

Санкт-Петербургский Государственный университет

**КУЗЬМИНА Софья Константиновна**

**Выпускная квалификационная работа**

***Пространственно-временная изменчивость первичной продукции в океане и её связь с физическими и биологическими параметрами среды на примере Атлантического сектора Арктики***

Бакалавриат:

*05.03.04 «Гидрометеорология»*

*СВ.5021.2018 «Гидрометеорология»*

Профиль «Океанология»

**Научный руководитель:**

доцент кафедры океанологии СПбГУ  
к.г.н. Лобанова П.В.

**Рецензент:**

Руководитель лаборатории географии и гидрологии ИВПС КарНЦ РАН  
к.г.н. Толстиков А.В.

Санкт-Петербург

2022

## Оглавление

Введение.....	2
Глава 1. Описание объекта исследования .....	5
1.1. Первичная продукция фитопланктона.....	5
1.2. Влияние параметров среды на продуктивность вод океана .....	5
1.3. Район исследования .....	8
1.4. Видовой состав Арктического фитопланктонного сообщества.....	12
1.5. Алгоритмы восстановления ПП океана.....	13
Глава 2. Данные и методы.....	15
2.1. Машинное обучение. Алгоритм Random Forest.....	16
Глава 3. Результаты.....	19
3.1. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-а и параметров среды .....	19
3.2. Пространственно-временная изменчивость связи между концентрацией хлорофилла-а и параметрами среды .....	22
3.3. Результаты моделирования .....	29
3.3.1. Факторы, определяющие изменчивость продуктивности вод Арктики.....	29
3.3.2. Прогноз положения высокопродуктивных зон с использованием машинного обучения .....	34
Заключение .....	42
Список литературы .....	44
Приложение .....	50

## Введение

Исследование продуктивности Мирового океана – важная и актуальная часть современных океанографических исследований, дающая представление о биологических, химических и физических процессах в его продуктивном слое. Продуктивность фитопланктонного сообщества является индикатором изменчивости содержания кислорода и углекислого газа в воде, тем самым может использоваться как индикатор климатических изменений.

Первичная продукция (или продуктивность) фитопланктона (ПП) – это часть органического вещества, оставшаяся после использования его автотрофными организмами на дыхание, которая тратится на увеличение их фитомассы (Алимов, 1989). На нее влияют химические и физические параметры среды – освещенность, содержание в воде микроэлементов, необходимых фитопланктону для фотосинтеза и роста, и температура воды.

Главная проблема исследования ПП в Мировом океане в целом, а в Арктике особенно, — это недостаток *in situ* данных для проведения статистически значимого анализа ее пространственно-временной изменчивости. Бассейн Северного Ледовитого океана большую часть года покрыт непроходимым льдом, поэтому рейсы для сбора данных возможны только в ограниченный временной период для ограниченного пространства.

Решением данной проблемы может послужить использование спутниковых данных для изучения продуктивности арктического бассейна (Lee et al., 2015). В последние 20 лет покрытие Северного Ледовитого океана спутниковыми данными концентрации хлорофилла-а (Хл-а) в поверхностном слое, температуры поверхности океана (ТПО), солёности, поступающей на поверхность фотосинтетически активной радиации (ФАР) и пр. значительно увеличилось в масштабах, пространственно-временном разрешении и качестве предоставляемых данных. Таким образом, используя спутниковые данные влияющих на ПП параметров среды, современные исследователи могут изучать продуктивность Северного Ледовитого океана.

Исследование ПП на основе спутниковых данных также дает основу моделированию ПП Арктического бассейна: определив, какой вклад в изменчивость концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое океана вносят различные факторы среды, можно предложить алгоритм восстановления ПП для морей Арктического региона (Slagstad & Stole-Hansen, 1991, Skogen et al., 1995).

Изучаемая в работе акватория (Баренцево, Норвежское и Гренландское моря) является местом смешения Арктических и Атлантических вод, водообмен в ней зависит от сроков образования и таяния льда. В связи с современными изменениями климата, кромка льда на акватории стала уходить на север, площади льда в районе уменьшаются (Stroeve & Notz, 2018). Увеличившееся в связи с этим проникновение Атлантических вод в регионы, исторически подвергавшиеся большему или сопоставимому влиянию Арктических водных масс, приносит с собой новые виды фитопланктона, которым теперь более комфортно существовать в северных водах (Oziel et al., 2020). К тому же, уменьшение периода, когда акватория покрыта льдом, и повышение температуры вод стимулируют более продолжительную продукцию фитопланктона. Все это ведет к повышению продуктивности района (Arrigo et al., 2008).

Целью работы является анализ связи изменчивости концентрации хлорофилла-а с изменчивостью параметров среды для вод Баренцева, Норвежского и Гренландского морей. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Освоить алгоритм машинного обучения Random Forest;
2. Создать базу спутниковых данных: массивы значений Хл-а, ТПО, ФАР, солёности, глубины эвфотического слоя (Zeu), глубины перемешанного слоя (ГПС);
3. Провести анализ пространственно-временной изменчивости массивов используемых данных;

4. Проанализировать зависимость изменчивости Хл-а от изменчивости параметров среды;
5. Создать алгоритм оценки продуктивности района исследования и оценить его точность.

Тема выпускной квалификационной работы предложена ФГБНУ "КамчатНИРО", научным консультантом выступала руководитель Лаборатории рыбохозяйственной экологии КамчатНИРО к.б.н. Лепская Е.В.

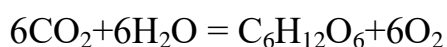
## **Глава 1. Описание объекта исследования**

### **1.1. Первичная продукция фитопланктона**

Первичная продукция фитопланктона определяет продуктивность вод Мирового океана. Поскольку продуктивность автотрофных организмов определяется процессами фотосинтеза, для которых необходим пигмент хлорофилл-а, то для оценки продуктивности вод в работе использована пространственно-временная изменчивость Хл-а.

Первичная продукция фитопланктона является индикатором продуктивности всего сообщества в океане: фитопланктон – это начальное автотрофное звено трофической цепи морского сообщества. Таким образом, ПП дает представление о количестве органического вещества, поступившего на следующий трофический уровень.

Первичную продукцию океана можно оценить через ее прямую связь с концентрацией хлорофилла-а, поскольку производство органического вещества происходит в результате процессов фотосинтеза с помощью пигмента хлорофилла (главный для фитопланктона – хлорофилл-а (Sauer et al., 2012)). В ходе фотосинтеза организмы синтезируют органические соединения углерода (глюкозу) из неорганических (углерод и вода), используя для этого световую энергию:



Фотосинтез при этом проходит в два этапа: световую и теньевую фазу, для первой из которых необходим свет. Поэтому в период полярной ночи фотосинтез проходить не может, и продуктивность Арктических морей сильно ограничена их широтным положением.

### **1.2. Влияние параметров среды на продуктивность вод океана**

Основная масса органического вещества в океане производится фитопланктоном – он определяет продуктивность океана. Фитопланктон – это

микроводоросли, свободно плавающие в толще воды. Их потребляют в пищу зоопланктон, рыбы и другие животные океана (Моисеев, 1969).

Для прохождения реакции фотосинтеза фитопланктону необходим свет – конкретно свет при длинах волны от 400 до 700 нм – **фотосинтетически активная радиация** (Morel, 1978). Без света не сможет пройти световая фаза фотосинтеза, и фитопланктон не сможет синтезировать молекулу глюкозы. Таким образом, зона фотосинтеза находится в верхнем освещенном слое, где и сосредоточена основная масса фитопланктона, – этот слой называется эвфотический (Моисеев, 1969). Понятие эвфотического слоя исходит из понятия компенсационной глубины – горизонта, на котором затраты на дыхание равны производству органики (Sverdrup, 1953). Для фитопланктона этой глубиной является горизонт, на который поступает 1% от поверхностной ФАР. Слой воды до этой глубины – эвфотическая зона или слой (Одум, 1986).

Фотосинтез возможен только в этом слое, поэтому ПП в океане определяется соотношением глубины эвфотического и перемешанного слоев: поскольку фитопланктон не способен передвигаться сам, его положение в водной колонне определяется вертикальными и горизонтальными движениями в океане, в том числе степенью стратифицированности водной колонны. Планктонные организмы будут в основном скапливаться в верхнем перемешанном слое, и не смогут опуститься ниже пикноклина, – находящегося на ГПС, – из-за своего малого веса. Таким образом, если ГПС будет располагаться ниже глубины эвфотического слоя, реакция фотосинтеза не сможет протекать в части фитопланктонного сообщества.

Температура поверхности океана (ТПО) даёт понимание общей динамики изменчивости температур в верхнем перемешанном (однородном) слое. Продуктивность воды может быть лимитирована температурой, поскольку при наиболее благоприятной освещенности при низких температурах максимальная скорость фотосинтеза не будет оптимальной по

сравнению с более теплыми водами, при этом скорость невозможно будет увеличить изменением других условий среды (Talling, 1957).

Температура и **солёность** воды также определяют стратифицированность вод – тем самым определяя глубину пикноклина: повышение температуры и снижение солёности верхних слоев способствует стратификации, которая двояко влияет на продуктивность водной колонны: с одной стороны, стратификация вод может не позволять фитопланктону опускаться на горизонты, лежащие ниже компенсационной глубины, способствуя росту валовой продуктивности сообщества. С другой стороны, пикноклин, образующийся в стратифицированной колонне, ограничивает поступление вод с более глубоких слоёв, богатых биогенными микроэлементами, к поверхностному слою (Teira et al., 2005).

Биогенные элементы (**БЭ**) необходимы фитопланктону для фотосинтезирования и роста. Ими являются фосфор, азот, кремний и др., встречающиеся в водах океана в виде фосфатных соединений ( $\text{PO}_4$ ), нитритов, нитратов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ), аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), силикатов ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) и др., поступающие в океан с материковым стоком (Моисеев, 1969), а также из нижележащих слоёв в результате различных движений вод: конвективное и ветровое перемешивание столба воды, подъём вод в зонах апвеллингов и дивергенций течений, вертикальный и горизонтальный перенос планетарными волнами Россби, процессы во фронтальных зонах и вихрях. Часто БЭ являются ограничивающим фактором для скорости роста, поскольку в толще воды их ограниченное количество: в весеннее «цветение» в первую очередь усваиваются все БЭ, поступившие в поверхностные горизонты в ходе зимней конвекции, однако после, с ростом температуры, устанавливается пикноклин, предотвращающий вертикальное перемешивание вод и не позволяющий БЭ в дальнейшем поступать из более глубоких горизонтов в поверхностные.

Наконец, температура и солёность вместе являются индикаторами материкового и ледникового стока, а также таяния морского льда, которые



способствуют увеличению концентрации Хл-а в воде. Материковый и ледниковый стоки приносят с собой повышенные концентрации БЭ, в т.ч. силикатов, необходимых диатомовым водорослям для построения своего скелета (Anderson, 1986). В то же время, таяние морского льда сопровождается формированием довольно резкого пикноклина (вызванного тонкой пленкой пресной воды на поверхности воды), на котором фитопланктон комфортно продуцирует даже при неглубоком залегании эвфотического слоя (т.е. при низкой освещенности), а также периодического апвеллинга, вызванного катабатическими ветрами, приходящими с поверхности льда (Alexander & Niebauer, 1981). В совокупности эти процессы позволяют фитопланктону не опускаться ниже еще не глубокой освещенной зоны, при этом некоторое время не испытывая недостаток БЭ, поступающих с локальным апвеллингом с более глубоких горизонтов (Hegseth & Sundfjord, 2002, Perette et al., 2011). Благодаря этим явлениям в морях высоких широт иногда наблюдаются зоны кратковременной повышенной продуктивности в период, непосредственно предшествующий «фенологической» волне «цветения» (Tremblay & Gagnon, 2009, Vorstad & Gower, 1984). При этом Хл-а, связанный с попадающими в воду из льда водорослями, не будет отражаться на среднемесячных спутниковых картах, поскольку он быстро опускается в нижние слои океана (Riebesell et al., 1991).

### **1.3. Район исследования**

В качестве района исследования выбраны моря Северо-Европейского бассейна – Баренцево, Норвежское и Гренландское моря, – через которые воды Атлантического океана поступают в Северный Ледовитый. Район называют Европейским Арктическим коридором (ЕАК) (Wassmann et al., 2010).

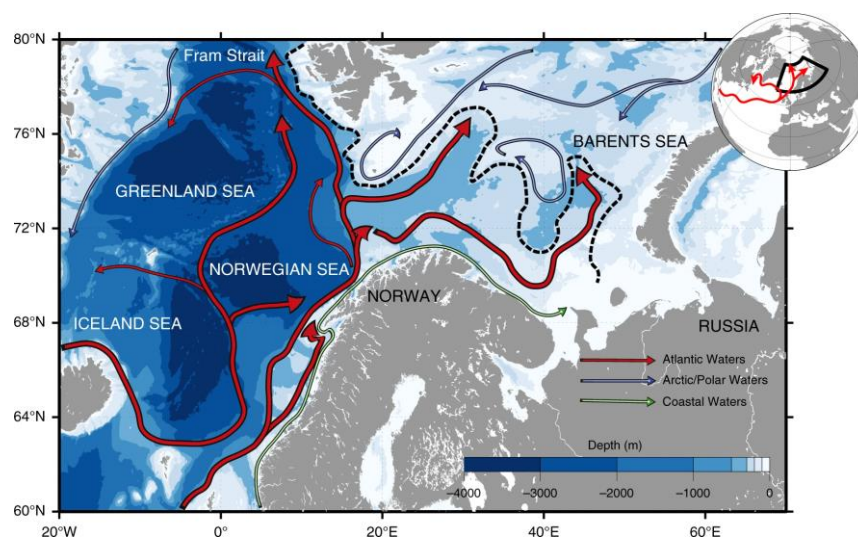


Рисунок 1. Карта района исследования. Greenland Sea – Гренландское море, Barents Sea – Баренцево море, Norwegian Sea – Норвежское море. Atlantic waters – воды Атлантического океана, Arctic Polar Waters – воды Северного Ледовитого океана. Источник: Oziel et al., 2020.

В районе сталкиваются два типа водных масс: теплые и солёные воды, приносимые Северо-Атлантическим течением, и холодные и относительно пресные воды Арктического бассейна. В зонах смешения вод образуются полярные фронты, на границах которых благодаря скоплению там фитопланктона и БЭ образуются зоны повышенной продуктивности океана. В том числе благодаря этому, почти 50% общей ПП Арктического бассейна происходит в ЕАК (Oziel et al., 2020, Sakshaug, 2004).

Северо-Атлантическое течение проникает в Баренцево море, разветвляясь на две ветви в районе 70 с.ш.: первая ветвь продолжает свое течение на север, а другая уходит на восток, проникая в Баренцево море.

### *Баренцево море*

Баренцево море – крайнее море Северного Ледовитого океана. На юге ограничено северным берегом Евразии, на западе граничит с Норвежским морем, на севере открыто к Арктическому бассейну, а на востоке граничит с Карским морем. Площадь акватории составляет 1,4 млн км<sup>2</sup>, глубины моря небольшие, в среднем около 200 м, максимальная глубина – 600 м. Температура и солёность моря контролируются Атлантическими и

Арктическими водами: с запада в море приходит тёплая и солёная вода (12-14°C, 35 psu), поэтому эта часть моря довольно хорошо прогрета и не замерзает зимой; с севера и востока море контролируется холодными и опресненными водами (32-33 psu), большая часть вод имеет низкие температуры, чаще всего опускающиеся ниже 0°C на глубинных горизонтах, зимой почти все море покрывается льдом. В последние годы (с 2000 г) Атлантические воды начали занимать большую часть моря по сравнению с предыдущими периодами (Oziel et al., 2016).

Порядка 1,1 Sv Атлантической водной массы (солёностью больше 34,9 psu) приходит в Баренцево море через Западный желоб, частично трансформируясь и опресняясь на поверхности, частично уходя в подповерхностный слой (Skagseth, 2008). Характерной чертой циркуляции в Баренцевом море являются полярные фронты, возникающие при столкновении тёплых и холодных вод: как известно, в этих районах ПП повышена (Longhurst, 2007). Это связано с возникновением в районе фронтов вертикального перемешивания, которое разрушает стратификацию и приносит на поверхность БЭ, а также с дополнительным скоплением БЭ в зонах фронтов в связи с горизонтальным движением вод.

#### *Гренландское и Норвежское моря*

Гренландское море – окраинное море Северного Ледовитого океана. На юге ограничено Исландией и Норвежским морем, на западе ограничено Гренландией, на севере открыто к Арктическому бассейну, а на востоке граничит с Баренцевым морем. Общая площадь моря 1,2 млн км<sup>2</sup>, средняя глубина – 1500 м, максимальная – 5527 м.

Норвежское море – окраинное море Северного Ледовитого океана. На юге граничит с Атлантическим океаном и Северным морем, на западе ограничено Исландией, на севере граничит с Гренландским и Баренцевым морями, а на востоке граничит с Норвегией.

Термохалинная структура вод в обоих морях сопоставима и обусловлена в основном меридиональной циркуляцией, проходящей через моря: на западе через моря проходят холодные и пресные воды Арктики (солёность 32 psu), на востоке – тёплые и солёные воды Норвежского течения (солёность 34-35 psu). Средняя температура на поверхности от -1°C на севере до 1-2°C на юге зимой, летом температуры повышаются до 0°C на севере и 6°C на юге. В открытой части морей образуется большое количество круговоротов, возникает глубокая конвекция.

### *Биогеографические провинции*

А. Лонгхерст выделяет район ЕАК в трёх биогеографических провинциях: Атлантическая Арктическая провинция (ARCT), в которую входит Гренландское море, Атлантическая Субарктическая провинция (SARC), куда входят Норвежское море и южная часть Баренцева моря, и Бореальная Полярная провинция (BPLR), куда входит северная часть Баренцева моря (Longhurst, 2007).

«Цветение» фитопланктона в двух более южных провинциях приходится на тёплый период, когда освещенности в полярных районах достаточно для прохождения фотосинтеза, и начинается с середины апреля – мая и может продолжаться до августа-сентября. Первый пик «цветения» проходит весной, когда тает лед, повышается освещенность и температура: в этот период продукция может достигать  $1000 \text{ мг С м}^{-2} \text{ д}^{-1}$ , хотя обычно весенняя продукция достигает порядка  $300\text{-}400 \text{ мг С м}^{-2} \text{ д}^{-1}$ . Повторное «цветение» наблюдается в сентябре и октябре, что связано с разрушением летней стратификации, а также может быть вызвано уходом из вод растительноядных животных, поглощающих фитопланктон.

«Цветение» фитопланктона в BPLR в целом повторяет сезонный цикл «цветения» в предыдущих двух провинциях (хотя и наступает несколько позже – в конце мая-начале июня), однако имеет важную особенность: на

кромке тающего льда в провинции наблюдается повышенная ПП (более 1000 мг С м<sup>-2</sup> д<sup>-1</sup>), связанная с вертикальным перемешиванием, вызванным ветровым апвеллингом рядом с кромкой тающего льда, и поступлением на поверхность большого количества БЭ.

