спутников ресурсного типа как Landsat, Santinel и т.д. Эти спутники производят съемку высокого пространственного разрешения и оснащены датчиками оптического диапазона, в частности, тепловым каналом [15].

Анализ работ по изучению температуры водной поверхности и других индикаторов апвеллинга показывает разнообразие применяемых методов обработки данных космической съемки.

Применяя сочетания методов оптической и радиолокационной съемок, выполненных летом 2006 г., исследуются параметры апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в работе [16]. Результаты работ показывают корреляционную связь прибрежного апвеллинга и выносов рек через сигнатуру на радиолокационных снимках, тепловых и оптических снимках моря в зонах вихрей, грибовидных структур.

Вопросу изучения апвеллинга в Каспийском море также посвящено много работ. В работах [15; 17] рассматривается использование космических снимков в геоинформационной среде для изучения апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия. Результаты этих работы позволили выявить на основе снимков с датчика MODIS и подспутниковых гидрометеорологических наблюдений масштабы и периоды проявления апвеллингов.

Многостороннему изучению апвеллинга Каспийского региона посвящен ряд работ Института космических исследований РАН. В работе Гинзбурга А.И. и др. [18] изучается структура апвеллинга по снимкам в инфракрасном канале со спутников NOAA-15, 16, 17 (пространственное разрешение – примерно 1 км, разрешение по температуре – около 0,1°C) для мая-сентября 2002 и 2003 гг., данные о скорости и направлении ветра в Махачкале использованы для получения картины ветроуправляемого апвеллинга и его характерных особенностей в ряде пунктов вдоль западного побережья Среднего Каспия.

Общая физико-географическая характеристика западной части Среднего Каспия

Каспийское море представляет собой замкнутый водоем протяженностью с севера на юг более 1000 км. В наиболее широкой части достигает 435 км, наименьшая ширина – 196 км. Водосборный бассейн составляет площадь 1380 тыс. км².

Каспийское море по своим характеристикам делится на 3 условных сектора: Северный, Средний и Южный [19].

Средний Каспий – это обособленная котловина, максимальная глубина которого достигает 788 м в Дербентской котловине. Западный берег Каспия имеет равномерный характер.

В целом Каспий располагается в нескольких климатических районах: северная часть – континентальная зона, западная часть – умеренно теплая зона, юго-запад – субтропическая влажная и восток – пустынная. Этим объясняются сезонные особенности синоптических процессов и погоды в Каспии. Атмосферная циркуляция определяется барическими центрами: зимой отрогом азиатского максимума, а в весенне-летний период – гребнем азорского максимума.

Для акватории Каспия характерен избыток тепла и высокий радиационный баланс – в среднем 60 ккал/см². Это приводит к интенсивному испарению и

теплообмену с атмосферой. Радиационный баланс достигает максимума в июне-июле ($11-12 \text{ ккал/см}^2$), а минимального значения ($1-2 \text{ ккал/см}^2$) в декабре.

Орографические условия, в которых располагается Каспийское море, способствует воздействию различных воздушных масс. Из полярных областей вторгаются холодные массы, а со стороны Северной Атлантики – влажные массы, Сибири – сухие континентальные. Также акватория подвержена субтропическим массам с юго-запада (Средиземноморье).

Ветровой режим разных частей Каспия существенно различается. На Среднем Каспии господствуют ветры северо-западного и юго-восточных направлений со среднегодовой скоростью от 2 до 5 м/с [19; 20].

Над открытым морем преобладают ветры со скоростями до 10 м/с (65-80%), тогда как повторяемость штормовых ветров составляет 1,0-1,5%. Наибольшая повторяемость штормовых ветров наблюдается в направлении с северо-востока на юго-запад, создавая циркулирующие течения.

Крайне неравномерно распределены по акватории моря осадки, что объясняется особенностями орографии, которая определяет направление и интенсивность воздушного потока, и, как следствие, уровнем конденсации паров, что зависит от температуры воздуха и дефицита влажности [20].

Температура воды хорошо выражена в зимний период, когда в Северной части температура может достигать 0°C , а на юге – более 10°C . Летом поверхностный слой воды нагревается до $28-32^\circ\text{C}$ и в этот период наблюдается проявление апвеллинга. Начало апвеллинга приходится на июнь, однако наибольшей интенсивности он достигает в июле-августе. Как следствие, на поверхности воды наблюдается понижение температуры ($7-15^\circ\text{C}$).

Солевой состав вод Каспия зависит от материкового стока, испарения и т.д. В зоне влияния материкового стока воды содержат преимущественно карбонаты и сульфаты кальция, которые являются основными компонентами в химическом составе речных вод. Резко меняется солёность северной части от 0,1‰ в устьевых областях Волги и Урала до 10-11‰ на границе со Средним Каспием. В открытых районах моря солёность не превышает 15‰ [20].

Для моря важное значение имеют течения, имеющие сложную структуру. Формируют их, главным образом, ветры, плотность, особенности береговая линия и рельеф дна. Течения имеют скорость 15-30 см/с. Вдоль западных берегов Среднего и Южного Каспия в слое от поверхности до дна доминируют течения южного направления [19; 21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во второй половине XX в. стали широко использовать зондирующую аппаратуру, позволяющую регистрировать флуоресценцию хлорофилла *a* для получения картины распределения фитопланктона в водной толще и детального анализа слоёв его максимального скопления [22-24].

В силу своей доступности, оперативности, достаточно подробному пространственно-временному разрешению спутниковая информация может существенно

дополнять данные, полученные традиционными контактными методами [8].

Источники данных и методика исследования апвеллинга

Поиск и подбор данных производился из достоверных источников, таких как государственные информационные ресурсы или международные источники данных. Материалами для работы послужили космические снимки с метеорологических и океанологических спутников за летний сезон 2017 г., а также данные наземных гидрологических измерений. Работа основывается на стандартных методах и методиках, изложенных в работах зарубежных и отечественных исследователей.

Методика выявления апвеллинга основывалась на аналогичных исследованиях, изложенных в нижеприведенных работах [15-18]. Для обнаружения явления в первую очередь использовались температурные показатели при резком понижении среднесуточной температуры более чем на 2°C . Подтверждался этот факт по космическим снимкам и наземным данным.

Классификация апвеллинга производилась по критериям продолжительности, интенсивности и масштабу. При продолжительности он делится на короткий (менее 3-х суток), нормальный (4-6 суток) и длительный (более 7). Интенсивность определялась по разности температурных показателей в последние сутки до его появления и минимальной температурой во время самого апвеллинга. В случае фиксации разности менее 3°C апвеллинг считается слабым, $3-5^\circ\text{C}$ – средним, более 5°C – сильным.

