

Департамент образования и науки города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
Центр дополнительного образования «Малая академия наук»
Центр выявления и поддержки одаренных детей
города Севастополя «Альтаир»

Номинация: Геоинформатика

ИЗУЧЕНИЕ КОККОЛИТОФОРИДНЫХ ЦВЕТЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Работу выполнила: Спиркина Мария
Васильевна, учащаяся ТО «Общая
биология» ГБОУ ЦДО «Малая академия
наук», ГБОУ СОШ №6, 11 класс;
Научный руководитель:
Баутина Ольга Васильевна,
педагог ДО ГБОУ ЦДО «Малая академия
наук»;
Научные консультанты: Кубряков А.А.,
д.ф.м. н., Алексерова А.А., к.г.н. ФГБУН
ФИЦ МГИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	5
1.1 Значение геосистемных мониторинговых исследований	5
1.2 Роль водорослей кокколитофорид в климатических процессах Земли	6
РАЗДЕЛ 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	7
2.1 Описание объекта исследований	7
2.2 Характеристика района исследований	9
2.3 Определение характеристик поверхностных вод	10
РАЗДЕЛ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	12
3.1 Влияние температуры на интенсивность «цветения»	13
3.2 Динамика концентрации <i>E. huxsleyi</i> , связь с хлорофиллом <i>a</i>	17
3.3 Закономерности пространственного распределения цветения	18
3.4 Факторы, влияющие на цветение кокколитофорид <i>E. huxsleyi</i>	20
3.5 Составление прогноза промысла рыбы	21
ВЫВОДЫ	23
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	24
ПРИЛОЖЕНИЯ	26

ВВЕДЕНИЕ

Черное море является самым изолированным от Мирового океана, имеет огромное значение для нашей страны, поэтому прогноз и контроль его биоресурсов и постоянное наблюдение за экологическим состоянием вод является актуальной задачей [8].

Различные факторы приводят к изменениям структуры планктонного сообщества Черного моря. Фитопланктон, как основной производитель органического вещества, участвует в биологической трансформации многих элементов питания и формирует биогеохимические циклы углерода, азота, фосфора, кремния.

В последнее время большое внимание уделяется изучению уникальных водорослей фитопланктона – кокколитофорид. Они участвуют в обмене углерода между океаном и атмосферой и являются важным звеном поглощения неорганического углерода из атмосферы, обладают способностью соединять углекислый газ с кальцием и переводить его в нерастворимую форму – карбонат кальция. Являясь одним из основных известняк-продуцирующих организмов в Мировом океане, они оказывают влияние на уровень углекислого газа в атмосфере и на температурный режим и климатические условия [8].

Эффективным методом контроля морской среды, выявления событий «цветения» фитопланктона и наблюдения их развития во времени и пространстве является дистанционное зондирование Земли из космоса.

Дистанционные методы открывают широкие возможности для исследования качества и продуктивности вод. Спутниковая диагностика «цветения» кокколитофорид *Emiliania huxleyi* основана на уникальных оптических характеристиках их клеток, связанных с высоким показателем преломления света кокколитами и коккосферой [17].

Актуальность работы заключается в определении недостаточно изученной ранее временной динамики концентрации *E. huxleyi*, в изучении пространственного распределения кокколитофорид, в выявлении влияния условий среды на динамику этих показателей. Задача определения основных закономерностей формирования структуры кокколитофорид в сезонном и климатическом аспектах не решена до сих пор [9].

Целью исследовательской работы является анализ интенсивности, пространственного распределения цветения кокколитофорид Черного моря и оценка влияния условий среды на данные процессы.

Задачи:

1. Установить влияние условий температурного фактора на интенсивность «цветения» *Coccolothophyceae* в различные временные периоды.

2. Изучить динамику концентрации *E. huxleyi*, связь с концентрацией хлорофилла *a* с использованием ДЗЗ за период 2005-2025 годы.

3. Объяснить причины различного пространственного распределения кокколитофоридного цветения по сезонам.

4. Выявить закономерности массовых цветений кокколитофорид в течение двадцатилетнего периода.

5. Составить прогноз, влияющий на биопродуктивность и эффективность добычи рыбных ресурсов с учетом выявленных закономерностей.

Объектом исследования данной работы является водоросль кокколитофориды *E. huxsleyi*. Предмет исследования – пространственное распределение кокколитофоридного цветения.

Практическая значимость. Результаты, полученные в ходе исследований, позволят объяснить причины современных изменений экосистемы Черного моря в условиях меняющегося климата. Появится возможность контролировать и прогнозировать изменения в морских экосистемах, эффективнее и безопаснее использовать морские ресурсы.

Новизна исследований заключается в том, что временная динамика концентрации *E. huxsleyi*, связь с концентрацией хлорофилла *a*, пространственное распределение кокколитофорид, влияние условий среды на динамику этих показателей в данном временном диапазоне ранее не изучалась.

Автором работы проводилась постановка целей и задач, выбор методов исследования и программного обеспечения, обработка и анализ спутниковых данных, анализ пространственного распределения кокколитофорид, выявление причин изменения характеристик и процессов, формулировка основных положений и выводов.

Исследовательская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, выводов, списка литературы из 22 наименований. Общий объем работы составляет 29 страниц, включая 38 рисунков, 3 диаграммы и 2 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному консультанту Кубрякову А.А., доктору физико-математических наук ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», Алескеровой А.А., с.н.с отдела ДМИ наук ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», Баутиной О.В., педагогу дополнительного образования Малой академии наук за помощь на всех этапах проведения исследовательской работы.

РАЗДЕЛ 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Значение геосистемных мониторинговых исследований

Экологический мониторинг – это информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданная с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов [8]. Основная цель экологического мониторинга заключается в создании информационной системы, позволяющей получать достоверные сведения о состоянии окружающей среды и ее изменениях в физических и биотических компонентах под действием различных факторов.

Геосистемный мониторинг включает наблюдения за изменением состояния наиболее репрезентативных геосистем и экосистем, их преобразованием из природных в природно-антропогенные. Он позволяет выявить генезис и взаимную связь тех явлений в окружающей среде, которые служат индикаторами антропогенного воздействия, предвидеть трансформации природных комплексов, ухудшающие среду обитания человека. Преимущества геосистемного мониторинга: пространственный охват, большое число спектральных каналов, регулярность получения данных.

С помощью космической съемки можно оценить прозрачность воды, определить строение дна, установить наличие в воде органических веществ и фитопланктона, обнаружить пленки на поверхности воды, определить температуру поверхностных вод.

При чтении спутниковых снимков учитывается наличие в воде тех или иных компонентов. Кокколитофорида придает воде непрозрачный молочный цвет и на космических снимках определяются по молочно-белым разводам [7].

Таким образом, геосистемный мониторинг служит надежным источником информации о состоянии поверхностных вод, дает возможность составления прогнозов пространственной и временной изменчивости вод, выявления зон повышенной биологической продуктивности.

1.2 Роль водорослей Кокколитофорид в климатических процессах Земли

Кокколитофорида (*Coccolothophyceae*) начали наблюдать в Черном море еще с 40-х годов 20 века, но до середины 1980-х их доля в фитопланктоне была мизерной и не превышала 3% при средней биомассе 8 мкг/л [8]. Кокколитофоридные цветения – климатически значимый фактор. Они широко распространены в Атлантическом, Тихом, Индийском океанах и

во многих морях, охватывая громадные площади (превышающие временами 100 тыс. кв. км) и оказывая существенное влияние на важные физические и биогеохимические процессы (в частности, «окисление» поверхностного слоя вод). Мощнейшие продуценты CaCO_3 , могут оказывать существенное влияние на обмен углекислым газом между океаном и атмосферой. Обуславливают действие «карбонатного биологического насоса».

Вследствие сильного светорассеяния, могут существенно увеличивать альбедо океана и тем самым влиять на баланс солнечного излучения и тепловой баланс океана. *Emiliana huxleyi* обладает способностью продуцировать диметилсульфид, который, попадая в атмосферу, способствует образованию облачности и изменению планетарного альбедо. Поток кокколитов на океанское дно обуславливает образование подводных меловых и известняковых холмов.

Прогнозируется, что текущие климатические изменения могут существенно повлиять на процессы кальцификации, причем разнонаправленно в низких и высоких широтах.

Исследования динамики развития кокколитофорид приобретают особую значимость в связи с повышением концентрации атмосферного углекислого газа, а также с изменчивостью концентраций азота и фосфора в морской воде, что приведет к изменению климата в целом.

РАЗДЕЛ 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Описание объекта исследований

Кокколитофориды (*Coccolithophyceae*) – это планктонные гаптофитовые водоросли, повсеместно распространенные в Мировом океане, отличительным признаком которых являются покрывающие всю поверхность клетки известковые (CaCO_3) пластинки – кокколиты. Наиболее изученным видом этой группы является *Gephyrocapsa huxleyi* (Lohmann), или *Emiliana huxleyi* [22].

Научная классификация:

Домен: Эукариота - (*Eukaryota*)

Клада: Гаптисты - (*Haptista*)

Подкласс: Кокколитофориды - (*Coccolithophoridophycidae*)

Класс: Гаптофитовые - (*Haptophyta*)

Порядок: Коккосфералес – (*Coccosphaerales*)

Отряд: Кокколитофориды - (*Coccolithophoridophycidae*)

Семейство: Кокколитофицеи - (*Coccolithophyceae*)

Род: Кокколитофора - (*Coccolithophora*)

Вид: Эмилиания Хаксли – (*Emiliana huxleyi*).