Вертикальный профиль хлорофилла-а в данных морях характеризуется его глубоководным максимумом (ГМХ), связанным с развитой стратификацией вод и доступом к БЭ: в большей части Арктического региона присутствует довольно глубокий (до 30-40 м) полярный перемешанный слой (ППС), бедный на необходимые диатомовым водорослям азотсодержащие БЭ (Tremblay et al., 2008). Поэтому ГМХ располагается чуть ниже и обусловлен в исследуемых акваториях даже не пикноклином, а нитраклином, предоставляющем фитопланктону недостающие в ППС микроэлементы (Tremblay et al., 2008; Martin et al., 2010; Ardyna et al., 2011). Это может дополнительно ограничивать продуктивность ЕАК, поскольку глубина эвфотического слоя не всегда коррелирует с глубиной пикно- и нитроклина.

#### **1.4. Видовой состав Арктического фитопланктонного сообщества**

Видовой состав в районе изменяется вместе с изменениями условий среды: как только на поверхность поступает достаточное количество ФАР, начинается весеннее «цветение». В этот период, когда в воде достаточно кремния и азота, в сообществе доминируют диатомовые водоросли (которым кремний необходим для построения скелета, а нитраты для которых являются главным ограничивающим БЭ) и лишь частично – кокколитофоры и динофлагелляты (Longhurst, 2007). По мере выедания БЭ на смену диатомовым приходят более устойчивые к недостатку БЭ кокколитофоры (в основном это гаптофитовые водоросли класса *Prymnesiophyte*), пик которых не прослеживается по спутниковым данным концентрации Хл-а (поскольку кальциевый скелет кокколитофор не позволяет дистанционно увидеть пигмент хлорофилла-а в их клетках), поэтому по спутниковым данным Хл-а ПП

Арктики может казаться меньше *in situ* в летний период (Поздняков и Чепикова, 2020, Valch et al., 1991).

В последние 20 лет с изменением климата в Арктике (повышение температуры на поверхности, «атлантификация») в Баренцево море начали проникать виды фитопланктона, обычно встречаемые в Атлантических, а не Арктических водах; с каждым годом широты их встречаемости проникают глубже на север (Hegseth & Sundfjord, 2008).

### 1.5. Алгоритмы восстановления ПП океана

Моделирование ПП океана в целом делится на две школы: понимание ПП (1) как **процесса**, идущего с определенной скоростью в единичном объеме, и (2) как **количества субстанции**, образованной в единичном объеме за единицу времени (Лобанова, 2017). В случае второго определения продуктивности океана, мы можем рассматривать моделирование ПП как моделирование высокопродуктивных зон в океане (концентрации Хл-а более  $1 \text{ мг м}^{-3}$  (Valch, 1992, Carr, 2002)). В данной работе продуктивность ЕАК моделируется именно как пространственная изменчивость продуктивных зон в акваториях.

В современных исследованиях для восстановления площадей высокопродуктивных зон используются алгоритмы машинного обучения. В данной работе используется алгоритм Random Forest, использовавшийся ранее в экологических исследованиях (Cutler, 2007; Rivero-Calle et al., 2015).

Метод основан на классификации набора данных с помощью ансамбля «деревьев», каждое из которых «голосует» за наиболее подходящий класс моделируемого параметра (Breiman, 2001).

Алгоритм достаточно несложно выполнить с помощью программных пакетов таких языков программирования, как Python и R; при этом алгоритмы занимают относительно небольшое количество оперативной памяти и времени для реализации, что особенно важно для такого масштабного анализа.

С точки зрения статистики и оценки точности результата, алгоритм RF может в процессе моделирования избавляться от систематических ошибок или сводить их к минимуму, после моделирования можно оценить вклад параметров-предикторов в модель, получить оценки точности алгоритма. Алгоритм также может восстанавливать классы для нелинейных связей между параметрами, обрабатывать неполные в пространстве и времени данные; оценивать сложные связи предикторов, не переоценивая из-за этого данные.

## Глава 2. Данные и методы

Источники данных за период 2002-2019 гг.:

1. Спутниковые данные ФАР (моль квантов  $\text{м}^{-2}$  день<sup>-1</sup>) со спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) из базы данных NASA's Ocean Biology Processing Group пространственной дискретностью 4x4 км, осредненные за месяц;
2. Данные ТПО ( $^{\circ}\text{C}$ ) с радиометров AVHRR (The Advanced Very-High-Resolution Radiometer) и AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS) и спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) из базы данных NASA's Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, приведенные к пространственной дискретности 4x4 км, осредненные за месяц;
3. Спутниковые данные цвета океана из базы Ocean Colour Climate Change Initiative (OC CCI), версия 5: данные концентрации хлорофилла-а ( $\text{мг м}^{-3}$ ) и коэффициента диффузного ослабления нисходящего солнечного излучения для волны длиной 490 нм  $k_d\text{-}490$  пространственной дискретностью 4x4 км, осредненные за месяц;
4. Данные глубины перемешанного слоя (ГПС), полученные по методу Духовского Д. С.: за ГПС принималась глубина, где значения вертикального градиента плотности превышают два его локальных среднеквадратических отклонения на промежутке  $\pm 50$  м (Башмачников и др., 2018), профили получены из массивов EN4 Hadley Center data base и ARMOR;
5. Данные солёности (psu) с радиометра Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis (MIRAS) спутника Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) из базы данных European Space Agency (ESA) за период 2010-2019 гг. приведенные к пространственной дискретности 4x4 км, осредненные за месяц;

На основе спутниковых данных  $k_d\text{-}490$  восстановлена глубина эвфотического слоя (Zeu) по формулам (Лобанова, 2017):

$$k_d(PAR) = 0.0864 + 0.884 \cdot k_d(490) - 0.00137 \cdot [k_d(490)]^{-1}$$



$$z_{eu} = \frac{4.6}{k_d(PAR)}$$

Формула выведена из закона затухания света в морской воде, предполагая, что поверхностная радиация соответствует 100% ( $I_0$ ), а радиация на глубине эвфотической зоны ( $z$ ) – 1%:

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-k_d \cdot z)$$

Для оценки тесноты связей с помощью коэффициента корреляции ( $r$ ) использовалась классификация по Ивантеру Э.В., Коросову А.В. (Ивантер и Коросов, 1992). Связь сильная при  $r > 0.70$ ; средняя –  $0.50 < r < 0.69$ ; умеренная –  $0.30 < r < 0.49$ ; слабая –  $0.20 < r < 0.29$ , очень слабая –  $r < 0.19$ .

Все расчёты и построение графиков проводились с помощью программных пакетов Matlab R2021b, Python 3.10 и Excel 2019. Моделирование с помощью методов машинного обучения и визуализация полученных результатов проводились с помощью языка программирования Python версии 3.10 и соответствующих библиотек: matplotlib, pandas (визуализация), numpy (работа с массивами), scikit-learn (машинное обучение, кросс-валидация, проверка полученных моделей).

## **2.1. Машинное обучение. Алгоритм Random Forest.**

Для моделирования продуктивных зон океана использовался алгоритм машинного обучения Random Forest (RF) в задаче классификации. Метод основан на методе дерева принятия решений и утилизирует похожие принципы, уточняя результаты при помощи построения ансамбля деревьев принятия решений (Decision Trees). На каждой вершине дерева находится узел деления данных на случайные наборы. Каждый узел определяет некоторый простой критерий, по которому данные делятся на части: в конце

моделирования решение о классификации принимается методом большинства.

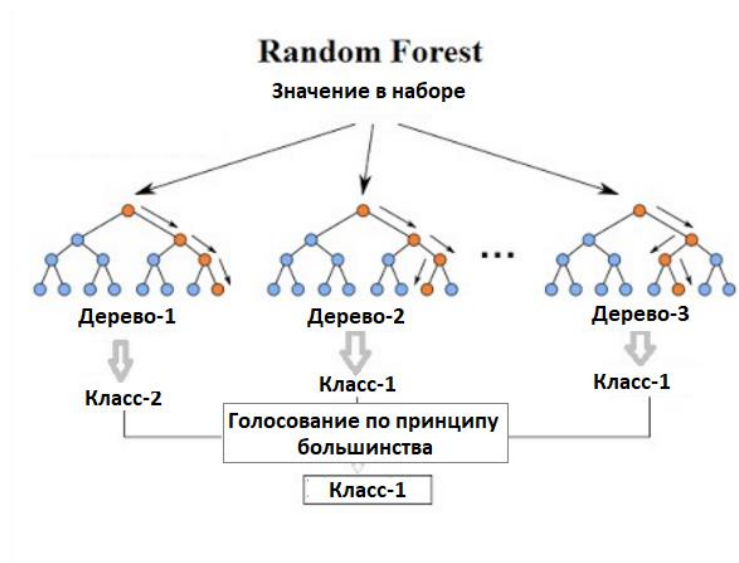


Рисунок 2. Схема принятия решений в алгоритме Random Forest. Источник: V. Jagannath.

Построение модели проводится следующим образом:

1. Определяется зависимая переменная – класс объекта, и независимые параметры-предикторы.
2. Набор данных делится на две выборки: обучающую и тестовую. Первая используется для создания модели, вторая – для проверки точности модели и поэтому не используется при построении модели. В работе использовано отношение обучающей и тестовой выборок 2:1.
3. В каждом узле «леса» строится дерево с подвыборкой значений обучающей выборки.
4. Для каждого узла дерева создается своя подвыборка с выбранным заранее количеством случайных признаков – эта величина равна корню из количества признаков.
5. Выбирается наилучший признак и расщепление по нему. Дерево строится либо до конца выборки, либо до достижения заранее

определенных параметров модели («чистоты листьев», глубины дерева и пр.).

Результаты работы моделей проверялись с помощью тестовой выборки. В результате работы модели получают количественные оценки качества модели: точность (precision), полнота (recall), и f1-score:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$f1 - score = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

где TP – истинно положительные, FP – ложно положительные и FN – ложно отрицательные значения, f1-score - взвешенное среднее между точностью и полнотой.

Для применения метода RF из всех имеющихся данных было создано 6 наборов данных: для 2010-2019 гг. для каждого из трех исследуемых морей (Баренцево, Норвежское и Гренландское моря). Решение создать по два набора данных для каждого из исследуемых морей связано с особенностями связей между Хл-а и глубиной эвфотического слоя в результате первичного моделирования (далее в Главе 3). Все значения концентраций хлорофилла-а были разбиты на наборы данных с двумя классами, отличающимися высоко- и низкопродуктивные зоны (или эвтрофные и олиготрофные воды) морей. Выделение классов определялось по пороговому значению концентрации Хл-а в  $1 \text{ мг м}^{-3}$  (Balch, 1992, Carr, 2002). Полученный набор данных был разбит на обучающую и тестовую выборку с соотношением 2:1. При выборе модели использовался метод кроссвалидации GridSearch, реализованный на Python 3.10 в библиотеке scikit-learn.

## Глава 3. Результаты

### 3.1. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-а и параметров среды

Проанализирована изменчивость концентраций хлорофилла-а как индикатора продуктивности вод и параметров среды, влияющих на его изменчивость. Результаты статистического анализа изменчивости для Хл-а представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Пространственно-временная изменчивость концентрации Хл-а [ $\text{мг м}^{-3}$ ] в исследуемых акваториях. СКО – среднеквадратическое отклонение, МО – математическое ожидание.

Район	Сезон	МО	СКО	Максимальное значение	Минимальное значение
Баренцево море	Весна	1,50	1,35	65,85	0,00
	Лето	0,92	1,25	82,82	0,00
	Осень	1,19	1,40	98,29	0,00
Гренландское море	Весна	0,72	0,88	38,84	0,00
	Лето	1,03	0,88	42,00	0,00
	Осень	0,91	0,63	61,59	0,00
Норвежское море	Весна	0,55	0,48	23,77	0,00
	Лето	0,88	0,45	24,01	0,03
	Осень	1,09	0,65	95,20	0,00

В Баренцевом море наблюдаются два пика «цветения» фитопланктона: весной и осенью, при этом весенний пик больше осеннего (МО = 1,50 и 1,19  $\text{мг м}^{-3}$  соответственно). Максимальные концентрации наблюдаются в осенний период, высокие значения связаны с повышенными концентрациями Хл-а в прибрежных районах.

В Норвежском море «цветение» наиболее активно в летний и осенний сезон (МО = 0,88 и 1,09  $\text{мг м}^{-3}$ ), при этом максимальные значения Хл-а осенью в акватории выше максимумов во все сезоны в других морях. Это может быть связано с протяженным продуктивным шельфом моря, наиболее благоприятными условиями для мощного «цветения» фитопланктона в море.

Для Гренландского моря средние концентрации Хл-а максимальны ( $MO = 1,03 \text{ мг м}^{-3}$ ) в летний и осенний периоды; это самое северное из исследуемых морей и для него наиболее выражена ограниченность поступающего на поверхность света. При этом максимальные значения Хл-а в море наблюдаются в осенний период (сентябрь-октябрь).

Наиболее высокие концентрации Хл-а наблюдаются в Баренцевом море за ним – Гренландское и Норвежское моря (в среднем в год 1,2, 0,89 и 0,84  $\text{мг м}^{-3}$  соответственно).

Проанализированы также изменчивости исследуемых параметров среды: ТПО, ФАР, Zeu, ГПС, солёность. Таблицы с характеристиками приведены в Приложении 1.

Средняя глубина эвфотического слоя максимальная летом в Баренцевом море и весной в Гренландском и Норвежском морях ( $MO = 31,56, 35,85, 37,20$  м соответственно). При этом в среднем глубины больше в Гренландском и Норвежском морях, чем в Баренцевом.

Глубина перемешанного слоя в Гренландском и Норвежском морях тесно связана с глубокой конвекцией в данных акваториях, поэтому может достигать величин до 2000 м. Средние максимальные ГПС наблюдаются во всех морях весной ( $MO = 51,93, 99,31$  и  $94,45$  м). Минимальные ГПС в морях примерно сопоставимы (13-16 м).

Температура поверхности океана минимальна весной, в период после зимних низких температур воздуха ( $MO = 0,20, 0,18, 5,42$  °C), и максимальна осенью, после продолжительного периода прогрева летом ( $MO = 4,84, 2,90, 9,70$  °C). В Гренландском море температура минимальная из всех исследуемых акваторий, в Норвежском – максимальная.

Фотосинтетически активная радиация примерно одинаково изменяется во всех морях, поскольку зависит в большей степени от широты акватории: летом значения максимальные, осенью – минимальные. Наибольшее в среднем

количество ФАР поступает в Норвежское море, однако в Баренцевом и Гренландском морях абсолютные сезонные максимумы ФАР почти всегда выше максимумов ФАР Норвежского моря.

Солёность изменяется в пределах от 20-23 psu в прибрежных распресненных водах до 37-38 psu в открытых водах. Солёность максимальна во всех морях в летний период (МО = 34,18, 34,81 и 33,90 psu), минимальна или близка к осеннему – в весенний (МО = 33,56, 34,86, 32,98 psu). Солёность в морях с обширным материковым стоком (Баренцевом и Норвежском) ниже, чем в Гренландском.

Таким образом, в исследуемых морях наблюдается два пика «цветения» фитопланктона: максимальный пик в весенний или летний период и менее сильный пик в осенний период.

### 3.2. Пространственно-временная изменчивость связи между концентрацией хлорофилла-а и параметрами среды

С помощью коэффициента корреляции оценены степени связи концентраций Хл-а как индикатора продуктивности вод моря и параметров среды. На рисунке 3 представлена среднегодовая карта коэффициента корреляции рядов Хл-а и эвфотической глубины в ячейках.

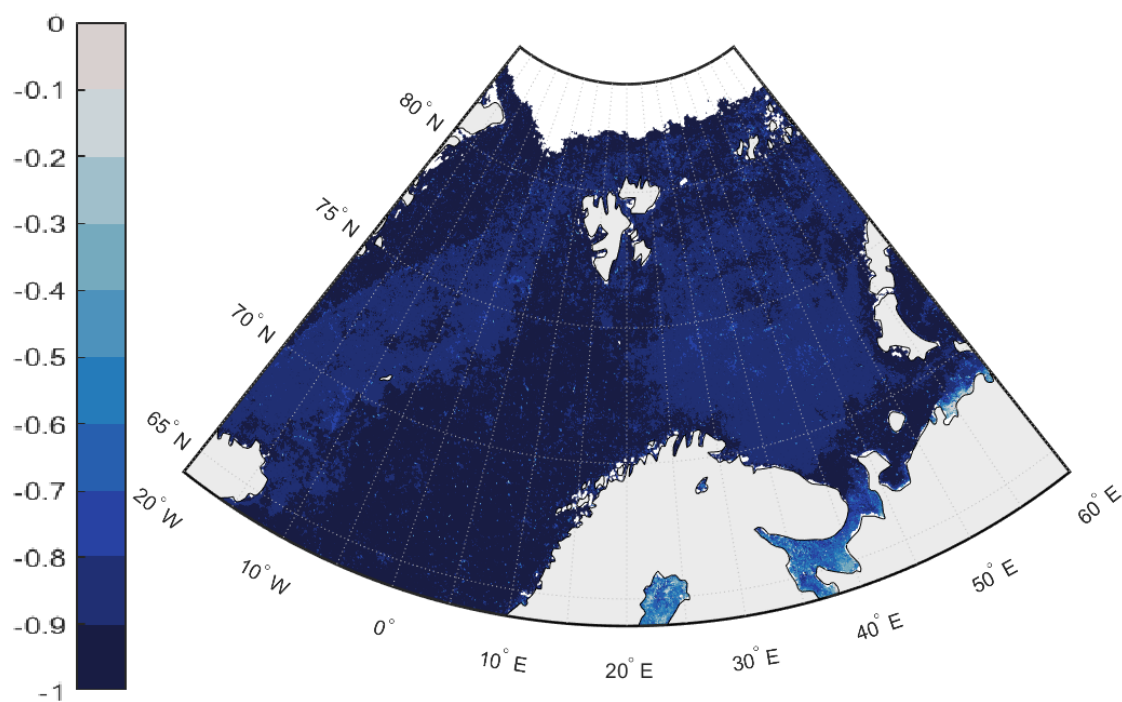


Рисунок 3. Пространственная изменчивость связи концентрации хлорофилла-а [ $\text{мг м}^{-3}$ ] с глубиной эвфотического слоя [м] в исследуемом районе за период 2002-2019 гг. Цветом показан коэффициент корреляции.

Наиболее сильная обратная связь ( $|r| > 0.9$ ) наблюдается в Норвежском море, в восточной и западной частях Гренландского и прибрежной части Баренцева морей. Несколько менее выраженная, но все еще сильная обратная связь ( $|r| > 0.8$ ) наблюдается в открытой части Баренцева и Гренландского морей.

Такая выраженная связь Хл-а с  $Z_{eu}$  объясняется несколькими процессами: во-первых, при «цветении» фитопланктон обладает свойством самозатенения (Shigesada & Okubo, 1981), когда при повышении концентрации Хл-а весной понижается  $Z_{eu}$  из-за вспышки «цветения» фитопланктона и

повышении концентраций взвеси в воде (фитопланктон); во-вторых, летом, когда концентрация Хл-а снижается из-за ограниченности БЭ,  $Z_{eu}$  наоборот увеличивается, т.к. снизившиеся концентрации взвесей в воде способствуют заглублению эвфотической глубины. Осенью же совместно работают два фактора: уменьшение  $Z_{eu}$  из-за снижения освещенности и уменьшение  $Z_{eu}$  из-за увеличения концентрации взвеси в воде (здесь взвесь – это фитопланктон, начавший свое второе сезонное «цветение»).