Если при фиксировании падения температуры в одном пункте наблюдения апвеллинг считается локальным, одновременно в 2-х пунктах – субрегиональным и в 3-х и более пунктах – региональным.

Материалы наземных гидрометеорологических наблюдений

Наземные данные получены в ходе гидрометеорологических наблюдений на постах в прибрежной зоне, а в открытом море данные измерены на судах. Эти данные сосредоточены в государственном информационном фонде – Единой государственной системе информации об обстановке в мировом океане (ЕСИМО).

Поиск возможен в следующих тематических разделах: температура воды; температура воздуха; солёность; скорость ветра; высота волн; уровень моря и содержание кислорода. Эти данные разделены для прибрежной зоны и открытого моря в виде статистики и трендов.

Из массива данных произведен поиск показателей для Среднего Каспия с 2010 по 2018 г и выгружен в формате *.csv. На их основе была создана автономная база пространственных данных в среде ArcGIS. В качестве ключевого поля установлен идентификатор станций, по которому производилась нормализация с тематическими данными: среднесуточная температура и солёность (на станциях наблюдения Махачкала, Избербаш и Дербент), сведения об уровне моря (на станциях Махачкала и Тюлений).

Станции наблюдений на дагестанском побережье приведены на рисунке 1 [17].



Рисунок 1. Станции наблюдения на Дагестанском побережье (Россия) [17]

Figure 1. Observation stations on the Dagestan coast (Russia) [17]

База геопространственных данных организована с возможностью расширения путем добавления новых данных, например, гидрохимических параметров (pH, содержание растворенного кислорода и биогенных элементов).

Данные дистанционного зондирования

Космические снимки получены из специализированных центров Ocean Color NASA (данные съемочных систем MODIS), Earth Science Data Systems (ESDS) NASA и SATIN [10; 25; 26]. Эти данные организованы по-разному, отражая различные пространственные, временные и параметрические группировки. В общем случае эти службы производят сбор, обработку, калибровку, проверку, архивацию и распространение продуктов, связанных с океаном, из большого числа оперативных спутниковых миссий дистанционного зондирования, которые предоставляют данные о цвете океана, температуре и солености поверхности моря для международных исследований с 1996 года.

В каталоге Ocean Color NASA представлены несколько вариантов данных разных уровней обработки. В разделе уровень 0 (Level 0) содержатся необработанные данные, полученные непосредственно с сенсора MODIS. Работа с этими данными достаточно трудоемкая.

Данные уровня 1A (Level 1A) проходят некоторую предварительную обработку, например, привязываются ко времени и снабжаются аннотацией с вспомогательной информацией, включая радиометрические и калибровочные коэффициенты, параметры географической привязки (например, данные эфемерид платформы). Именно этот факт делает уровень 1A предпочтительным уровнем архивных данных. Прошедшие радиометрическую коррекцию снимки относятся к уровню 1B (Level 1B).

Второй уровень данных (Level 2) составляют продукты, полученные из данных предыдущего уровня. Как правило, это геофизические переменные с тем же разрешением, что и исходные данные уровня 1. Эти переменные сгруппированы в несколько наборов продуктов (например, цвет океана или температура).

Данные уровня 3 – это производные геофизические переменные, которые были агрегированы на четко определенную пространственную сетку в течение определенного периода времени (например, ежедневно, 8 дней, ежемесячно и т.д.).

Данные уровня 4 представляют собой выходные данные модели или результаты анализа данных более низкого уровня (например, переменных, полученных из нескольких измерений).

Были отобраны данные 2 и 3 уровней, полученные с помощью спутников Terra и Aqua в интервале с 10.30 до 14.00 (MSK). Поиск производился на летний период с учетом облачности. Было отобрано более 200 сцен, пригодных для дальнейшей работы [14].

Технология обработки данных дистанционного зондирования

Обработка данных заключалась в геометрической коррекции и синтезе каналов в программе SeaDAS. Данная программа разработана для целей дешифрирования снимков при океанологических исследованиях. Заложенные в программу алгоритмы позволяют идентифицировать продукты MODIS и подбирать для них параметры коррекции.

Для получения тепловых полей использовались каналы в инфракрасном диапазоне с пространственным разрешением в 1 км и точностью температуры 0,3-0,5°C.

Расширение файлов для продуктов уровня обработки 2 также воспроизводится и визуализируется пакетом SeaDAS. Для этих продуктов производился расчет минимальных и максимальных показателей, исходя из чего подбирается тип шкалы в легенде. Для данных концентрации хлорофилла *a* оптимальным оказалась шкала логарифмического типа с шагом 10 мг/м^3 . Для определения количества взвеси в воде и характера распределения производилась обработка слоя – коэффициент диффузного ослабления для длины волны 490 нм (K_d_{490}), что характеризует степень прозрачности морской воды. Для этого использовались красный, ближний инфракрасный и синий каналы MODIS.

Создание тематического геоинформационного проекта
Обработанные космические снимки и файлы с геофизическими параметрами имеют пространственную привязку в проекции WGS-84, что позволяет их легко адаптировать в ранее созданную базу геопространственных данных.

В базу геоданных внесено 95 изображений с температурными полями.

По внесенным в базу геоданным наземных наблюдений производилось создание серий интерполяционных карт, по которым производится верификация спутниковых данных, что показало незначительное отклонение показателей, полученных наземным и спутниковыми методами.

ГИС-проект имеет в своей структуре 3 блока.

В первый блок включены базовые пространственные слои, куда входят наборы векторной батиметрической карты Каспийского моря и космический снимок высокого пространственного разрешения. Также предусмотрена возможность подключения посредством WMS-подключения базовых слоев глобального охвата, предоставляемых ArcGIS Online.

Второй блок состоит из слоев наземных наблюдений. Данные организованы в атрибутивных таблицах с возможностью пространственного анализа и моделирования. По этим данным создается растровые привязанные карты измеренных величин методом кригинга.