Рис. 2.1 Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Кокколитофориды являются важными продуцентами органического вещества в океане, их долю в первичной продукции оценивают в 1–10 %, они также играют ключевую роль в образовании CaCO_3 и формировании известковых донных отложений. С накоплением коккосфер и отдельных кокколитов в воде существенно изменяются оптические характеристики моря.

Кокколитофориды составляют существенную часть нанопланктона, а их известковые скелеты, входящие в состав донных отложений, часто используются для определения возраста горных пород.

Emiliana huxleyi играют важную роль в биогеохимии океана, вызывая цветения вод и в Чёрном море. Кокколитофоры являются одними из основных известняк-продуцирующих организмов в Мировом океане, наряду с фораминиферами [23].

За счет наличия уникального фотосинтетического аппарата, они лучше, чем другие фитопланктонные представители могут быть защищены от повышенного освещения.

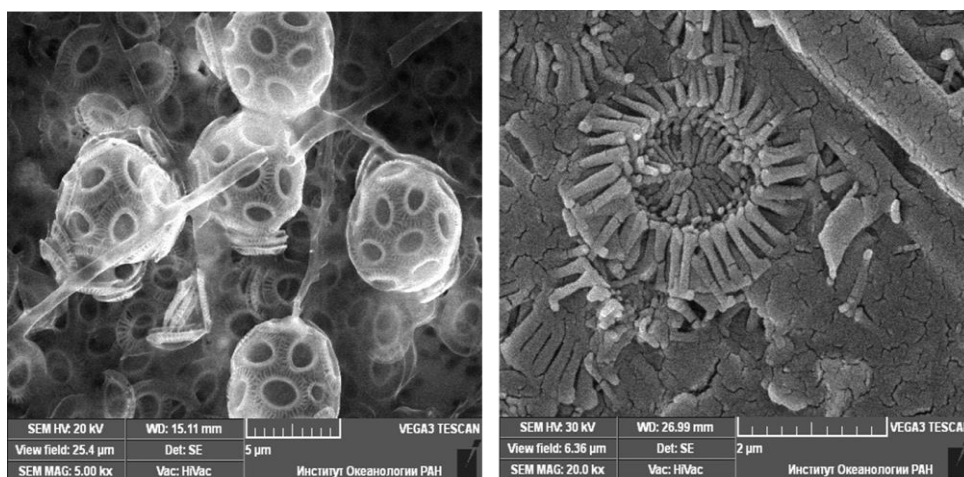


Рис. 2.2 Черноморские кокколитофориды *Emiliana huxleyi* под электронным микроскопом. Слева – клетки кокколитофорид, покрытые кокколитами (plated cells), справа – целые и разрушенные кокколиты

Кокколитофориды обладают сильным слабоселективным светорассеянием, что дает возможность наблюдать цветение по данным спутниковых сканеров цвета. На спутниковых изображениях Черного моря из года в год обнаруживается помутнение поверхностного слоя.



Рис. 2.3 Данные SeaWiFS 11 июня 2005 года. На изображении видны речные выносы рек из прибрежной зоны в открытое море

2.2 Характеристика района исследований

Площадь Чёрного моря — около 422 тысяч квадратных километров. Береговая линия почти не изрезана, периметр прерывается только реками и заливами. Со стороны Турции к побережью примыкают Понтийские горы, а со стороны России и Абхазии скалистый рельеф создают хребты Кавказских гор. Внутри моря практически нет островов, а большая часть из существующих — необитаемы [21].

Обширные участки глубоководных вод Чёрного моря являются бескислородными. Чёрное море — это самый большой бескислородный морской бассейн на Земле. Следствием этого является то, что в более глубоких частях моря не могут существовать организмы, которые участвуют в метаболизме, основанном на дыхании кислородом.

Вместо этого в качестве конечного окислителя используются другие вещества, такие как сульфат, в результате чего образуется сероводород.

Чёрное море находится в зоне континентального климата. Здесь существует большая разница между летними и зимними температурами, осадки редки, а в холодное время года наблюдаются сильные ветра. Однако природные условия на побережье разнятся от региона к региону, поэтому климат Чёрного моря нельзя назвать однородным.

2.3 Определение характеристик поверхностных вод с помощью ДЗЗ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – получение информации о поверхности Земли и объектах на ней, атмосфере, океане, верхнем слое земной коры бесконтактными методами, при которых регистрирующий прибор удален от объекта исследований на значительное расстояние [5].

Космический аппарат Aqua является частью комплексной программы NASA EOA, направленной на исследование Земли и состоящей из трех специализированных спутников Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно [19].

MODIS, установленный на спутнике Aqua, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах, и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250 м. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 6 лет [20].

Мониторинг вод по данным космической съемки проявляется в коротковолновом, инфракрасном и микроволновом спектральном диапазонах. Преимущества метода заключается в том, что дает возможность пространственного охвата, имеет большое число спектральных каналов, обеспечивает регулярность данных.

Дистанционное зондирование позволяет произвести анализ биологической продуктивности вод, их экологического состояния, получить

сведения о ледовой обстановке, состоянии береговой линии. При помощи космических данных возможно наблюдение над степенью прозрачности вод, наличие органических веществ, фитопланктона, взвесей и их концентрацию, обнаружение пленок на поверхностных водах, температуру поверхностных вод. Водоросли содержат хлорофилл, который поглощает излучение в синей и красной зоне спектра и отражает в зеленой. При визуализации космических снимков в синтезе каналов «натуральные цвета» выявляется пространственное распределение и количество хлорофилла *a* по зонам насыщенности зеленого окраса. Другой вид водорослей, кокколитофориды, придают воде непрозрачный молочный цвет и на космических снимках определяются по молочно- белым разводам (рис. 2.4).

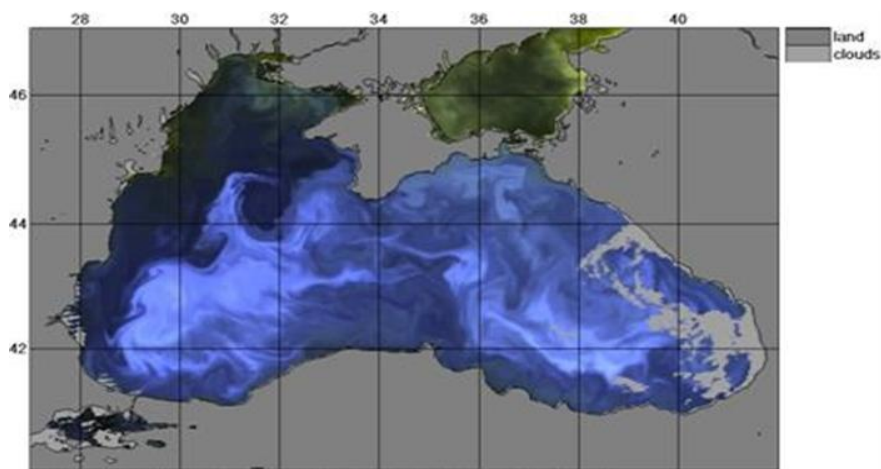


Рис.2.4

Пространственное распределение кокколитофорид, построенные по данным спутникового сканера MODIS-Aqua от 15 июля 2015 года

Так, в январе 2025 года интенсивное цветение кокколитофорид в восточной части Черного моря было отмечено в глубинных участках (рис. 2.5).

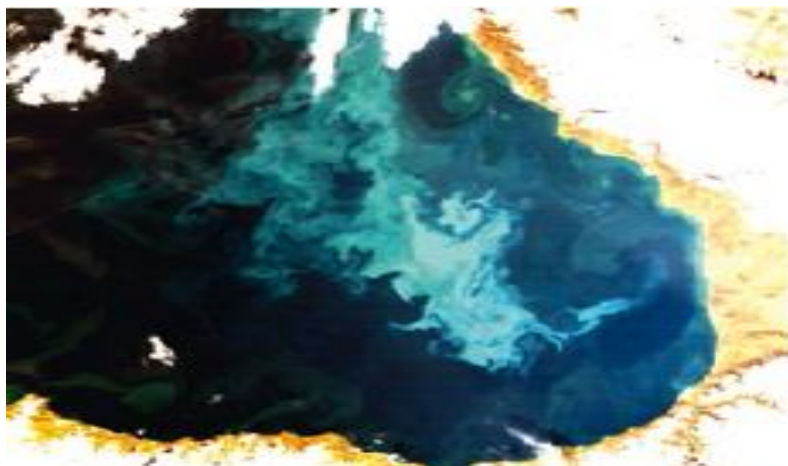


Рис. 2.5 Цветение кокколитофорид в восточной части Черного моря
Фрагмент космического снимка MODIS-Aqua от 21.01. 2025 года

В наиболее общем виде цветение можно определить, как накопление биомассы фитопланктона в пределах определенной акватории в результате превышения скорости роста микроводорослей над скоростью потерь клеток [22].

Очевидно, что изучение пространственной и временной изменчивости различных процессов стало возможным только с появлением спутниковых данных с высоким пространственным разрешением. Это дало возможность определять характеристики как локальных, так и субмезомасштабных процессов и выделить районы наиболее частых их проявлений.