На рисунке 4 представлены карты коэффициента корреляции для рядов Хл-а и ТПО и ФАР в ячейках.

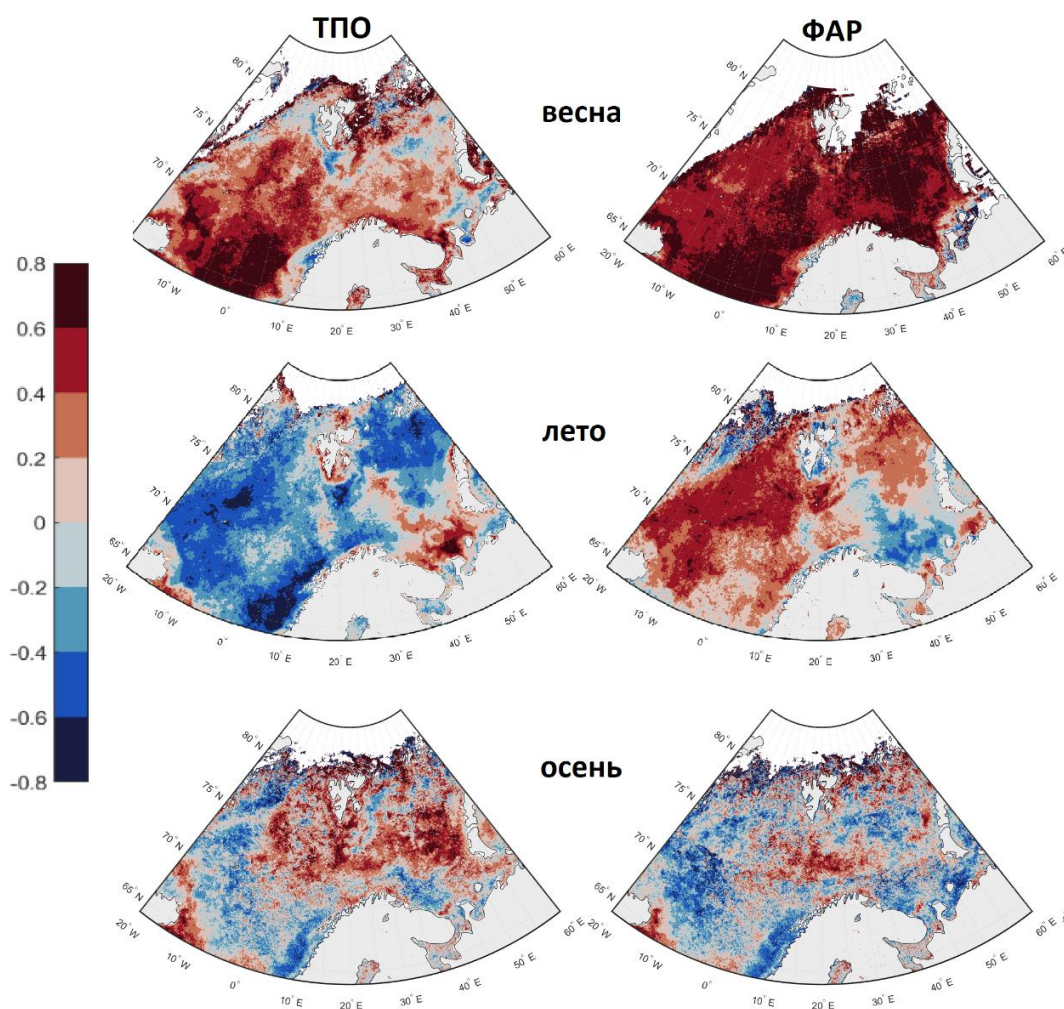


Рисунок 4. Пространственно-временная изменчивость связи концентрации хлорофилла-а [ $\text{мг м}^{-3}$ ] с температурой поверхности океана (ТПО) [ $^{\circ}\text{C}$ ] и фотосинтетически активной радиацией (ФАР) [ $\text{моль квантов м}^{-2} \text{день}^{-1}$ ] в исследуемом районе за период 2002-2019 гг. Цветом показан коэффициент корреляции, рассчитанный по сезонам.



Наилучшим образом связь между параметрами прослеживается в весенний период: в это время связь Хл-а с ФАР прямая, Хл-а с ТПО прямая в открытых водах, обратная – в прибрежных ( $|r| > 0.4$ , связь от сильной до умеренной (классификация связей приведена в Главе 2)). По распределению высоких корреляций Хл-а и ТПО прослеживается масса динамически активных Атлантических вод, по мере ослабления действия которых связь понижается.

Летом связь Хл-а с ТПО обратная в Норвежском и Гренландском морях, прямая – в южной и центральной части Баренцева моря ( $|r| = 0.4-0.6$ ), обратная картина летом между Хл-а и ФАР: связь прямая в Норвежском и Гренландском морях и северной части Баренцева, обратная – в прибрежной половине Баренцева моря ( $|r| = 0.6-0.8$ ).

Осенью структура связи Хл-а с параметрами среды становится еще сложнее: в открытых водах Баренцева и восточной части Гренландского моря связь Хл-а с ТПО прямая, слабее, чем весной. В прибрежных водах, западной части Гренландского и Норвежском море связь обратная. Связь Хл-а с ФАР по большей части обратная, в отличие от весеннего периода, и менее выраженная.

Характер связи Хл-а с ТПО объясняется сезонностью изменчивости этих параметров: весной и ранним летом, когда ТПО повышается, одновременно начинает цвести фитопланктон, летом же ТПО продолжает повышаться, устанавливается стратификация и фитопланктон перестает активно цвести – связь меняется на обратную. Наконец, осенью ТПО понижается, а концентрации Хл-а повышаются благодаря разрушению стратификации и поднятию с более глубоких горизонтов БЭ, или ТПО понижается и понижается вместе с ней Хл-а в период снижения активности фотосинтетических процессов. Прямые связи Хл-а с ТПО в летний период объясняются обильным материковым стоком, где ТПО является индикатором притока более теплых и богатых БЭ вод материкового стока или теплых Атлантических вод, вызывающих небольшое разрушение стратификации и поднятие БЭ в верхние

горизонты. Таким образом, ТПО в большей степени является индикатором изменчивости Хл-а, и в меньшей – параметром, непосредственно определяющим интенсивность продукции фитопланктона.

Связь Хл-а с ФАР определяется как фоточувствительностью процесса фотосинтеза, так и параллельным сезонным ходом изменчивости двух параметров: в период первой волны «цветения» связь между параметрами прямая, поскольку с повышением освещенности повышается ПП и тем самым концентрация Хл-а как ее индикатора (весна). С убыванием интенсивности ФАР – понижается максимальная скорость фотосинтеза, в то же время параллельно устанавливается стратификация и Хл-а понижается из-за ограниченности БЭ (лето). Осенью же связь преимущественно обратная, поскольку Хл-а повышается с разрушением стратификации и доступом к БЭ, а количество ФАР – продолжает снижаться.

На рисунке 5 представлены карты коэффициента корреляции для рядов Хл-а и солёности и ГПС в ячейках.

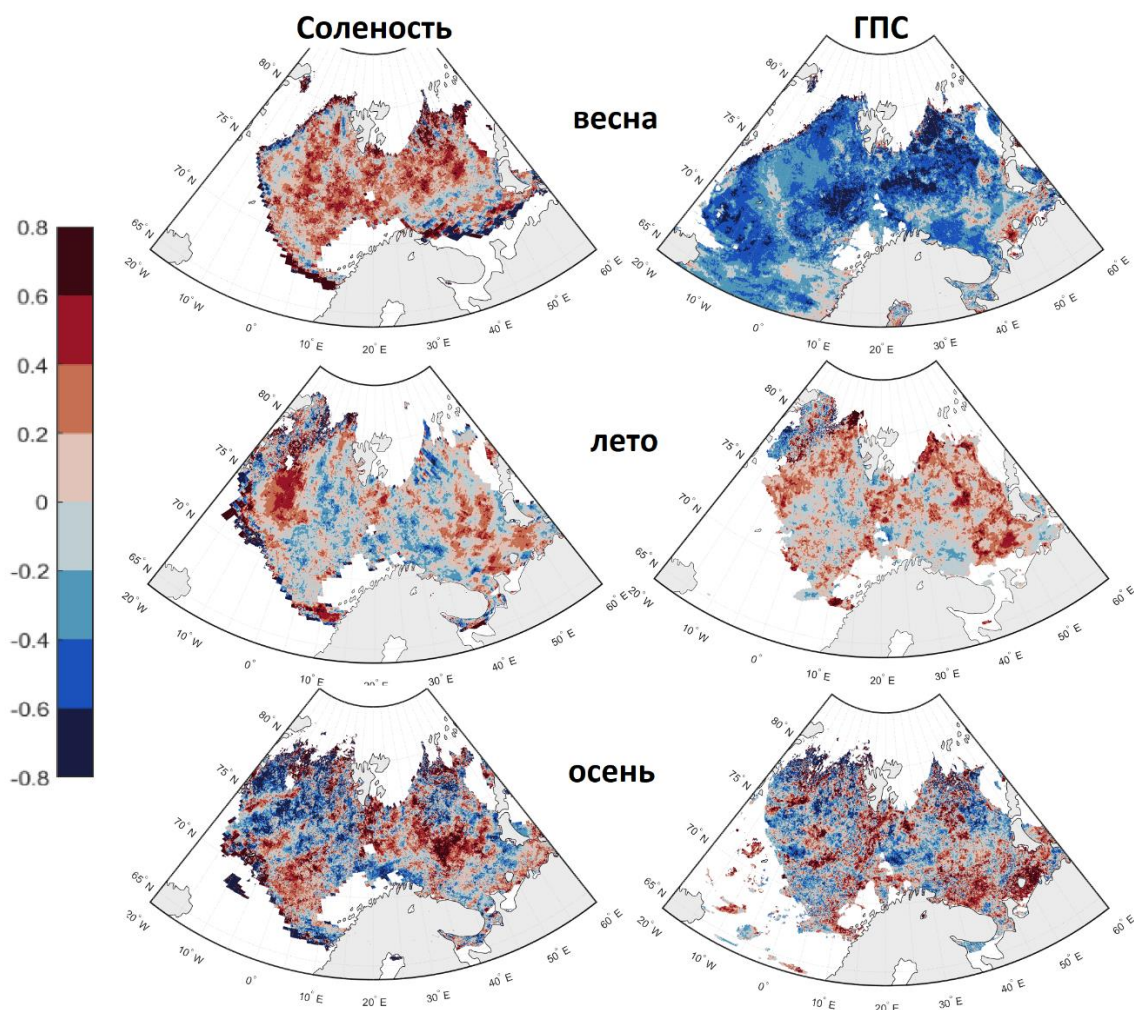


Рисунок 5. Пространственно-временная изменчивость связи концентрации хлорофилла-а [ $\text{мг м}^{-3}$ ] с солёностью [psu] и глубиной перемешанного слоя (ГПС) [м] в исследуемом районе за период 2002-2019 гг для ГПС и 2010-2019 гг для солёности. Цветом показан коэффициент корреляции, рассчитанный по сезонам.

Наиболее пространственно однородна связь между параметрами весной: прямая связь Хл-а с солёностью и обратная – Хл-а с ГПС ( $|r| = 0.4-0.6$ , связь от средней до умеренной).

Летом связь Хл-а с ГПС и солёностью по большей части слабая ( $|r| < 0.2$ ), умеренная положительная связь наблюдается на востоке Баренцева и, для ГПС, Гренландского моря. Для солёности также умеренная отрицательная связь наблюдается у побережья и на востоке Гренландского и Норвежского морей, а область положительной связи смещается на запад, в сторону смешения вод теплого Норвежского и холодного Восточно-Гренландского течений.

Осенью связь между параметрами наиболее хаотична: для Хл-а и солёности в центральной части Баренцева и Норвежского морей наблюдается положительная связь ( $r > 0.4$ , степень связи от умеренной до сильной), в Гренландском море и у побережья и на севере Баренцева и Норвежского морей – отрицательная связь ( $r = 0.4-0.6$ , степень связи от умеренной до средней). Для Хл-а и ГПС области положительной связи – южная часть Баренцева моря, граница раздела между Баренцевым и Норвежским морями, фронтальные зоны Гренландского моря, где происходит активное фронтальное перемешивание; в остальных районах связь преимущественно отрицательная.

Связь Хл-а с солёностью почти всегда иллюстрирует роль солёности как индикатора вторжения солёных Атлантических вод или притока пресных материковых или ледниковых вод: в первом случае связь прямая, во втором – обратная. Солёные и динамически активные воды Атлантики перемешивают водную колонну, разрушая стратификацию; дополнительные БЭ приходят с нижележащих горизонтов и способствуют повышению концентрации Хл-а. Пресные воды являются индикатором притока материкового стока (лето-осень), богатого необходимыми диатомовым водорослям БЭ (в основном нитраты и силикаты), а также таяния морского льда, способствующего «цветению» фитопланктона на формирующемся тонком, хорошо освещенном пресном слое (весна).

Рассматривая связь между Хл-а и ГПС, можно увидеть, как подтверждается теория Свердрупа о механизме начала весеннего «цветения» фитопланктона: массовое «цветение» может начаться только после поднятия ГПС поздней весной-ранним летом, когда основная масса фитопланктона будет сосредоточена внутри эвфотического слоя, над критической глубиной (Sverdrup, 1953). В это же время связь между параметрами положительная летом: ГПС становится все меньше с установлением стратификации, доступ к БЭ прекращается, продуктивность водоема замедляется. Осенью же связь положительная в районах, где ГПС заглубляется и происходит вертикальное

перемешивание: с заглублением ГПС в верхние слои поступают БЭ, повышается концентрация Хл-а.

Таким образом, связь концентрации хлорофилла-а с глубиной эвфотического слоя прослеживается наилучшим образом, при этом связь однородна в течение всего года, эта связь обратная. Связь концентрации хлорофилла-а с остальными параметрами наиболее однородна в весенний сезон и наиболее хаотична – в осенний. Связь концентрации хлорофилла-а с ТПО и ФАР прямая и, по степени влияния, от сильной до умеренной весной ( $|r| > 0.4$ ) и более слабая и разрозненная осенью, когда связь меняется на обратную почти по всей акватории, кроме открытых вод севера Баренцева и Гренландского морей. Связь концентрации хлорофилла-а с ГПС обратная, с солёностью – прямая, по степени влияния связь от средней до весной умеренной ( $|r| = 0.4-0.6$ ), хаотичная от умеренной до средней связь – осенью.

### 3.3. Результаты моделирования

#### 3.3.1. Факторы, определяющие изменчивость продуктивности вод

##### Арктики

В результате моделирования с помощью алгоритма машинного обучения RF получены модели, восстанавливающие распространение высоко- и низкопродуктивных зон в исследуемом регионе. По модели также можно оценить вклад каждого рассматриваемого параметра в продуктивность автотрофного сообщества. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Вклады параметров-предикторов в оценку продуктивности вод. Здесь Zeu – глубина эвфотического слоя, ФАР – фотосинтетически активная радиация, ТПО – температура поверхности океана, ГПС – глубина перемешанного слоя. На этапе с Zeu в модель включалась глубина эвфотического слоя как предиктор, на этапе без Zeu – не включалась. Метрики качества модели подробно описаны в главе 2.

Море	Гренландское		Баренцево		Норвежское	
	С Zeu	Без Zeu	С Zeu	Без Zeu	С Zeu	Без Zeu
Зей	82%	-	81%	-	82%	-
ФАР	8%	32%	6%	29%	6%	28%
ТПО	3%	25%	5%	28%	4%	29%
Солёность	3%	28%	4%	31%	3%	26%
ГПС	3%	14%	3%	12%	5%	17%
<b>Метрики качества модели</b>						
Precision	<b>0.95</b> (0.94; 0.96)	<b>0.96</b> (0.97; 0.95)	<b>0.95</b> (0.95; 0.96)	<b>0.96</b> (0.95; 0.97)	<b>0.92</b> (0.91; 0.94)	<b>0.93</b> (0.95; 0.90)
Recall	<b>0.95</b> (0.94; 0.96)	<b>0.95</b> (0.97; 0.93)	<b>0.95</b> (0.96; 0.95)	<b>0.96</b> (0.93; 0.98)	<b>0.92</b> (0.94; 0.91)	<b>0.91</b> (0.97; 0.86)
f1-score	<b>0.95</b> (0.95; 0.95)	<b>0.95</b> (0.97; 0.94)	<b>0.95</b> (0.95; 0.95)	<b>0.95</b> (0.94; 0.97)	<b>0.92</b> (0.92; 0.93)	<b>0.92</b> (0.96; 0.88)
Размер выборки (обучающей/тестовой)	431401/ 862802		887067/ 1774134		306513/ 613026	

В ходе моделирования изначально рассматривалась выборка с *Zeus* как параметром-предиктором (1 этап). Однако по результатам моделирования наибольший вклад (81-82%) в изменчивость класса Хл-а (т.е. принадлежность ячейки к высоко- или низкопродуктивной зоне) вносила именно *Zeus*. Это связано с тем, что ранее *Zeus* была восстановлена через коэффициент диффузного ослабления нисходящего солнечного излучения для волны длиной 490 нм. Этот параметр указывает на наличие в океане взвесей, от которого и зависит глубина проникновения солнечного света *Zeus*. Поскольку большая часть рассматриваемого района относится к 1 типу вод, т.е. водам, где оптические параметры вод зависят напрямую от концентрации фитопланктона (или Хл-а) (Morel & Prieur, 1977), модель искусственно описывала большую часть изменчивости Хл-а с помощью *Zeus*. На 1 этапе 90% изменчивости класса Хл-а описывали *Zeus* и ФАР (6-8%), при этом ТПО, ГПС и солёность вносили примерно одинаково малый вклад (3-5%).

На 2 этапе моделирования из параметров-предикторов была исключена *Zeus*. В результате изменчивость Хл-а описывали только ФАР, ТПО, ГПС и солёность. В результате параметры ФАР, ТПО и солёность описывают примерно по 30% изменчивости, а остальные 10% описывает ГПС. ФАР во всех морях вносит большой вклад в изменчивость Хл-а, поскольку рассматриваемый район находится в высоких широтах (64-84° с.ш.), где «цветение» фитопланктона и скорость его фотосинтеза и роста сильно ограничены доступным для фотосинтеза количеством света. Поэтому вклад ФАР часто если не наибольший, то второй по значимости (32, 29 и 28%), при этом максимальный он в самом северном Гренландском море.

Доли изменчивости, описываемые параметрами, по-разному распределяются в морях: в Гренландском и Баренцевом море, где весной и летом зоны высокой продуктивности фитопланктона определяются распреснением от ледников, тающего льда и материкового стока, наибольший (или близкий к ФАР) вклад вносит солёность (28 и 31% соответственно), а в

Норвежском море, где на продуктивность в большей степени влияет динамическая активность Норвежского течения, прогрев воды весной и наличие температурной стратификации летом, наибольший вклад вносит ТПО (29%), за ней – ФАР (28%). Наименьший вклад в изменчивость класса Хл-а во всех морях вносит ГПС, однако она все равно описывает значительную часть изменчивости Хл-а (14, 12 и 17%).