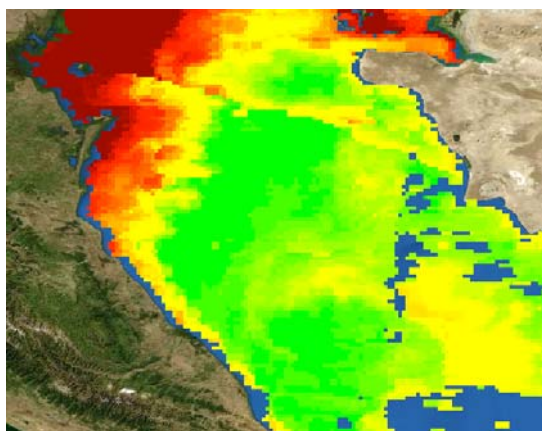
Следующий блок данных – тематические данные, полученные со спутника и обработанные в программе SeaDAS. Они имеют ту же пространственную привязку, что и предыдущие слои и могут быть интегрированы в базу данных. По этим данным в последующем производились картометрические работы по определению характеристик апвеллинга (площадей, интенсивности и т.д.).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

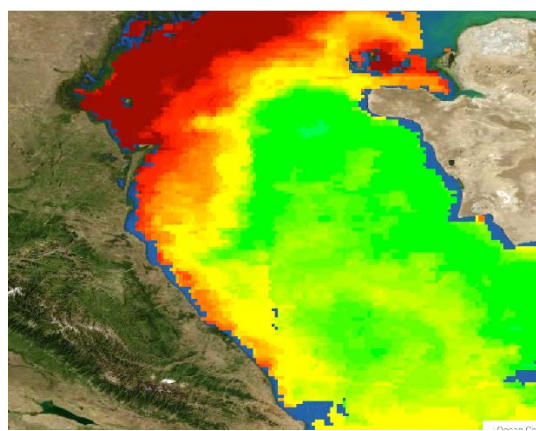
*Оценка содержания хлорофилла *a* по спутниковым данным*
Признаком, по которому можно идентифицировать апвеллинг, является содержание в воде фитопланктона. Фитопланктон фиксируется видимой и ближней инфракрасной частями электромагнитного излучения с точностью до 5%. Это становится возможным благодаря прекращению процесса фотосинтеза, когда пигмент хлорофилл начинает флюоресцировать.

К началу летнего сезона в целом для Северного Каспия концентрация хлорофилла *a* находится на уровне более 10 мг/м^3 и такой показатель сохраняется в водной массе до станции Лопатина. По состоянию на 1 июня в Среднем Каспии содержание хлорофилла составляет $4-5 \text{ мг/м}^3$. Водные массы с такими показателями тянутся узкой полосой вдоль дагестанского побережья на юг. К 8 июня концентрация хлорофилла снижается до среднего показателя $2,5 \text{ мг/м}^3$, но при этом значительно увеличивается площадь распространения хлорофилла с таким показателем. Такое состояние сохраняется до 13 июня, после чего падает концентрация хлорофилла и уменьшается площадь с такими данными. При этом для прибрежной полосы показатель хлорофилла в этот период держится на уровне до 5 мг/м^3 (рис. 2).

До 25 июня концентрация хлорофилла *a* держится на уровне $1-2 \text{ мг/м}^3$, после чего резко возрастает до 6 мг/м^3 , постепенно увеличивая площадь содержания. На расстоянии около 80 км от дагестанского побережья в направлении с запада на восток концентрация снижается до 1 мг/м^3 . К 30 числу этот показатель достигает значения $1,5-2 \text{ мг/м}^3$ почти для всей акватории Среднего Каспия (рис. 3).



a)



b)

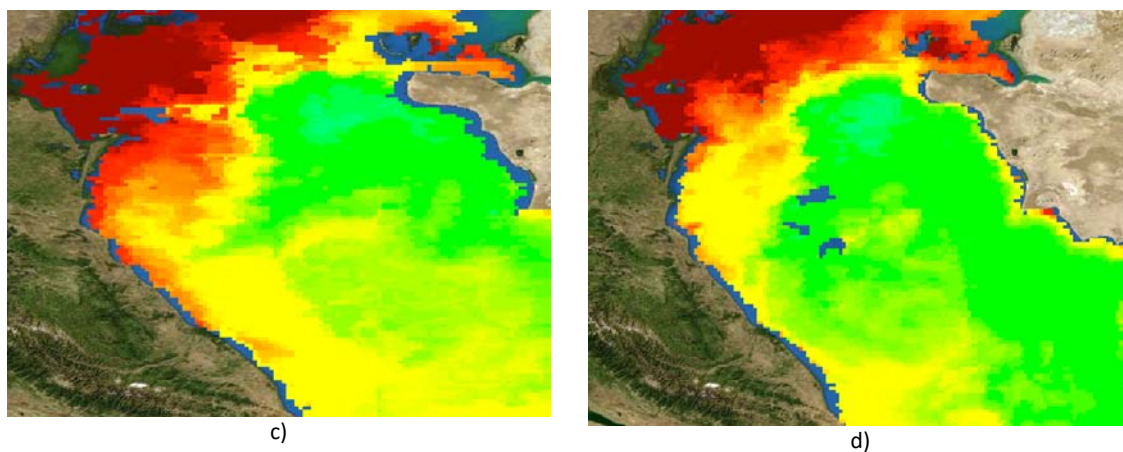


Рисунок 1. Фрагменты карт концентрации хлорофилла *a*: а – 01 июня; б – 08 июня; с – 12 июня; д – 17 июня
Figure 2. Sections of maps of chlorophyll *a* concentration: а – 01 June; б – 08 June; с – 12 June; д – 17 June 2017