РАЗДЕЛ 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Влияние температуры на интенсивность «цветения» *E. huxsleyi*

Для изучения роли температурного фактора в многолетней изменчивости кокколитофорид использовались спутниковые снимки MODIS-Aqua за период с 2005 по 2025 гг.

Анализ динамики концентрации кокколитофорид и температуры поверхностного слоя показал, что аномальные по уровню летние цветения водорослей наблюдались после наиболее холодных зим. Эта закономерность устойчива на протяжении всего периода. Такие события вызваны усилением вертикального вовлечения питательных веществ из глубинных слоев в предшествующий зимний период. Поверхностные воды при этом обогащаются биогенными элементами.

Так, холодные зимы 2012, 2017 и 2018 гг. способствовали более интенсивному и продолжительному цветению фитопланктона летом

Таблица 3.1

Показатели среднемесячных температур 2010-2019 гг.

Среднемесячная температура последних лет ^[5]													
Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
2010 год, °С	3,3	6,3	6,3	11,5	17,3	23,6	25,6	27,0	21,4	12,4	13,5	9,3	14,8
2011 год, °С	2,0	0,4	4,7	9,9	15,6	21,7	24,9	24,0	19,9	12,3	2,8	7,4	12,1
2012 год, °С	2,3	-3,3	3,0	12,4	18,5	23,5	25,9	24,7	20,8	17,9	9,6	4,2	13,3
2013 год, °С	5,7	6,6	7,2	12,0	19,5	22,1	24,3	25,3	17,9	12,1	10,8	3,7	13,9
2014 год, °С	3,5	4,1	8,7	11,9	17,8	21,6	25,2	26,1	19,8	12,3	7,3	7,1	13,8
2015 год, °С	4,3	4,3	7,9	9,9	16,3	22,1	24,3	25,5	22,9	12,3	10,9	5,6	13,9
2016 год, °С	2,1	6,7	8,5	12,6	16,6	23,0	25,6	26,5	19,5	11,4	7,8	1,1	13,5
2017 год, °С	1,8	2,6	9,0	10,6	15,7	21,1	24,3	26,1	21,8	14,0	9,2	9,4	13,8
2018 год, °С	3,8	4,4	7,2	13,9	19,1	23,1	25,8	26,1	20,9	16,4	6,1	5,1	14,3
2019 год, °С	5,8	4,9	7,0	11,2	17,9	25,3	23,5	24,8					

Рис 3.1 показывает, что менее интенсивное развитие кокколитофорид наблюдалось в 2001, 2010, 2015 и в 2021 гг. Самые большие площади, более 80% поверхности моря, зафиксированы летом в 2013, 2019, 2020 и в 2025 гг. (Приложение 1).

Диаграмма 1

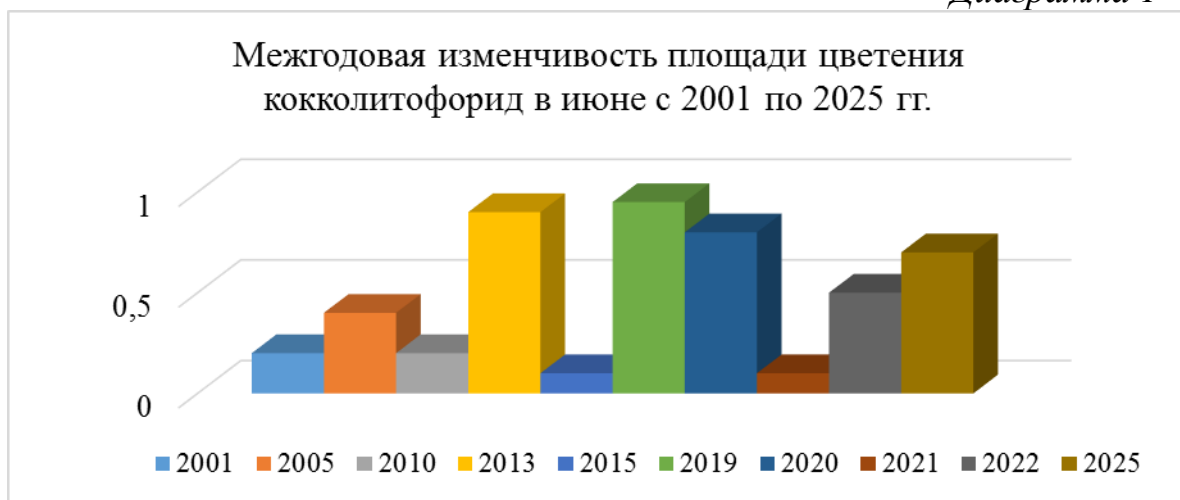


Рис.3.1 – Диаграмма межгодовой изменчивость площади цветения кокколитофорид

На рисунке 3.2 показаны спутниковые снимки с демонстрацией летних температур поверхностных вод, на которых высокие значения изображены красным и оранжевым цветами:

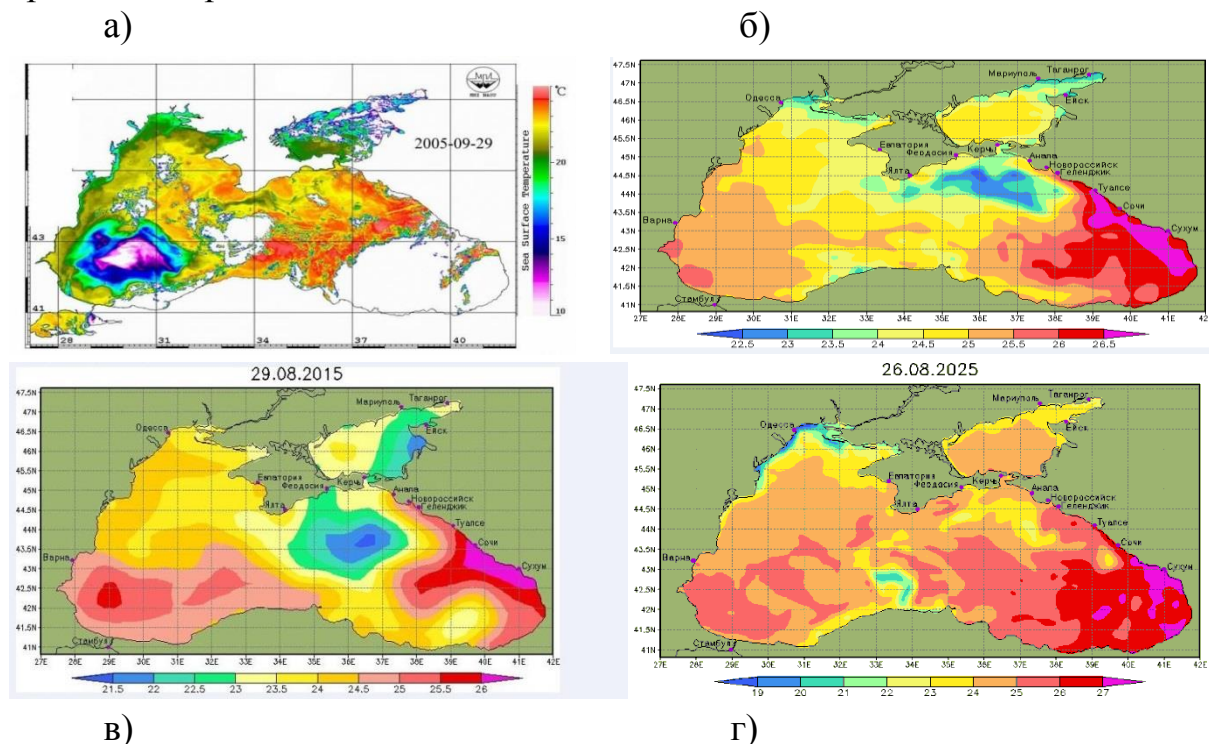


Рис.3.2 - Температура поверхностных вод Черного моря 2005-2025 год. (а – 2005 год, б – 2010 год, в – 2015 год, г – 2025 год)

При сопоставлении данных диаграммы и снимков температуры воды, можно утверждать, что температура поверхностных вод не является главным фактором массового развития *E. huxsleyi*.

Отличительной чертой вегетации кокколитофорид летом 2022 года является позднее начало цветения. В мае 2022 года цветение практически отсутствовало. Массовое развитие кокколитофорид началось в июне и продолжалось весь июль до августа, что является редким явлением за двадцатилетний период.

В результате сдвига сроков цветения концентрации кокколитофорид в мае были минимальными, а в июле-августе 2022 г. - максимальными за весь период спутниковых наблюдений. Примечательно, что в мае 2022 г температура поверхностного слоя была значительно ниже, чем в соответствующие периоды аномальных цветений предшествующих лет. Кроме того, май 2022 отличался большим количеством облачных дней, что снижало освещенность поверхностного слоя и могло повлиять на условия вегетации кокколитофорид.

Интересным фактом является то, что после летнего цветения 2022 года в Черном море наблюдалось масштабное зимнее цветение кокколитофорид, которое началось в ноябре и, достигнув максимума в декабре 2022 - январе 2023, охватило всю акваторию моря. Сочетание двух последовательных цветений - аномального летнего и масштабного зимнего в течение одного года является достаточно редким явлением за период спутниковых наблюдений с 1998 по 2023 г. Локальные зимние цветения, наблюдавшиеся ранее после бурной летней вегетации кокколитофорид, не захватывали всю акваторию моря, как это произошло в декабре 2022 – январе 2023 г.