Касательно метрик качества модели стоит отметить, что для каждого из морей они превышают 90%, что является очень хорошим результатом для поставленной задачи. При этом модели для Гренландского и Баренцева морей работают несколько лучше (3-5%), чем модели для Норвежского моря.

Для наглядного описания влияния параметров среды на Хл-а построены гексагональные диаграммы рассеяния для Хл-а и двух параметров среды, вносящий наибольший вклад в его изменчивость. На рисунке 6 показана диаграмма для Гренландского и Баренцева морей.

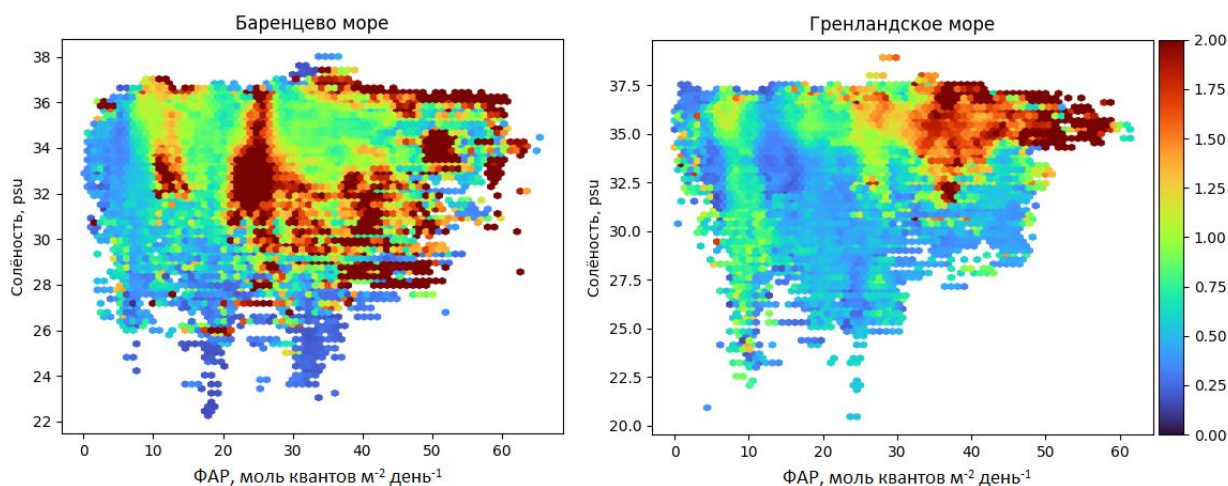


Рисунок 6. Гексагональные диаграммы рассеяния для Гренландского и Баренцева морей для концентрации хлорофилла-а (цветом) [ $\text{мг м}^{-3}$ ] и параметров среды солёности [psu] и фотосинтетически активной радиации (ФАР) [ $\text{моль квантов м}^{-2} \text{день}^{-1}$ ].

На диаграмме прослеживаются две высокопродуктивные зоны: при высокой освещенности и солёности, когда летом фотосинтез ограничен низкими концентрациями БЭ, и при низкой освещенности и любой солёности,



когда при минимальном количестве света фитопланктон готов начать фотосинтезировать на самых поверхностных горизонтах. Первая зона указывает на перемешивание вод в зонах глубокой конвекции и фронтальных зонах Гренландского моря, а также на перемешивание при вторжении динамически активных солёных вод Атлантического океана в Баренцево море и поступление БЭ с донных горизонтов на поверхность, для их дальнейшей утилизации фитопланктоном. Вторая зона говорит нам о продуктивности в весенний период, когда при минимальной освещенности, проникающей только на поверхностные горизонты, при таянии льда формируется пикноклин, на котором фитопланктон остается и комфортно фотосинтезирует (лучше всего прослеживается в Гренландском море с его обширной кромкой льда); а также о продуктивности в осенний период, когда солёность высокая, освещенность низкая, и в связи с осенней конвекцией наступает второй пик «цветения» с поступлением со дна БЭ.

На рисунке 7 представлена гексагональная диаграмма рассеяния для Норвежского моря.

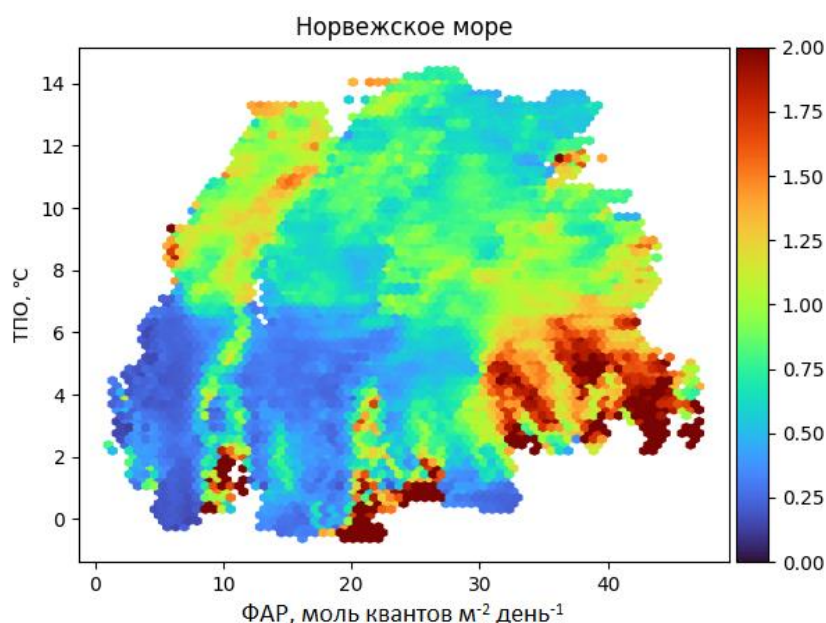


Рисунок 7. Гексагональная диаграмма рассеяния для Норвежского моря для концентрации хлорофилла-а (цветом) [мг м<sup>-3</sup>] и параметров среды температуры поверхности океана (ТПО) [°С] и фотосинтетически активной радиации (ФАР) [моль квантов м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>].

В Норвежском море также наблюдаются две зоны высокой продуктивности: при высоких температурах и низкой освещенности, когда при таянии льда и распространении материкового стока устанавливается неглубокий пикноклин, и при низких температурах и высокой освещенности, когда летом при низких температурах наблюдается небольшое вертикальное перемешивание и со дна поднимаются БЭ.

Таким образом, наиболее значимыми параметрами среды для описания продуктивности вод являются, в первую очередь, освещенность (ФАР) для всех морей, а также солёность как индикатор распресненных или динамически активных вод Атлантического океана – для Баренцева и Гренландского моря и ТПО как индикатор сезонной изменчивости температуры воды и динамически активных вод Атлантического океана – для Норвежского моря. Эти параметры вместе описывают условия, наиболее благоприятно влияющие на продуктивность района: доступность БЭ с вертикальным перемешиванием в летний и осенний период и доступность света в весенний и осенний периоды.

### **3.3.2. Прогноз положения высокопродуктивных зон с использованием машинного обучения**

Для оценки работы моделей была проведена их валидация на основе последнего доступного в выборке года – 2019 г. Для этого вся выборка до 2019 года являлась обучающей, а 11 месяцев (декабрь-ноябрь) 2019 года – тестовой.

На основе результатов моделирования изначально построены графики общей площади высокопродуктивных вод (данной в количестве ячеек размером 4x4 км) для спутниковых и модельных данных.

Результаты работы моделей показывают хорошую способность описать внутригодовую изменчивость общей площади высокопродуктивных вод для всех морей: модели всегда повторяют минимум ранней весной и поздней осенью и показывают два пика «цветения» фитопланктона: весенний и осенний. Однако все модели несколько занижают площадь высокопродуктивных вод: лучше всех повторяет ее модель для Баренцева моря (рисунок 8) в период весеннего пика (с марта по июль), которая почти идеально описала изменчивость площади высокопродуктивных вод и только в летне-осенний период стала занижать количество высокопродуктивных ячеек.

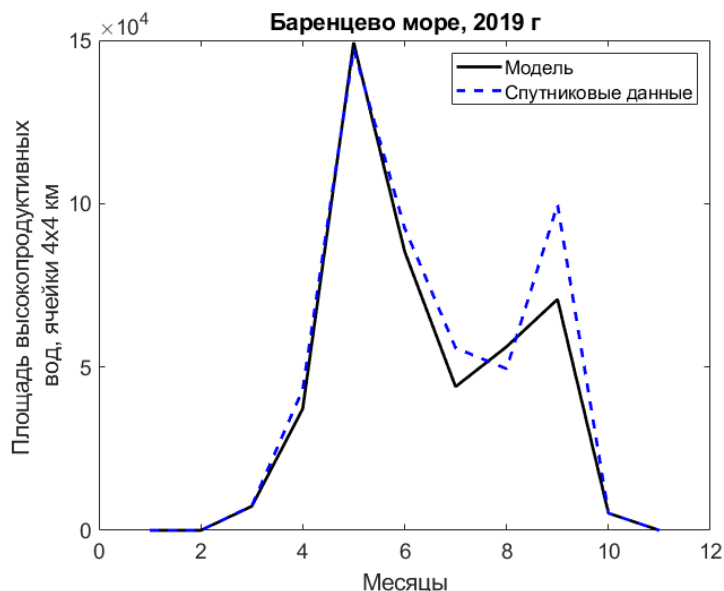


Рисунок 8. Оценка общей площади высокопродуктивных вод для Баренцева моря по результатам работы модели и по спутниковым данным концентрации хлорофилла-а, площадь дана в ячейках 4x4 км

Модель для Гренландского моря (рисунок 9) хорошо описывает изменчивость вне месяцев с максимальной площадью высокопродуктивных вод (июнь и сентябрь), но при обильном «цветении» занижает значение общей площади.

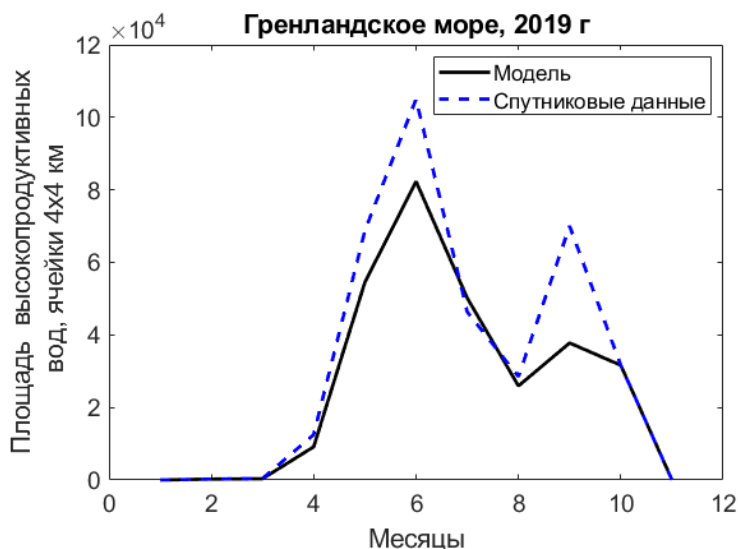


Рисунок 9. Оценка общей площади высокопродуктивных вод для Гренландского моря по результатам работы модели и по спутниковым данным концентрации хлорофилла-а, площадь дана в ячейках 4x4 км

Модель для Норвежского моря (рисунок 10) хорошо описывает оригинальную структуру сезонной изменчивости продуктивности моря: она верно восстановила локальный минимум площади в мае и оба пика «цветения» в июне и сентябре, однако почти во все месяцы модель недооценивала степень распространения высокопродуктивных вод по акватории.

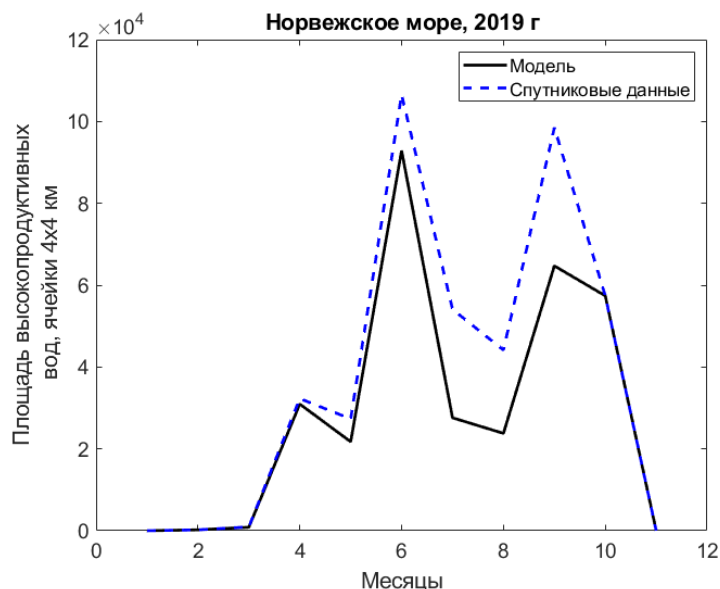


Рисунок 10. Оценка общей площади высокопродуктивных вод для Норвежского моря по результатам работы модели и по спутниковым данным концентрации хлорофилла-а, площадь дана в ячейках 4x4 км

Рассматривая пространственную изменчивость полученных по модели и спутниковым данным ячеек высокопродуктивных вод, можно заметить, что не всегда модель правильно восстанавливает качественное, а не количественное распределение «цветения» фитопланктона: общая площадь может быть восстановлена верно, но ее распределение по акватории часто отлично для результатов модели и для спутниковых данных.

Карты площадей высокопродуктивных вод для Баренцева моря представлены на рисунках 11-12, а также в приложении 2 для всех месяцев в 2019 г.

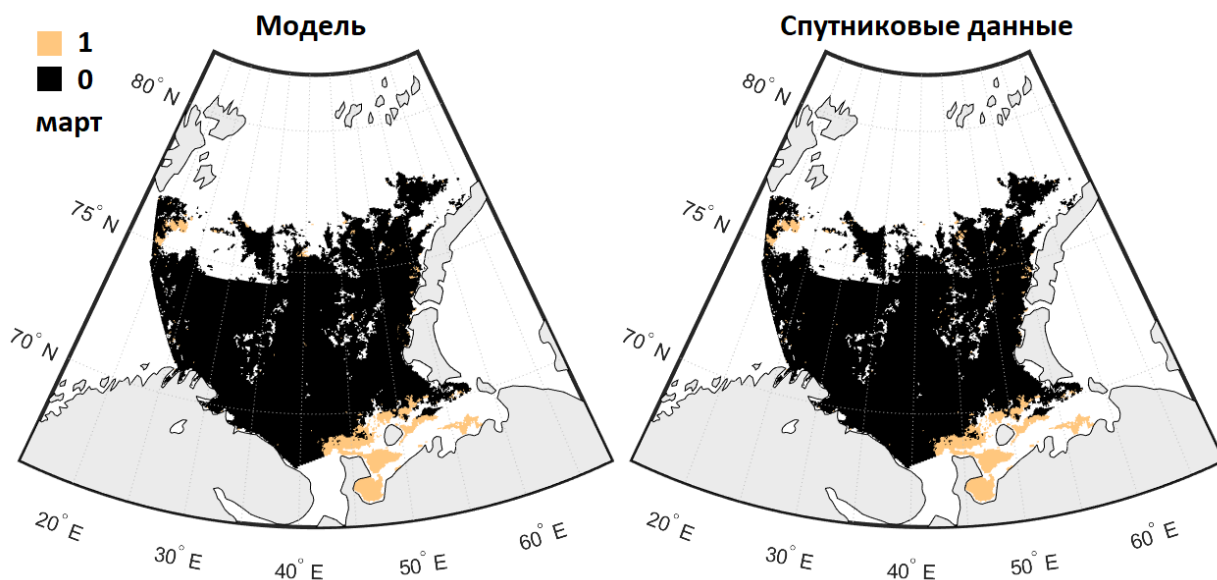


Рисунок 11. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в марте 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

Для Баренцева моря пространственно, так же как и количественно, наилучшие результаты модель показала в первый пик «цветения» с марта по июнь (рисунок 10): в эти месяцы площади высокопродуктивных зон по модели и спутниковым данным совпадают наилучшим образом и лишь редкие ячейки-выбросы пятнами проступают в модельных результатах. В следующие месяцы модель сработала несколько хуже (рисунок 12): распределение высокопродуктивных зон довольно хаотично в открытой части моря, хотя в самый продуктивный месяц (сентябрь) общее положение высокопродуктивных зон в целом показано верно.

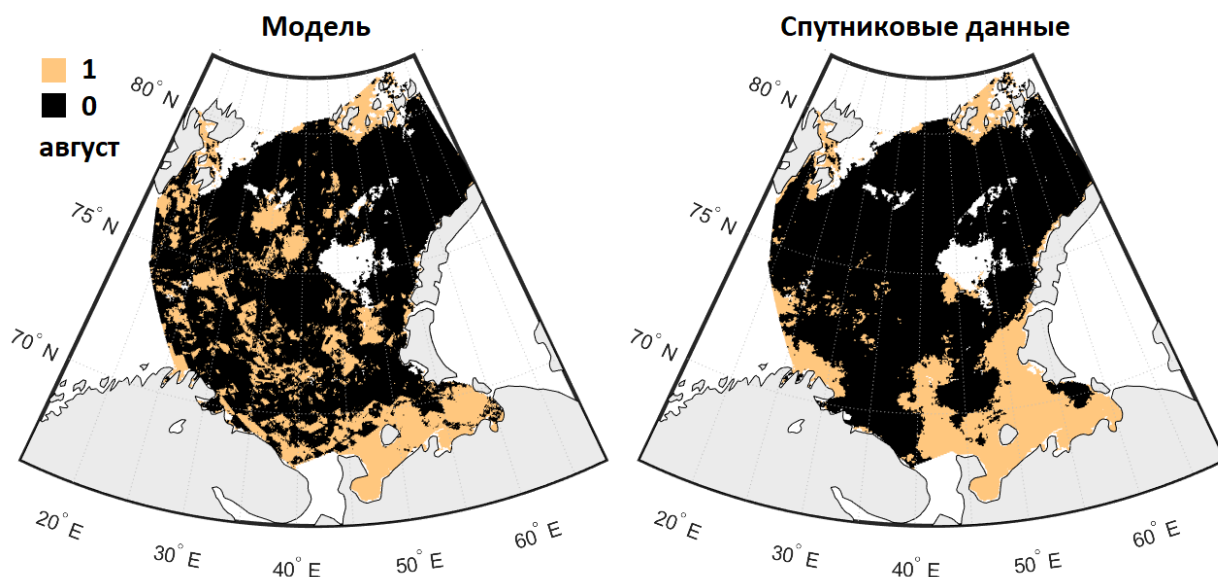


Рисунок 12. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в августе 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

В целом, модель лучше всего работает в прибрежных областях (юг Баренцева моря, восточное побережье Шпицбергена, западное побережье Новой Земли), где она всегда угадывает наличие высоких концентраций хлорофилла-а.

Карты площадей для Гренландского моря представлены на рисунке 13, а также в приложении 2 для всех месяцев в 2019 г.

Для Гренландского моря, в отличие от Баренцева, модель довольно хорошо восстанавливает расположение высокопродуктивных районов в течение всего года.

В периоды максимальных распространений высокопродуктивных зон (июнь и сентябрь) модель наибольшим образом недооценивает степень распространения «цветения» фитопланктона (рисунок 13), в другие месяцы не

наблюдается сильных выбросов по пространству, только недооценка распространения высокопродуктивных ячеек.