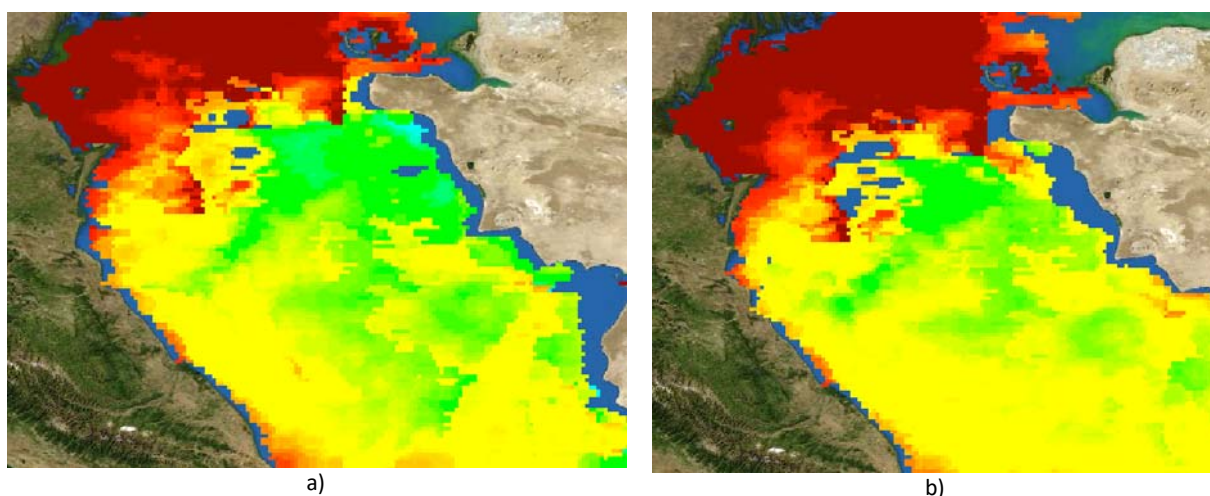
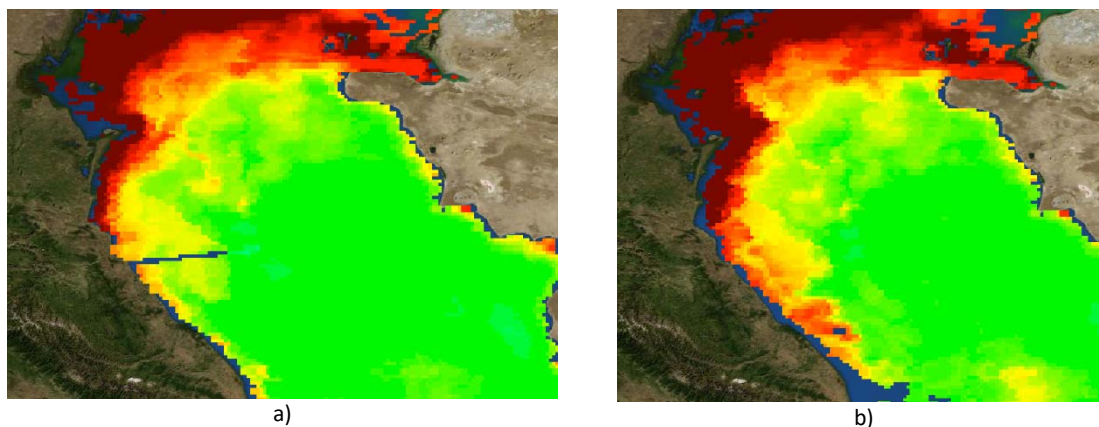


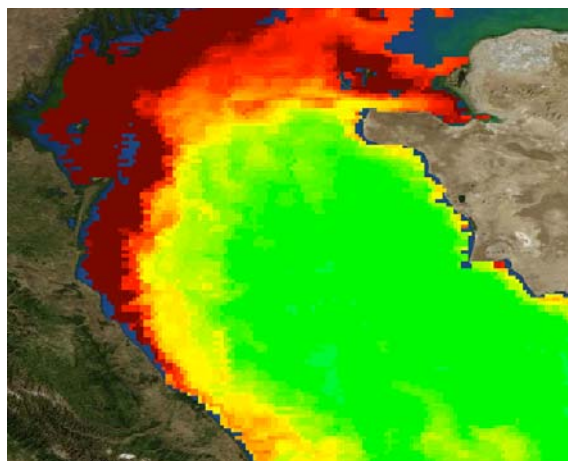
Рисунок 3. Фрагменты карт концентрации хлорофилла *a*: а – 28 июня; б – 30 июня
Figure 3. Sections of maps of chlorophyll *a* concentration: а – 28 June 28; б – 30 June 2017

Начиная с 7 июля, содержание хлорофилла повышается до $7-8 \text{ мг/м}^3$ к северу от Махачкалы, а к югу достигает 2 мг/м^3 в районе устья реки Самур. К 13 июня концентрация хлорофилла значительно снижается. 16 июня этот показатель достигает 10 мг/м^3 в пятнадцатикилометровой полосе к северу от Махачкалы. В то же время, к югу от Махачкалы показатель хлорофилла держится на уровне $3-5 \text{ мг/м}^3$. Такая картина сохраняется до 20 июля, а 21 июля заметно увеличивается площадь с показателем 5 мг/м^3 ,

что продолжается до 29-30 июля. Зоне к северу от Избербаша в этот период характерна концентрация более 10 мг/м^3 (рис. 4).

Такое пространственное распределение хлорофилла наблюдается до 1 августа, после которого его концентрация начинает снижаться. В прибрежной тридцатикилометровой полосе до устья Самур спутники зафиксировали показатель содержания хлорофилла более 10 мг/м^3 (рис. 5).

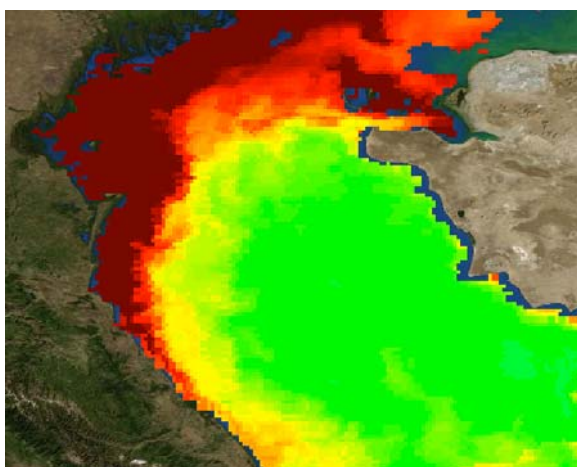




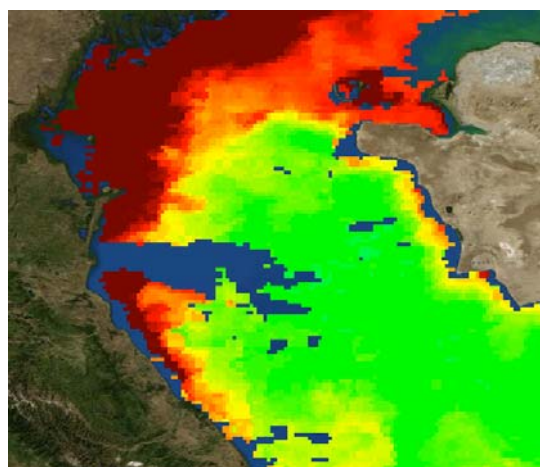
с)

Рисунок 4. Фрагменты карт концентрации хлорофилла а: а – 19 июля; б – 21 июля; с – 29 июля