Ранее существовало убеждение, что регулярные массовые цветения в северном полушарии происходят в весенне-летний период [16]. Однако отмечались единичные случаи цветения кокколитофорид в центральной части Черного моря в ноябре 1993 года и в его северо-западной части в декабре 2006 г. Интенсивное цветение *E. huxsleyi* в восточной части было выявлено в январе-феврале 2019 года (рис.3.3).

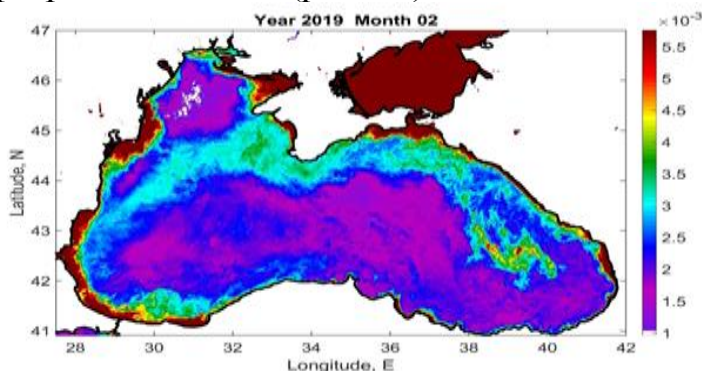


Рис.3.3 Интенсивное цветение *E. huxsleyi* в восточной части в зимний период (февраль, 2019 г.)

При анализе спутниковых снимков можно заметить, что в последние годы интенсивность зимних цветений наблюдается чаще. Особенно показателен декабрь 2022 года (Приложение 2).

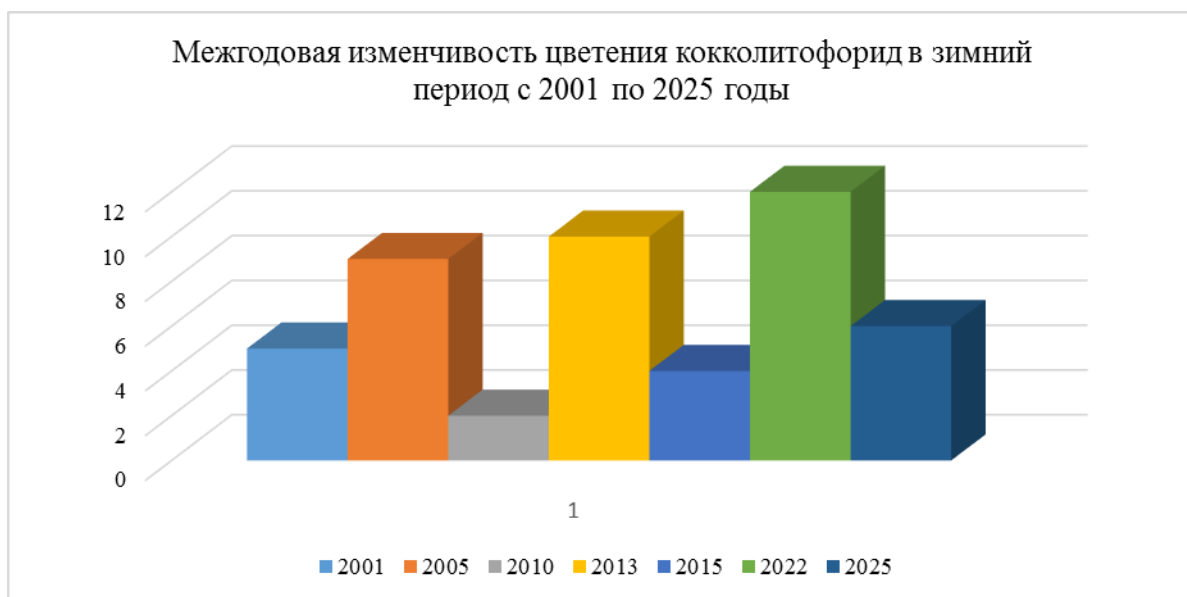


Рис.3.4 – Межгодовая изменчивость площади цветения кокколитофорид

Установлено, что температура аномально холодных зим, после которых наблюдаются интенсивные цветения кокколитофорид, повышается в соответствии с общим потеплением поверхностного слоя моря [6]. В результате зимней конвекции теплые воды поднимаются вверх.

Глубина зимней конвекции в условиях зимних температур может поддерживаться за счет осолонения поверхностного слоя моря, которое наблюдается в Черном море, по мнению Гинзбурга, в последнее десятилетие.

Причины столь раннего развития кокколитофорид пока достаточно неизучены. Однако можно предположить, что на зимние цветения влияет целый ряд факторов: действие интенсивных штормов, особая структура кокколитов, биотические взаимодействия (отсутствие естественных врагов в пищевой цепи).

Данные межгодовой изменчивости площади цветения можно считать достоверными, т.к. они согласуются с показателями хода температур в летний и зимний периоды.

3.2 Динамика концентрации *E. huxsleyi*, связь с хлорофиллом *a*

Для проведения аналитической работы были использованы статистические материалы работы «Цветение» кокколитофорид в Черном море по данным дистанционного зондирования Т.Я. Чуриловой и массив данных спутниковых снимков, предоставленный сотрудниками Морского гидрофизического института г. Севастополя (Приложение 1, 2).

Период июньского цветения кокколитофорид в Черном море характеризуется самой высокой в годовом цикле инсоляцией поверхности моря. В этих условиях устойчивость фотосинтетического аппарата *E. huxsleyi*

обеспечивают им преимущества в скорости роста по сравнению с другими планктонными водорослями. В результате численность *Coccolothophyceae* начинает расти, развивается пик цветений, в котором биомасса фитопланктона может быть представлена в основном одним видом *E. Huxsleyi* [22]. В приложении 1 на снимках летних цветений заметны различные значения концентрации кокколитофорид по годам.

Так, максимальные показатели характерны для начала лета 2005 и 2024 гг. Причем, эти значения отражены по береговым шельфовым зонам северо-востока. В западной части шельфа концентрация замечена в 2008 и в 2020 гг. Концентрация водорослей в зимний период иная (Приложение 2). Так, цветение кокколитофорид в декабре смещается в глубоководные центральные части моря (2010, 2022, 2024 гг.). В 2005, 2020 и в 2024 гг. цветение локализовано в шельфовой зоне.

Это объясняется тем, что летом уровень трофности вод у побережья выше, что дает возможность активному фотосинтезированию фитопланктона. В прибрежных водах, которые подвержены влиянию речного стока, интенсивное развитие *E. huxsleyi* наблюдается на фоне повышения биомассы фитопланктона.

При анализе спутниковых снимков учитывались следующие факторы: облачность, вихревые движения вод, вертикальное распределение хлорофилла *a*, и т.д. Поэтому в данном вопросе могут допускаться неточности. Так, на рис 3.5 Размещена карта концентрации хлорофилла *a* за 26 апреля 2016 года., белые участки на котором демонстрируют облачность.

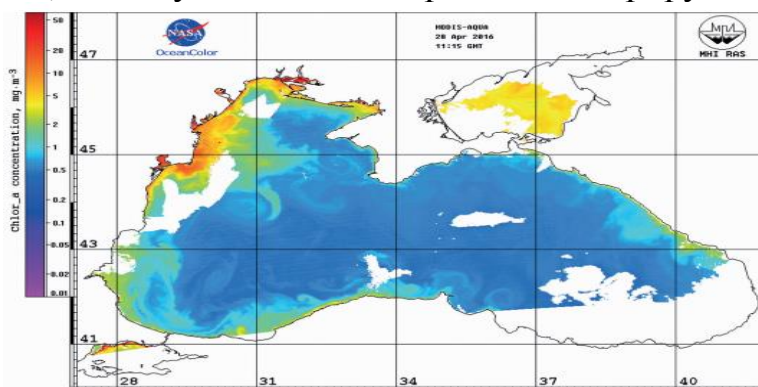


Рис. 3.5 - Карта концентрации хлорофилла *a* за 26 апреля 2016 года

Анализ показал, что более интенсивное развитие кокколитофорид наблюдается в годы, когда уменьшаются средние значения концентрации хлорофилла *a*.

В высокопродуктивных шельфовых районах главный максимум приурочен к лету и осени, короткопериодическая изменчивость биологической продуктивности высокая.

В глубоководных акваториях при общем низком уровне кратковременной изменчивости концентрации хлорофилла главный

максимум приходится на зиму. Это можно объяснить вертикальными перемещениями водных масс.

В холодный период вертикальное перемешивание вызывает вовлечение фитопланктона из нижних слоев, а затем интенсивный поток нитратов и фосфатов. Зимой эти два процесса приводят к увеличению концентрации хлорофилла *a*.

Для глубоководных районов оказывается характерным средний уровень сезонной изменчивости хлорофилла. В зимний и осенний сезоны (периоды цветений) связь годовой изменчивости содержания хлорофилла и многолетнего хода зимней температуры воздуха напрямую зависит от уровня биопродуктивности (рис.3.6).