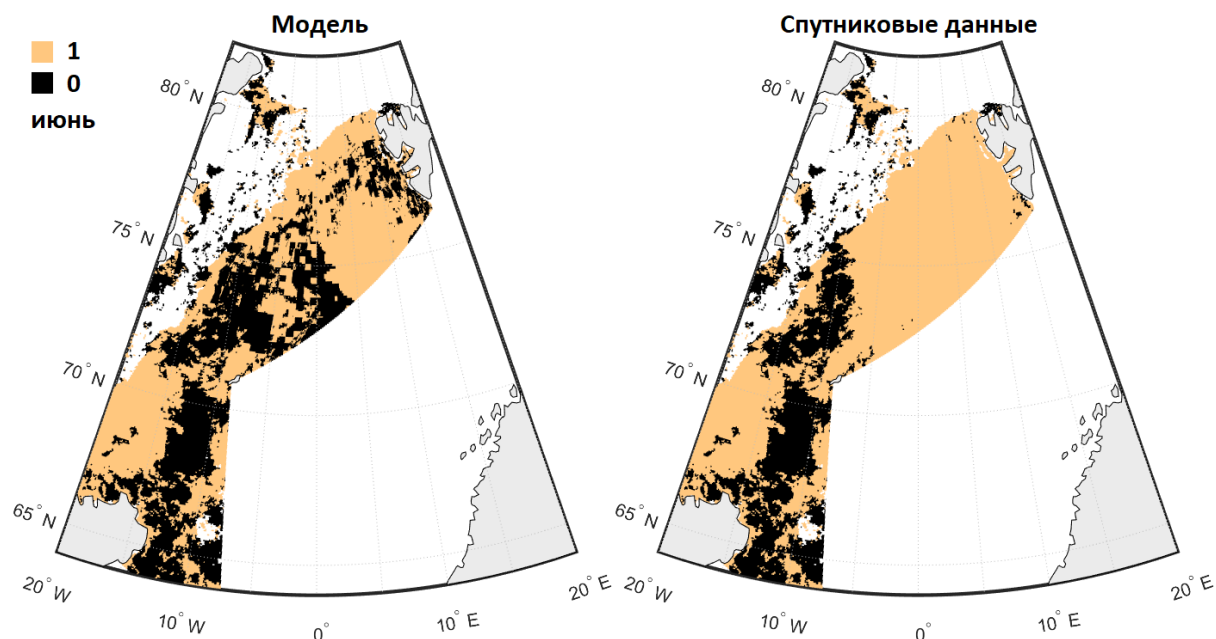


Рисунок 13. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в июне 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

Карты площадей для Норвежского моря представлены на рисунках 14-15, а также в приложении 2 для всех месяцев в 2019 г.

Модель для Норвежского моря в наибольшей степени повсеместно недооценивает распространение высокопродуктивных зон по акватории, однако верно восстанавливает их примерное расположение в пространстве: в месяцы пика продуктивности (июнь, сентябрь и октябрь) это практически вся акватория (рисунок 14), в остальные месяцы это прибрежные воды и фронтальные зоны моря (рисунок 15).



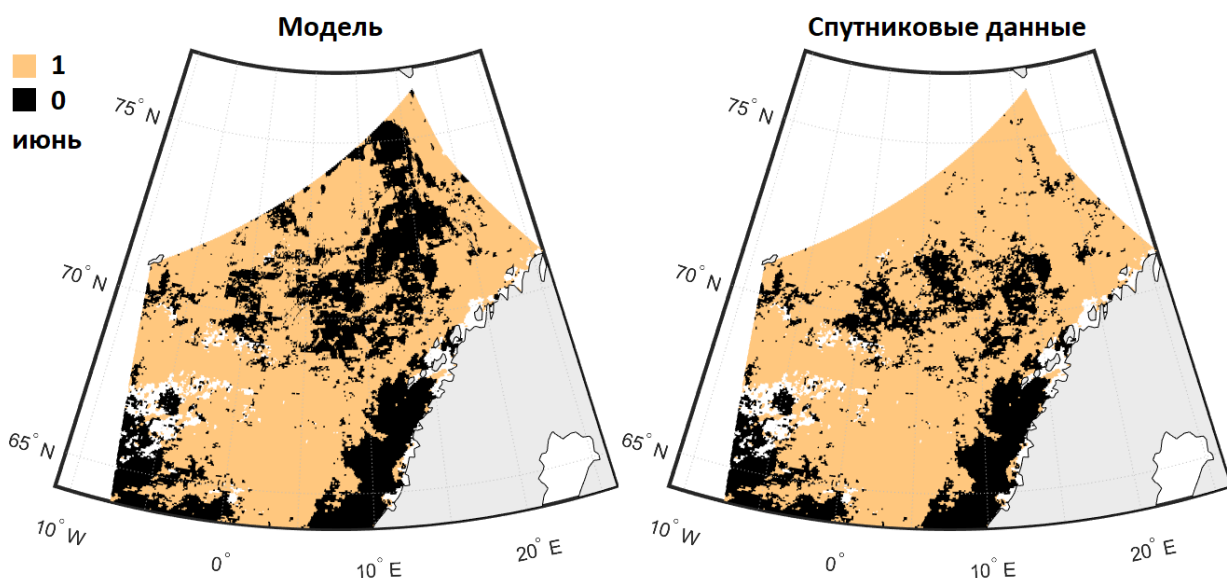


Рисунок 14. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в июне 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

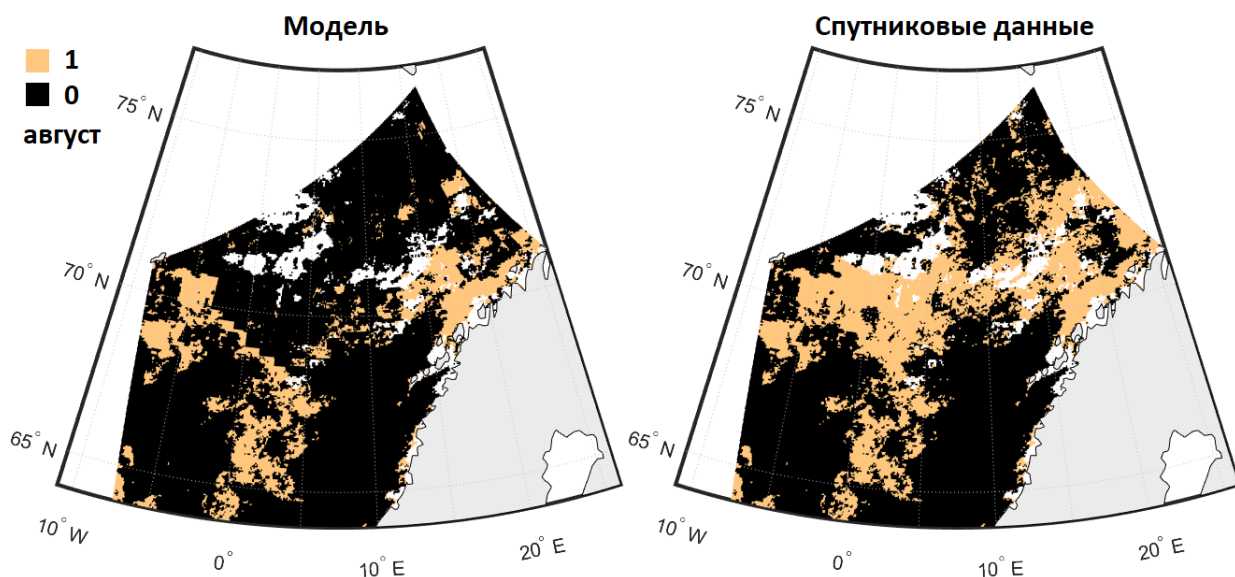


Рисунок 15. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в августе 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

Таким образом, все три модели довольно хорошо описывают общую картину как временной, так и пространственной изменчивости распределения высоко- и низкопродуктивных зон в рассматриваемых морях: наилучшим

образом это делает модель для Гренландского моря, которая почти всегда верно показывает место нахождения высокопродуктивных вод и их общую площадь, за ней – модель для Норвежского моря, которая в целом верно определяет положение высокопродуктивных вод, но занижает их общую площадь, модель для Баренцева моря же не всегда верно показывает места высокой продуктивности в море, и только в период первого пика «цветения» (март-июнь) верно оценивает общую площадь высокопродуктивных вод в акватории.

## Заключение

В работе рассмотрены пространственно-временные изменчивости концентраций хлорофилла-а (Хл-а) и параметров среды (глубины эвфотического слоя, ТПО, ФАР, ГПС, солёности), а также связи между ними. Кроме того, на основе алгоритма машинного обучения Random Forest создан алгоритм оценки продуктивности исследуемого района по параметрам среды и оценена его точность.

В ходе работы оценен сезонный ход продуктивности исследуемых морей: в морях наблюдается два пика «цветения» фитопланктона: максимальный пик в весенний (май для Баренцева моря) или летний (июнь для Гренландского и Норвежского морей) период и второй, менее сильный, пик в осенний период (сентябрь во всех морях).

Анализ пространственно-временного распределения связей между концентрациями хлорофилла-а и параметрами среды показал, что наилучшая связь прослеживается между Хл-а и глубиной эвфотического слоя в течение всего года, эта связь обратная. Между концентрациями хлорофилла-а и остальными параметрами связь наиболее однородна в весенний сезон и наиболее хаотична – в осенний. Связь концентрации хлорофилла-а с ТПО и ФАР прямая и, по степени влияния, изменяется от сильной до умеренной весной ( $|r| > 0.4$ ) и более слабая и разрозненная осенью, когда связь меняется на обратную почти по всей акватории, кроме открытых вод севера Баренцева и Гренландского морей. Связь концентрации хлорофилла-а с ГПС обратная, с солёностью – прямая, по степени влияния связь от средней до умеренной весной ( $|r| = 0.4-0.6$ ), хаотичная от умеренной до средней связь – осенью.

По результатам работы модели оценены вклады параметров среды в изменчивость продуктивности района: наиболее значимыми параметрами среды для описания продуктивности вод являются, в первую очередь, освещенность (ФАР) для всех морей, а также солёность как индикатор

распресненных или динамически активных вод Атлантического океана – для Баренцева и Гренландского моря и ТПО как индикатор сезонной изменчивости температуры воды и динамически активных вод Атлантического океана – в Норвежском море. Эти параметры вместе описывают условия, наиболее благоприятно влияющие на продуктивность района: доступность БЭ с вертикальным перемешиванием в летний и осенний период и доступность света в весенний период.

Проведен анализ работы моделей для трех морей: все три модели довольно хорошо описывают общую картину как временной, так и пространственной изменчивости распределения высоко- и низкопродуктивных зон в рассматриваемых морях: наилучшим образом это делает модель для Гренландского моря, которая почти всегда верно показывает место нахождения высокопродуктивных вод и их общую площадь, за ней – модель для Норвежского моря, которая в целом верно определяет положение высокопродуктивных вод, но занижает их общую площадь, модель для Баренцева моря же не всегда верно показывает места высокой продуктивности в море, и только в период первого пика «цветения» (март-июнь) верно оценивает общую площадь высокопродуктивных вод в акватории.

Результаты работы целесообразно рассмотреть в дальнейших исследованиях: во-первых, стоит продолжить применять алгоритм Random Forest для построения моделей продуктивности региона, однако теперь изучить его применение в модификации регрессора, а не классификатора, для более точной оценки продуктивности региона. Во-вторых, полученные модели можно применить для оценки будущих мест повышенных концентраций фитопланктона на основе физических моделей океана.

## Список литературы

1. Алимов, А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 152 с.
2. Башмачников, И.Л., Федоров, А.М., Весман, А.В., Белоненко, Т.В., Колдунов, А.В., Духовской, Д.С. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1: локализация областей конвекции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. Т. 15. № 7. С. 184–194.
3. Ивантер Э.В. Основы биометрии: Введение в статистический анализ биологических явлений и процессов. / Э.В. Ивантер, А.В. Коросов. – Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. Гос. Ун-та, 1992 – 168 с.
4. Лобанова, П.В. Спутниковые алгоритмы оценки первичной продукции в водах с различными океанологическими условиями (на примере Северо-восточной Атлантики и Японского моря): дис. ... к.г.н. : 25.00.28 / П.В. Лобанова. – СПб., 2017. 390 с.
5. Моисеев, П.А. Биологические ресурсы мирового океана. – М.: ВО «Агропромиздат», 1989. – 368 с.
6. Одум, Ю. Экология. Т.1. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
7. Поздняков, Д. В. Феномен массовых цветений *E.huxleyi* в Мировом океане: многолетние спутниковые исследования в субарктических и арктических морях / Д. В. Поздняков, С. С. Чепикова // Всероссийская научная конференция с международным участием "Земля и космос" к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева : Сборник статей, Санкт-Петербург, 20–21 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью "Мономакс", 2020. – С. 53-57.
8. Alexander, V., & Niebauer, H. J. Oceanography of the eastern Bering Sea ice-edge zone in spring // Limnology and Oceanography, 1981. V. 26(6). P. 1111–1125.

9. Anderson, G. F. Silica, diatoms and a freshwater productivity maximum in Atlantic Coastal Plain estuaries, Chesapeake Bay // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1986. V. 22(2), P. 183–197.
10. Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Bélanger, S., Matsuoka, A., & Tremblay, J.-É. Parameterization of vertical chlorophyll a in the Arctic Ocean: impact of the subsurface chlorophyll maximum on regional, seasonal, and annual primary production estimates // *Biogeosciences*, 2013. V. 10(6), P. 4383–4404.
11. Arrigo, K. R., van Dijken, G., & Pabi, S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production // *Geophysical Research Letters*, 2008. V. 35(19), P. L19603.
12. Balch, W. Correction [to “The remote sensing of ocean primary productivity: Use of a new data compilation to test satellite algorithms” by William Balch et al.] // *Journal of Geophysical Research*, 1992. V. 97(C3), P. 3689.
13. Balch, W. M., Holligan, P. M., Ackleson, S. G., & Voss, K. J. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine // *Limnology and Oceanography*, 1991. V. 36(4), P. 629–643.
14. Borstad, G. A., and Gower J. F. R. Phytoplankton Chlorophyll Distribution in the Eastern Canadian Arctic // *Arctic*, 1984. V. 37. №. 3. P. 224–233.
15. Breiman, L. Random Forests // *Machine Learning*, 2001. V. 45(1), P. 5–32.
16. Carr, M.E. Estimation of potential productivity in eastern boundary currents using remote sensing // *Deep-Sea Res*, 2002. V. II 49. P. 59–80.
17. Cutler D.R., Edwards Jr. T.C., Beard K.H., Cutler A., Hess K.T., Gibson J., and Lawler J.J. Random forests for classification in ecology // *Ecology*, 2007. №88(11), P: 2783-2792.
18. Engelsen, O., Hegseth, E. N., Hop, H., Hansen, E., & Falk-Petersen, S. Spatial variability of chlorophyll-a in the Marginal Ice Zone of the Barents Sea, with relations to sea ice and oceanographic conditions // *Journal of Marine Systems*, 2002. V. 35(1-2), P. 79–97.

19. Hegseth E. N., Sundfjord A., Intrusion and blooming of Atlantic phytoplankton species in the high Arctic // *Journal of Marine Systems*, 2008. V. 74, №. 1–2, P. 108-119.
20. JPL MUR MEaSURES Project. 2015. GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis. Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2020-02-09] at <https://doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ04>.
21. Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., ... Mecklenburg, S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proceedings of the IEEE*, 2010. V. 98(5), P. 666–687.
22. Lee Y. J., Matrai P. A., Friedrichs M. A. M., Saba V. S., Antoine D., ... Westberry T. K. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models // *J. Geophys. Res. Oceans*, 2015. №. 120. P. 6508– 6541.
23. Longhurst A. R. *Ecological geography of the sea* (2d ed). – Elsevier Academic Press, 2007. – 560 p.
24. Martin, J., Tremblay, J., Gagnon, J., Tremblay, G., Lapoussi`ere, A., Jose, C., Poulin, M., Gosselin, M., Gratton, Y., and Michel, C.: Prevalence, structure and properties of subsurface chlorophyll maxima in Canadian Arctic waters // *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 2010. V. 412, P. 69–84.
25. Morel, A. and Prieur L. Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*, 1977. V. 22, P. 709-722.
26. Morel, A. Available, usable, and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis // *Deep Sea Research*, 1978. №25(8), P: 673-688.
27. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Averaged monthly Aqua MODIS PAR Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. Accessed on 01/12/2021.

28. Oziel, L., Baudena, A., Ardyna, M. et al. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean // *Nat Commun*, 2020. V. 11, P. 1705.
29. Oziel, L., Sirven, J., and Gascard, J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Sci.*, 2016. V. 12, P. 169–184.
30. Perrette, M., Yool, A., Quartly, G. D., and Popova, E. E. Near-ubiquity of ice-edge blooms in the Arctic // *Biogeosciences*, 2011. V. 8, P. 515–524.
31. Riebesell, U., Schloss, I. & Smetacek, V. Aggregation of algae released from melting sea ice: implications for seeding and sedimentation // *Polar Biol*, 1991. V. 11, P. 239–248.
32. Riley G. A. Limnological studies in Connecticut. Part III. The plankton of Linsley pond // *Ecological Monographs*, 1940. V. 10. №. 2. P. 279-306.
33. Rivero-Calle S., Gnanadesikan A., Del Castillo C. E., Balch W. M., Guikema S. D. Multidecadal increase in north Atlantic coccolithophores and the potential role of rising CO<sub>2</sub> // *Science*, 2015. V. 350(6267). P. 1533-1537.
34. Sakshaug E. Primary and secondary production in the Arctic Seas // *The organic carbon cycle in the Arctic ocean* // Eds. Stein R., Macdonald R.W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 57–81.
35. Sathyendranath, S., Brewin, RJW, Brockmann, C, Brotas, V, Calton, B, ... Platt, T. An ocean-colour time series for use in climate studies: the experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) // *Sensors*, 2019. V. 19, P. 4285.
36. Sathyendranath, S., Platt T., Kovačič, Dingle J., Jackson T., Brewin R., Franks P., Marañón E., Kulk G., Bouman H. Reconciling models of primary production and photoacclimation [Invited] // *Applied Optics*, 2020. V. 59. №. 10. P. C100-C114.
37. Sauer M. J., Roesler C. S., Werdell P. J., Barnard A. Under the hood of satellite empirical chlorophyll a algorithms: revealing the dependencies of maximum band ratio algorithms on inherent optical properties // *Opt. Express*, 2012. V. 20. P. 20920-20933.