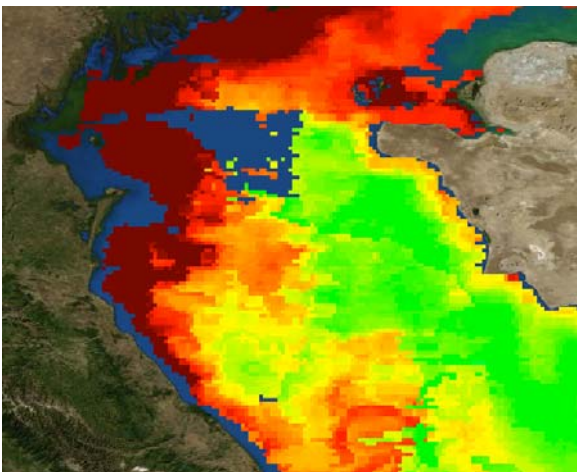
Figure 4. Sections of maps of chlorophyll *a* concentration: а – 19 July; б – 21 July; с – 29 July 2017



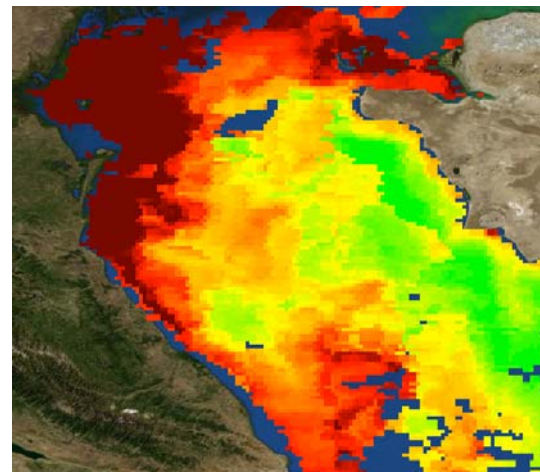
а)



б)



с)



д)

Рисунок 5. Фрагменты карт концентрации хлорофилла а: а – 01 августа; б – 11 августа; с – 13 августа; д – 16 августа

Figure 5. Sections of maps of chlorophyll *a* concentration: а – 01 August 01; б – 11 August; с – 13 August; д – 16 August 2017

В последующем наблюдается увеличение площади с концентрацией больше $4,5-5 \text{ мг/м}^3$, достигая максимума к 16 августа. Уменьшение площади начинается с 20 августа, при этом в прибрежной полосе сохраняется концентрация на уровне $7-8 \text{ мг/м}^3$. Следующее резкое увеличение площади и концентрации наблюдается к 29 августа (рис. 6). В последующие дни и в течение осеннего сезона

концентрации хлорофилла на всей акватории Среднего Каспия равномерно распределено в поверхностном слое в диапазоне $1-5 \text{ мг/м}^3$.

Флюоресценция фитопланктона заметна на снимках оптического диапазона, но из-за облачности или дымки их использование затруднено (рис. 7). Яркое свечение свидетельствует о завершении фотосинтеза и гибели фитопланктона.

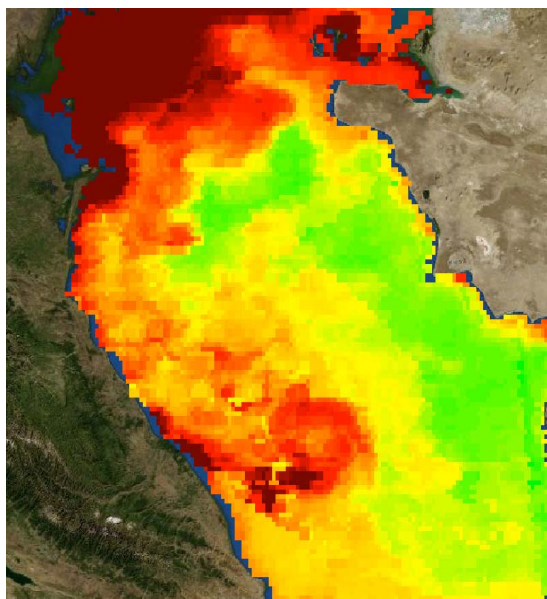


Рисунок 6. Фрагменты карт концентрации хлорофилла *a* 29 августа

Figure 6. Section of map of chlorophyll *a* concentration on 29 August 2017



Рисунок 7. Снимок с флуоресценцией фитопланктона 3 августа

Figure 7. Image with phytoplankton fluorescence on 3 August 2017

Анализ и оценка интенсивности проявления апвеллинга с помощью ГИС-проекта

Выявление сроков, размеров и интенсивности апвеллингов за исследуемый период производится с привлечением в дополнение к ранее обработанным космическим снимкам данных наземных наблюдений, сведенных в базу геоданных. По этим данным в исследуемый период в западной части Среднего Каспия подъем холодных и обогащенных биогенными элементами глубинных вод наблюдался 3 раза.

Первый случай апвеллинга проявляется 9-17 июня. В это время температура зафиксированная минимальная температура в районе Махачкалы составляет 14°C, при повышении солёности до 12‰ (рис. 8).

По космическим снимкам замечено, что этот апвеллинг начался в районе Лопатина, на три дня раньше, чем на станции Махачкала и впоследствии (09 июня) охватил площадь 1500 км². Здесь апвеллинг сохранялся вплоть до 16 июня. По интенсивности он относится к категории сильный, а по продолжительности – длительный. Так как более слабый апвеллинг был замечен в этот же период (12 июня) у станции Дербент с минимальной температурой 18°C, то можно утверждать, что явление имеет региональный масштаб. Также в поверхностном слое этой массы воды зафиксировано постепенное увеличение содержания растворенного кислорода и величины pH. Максимальные значения этих показателей составляет 9,70 мг/л – растворенного

кислорода и $pH=8,64$. Также зафиксировано повышение содержания хлорофилла и взвеси (рис. 9).

Следующий апвеллинг, наблюдавшийся с 19 июня по 1 июля, был средней интенсивности, но отличался продолжительностью. Минимум среднесуточной температуры за это время составил $17,9^{\circ}C$. Падение температуры в начале апвеллинга составило $2,8^{\circ}C$ при повышении солёности на 1‰ (рис. 9).

Площадь поверхности с данными показателями составила 253 км^2 , а 26 числа достигла максимума – 454 км^2 . По охвату акватории этот апвеллинг относится к субрегиональному. Гидрохимические показатели также изменились. 20 июня было зафиксировано высокое содержание растворенного кислорода. Концентрация хлорофилла a повысилась с 4 до $8\text{--}12\text{ мг/м}^3$, доходя 24 июня до значения 23 мг/м^3 (рис. 10).