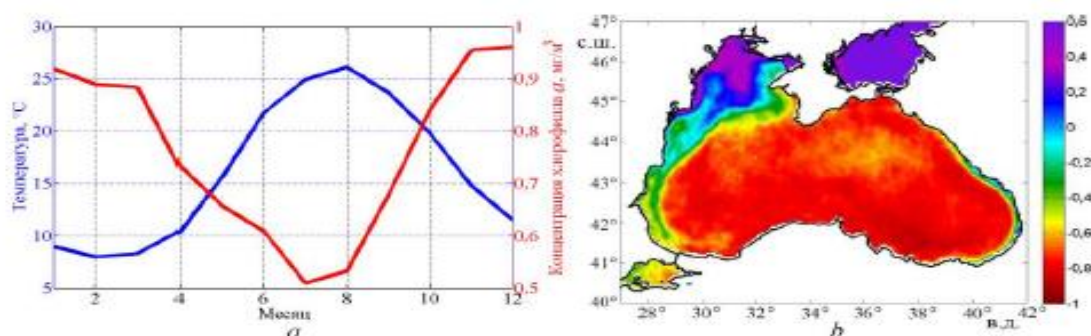


Рис.3.6 - Сезонная изменчивость хлорофилла *a* и поверхностной температуры в глубоководной части моря (а – температура, б – концентрация хлорофилла *a*)

Очевидно, что существуют механизмы, которые позволяют кокколитофоридам доминировать и завоевывать обширные территории. Возможно, значительный вклад в конкурентоспособность *E. huxleyi* вносят механизмы адаптации к высокой интенсивности света [21].

В работе Силкина В.А. «Почему кокколитофориды доминируют» говорится о том, что *E. huxleyi* отличаются не только высокой устойчивостью к температуре и свету, но и способны развиваться в условиях дефицита азота.

Например, в июне 2006 года, когда концентрация в воде азота отмечалась низкой, а фосфора высокой, вклад кокколитофорид в общую массу фитопланктона составил >90%.

Проводилось детальное исследование структуры пигментного комплекса и функциональных характеристик *E. huxleyi* и оно показало, что высокая интенсивность света не приводит к ингибированию роста благодаря активной фотопротекторной функции пигментно-белкового комплекса. Фотопротекторы способствуют устойчивости к яркому свету благодаря минимизации накопления активных форм кислорода и предотвращения окислительного повреждения, таким образом, повышается устойчивость реакционных центров фотосистемы II [22].

Некоторые ученые (Т.Я. Чурилова, В.В. Суслин) высказывают предположение о том, что некоторые кокколитофориды могут вести

миксотрофный или фагоцитарный образ жизни, о чем говорит их присутствие за пределами зоны фотосинтеза [21].

E. huxleyi, имея уникальный белковый комплекс и функциональные особенности, могут расти с максимальной скоростью при высокой освещенности, ингибирующей рост всех остальных групп микроводорослей. Таким образом, на концентрацию *E. huxleyi* оказывают влияние не только абиотические условия, но и особенности физиологии и анатомии кокколитофорид.

3.3 Закономерности пространственного распределения цветения

Спутниковые снимки, содержащие информацию о пространственном распределении кокколитофоридного цветения, имеют форматы видимого цвета и спектрального изображения. На рис 3.7 можно видеть особенности каждого снимка.

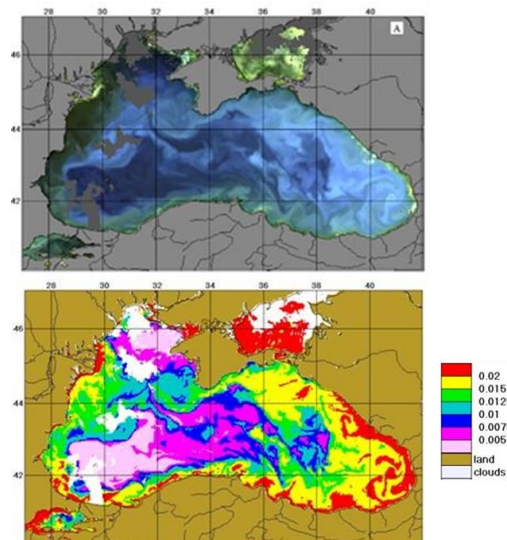


Рис.3.7 Слева сверху - спутниковое изображение Черного моря в видимом цвете, слева внизу - пространственное распределение показателя

Для выявления закономерностей пространственного распределения *E. huxleyi* рассмотрим спутниковые снимки зимнего цветения:

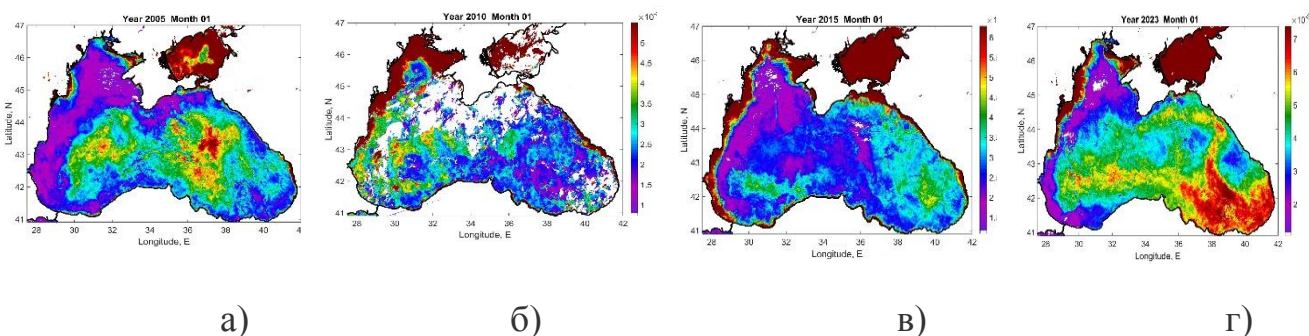


Рис 3.8 Зимние цветения кокколитофорид за период с 2005 по 2024 гг. (а - январь 2005г., б - январь 2010 г., в – январь 2015 г., г – январь 2024 г.)

Зимние цветения не всегда охватывают всю акваторию моря. В большинстве случаев наблюдаются локальные цветения, преимущественно в восточной части моря. Эти районы являются тёплым сектором и защищены от воздействия холодных северо-восточных ветров. На снимке 2005 года интенсивное зимнее цветение характерно для восточного сектора со смещением к глубинным областям.

В 2010 году зимой относительно равномерное незначительное цветение с увеличением показателя в западном секторе моря.

В 2015 году наблюдается смещение неактивного цветения в восточную часть. Показателен 2024 год тем, что концентрация цветения *E. huxsleyi* очень ярко выражена на юго-востоке и частично охватывает глубинные воды со смещением к югу.

В зависимости от условий, благоприятных для вегетации кокколитофорид, область зимнего цветения может располагаться в различных частях моря.

Летние цветения обычно происходят в открытой части моря, но в последнее десятилетие из-за общего потепления и осолонения поверхностного слоя зона наибольшего развития кокколитофорид смещается на периферию бассейна. На рисунке 3.0 представлены спутниковые снимки с изображением летних цветений:

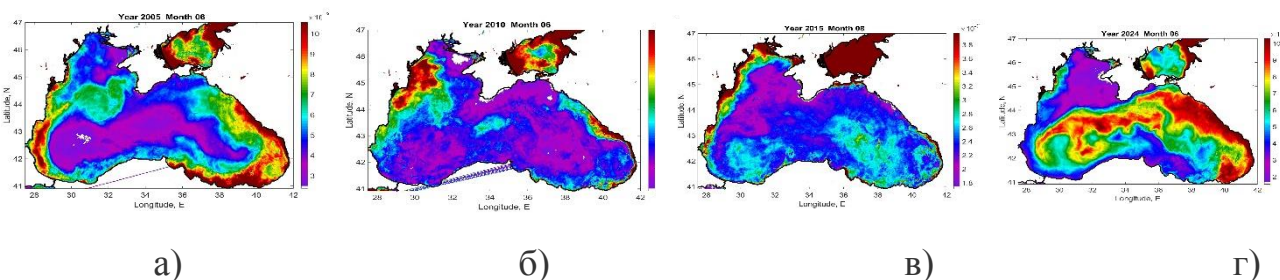


Рис.3.9 – Летние цветения кокколитофорид за период с 2005 по 2024 гг.

Можно заметить тенденцию смещения концентрации *E. huxsleyi* к периферии, что объясняется повышенной трофностью вод в летний период.

Наиболее широкий охват развития кокколитофорид на поверхности вод замечен в 2024 году. Причинами такого явления могут быть жаркое лето, циркуляция водных масс, увеличение органических веществ в воде (Приложение 3).

Среди аномальных цветений выделяются цветения 2002, 2010, 2015, 2021 и 2022 гг.. Например, летом 2022 года цветение кокколитофорид развивалось преимущественно в восточной части Чёрного моря.

Основные очаги цветения с концентрациями до 8–10 млн кл/л формировались у северо-восточного побережья моря, а также в зоне Батумского антициклонического круговорота [3].

Таким образом, можно выделить закономерности пространственного распределения кокколитофорид: преобладание летнего максимума в июне,

присутствие региональных различий в уровне зимней вегетации, которые определяются различными гидрометеорологическими условиями в разных акваториях.

3.4 Факторы, влияющие на цветение кокколитофорид *E. huxsleyi*

Цветение *E. huxsleyi* вызваны совместным действием нескольких абиотических факторов. Одним из важных является интенсивность света, падающего на поверхность воды. Кокколитофориды способны расти при высокой интенсивности света, ингибирующей рост других водорослей.