38. Shigesada N., Okubo A. Analysis of the self-shading effect on algal vertical distribution in natural waters // *Journal of Mathematical Biology*, 1981. V. 12. №. 3. P. 311-326.
39. Skagseth, Ø. Recirculation of Atlantic Water in the western Barents Sea // *Geophysical Research Letters*, 2008. V. 35(11).
40. Skogen, M. D., Svendsen, E., Berntsen, J., Aksnes, D., & Ulvestad, K. B. Modelling the primary production in the North Sea using a coupled three-dimensional physical-chemical-biological ocean model // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995. V. 41(5), P. 545–565.
41. Slagstad, D. & Stole-Hansen, K. Dynamics of plankton growth in the Barents Sea: model studies // *Polar Res.*, 1991. V. 10. P. 173-186.
42. Stroeve, J. C., & Notz, D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*, 2018. V.13. №. 10.
43. Sverdrup, H. U. On Conditions for the Vernal Blooming of Phytoplankton // *ICES Journal of Marine Science*, 1953. V. 18, №. 3. P. 287–295.
44. Talling J. F. Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation // *New Phytologist*, 1957. V. 56. №. 1. P. 29-50.
45. Teira, E., Mourin, B., Maran, E., Pérez, V., Pazó, M. J., Serret, P., Armas, D., Escánez, J., Woodward, E. M. S., Fernández, E. Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: potential factors affecting phytoplankton activity // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005. V. 52. №. 4. P. 569-588.
46. Tremblay, J. and Gagnon, J. The effects of irradiance and nutrient supply on the productivity of Arctic waters: a perspective on climate change, in: *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions*, edited by: Hihoul, J. C. J. and Kostianoy, A. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2009.
47. Venkata J. - <https://community.tibco.com/wiki/random-forest-template-tibco-spotfirer-wiki-page>, CC BY-SA 4.0.

48. Wassmann, P., Slagstad, D. & Ellingsen, I. Primary production and climatic variability in the European sector of the Arctic Ocean prior to 2007: preliminary results // *Polar Biol.*, 2010. V. 33, P. 1641–1650.

## Приложение

### Приложение 1. Пространственно-временная изменчивость параметров среды в исследуемых акваториях

Здесь и далее: СКО – среднееквадратическое отклонение, МО – математическое ожидание, МАХ – максимальное значение, MIN – минимальное значение.

Таблица 1.1. Пространственно-временная изменчивость глубины эвфотического слоя [м] в исследуемых акваториях.

Район	Сезон	МАХ	MIN	МО	СКО
Баренцево море	Весна	98,42	1,44	25,29	12,28
	Лето	70,87	0,96	31,56	10,72
	Осень	67,66	0,79	25,87	9,30
Гренландское море	Весна	87,97	1,48	35,85	12,10
	Лето	92,55	0,73	28,94	9,66
	Осень	83,02	1,09	27,00	8,23
Норвежское море	Весна	73,02	1,85	37,20	9,17
	Лето	58,70	2,61	29,46	6,15
	Осень	78,17	0,60	24,23	7,38

Таблица 1.2. Пространственно-временная изменчивость глубины перемешанного слоя [м] в исследуемых акваториях.

Район	Сезон	МАХ	MIN	МО	СКО
Баренцево море	Весна	380,00	13,00	51,93	47,07
	Лето	69,00	15,25	17,79	2,80
	Осень	198,00	13,00	37,03	20,91
Гренландское море	Весна	2083,75	13,00	99,31	160,33
	Лето	47,00	16,00	17,45	2,79
	Осень	1656,81	15,25	32,14	23,95
Норвежское море	Весна	2303,68	13,00	94,45	158,89
	Лето	58,25	15,19	17,67	3,26
	Осень	1178,29	13,00	31,73	27,72

Таблица 1.3. Пространственно-временная изменчивость фотосинтетически активной радиации [моль квантов м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>] в исследуемых акваториях.

Район	Сезон	MAX	MIN	МО	СКО
Баренцево море	Весна	65,50	0,00	16,92	9,58
	Лето	63,87	0,44	28,29	8,01
	Осень	28,99	0,06	8,64	2,52
Гренландское море	Весна	57,57	0,00	16,59	9,37
	Лето	65,50	0,44	27,88	7,47
	Осень	31,04	0,03	9,15	2,65
Норвежское море	Весна	55,68	0,13	19,06	9,10
	Лето	59,44	0,67	28,70	6,11
	Осень	30,73	0,51	12,06	2,69

Таблица 1.4. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности океана [°С] в исследуемых акваториях.

Район	Сезон	MAX	MIN	МО	СКО
Баренцево море	Весна	6,78	-1,80	0,20	2,17
	Лето	15,17	-1,80	4,03	3,42
	Осень	12,60	-1,80	4,84	3,00
Гренландское море	Весна	8,67	-1,80	0,18	2,07
	Лето	11,74	-1,80	2,90	3,63
	Осень	11,17	-1,80	3,37	3,39
Норвежское море	Весна	9,85	-1,46	5,42	1,55
	Лето	15,99	2,09	9,33	2,16
	Осень	14,45	2,61	9,70	1,67

Таблица 1.5. Пространственно-временная изменчивость солёности [psu] в исследуемых акваториях.

Район	Сезон	MAX	MIN	МО	СКО
Баренцево море	Весна	37,23	23,21	33,56	1,37
	Лето	38,01	20,21	34,18	1,47
	Осень	37,03	21,47	33,98	1,44
Гренландское море	Весна	38,15	23,79	34,86	1,09
	Лето	38,92	20,46	34,81	1,46
	Осень	37,97	20,99	34,61	1,43
Норвежское море	Весна	37,12	23,52	32,98	1,29
	Лето	37,05	21,12	33,90	1,28
	Осень	37,72	20,91	33,66	1,34

## Приложение 2. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в 2019 г

Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

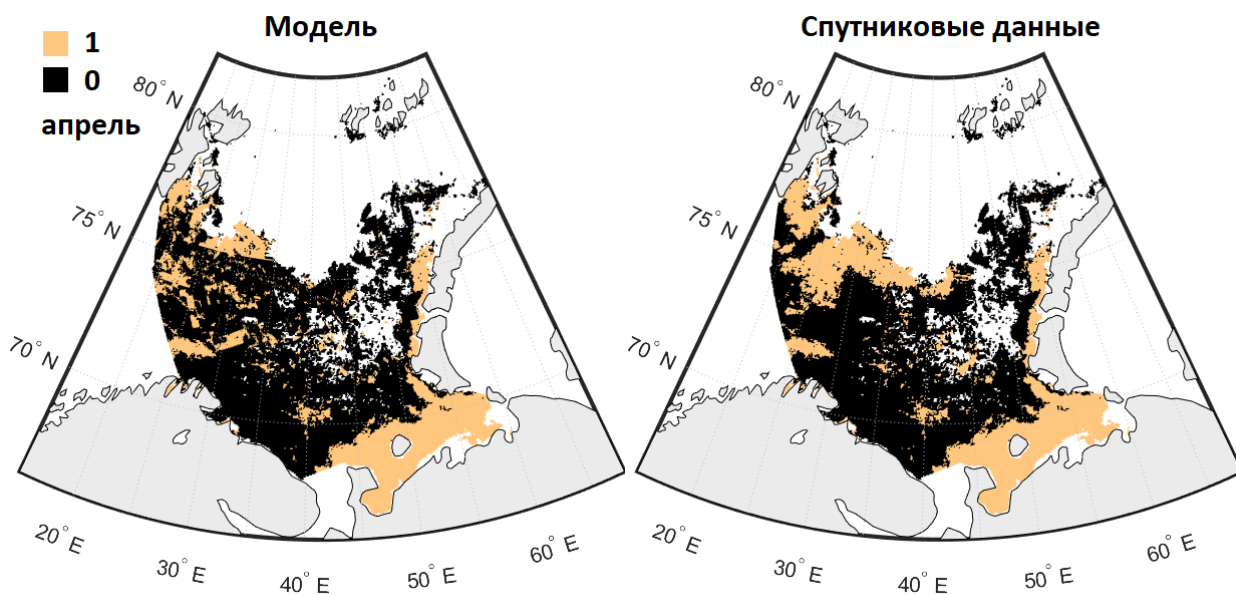


Рисунок 2. 1. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в апреле 2019 г.

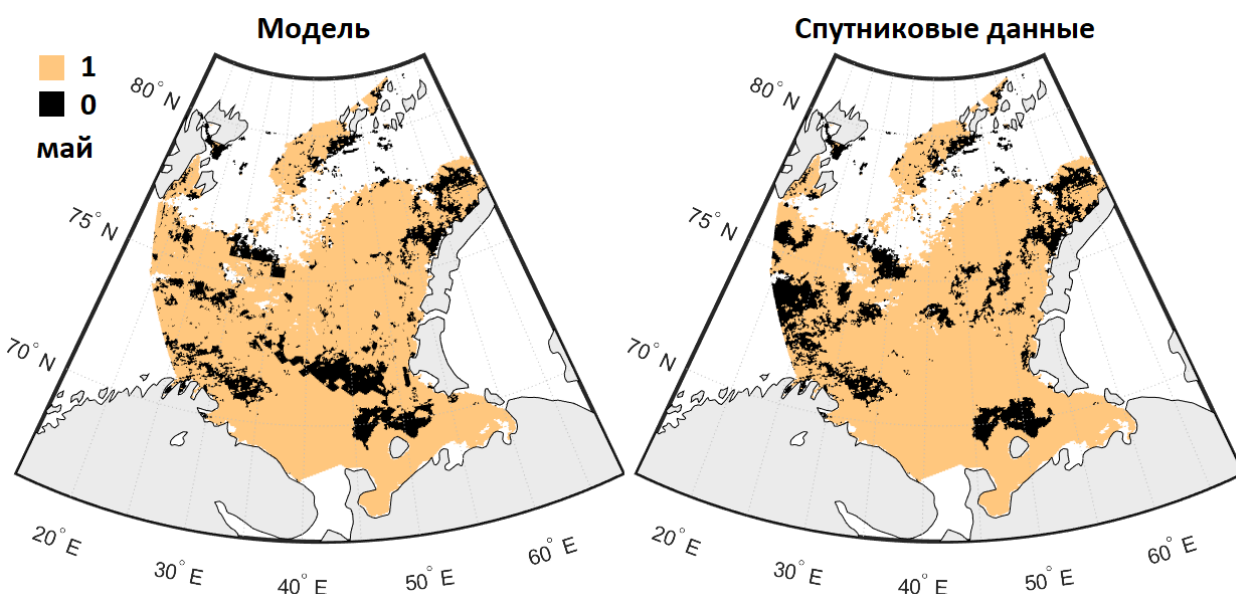


Рисунок 2. 2. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в мае 2019 г.

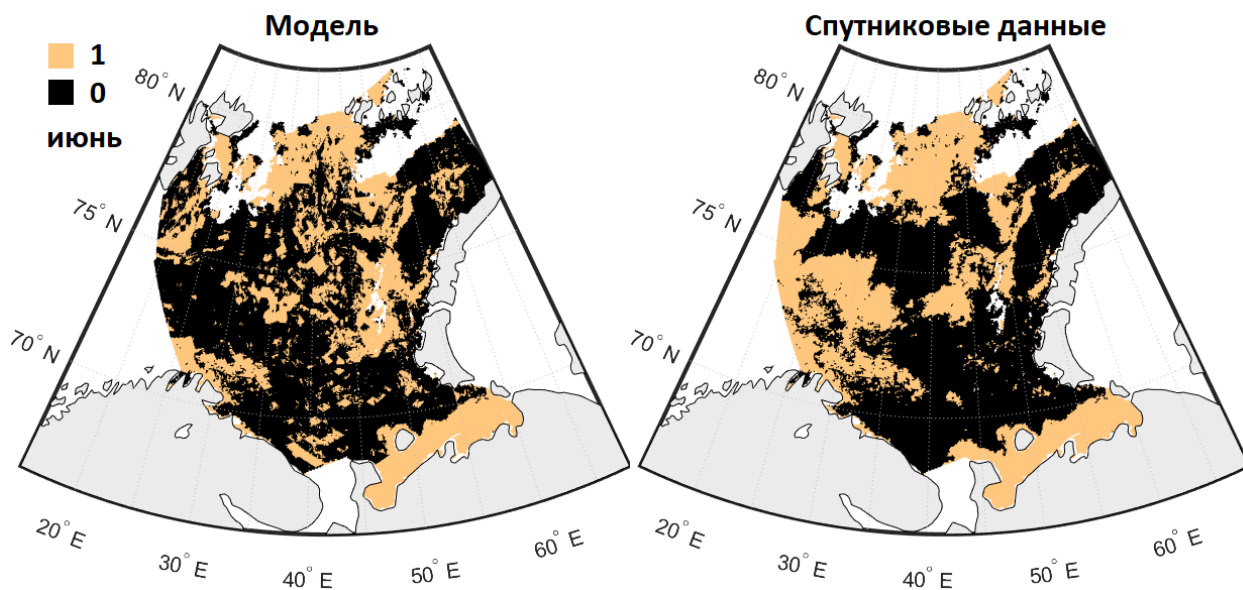


Рисунок 2. 3. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в июне 2019 г.

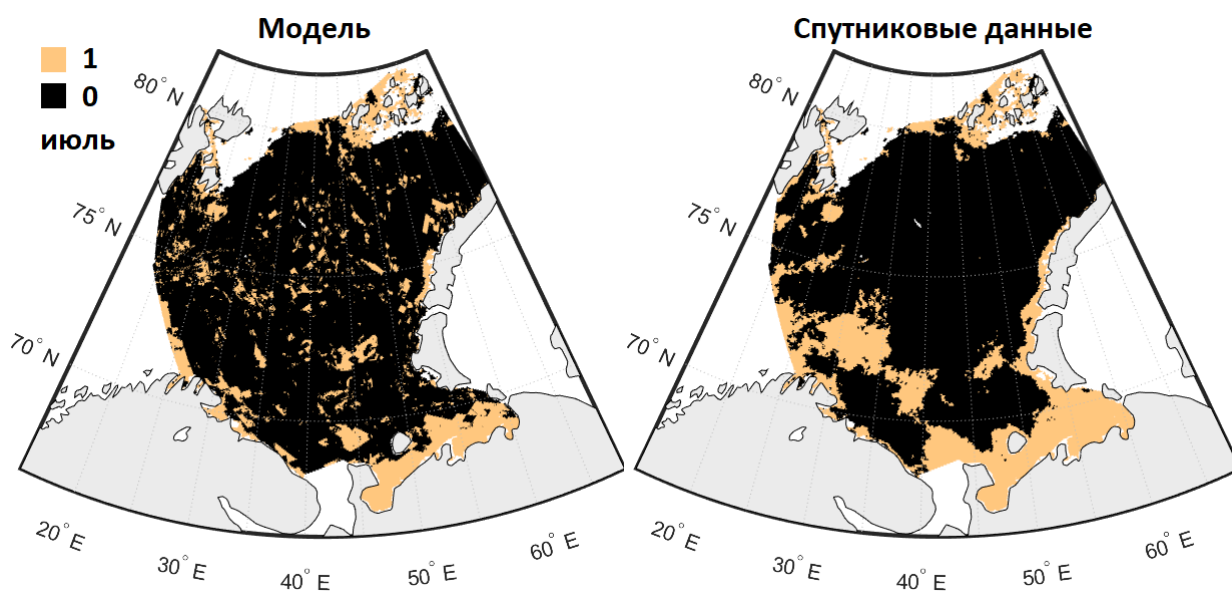


Рисунок 2. 4. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в июле 2019 г.

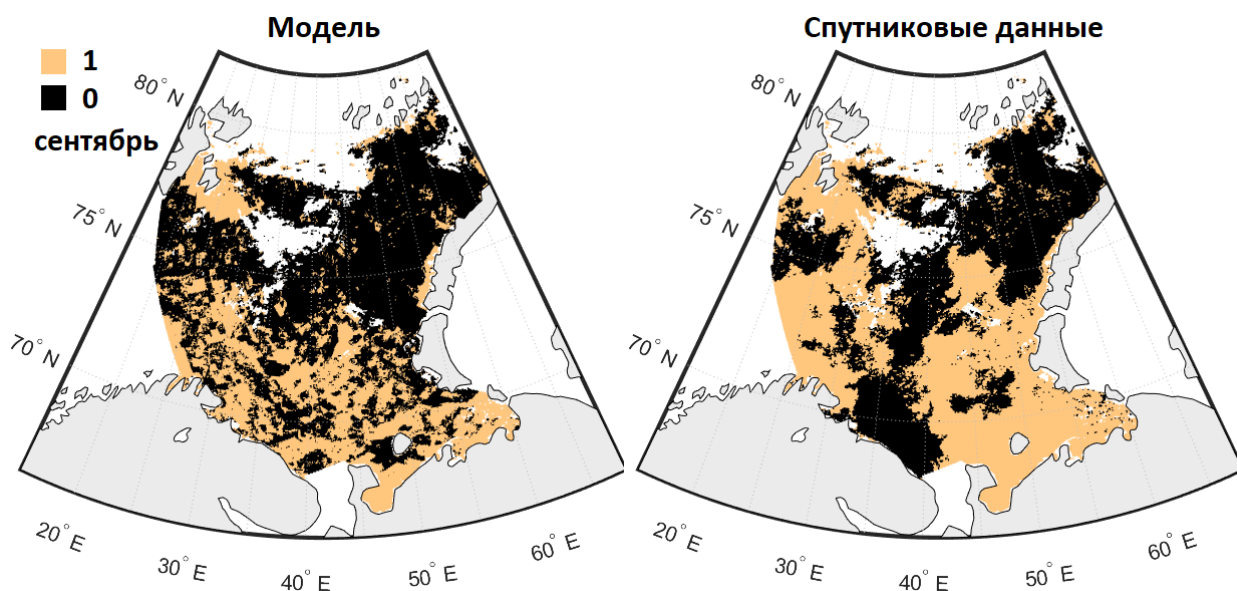


Рисунок 2. 5. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в сентябре 2019 г.

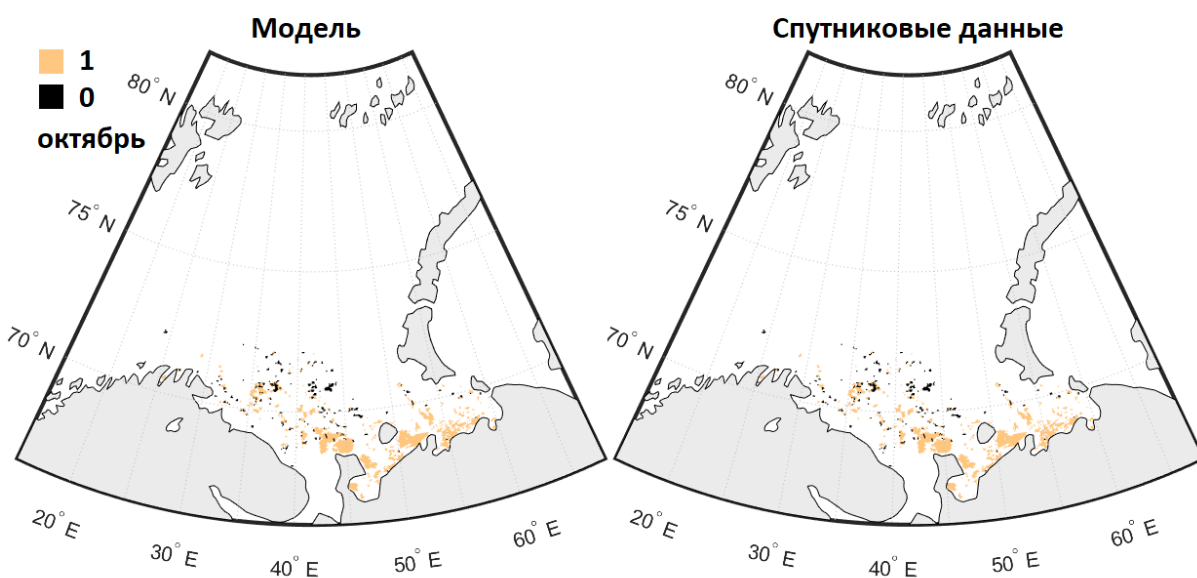


Рисунок 2. 6. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Баренцевом море в октябре 2019 г.

Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

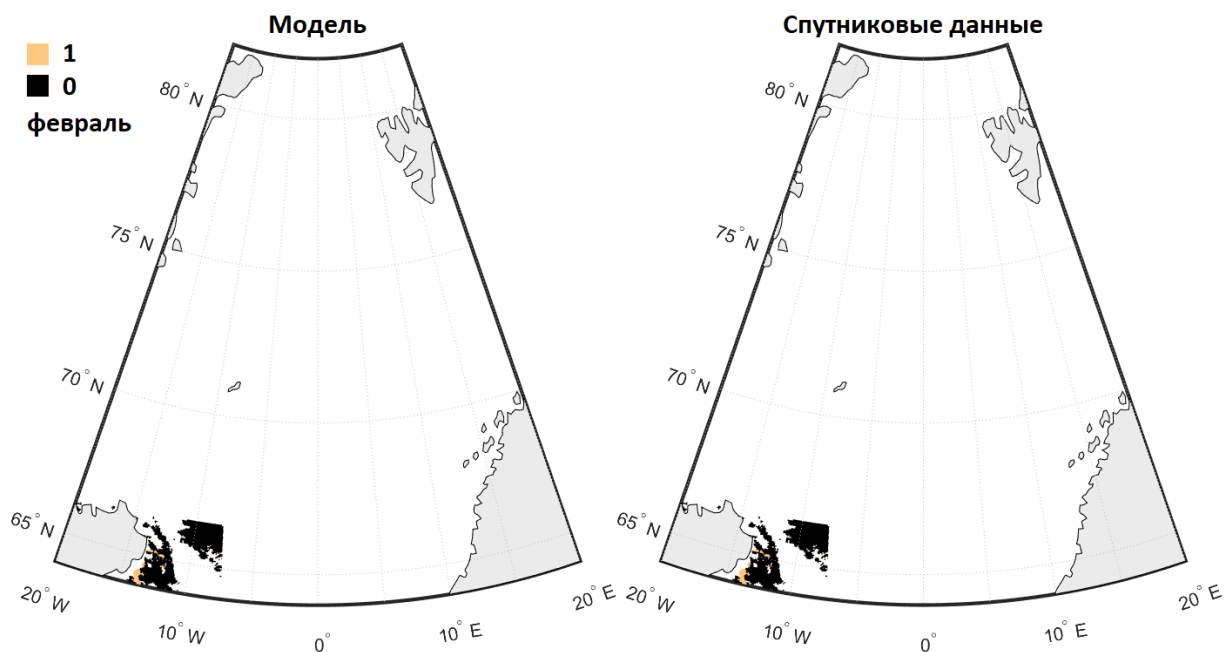


Рисунок 2. 7. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в феврале 2019 г.

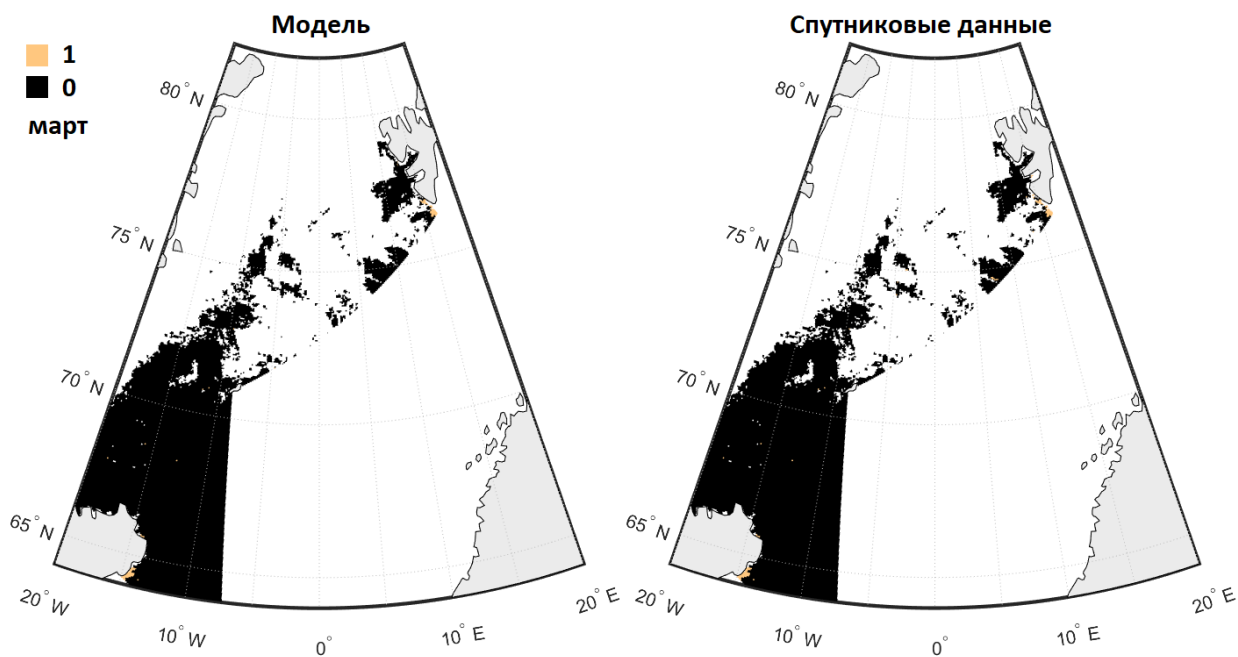


Рисунок 2. 8. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в марте 2019 г.



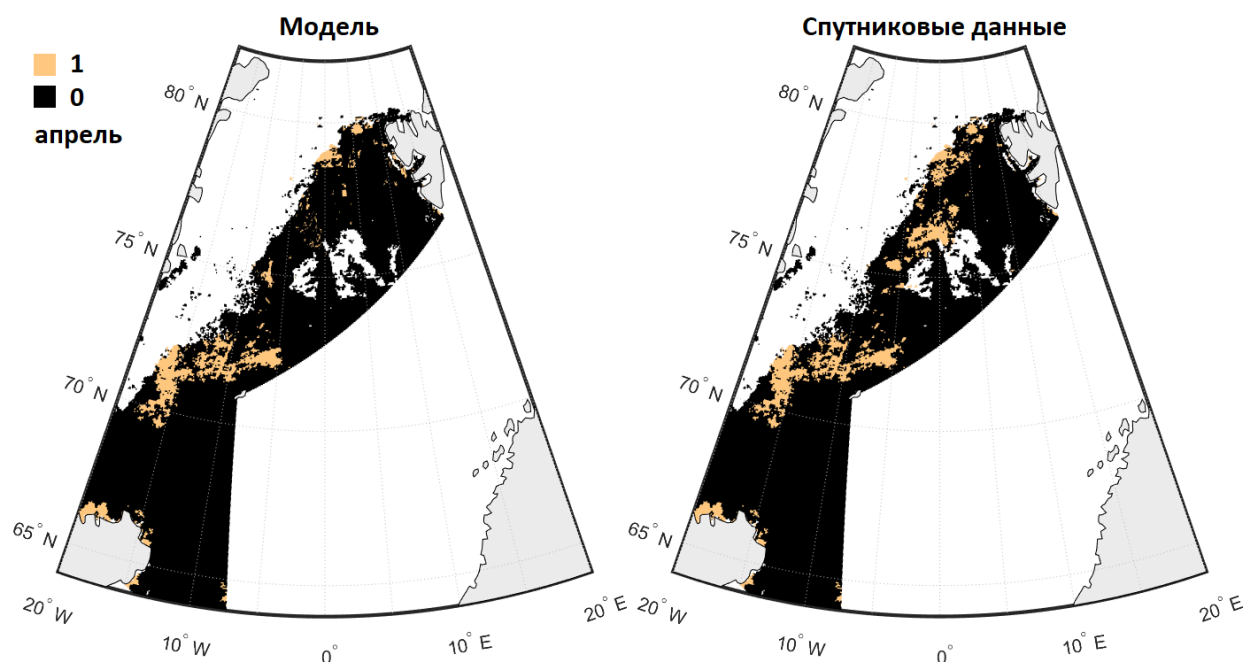


Рисунок 2. 9. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в апреле 2019 г.

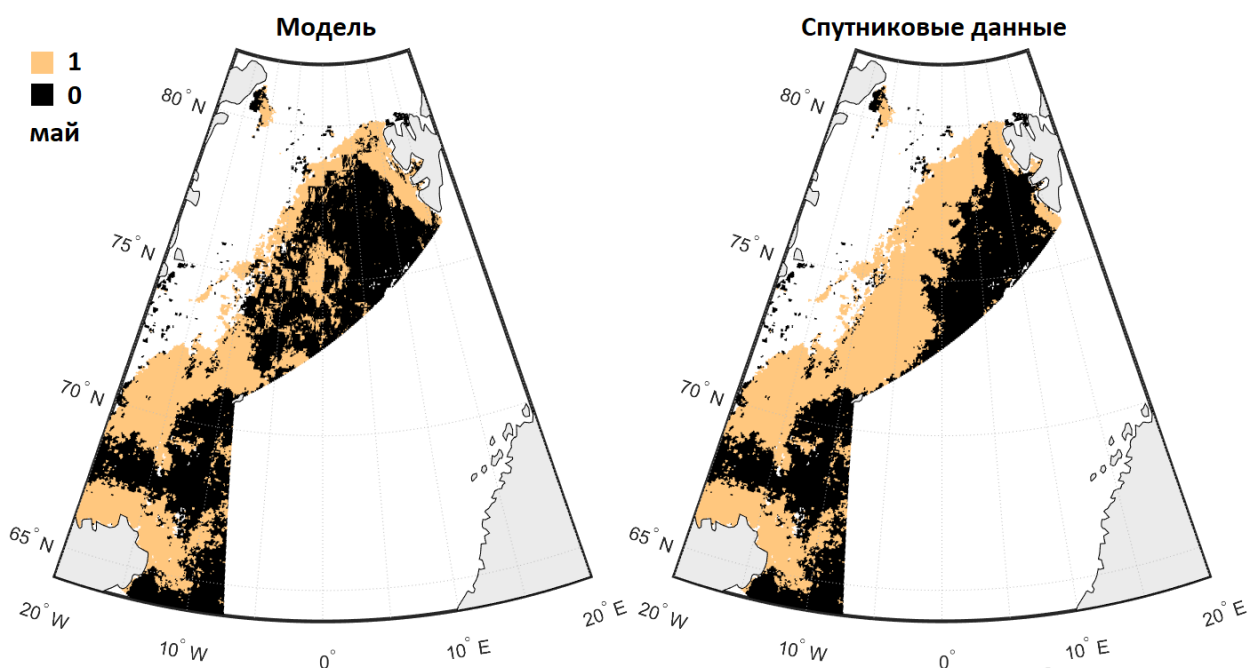


Рисунок 2. 10. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в мае 2019 г.

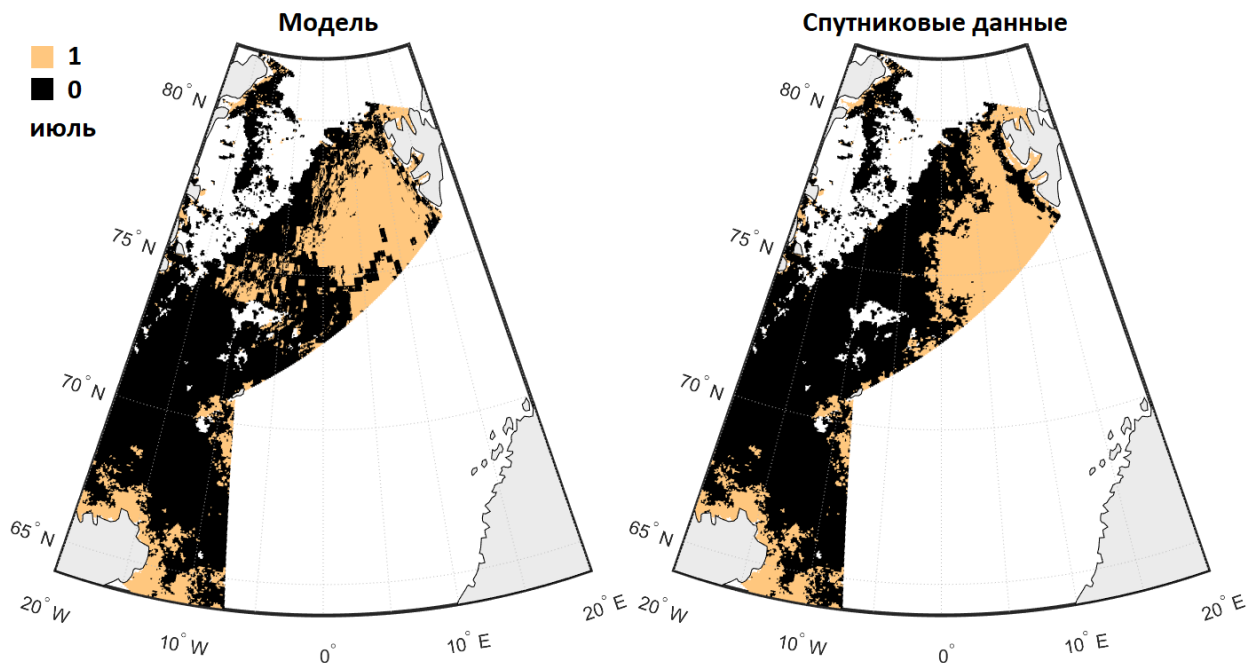


Рисунок 2. 11. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в июле 2019 г.

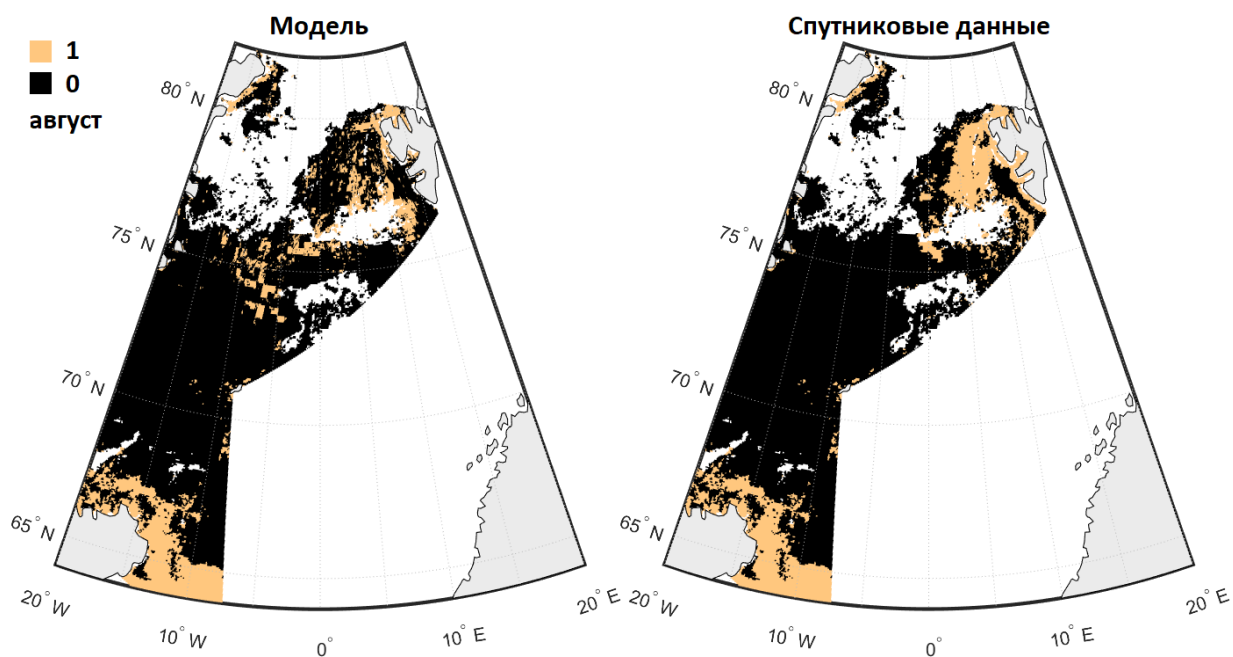


Рисунок 2. 12. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в августе 2019 г.

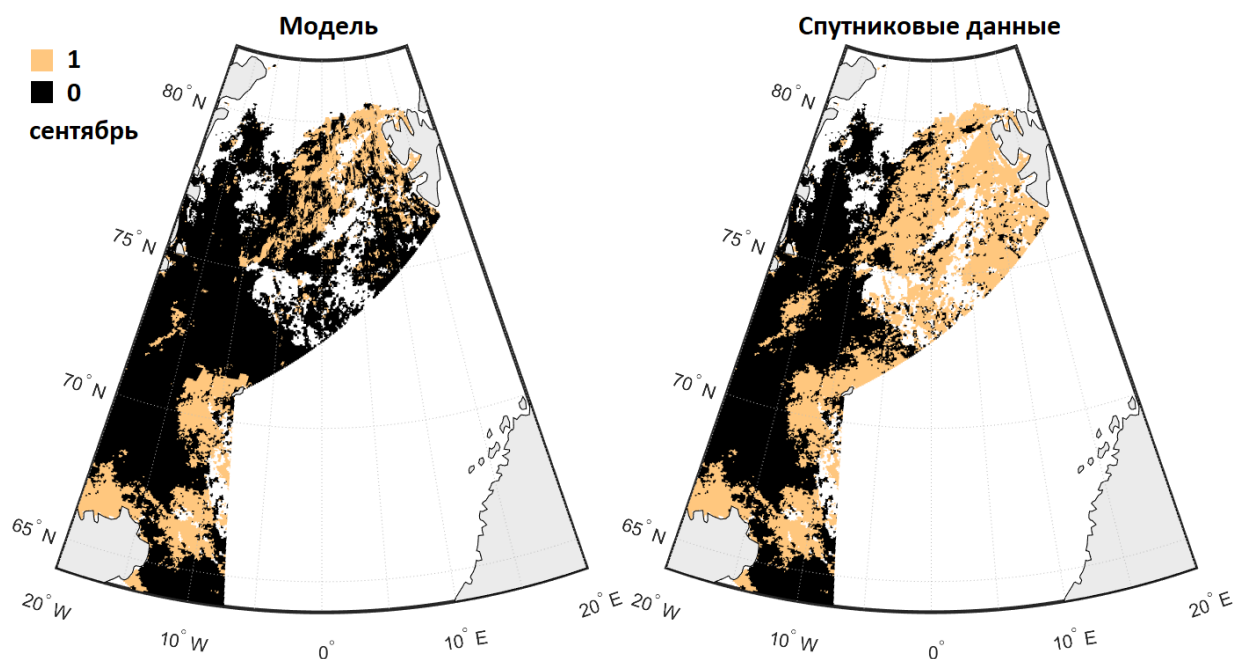


Рисунок 2. 13. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в сентябре 2019 г.