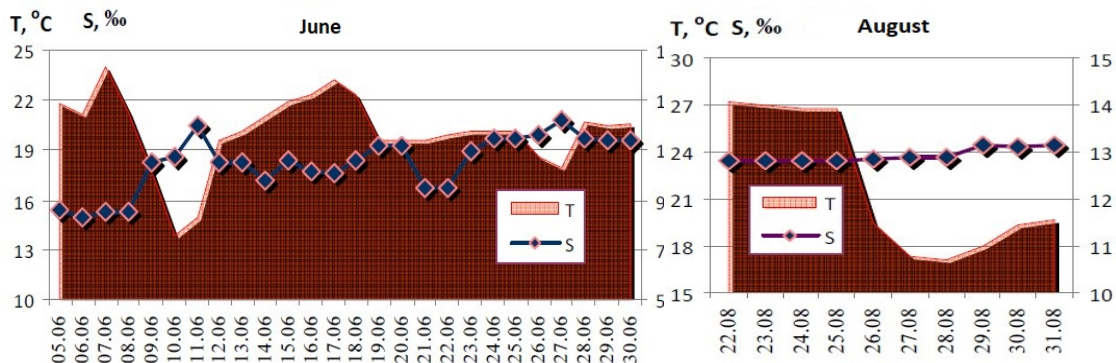


Рисунок 8. График среднесуточных значений солёности и температуры в районе станции Махачкала (по данным Росгидромета)

Figure 8. Diagram of daily average salinity and temperature values in the area of the Makhachkala station (according to Roshydromet data)

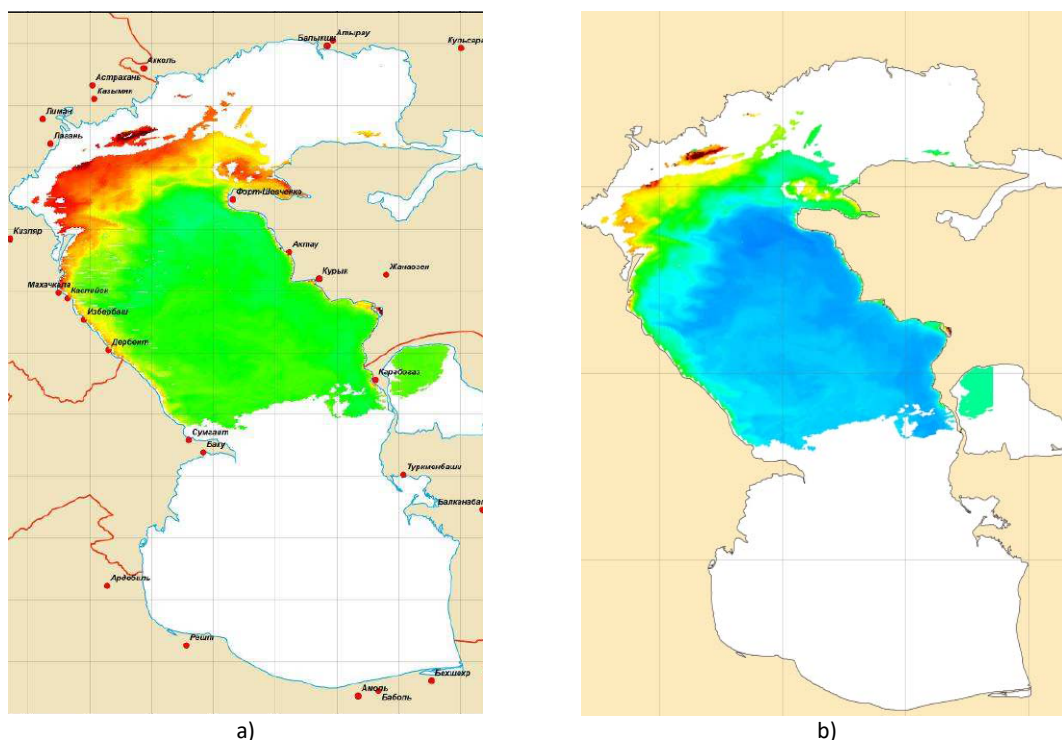


Рисунок 9. Карты концентрации хлорофилла a (a) и взвеси (b) (12 июня)

Figure 9. Maps of the concentration of chlorophyll a (a) and suspended matter (b) (12 June 2017)

Третий случай апвеллинга в исследуемой области зафиксирован в конце августа (26 августа). Этот апвеллинг характеризуется снижением температуры на $7,4^{\circ}C$, что у берега составила $17,1^{\circ}C$ (рис. 10). Апвеллинг длился до 1 сентября. Данный апвеллинг является сильным и длительным.

Для данного апвеллинга не характерен сильный скачок солёности (на $0,32\text{‰}$), как в предыдущих

случаях. Площадь акватории, на котором проявился апвеллинг, составила около 500 км^2 .

Гидрохимическое состояние воды отличается ростом содержания растворенного кислорода и величины pH накануне апвеллинга. Растворенный кислород достиг максимума в 8 мг/л к 26 августа.

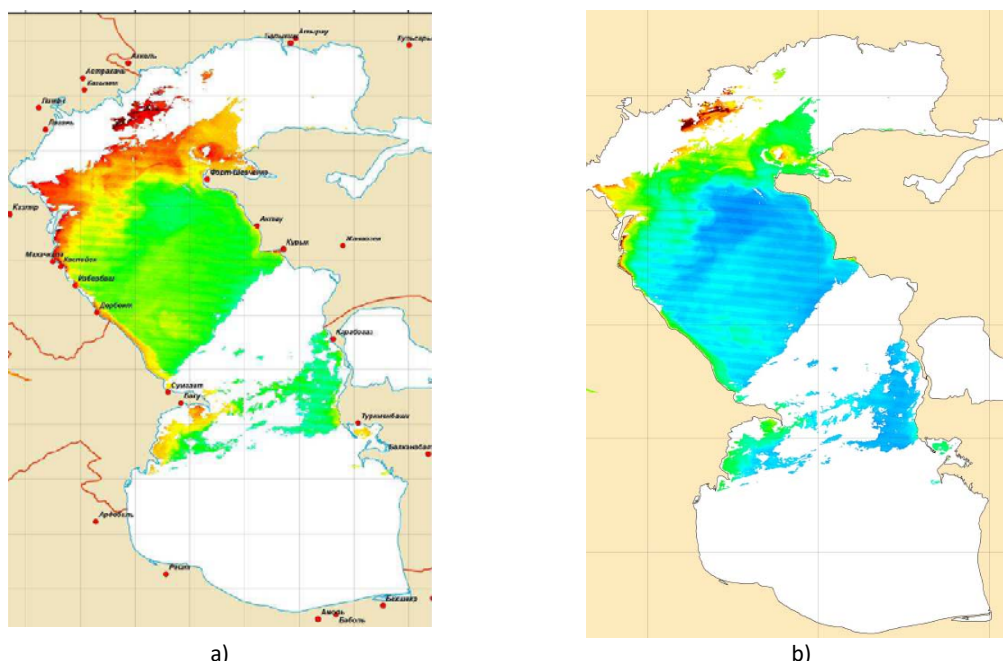


Рисунок 10. Карты концентрации хлорофилла *a* (а) и взвеси (б) (24 июня)