Условия минерального питания также влияют на развитие водорослей. Доля кокколитофорид в фитопланктоне в различных районах моря периодически возрастает при ухудшении условий минерального питания, например, при снижении потоков биогенных элементов из-за повышения стабильности водного столба.

Гидрофизические условия – важный фактор, влияющий на жизнь *E. huxsleyi*. Увеличение толщины верхнего слоя поверхности моря после перемешивания вызывает вовлечение фитопланктона и служит причиной увеличения концентрации хлорофилла *a* на поверхности.

Значительное уменьшение разделения водной толщи на слои разной плотности, температуры, солености из-за сильных течений приводит к частичному смешению вод и вовлечению биогенных веществ в нижние слои эвфотической зоны.

Кроме этого, штормовое воздействие способствует интенсивному горизонтальному переносу хлорофилла *a* и биогенных элементов на значительное расстояние, вплоть до северо-западной части моря, что способствует развитию цветения в отдаленных от воздействия штормов районах.

Вихревые движения водных масс поверхностного слоя могут влиять на перемещение области цветения кокколитофорид, как это показано на рис.3.10:

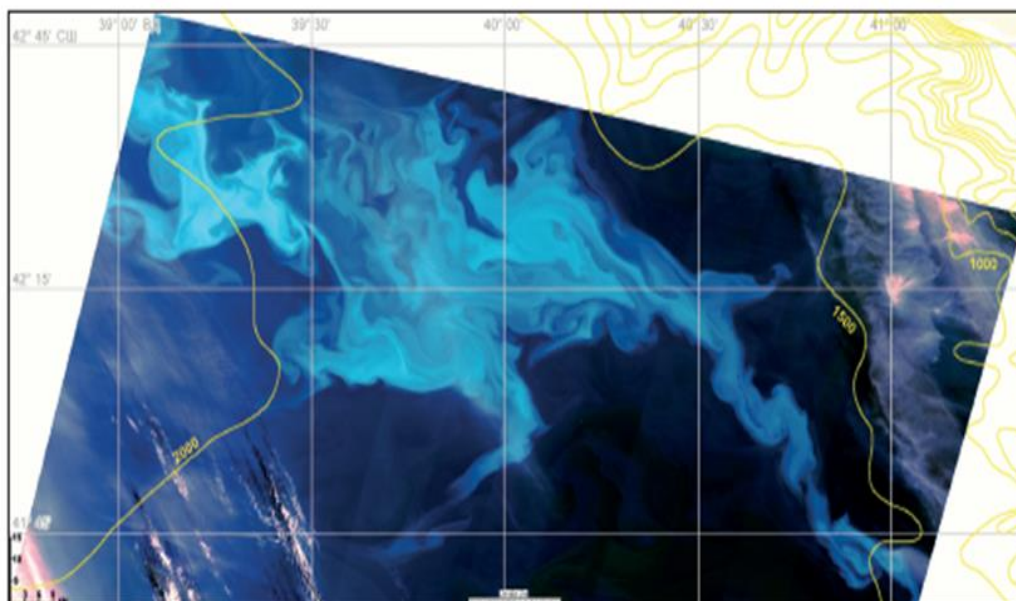


Рис.3.10 – Цветение кокколитофорид в восточной части Черного моря в феврале 2019 года

Таким образом, динамические процессы могут формировать потоки питательных веществ, изменять характеристики фитопланктона, концентрацию хлорофилла, органического вещества.

3.5 Составление прогноза вылова рыбных ресурсов

Прикладное значение проведенного исследования заключается в составлении **прогноза, влияющего на повышение эффективности вылова основных промысловых видов рыбы в Черном море**. Он основан на следующих позициях:

1. Эффективные показатели вылова рыбных ресурсов летом ожидаемы в центральных частях моря после аномально холодных зим, так как апвеллинговые события выносят биогенные вещества к поверхности, а массовые цветения кокколитофорид обеспечивают эти области большим количеством растворенного в воде кислорода.

2. В осенний и зимний периоды большие скопления рыбы сосредоточены у побережий, так как повышается трофность вод, биогенные вещества выносятся реками, впадающими в море. Поэтому эффективные показатели вылова рыбы в этот период можно ожидать в береговой зоне.

3. Учитывая циклический характер массовых цветений кокколитофорид (пиковые фазы цветений происходят раз в 4-5 лет), можно предположить в какие годы ожидаются максимальные выловы рыбы.

Для того, чтобы проверить данные утверждения, мы обратились к источникам со статистикой. В работе Е.А. Кожурина «Динамика уловов промысловых рыб Крыма в Черном море» представлены показатели, подтверждающие предложенные нами позиции (рис. 3.11).

Таблица 2. Вылов демерсальных рыб в Черноморско-Крымском районе и Чёрном море в 2000–2017 гг., т

Год	Вид ВБР*											Всего
	Катран	Скат	Мерланг	Кефали	Пивенгас	Атерина	Смарида	Барабуля	Бычки	Глосса	Калкан	
2000	67,6	27,1	4,2	18,8	16,8	11,3	н/д	7,2	0,0	0,0	67,0	220,0
2001	127,2	74,7	10,0	19,5	21,8	10,0	н/д	18,6	0,8	0,0	110,8	393,5
2002	87,4	78,0	7,4	10,7	80,4	28,2	н/д	40,1	0,9	0,1	74,8	407,9
2003	121,1	107,1	13,5	21,7	17,1	28,1	н/д	26,3	0,7	0,0	93,4	429,0
2004	76,8	74,2	16,2	19,2	5,0	106,0	н/д	15,6	0,7	0,0	95,2	408,9
2005	66,1	58,3	5,1	28,5	28,1	141,6	н/д	15,5	0,0	0,0	97,7	440,9
2006	53,5	71,1	13,8	42,3	33,9	87,8	н/д	50,9	0,1	0,0	106,0	459,4
2007	35,3	40,2	17,4	57,7	36,6	411,6	н/д	47	0,1	0,0	143,9	790,0
2008	68,1	50,5	6,5	40,5	37,7	227,7	н/д	45,2	0,0	0,0	177,0	653,3
2009	39,8	39,4	7,4	38,0	35,5	587,9	н/д	55,7	0,2	0,0	174,7	978,6
2010	14,0	35,5	12,8	23,6	5,7	182,7	н/д	59,6	1,7	0,0	129,2	464,7
2011	20,6	19,1	35,6	41,2	10,6	58,5	н/д	42,2	0,9	0,0	152,5	381,0
2012	5,4	27,9	33,0	68,3	0,8	36,1	н/д	70,5	26,5	0,0	144,0	412,4
2013	6,6	26,5	19,8	78,6	0,7	3021	н/д	92,1	717,3	0,0	114,0	4076,7
2014	28,1	31,6	9,1	140,9	0,9	1124,3	н/д	177,7	29,3	0,0	88,9	1630,9
2015	52,7	42,9	17,5	177,5	0,3	36,3	н/д	308,3	н/д	н/д	76,4	712,0
2016	28,8	26,1	27,5	270,5	0,1	51,9	51,3	354,3	н/д	н/д	189,6	1000,0
2017	43,1	54,6	36,9	275,4	0,2	35,0	83,0	571,2	н/д	н/д	248,4	1347,8

* Кефали — синиль, лобан и остронос, атерина — черноморская атерина и атлантическая атерина.

Рис.3.11 – Динамика вылова рыбных ресурсов в 2000-2017 гг

Из таблицы видно, что после аномально холодной зимы 2012 года, в 2013 году вылов рыбы был значительно выше (2012 – 412,4, в 2013 – 4076,7).

По информации канала РБК – Ростов, в январе-сентябре 2025 года рыбаки Азово-Черноморского бассейна добыли 34,3 тысячи тонн рыбы и других водных биоресурсов, что почти в 1,4 раза больше по сравнению с аналогичным периодом 2024 год.

В ходе анализа спутниковых снимков летних цветений были определены максимальные их значения именно в 2025 году (рис.3.1). Значит, показатели массовых цветений кокколитофорид напрямую влияют на эффективность вылова рыбных ресурсов. Учитывая данные прогнозные позиции, можно моделировать события на несколько лет вперед, определить места повышенной биопродуктивности и максимально увеличить эффективность промысла (Приложение 4).