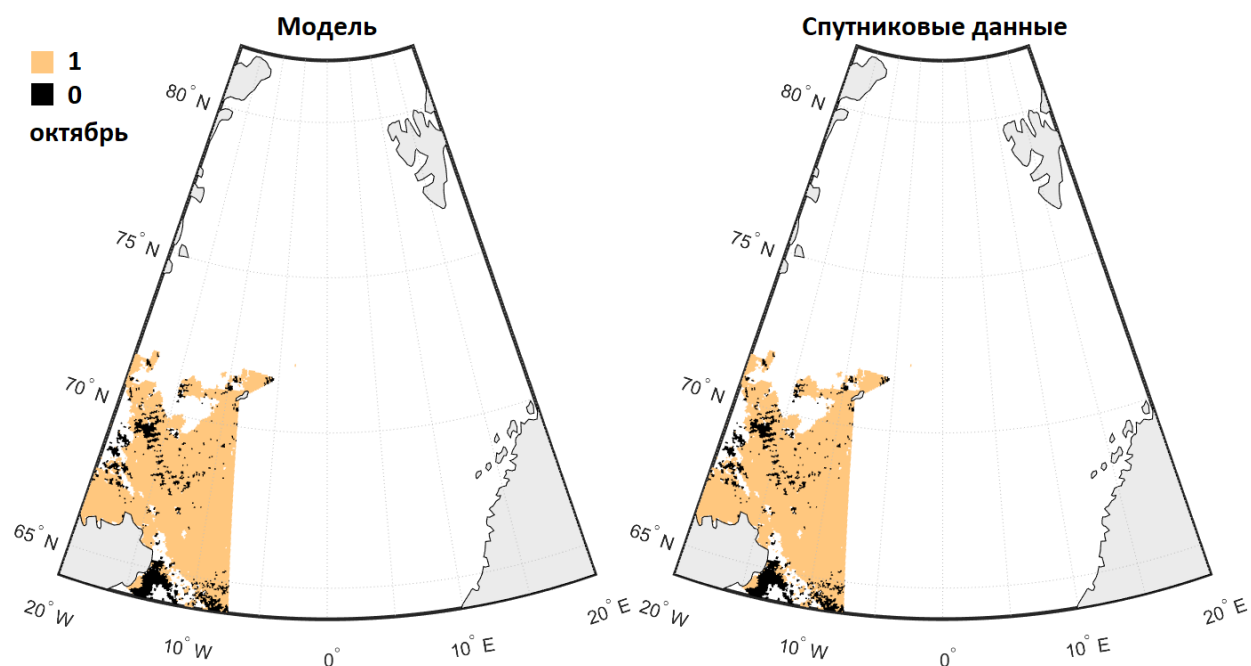


Рисунок 2. 14. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Гренландском море в октябре 2019 г.

Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в 2019 г. Здесь «1» - это высокопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а больше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ , «0» - низкопродуктивные воды с концентрацией хлорофилла-а меньше  $1 \text{ мг м}^{-3}$ .

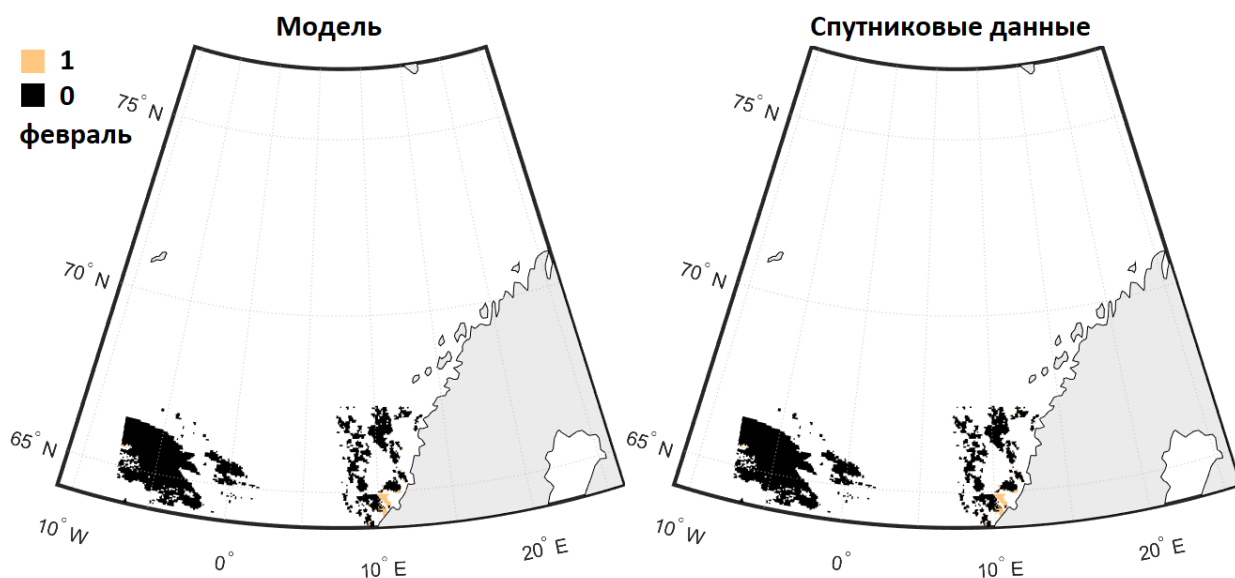


Рисунок 2. 15. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в феврале 2019 г.

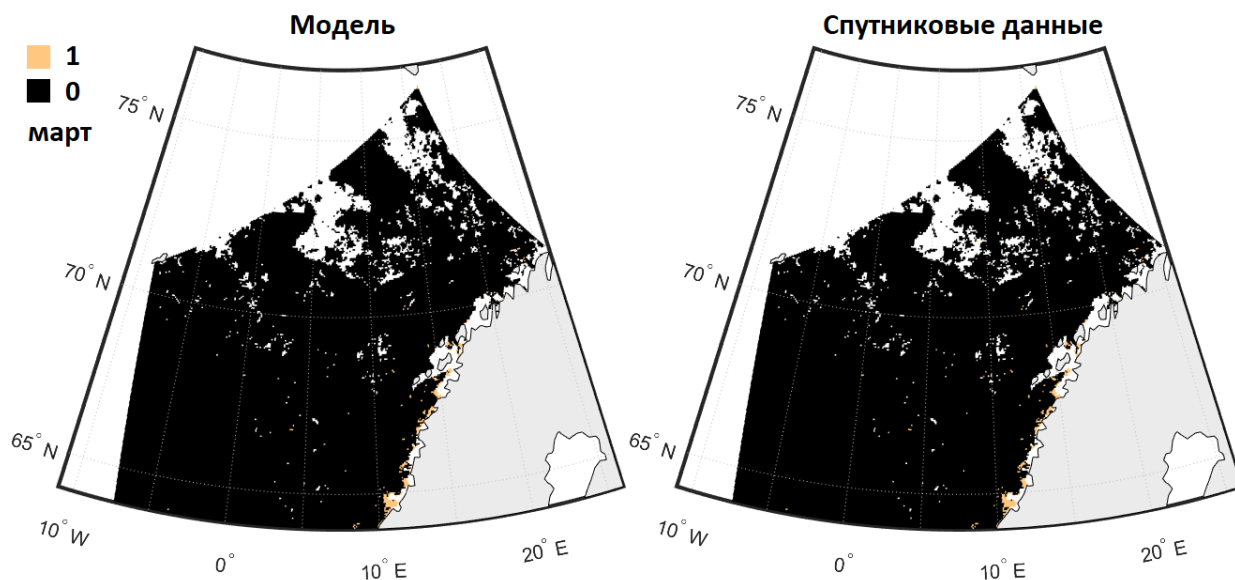


Рисунок 2. 16. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в марте 2019 г.

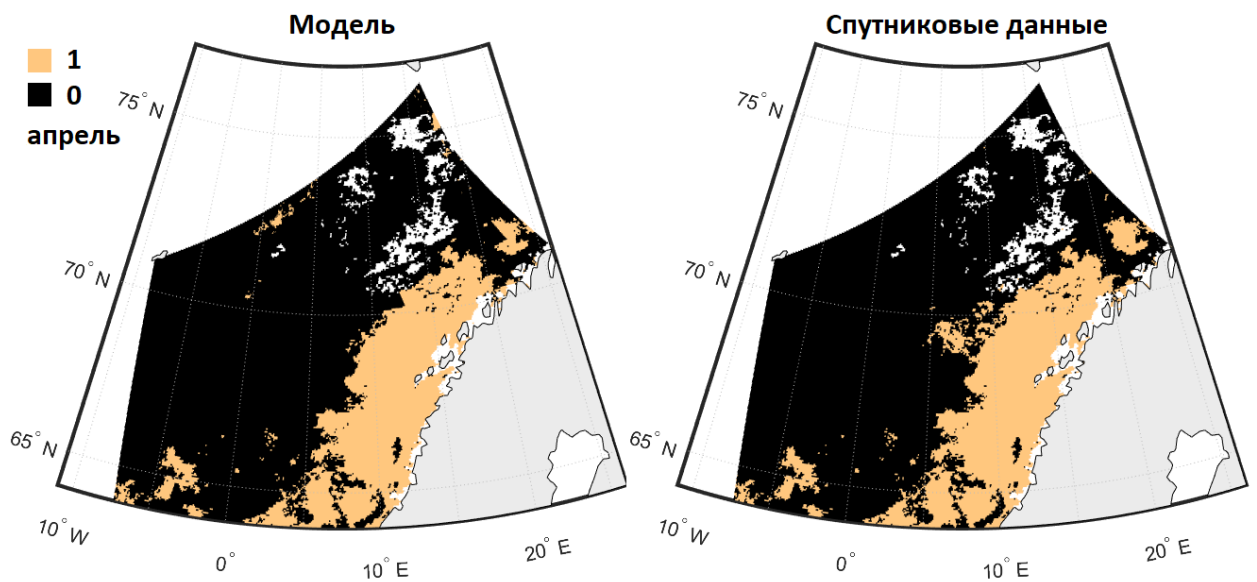


Рисунок 2. 17. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в апреле 2019 г.

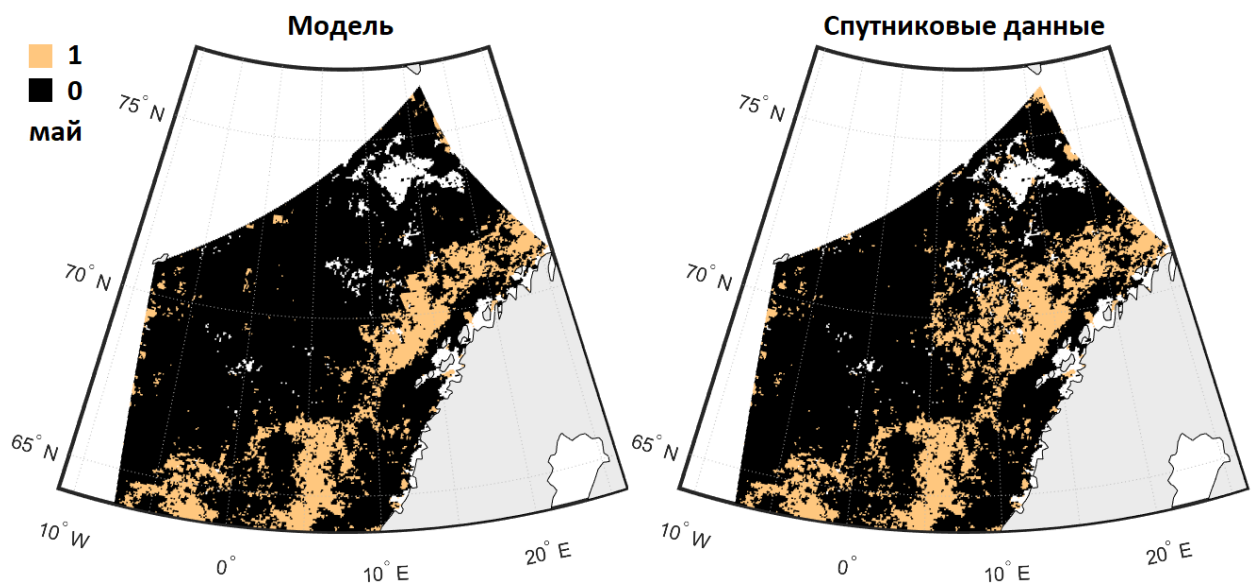


Рисунок 2. 18. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в мае 2019 г.



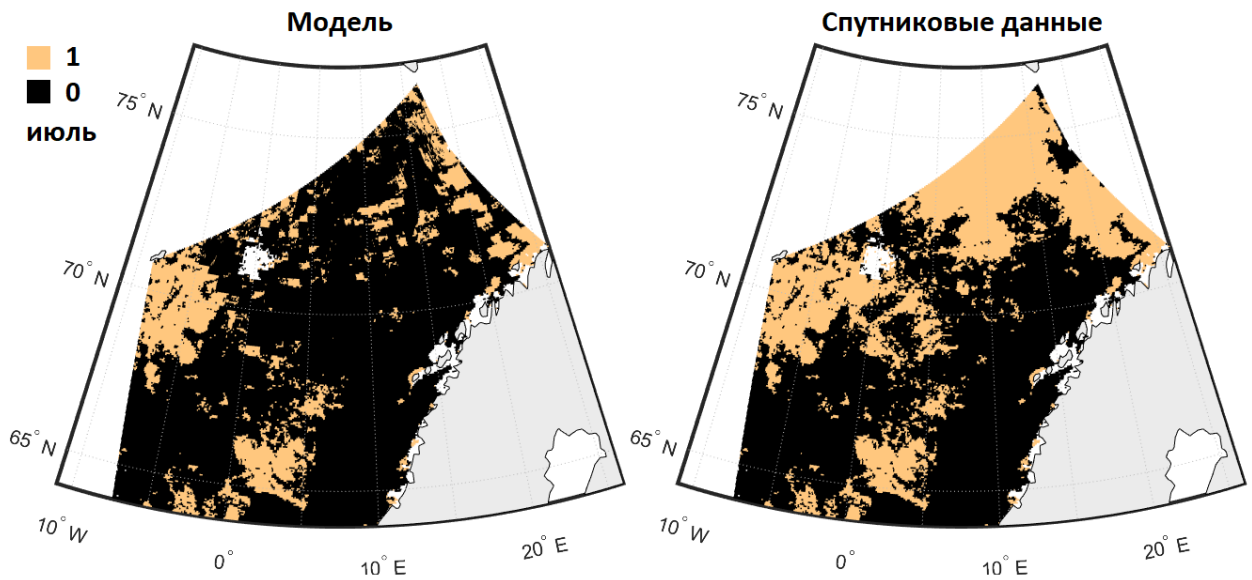


Рисунок 2. 19. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в июле 2019 г.

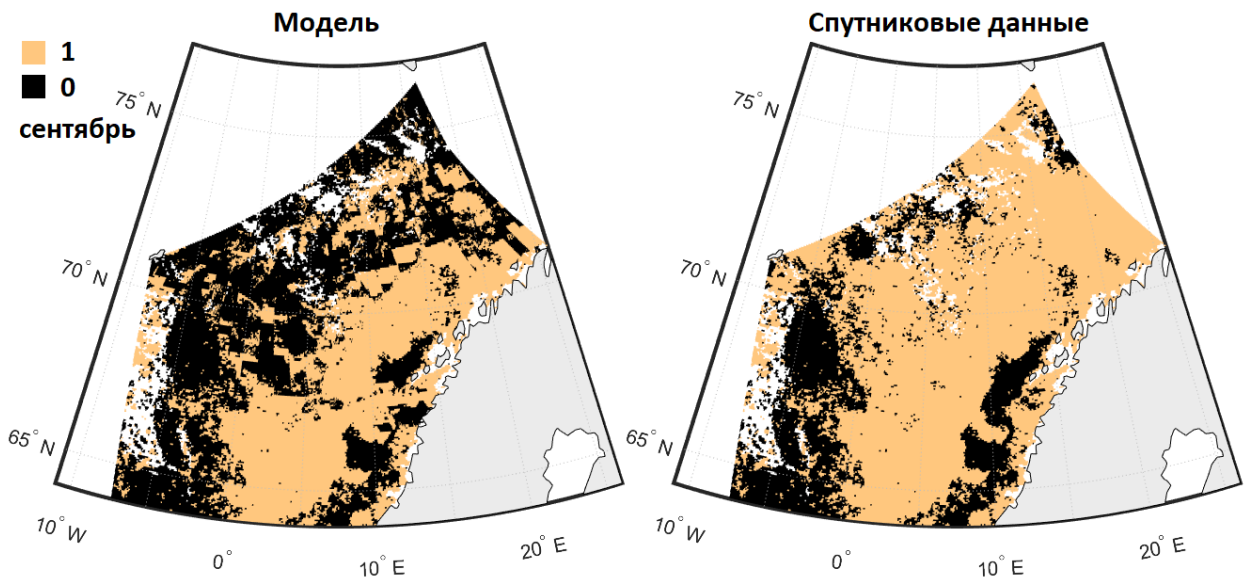


Рисунок 2. 20. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в сентябре 2019 г.

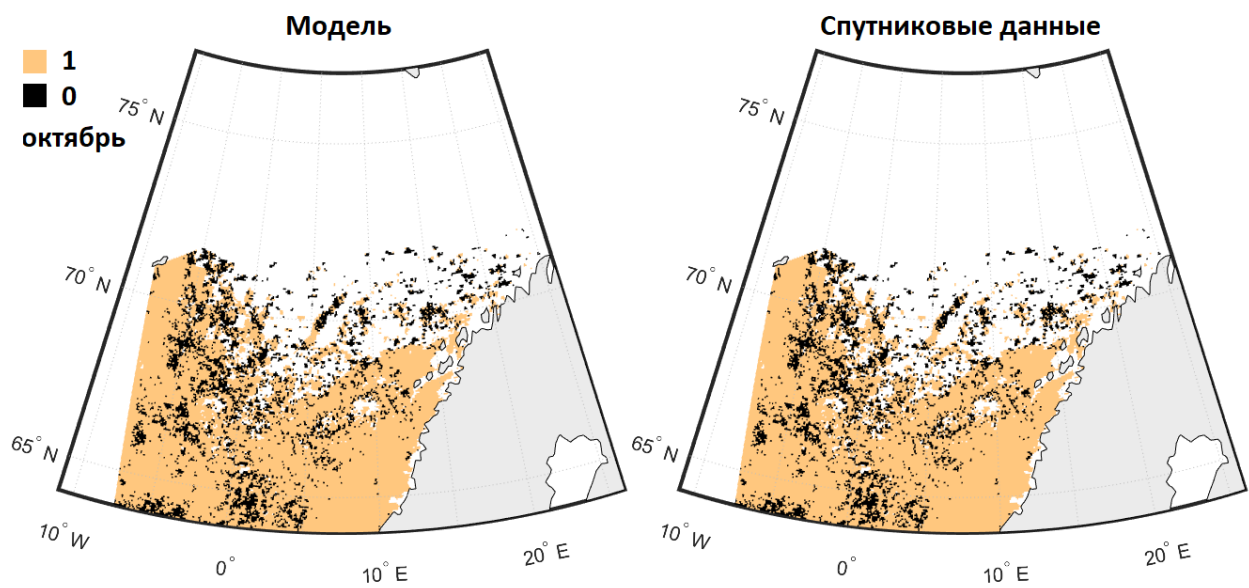


Рисунок 2. 21. Карты распределения площади высокопродуктивных зон в Норвежском море в октябре 2019 г.