Figure 10. Maps of the concentration of chlorophyll *a* (a) and suspended matter (b) (24 June 2017)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апвеллинг оказывает существенное влияние на пространственное распределение и структуру морских экосистем, что выявляется посредством многофакторного анализа гидрофизических и гидрохимических показателей на основе геоинформационного подхода. Анализ литературы по данному направлению показал повсеместное использование космических снимков, а также возможности и ограничения их применения в исследовании апвеллинга.

Работа по подбору материалов космосъемок показала существование большое количества спутниковых систем, пригодных для проведения подобных работ. Это обуславливает необходимость разработки алгоритмов интеграции данных с этих спутников. Для выявления самих гидрофизических показателей и концентрации хлорофилла *a* эффективными оказались способы алгебры изображений, что позволило выявить многие параметры, недоступные для прямого визуального дешифрирования.

Для Каспийского моря, ввиду его больших размеров, характерна пространственная неоднородность океанологических параметров. Это можно проследить по результатам обработки космических снимков и их верификации по наземным данным. В то время как для Восточной части Среднего Каспия апвеллинг за изучаемый сезон являлся устойчивым явлением, сохраняя аномальные температуры весь период, то в западной части он носит периодический и разномасштабный характер. Всего по наземным данным выделено и подтвержден по спутниковым данным 3 апвеллинга [27].

Значительные трудности составили пропуски в данных как на космических снимках, обусловленные облачностью, так и на наземных станциях наблюдений.

В целом проделанная работа не подтвердила именно дрейфовую природу апвеллинга на западном

Каспии, что говорит о необходимости проведения долговременного изучения материалов космической съемки и наземных наблюдений. Выполнение такой работы возможно на базе возможностей многофакторного геоинформационного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Океанографическая энциклопедия, 1974, С. 20-22.
URL: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html> (Дата обращения: 13.02.2021)
2. Жуков Л.А. Общая океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 376 с.
3. Gaines S., Airame S. Upwelling. URL: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/02quest/background/upwelling/upwelling.html> (дата обращения: 01.03.2021)
4. Рабинович Ю., Говинджи К. Роль хлорофилла в фотосинтезе. Молекулы и клетки. Москва: Мир, 1967. С. 72-83.
5. Карл Г. Предсказания продукции фитопланктона по показаниям среды обитания // Материалы II Международного океанографического конгресса, Москва: Наука, 1966. С. 188-189.
6. Steemann N.E. Marine Photosynthesis with Special Emphasis on the Ecological Aspects. Amsterdam, New York, Elsevier Scientific Pub., Co., 1975, 141 p.
7. Семина Г.И. Вертикальное распределение жизни в океане. Пелагиаль. Фитопланктон // Биология океана. Т. 1. Биологическая структура океана. М.: Наука. 1977. С. 117-124.
8. Мордасова Н. В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Труды ВНИРО. Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. 2014. Т. 152. С. 41-54
9. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С. А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. Москва: ИКИ РАН, 2011. 480 с.

10. Ocean Color Data. URL: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directaccess> (дата обращения: 12.01.2021)
11. Костяной А.Г. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. Часть 2 // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 63-85.
12. Кравцова В.И., Тутубалина О.В., Балдина Е.А. Гиперспектральная система MODIS: обзор областей применения // Межуниверситетский аэрокосмический центр при Географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. URL: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acentr/int_sem4/modis_appl.htm (дата обращения: 24.01.2021)
13. Earth Science Data Systems (ESDS) Program. URL: <https://earthdata.nasa.gov/esds> (Дата обращения: 23.03.2021)
14. JPL MUR MEaSUREs Project. 2015. GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, USA. URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOBv4.1> (дата обращения: 09.01.2021) DOI: 10.5067/GHGM-4FJ04
15. Курамагомедов Б.М., Монахова Г.А., Гаджиев А.А., Ахмедова Г.А. Опыт использования геоинформационных технологий в исследованиях апвеллинга в Каспийском море // Юг России: экология, развитие. 2014. Т. 9. N 4. С. DOI: 10.18470/1992-1098-2014-4-121-125
16. Гурова Е.С., Иванов А.Ю. Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2011. N 4. С. 41-54.
17. Монахова Г.А., Курамагомедов Б.М., Расулова М.М., Бекшокова П.А. Геоинформационные системы в изучении особенностей апвеллинга у западного побережья среднего Каспия // Юг России: экология, развитие. 2012. Т. 7. N 3. С. 116-119. DOI: 10.18470/1992-1098-2012-3-116-119
18. Гинзбург А. И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Шерemet Н.А. Структура апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия (по спутниковым наблюдениям) // Исследование Земли из космоса. 2005. N 4. С. 76-85.
19. Нестеров Е.С. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. Москва: Трида лтд, 2016. 378 с.
20. Электронный атлас Каспийского моря. Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015. URL: <http://www.geogr.msu.ru/casp/> (дата обращения: 21.01.2021)
21. Электронный справочник по природной среде Каспия / Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: http://www.esimo.ru/atlas/new/Kasp/1_1.html (дата обращения: 24.01.2021)
22. Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Географический вестник. 2016. Т. 38. N 3. С. 160-168. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168
23. Цхай Ж.Р., Хен Г.В. Оценка общего содержания хлорофилла *a* в Охотском море с использованием спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2020. N 6. С. 34-46. DOI: 10.31857/S0205961420060056
24. Suslin V.V., Churilova T.Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480-560 nm bands from ocean colour scanners. International Journal of Remote Sensing, 2016, vol. 37, no. 18, pp. 4380-4400. DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350
25. SATIN: каталог данных / Лаборатория спутниковой океанографии РГГМУ. URL: <http://satin.rshu.ru/> (дата обращения: 14.03.2021)
26. Worldview Earth Data NASA. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 11.01.2021)
27. Багомаев А.А., Гусейнова Н.О. Выявление температурных аномалий на западном Каспии за 2017 г. по данным дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. N 4. С. 63-74. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-4-63-74