ВЫВОДЫ

1. Массовое развитие кокколитофорид в Черном море происходит ежегодно с мая по июль и достигает пиковых значений с периодичностью 4-5 лет. Наиболее интенсивные цветения *E. huxsleyi* в летний период происходят в годы с отрицательной аномалией температуры предшествующих зим.
2. Факторами для развития зимних цветений являются стабильность поверхностного слоя, маловетренная погода и достаточная освещенность. В годы развитых зимних цветений летнее цветение кокколитофорид выражено слабее.
3. Восточная часть моря является теплым сектором и испытывает наименьшую ветровую нагрузку по сравнению с другими районами, именно поэтому в период массовых летних цветений пик приходится на восточный сектор Черного моря.
4. Выявлены закономерности массового цветения кокколитофорид:
 - за последние десятилетия происходит смещение цветений *E. huxsleyi* из открытой части моря на периферию бассейна;
 - преобладание летнего максимума в июне;
 - присутствие региональных различий в уровне зимней вегетации, которые определяются различными гидрометеорологическими условиями в разных акваториях моря.
5. Определены причины кокколитофоридных цветений:
 - температура воды и интенсивность света;
 - соленость воды;
 - устойчивость пигментного аппарата кокколитофорид;
 - гидрофизические условия: штормовая активность, скорость и направление течений, вертикальное перемешивание водных масс.
6. Составлен прогноз более эффективного вылова рыбных ресурсов в акватории Черного моря с учетом выявленных закономерностей массовых цветений (Приложение 4). Представлен отзыв индивидуального предпринимателя компании рыбной отрасли в г. Севастополе Бычкова Андрея Владимировича (Приложение 5).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

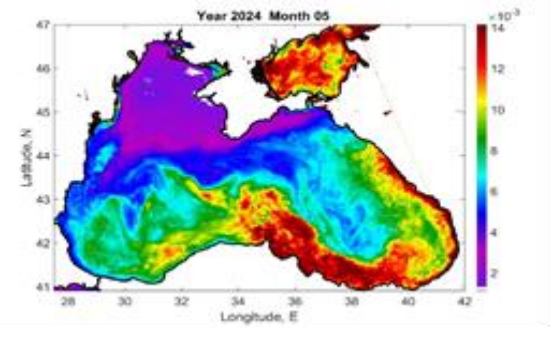
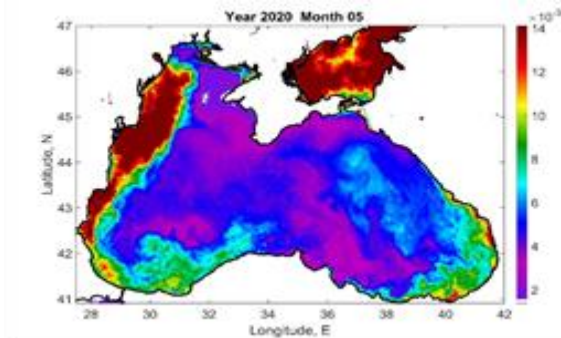
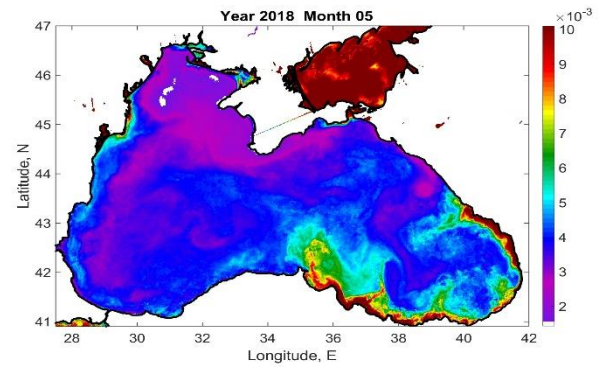
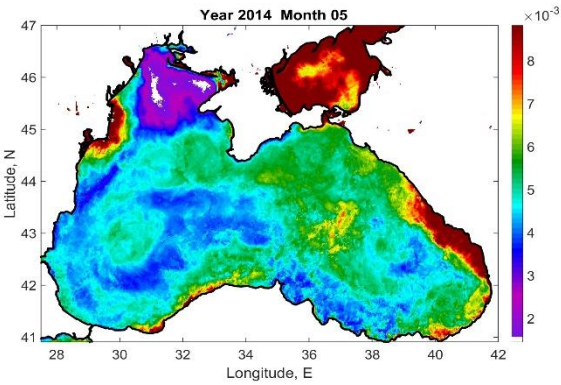
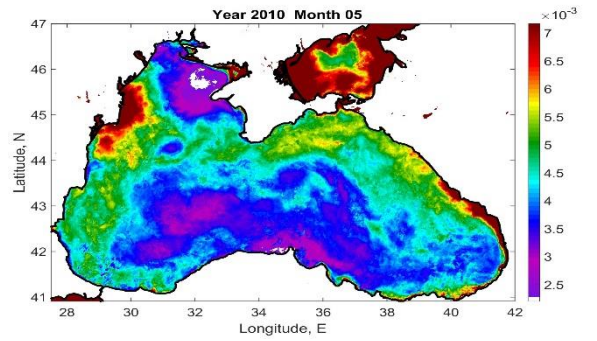
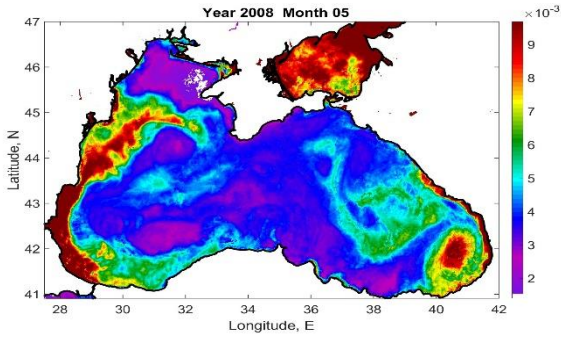
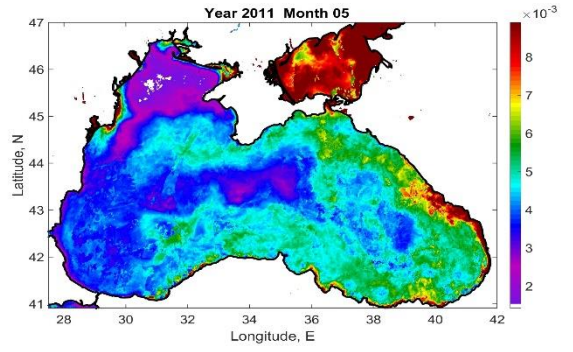
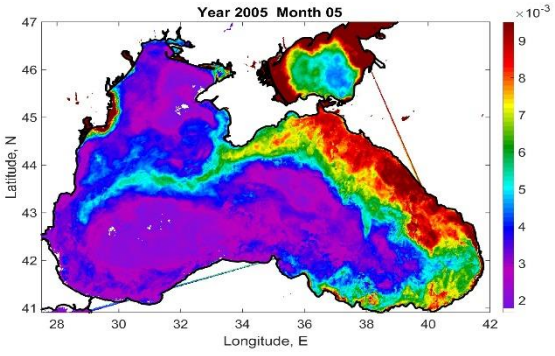
1. Алескерова А.А. Субмезомасштабные динамические процессы и их влияние на распределение взвешенного вещества у берегов Крыма. Морской гидрофизический институт РАН. Севастополь. – 2022. 153 с.
2. Андреев Д.Н. Экологическая оценка по данным спутниковых наблюдений. Пермь: Издание Пермь, 2010 г., 36 с
3. Бакуева Я.И. Особенности сезонной изменчивости концентрации хлорофилла А в различных регионах Южной Атлантики по спутниковым данным // Бакуева Я.И., Кубрякова Е.А., Кубряков А.А. Морской гидрофизический журнал. Том 39, №1. Севастополь. – 2023. – С. 31-51.
4. Востокова А.С. Исследование сезонной многолетней изменчивости фитопланктона в Черном море по спутниковым и экспедиционным данным. Москва. – 2024.
5. Востоков С.В., Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Черном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла а //Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М.// Доклады АН. - 2019. - С.99-103.
6. Востоков С.В., Салинг И.В., Востокова А.С. Изучение влияния температурных условий на развитие летних цветений кокколитофорид в Черном море по данным дистанционного зондирования. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва. – 2023.
7. Государева О.И. Об исследовании поверхностных вод на основе данных космических спутников. // Земля из космоса. №11// Москва. – 2020. С.35-39.
8. Корчемкина Е.Н. Влияние случаев цветения кокколитофорид на биооптические характеристики вод Черного моря по данным наблюдений в 2012 и 2017 годах // Корчемкина Е.Н., Маньковская Е.В., Ли Р.И. Статья ИнБЮМ, ГидроФИЗ. Севастополь. - 2020. 14 с.
9. Копелевич О. В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров света 1998-2017 гг. // О.В. Копелевич., И.В. Салинг, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец и др.// ФГБУ науки, Институт океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН). Москва. – 2018.
10. Копелевич О. В. Исследование кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по спутниковым данным. Шестая Школа-семинар "Спутниковые методы и системы исследования Земли. Таруса. Москва. – 2015.
11. Кубряков А.А. Летнее и зимнее цветение кокколитофоров в Черном море и его влияние на производство растворенных органических веществ по данным Bio-Argo // Кубряков А.А.

12. Кубрякова Е.А. Зимнее «цветение» кокколитофорид в Черном море по спутниковым данным и измерениям буев Био-Арго: межгодовая изменчивость и возможные причины возникновения // Кубрякова Е.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. // Материалы конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь. – 2024.
13. Кубряков А.А. Изменчивость динамики вод Черного моря на сезонных и межгодовых масштабах и ее влияние на морскую экосистему. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Морской гидрофизический институт РАН. - Севастополь, 2023. 46 с.
14. Кубряков А.А. Влияние физических факторов на биологические характеристики морских экосистем. Морской Гидрофизический Институт РАН. – Севастополь, 2022.
15. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Аномальное цветение кокколитофорид в восточной части Черного моря, выявленное по спутниковым данным. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса//Т.16. №. 1. Москва. – 2019. С. 248-253.
16. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Черного моря в холодный сезон. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса//Т.18. №. 1. Москва. – 2021.
17. Ольштынская А.П. Диатомеи и кокколитофориды в голоценовых экосистемах прикерченского сектора Черного моря // Экосистемы, их оптимизация и охрана// вып.11. Киев. – 2014. С.82-88.
18. Панасюк М.В., Сафиоллин Ф.Н., Логинов Н.А., Пудовик Е.М. Фотография, фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли. Казань: Учебное пособие для студентов, 2018, 121 с.
19. Повалишников Е.С. Ефимова Л.Е., Головлева В.О. Применение методов дистанционного зондирования для мониторинга водных объектов в пределах ООПТ. МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва. 2013.
20. Стельмах Л.В. Эколого-физиологические основы развития весеннего «цветения воды» кокколитофоридой *Emiliana huxleyi* в Черном море. ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского Севастополь. – 2018.
21. Тебацо М. Молото. Дистанционное зондирование состава сообщества фитопланктона в северной части Бенгельской апвеллинговой системы. Отделение экологических наук и менеджмента, Северо-Западный университет, Почефструм, ЮАР. – 2023.
22. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Кривенко О.В. Цветение кокколитофорид в Черном море по данным дистанционного зондирования в 1998-2023 годах: интенсивность и частота. // Морской гидрофизический журнал Т. 40, №6. Севастополь, 2024.

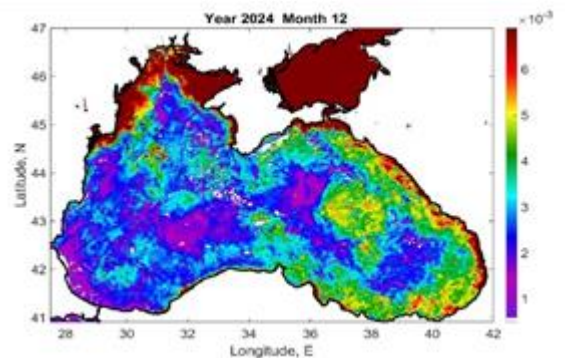
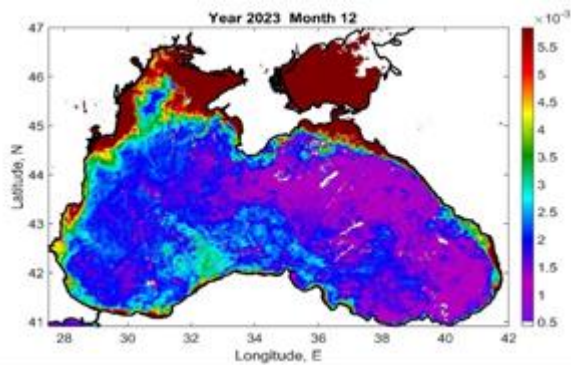
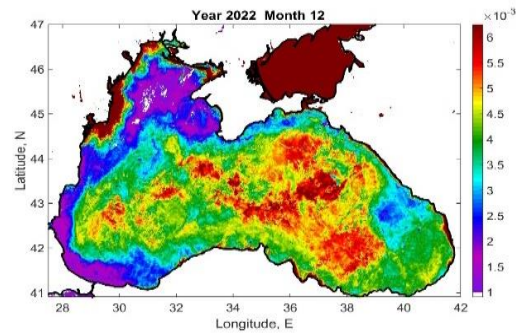
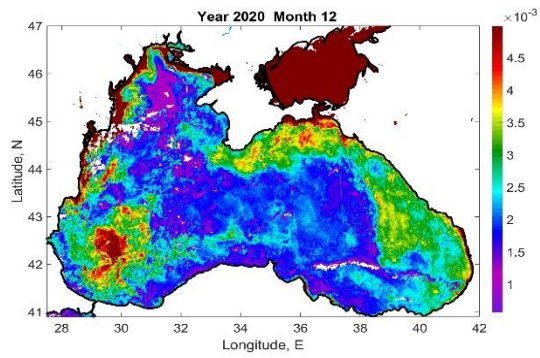
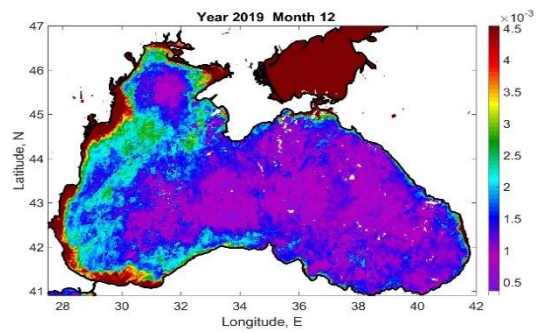
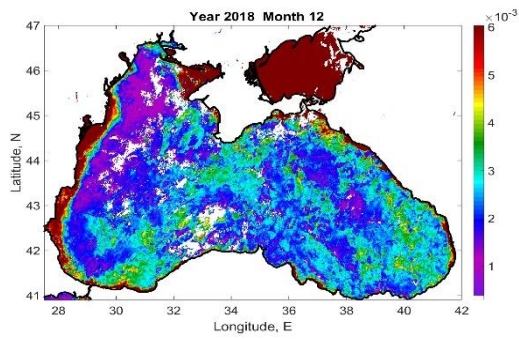
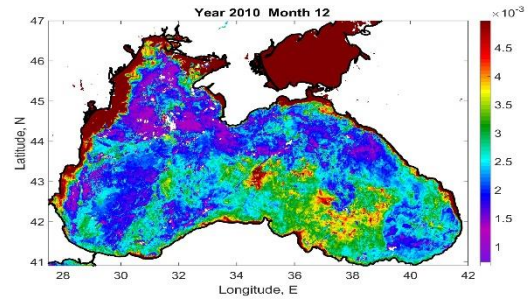
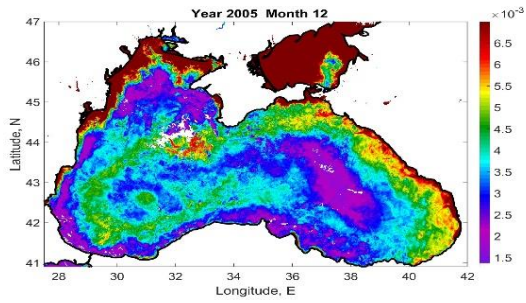
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Карты численности кокколитофорид в начале лета период с 2005 по 2024 год



Приложение 2
Карты численности кокколитофорид в зимний период с 2005 по 2024 год

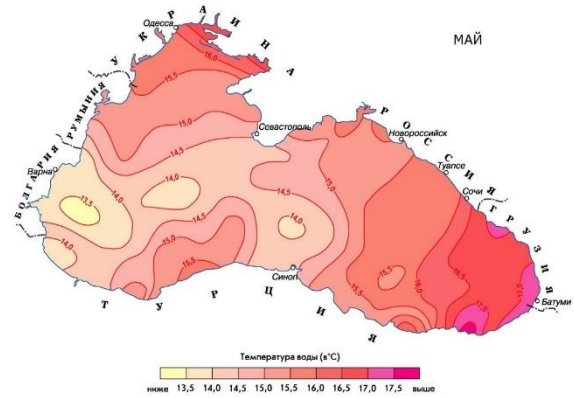


Приложение 3

Спутниковое изображение в видимом цвете массового размножения кокколитофорид в мае 2025 года (а), и температура воды на поверхности моря в мае 2025 года (б)



а)



б)

Приложение 4

Прогноз вылова рыбных ресурсов до 2035 года

Диаграмма 4.1




Рис. 4.1 – Диаграмма прогноз вылова до 2040 года. Данные до 2017 года Е.А. Кожурина «Динамика уловов промысловых рыб Крыма в Черном море», Керчь - 2018 г.

Приложение 5

Отзыв индивидуального предпринимателя компании рыбной отрасли в
г. Севастополе Бычкова Андрея Владимировича.

ИП Бычков Андрей Владимирович
Севастополь ОГРНИП: 316920400054700 ИНН: 920156949306 Действующий



ИП БЫЧКОВ А.В.


ИП Бычков Андрей Владимирович

299006 г. Севастополь ул. А. Косарева д. 3 кв. б. ИНН 920156949306 ОГРНИП
316920400054700 р/с 40802810323970000661 Банк ВТБ (ПАО) г. Симферополь БИК
044525411 к/с 3101810145250000411 +79788455675

Исследовательская работа Спиркиной Марии «Изучение кокколитофоридных цветений в Черном море по спутниковым данным» имеет большое значение для рыбохозяйственного комплекса российского сектора черноморского побережья. Нас заинтересовали выводы, сделанные автором в ходе сопоставления спутниковых снимков за большой временной период с условиями среды и с реальным явлением цветения водорослей. Убедительно и достоверно показана в работе ситуация по максимальному (за последнее десятилетие) вылову рыбы в 2013 году, которая действительно наблюдалась после аномально холодной зимы. Кроме того, в исследовании выявлена закономерность, которая тоже заслуживает нашего внимания. В работе сказано, что эффективные показатели вылова летом ожидаемы в центральной части моря, а в осенне-зимний — на периферии черноморского бассейна. Отмечена и цикличность массового цветения водорослей, что влияет на продуктивность вод моря в целом и на вылов рыбных ресурсов в частности.

Работа имеет научно-обоснованные выводы, которые можно использовать в нашей деятельности. Исследование построено на хорошей доказательной базе. Современный метод дистанционного зондирования, который становится важнейшим инструментом для изысканий, позволит добиться высокой эффективности добычи рыбных ресурсов и составлять прогнозы на будущее.

Компания благодарит автора за проделанную работу.

Индивидуальный предприниматель  Бычков А.В.