REFERENCES

1. *Okeanograficheskaya entsiklopediya* [Oceanographic encyclopedia]. 1974, pp. 20-22. Available at: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html> (accessed 13.02.2021) (In Russian)
2. Zhukov L.A. *Obshchaya okeanologiya* [General Oceanology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 376 p. (In Russian)
3. Gaines S., Airame S. Upwelling. Available at: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/02quest/bac kground/upwelling/upwelling.html> (accessed 01.03.2021)
4. Rabinovich Yu., Govindzhi K. *Rol' khlorofilla v fotosinteze. Molekuly i kletki* [The role of chlorophyll in photosynthesis. Molecules and cells]. Moscow, Mir Publ., 1967, pp. 72-83. (In Russian)
5. Karl G. *Predskazaniya produktzii fitoplanktona po pokazaniyam sredy obitaniya* [Predictions of phytoplankton production based on habitat indications]. *Materialy II Mezhdunarodnogo okeanograficheskogo kongressa, Moskva, 1966* [Proceedings of the II International Oceanographic Congress, Moscow, 1966]. Moscow, 1966, pp. 188-189. (In Russian)
6. Steemann N.E. *Marine Photosynthesis with Special Emphasis on the Ecological Aspects*. Amsterdam, New York, Elsevier Scientific Pub., Co., 1975, 141 p.
7. Semina G.I. *Vertikal'noe raspredelenie zhizni v okeane. Pelagial'. Fitoplankton. Biologiya okeana. Biologicheskaya struktura okeana* [Vertical distribution of life in the ocean. Pelagial. Phytoplankton. Ocean Biology. Biological structure of the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 1977, vol. 1, pp. 117-124. (In Russian)
8. Mordasova N.V. [Indirect assessment of water productivity by chlorophyll content]. In: *Trudy VNIRO. Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Beringova morya* [Proceedings of VNIRO. Comprehensive studies of the ecosystem of the Bering Sea]. 2014, vol. 152, pp. 41-54 (In Russian)
9. Lavrova O.Yu., Kostyanov A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* [Integrated satellite monitoring of the seas of Russia]. Moscow, Space Research Institute RAS Publ., 2011, 480 p. (In Russian)
10. Ocean Color Data. Available at: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directaccess> (accessed 12.01.2021)

11. Kostyanoy A.G. Satellite monitoring of climatic parameters of the ocean. Part 2. Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]. 2017, no. 2, pp. 63-85. (In Russian)
12. Kravtsova V.I., Tutubalina O.V., Baldina E.A. *Giperspektral'naya sistema MODIS: obzor oblastei primeneniya* [Hyperspectral system MODIS: an overview of applications]. Interuniversity Aerospace Center at the Faculty of Geography, Moscow State University of M.V. Lomonosov. Available at: http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acentr/int_sem4/modis_appl.htm (accessed 24.01.2021) (In Russian)
13. Earth Science Data Systems (ESDS) Program. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/esds> (accessed 23.03.2021)
14. JPL MUR MEASURES Project. 2015. GHRST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, USA Available at: <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MUR-JPL-L4-GLOBv4.1> (accessed 09.01.2021). DOI 10.5067/GHGMR-4FJ04
15. Kuramagomedov B.M., Monakhova G.A., Gadzhiev A.A., Akhmedova G.A. The experience of using of the geoinformation technologies in the Investigation of upwelling in the Caspian Sea. *South of Russia: ecology, development*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 121-125. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2014-4-121-125
16. Gurova E.S., Ivanov A.Yu. Appearance of Sea Surface Signatures and Current Features in the South East Baltic Sea on the MODIS and SAR images. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Research of the Earth from space]. 2011, vol. 9, no. 4, pp. 41-54. (In Russian)
17. Monakhova G.A., Kuramagomedov B.M., Rasulova M.M., Bekshokova P.A. Geoinformation systems in the study of the peculiarities of the upwelling at the western coast of the middle Caspian. *South of Russia: ecology, development*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 116-119. (In Russian) DOI 10.18470/1992-1098-2012-3-116-119
18. Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G., Soloviev D.M., Sheremet N.A. The structure of upwelling near the western coast of the Middle Caspian (according to satellite observations). *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Research of the Earth from space]. 2005, no. 4, pp. 76-85. (In Russian)
19. Nesterov E.S. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting]. Moscow, Triada Ltd. Publ., 2016, 378 p. (In Russian)
20. *Elektronnyi atlas Kaspiiskogo moriya. Geograficheskii fakul'tet MGU imeni M.V. Lomonosova* [Electronic atlas of the Caspian Sea. Faculty of Geography, Moscow State University named after M.V. Lomonosov]. 2015. Available at: <http://www.geogr.msu.ru/casp/> (accessed 21.01.2021)
21. *Elektronnyi spravochnik po prirodnoi srede Kaspiya. Edinaya gosudarstvennaya sistema informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane* [Electronic reference book on the natural environment of the Caspian. Unified state information system on the situation in the World Ocean]. Available at: http://www.esimo.ru/atlas/new/Kasp/1_1.html (accessed 24.01.2021)
22. Kutuzov A.V. Operational satellite monitoring of plankton algae accumulation and quantitative estimation of their density. *Geographical bulletin*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 160-168. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168
23. Tskhai Zh.R., Khen G.V., Estimation of the total chlorophyll-a content in the Sea of Okhotsk using satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, no. 6, pp. 34-46. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420060056
24. Suslin V.V., Churilova T.Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480-560 nm bands from ocean colour scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 37, no. 18, pp. 4380-4400. DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350
25. *SATIN: katalog dannykh / Laboratoriya sputnikovoi okeanografii RGGMU* [SATIN: data catalog / Laboratory of Satellite Oceanography, Russian State Hydrometeorological University]. Available at: <http://satin.rshu.ru/> (accessed 14.03.2021)
26. Worldview Earth Data NASA. Available at: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (accessed 11.01.2021)
27. Bagomaev A.A., Guseynova N.O. Identification of temperature anomalies in the western Caspian Sea in 2017 based on remote sensing data. *South of Russia: ecology, development*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 63-74. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2020-4-63-74

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени участвовали в написании статьи, и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Надира О. Гусейнова / Nadira O. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>
 Абдулмеджид А. Багомаев / Abdulmedzhid A. Bagomaev <https://orcid.org/0000-0001-5043-6345>
 Лейла Ш. Ахмедова / Leyla Sh. Akhmedova <https://orcid.org/0000-0003-1347-1429>
 Башир М. Курамагомедов / Bashir M. Kuramagomedov <https://orcid.org/0000-0002-4446-0645>