



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему Межгодовая динамика биологической продуктивности Японского  
моря

**Исполнитель** Шалдымов Рамис Геннадьевич  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель** кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Чанцев Валерий Юрьевич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«19» иссент 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3  |
| 1 ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ.....   | 5  |
| 1.1 Физико-географическое описание Японского моря .....   | 5  |
| 1.2 Климатическая характеристика .....  | 7  |
| 1.3 Гидрологический режим .....   | 8  |
| 1.3.1 Течения.....  | 9  |
| 1.3.2 Термохалинная структура .....   | 11 |
| 1.3.3 Ледовая обстановка .....  | 15 |
| 1.4 Условия формирования первичной продукции .....  | 17 |
| 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....  | 20 |
| 2.1 База данных морской службы Sorernicus .....   | 20 |
| 2.2 Методика выполнения работы .....  | 24 |
| 2.2.1 Кросс-корреляционный анализ .....   | 27 |
| 2.2.2 Кластерный анализ .....   | 29 |
| 3 АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ.....   | 33 |
| 3.1 Сезонная изменчивость температуры воды в Японском море....  | 33 |
| 3.2 Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла-а в Японском<br>море  | 36 |
| 3.3 Внутригодовая изменчивость течений в Японском море.....   | 39 |
| 3.4 Районирование взаимосвязи распределения хлорофилла-а с<br>распределением температуры воды и течений ..... | 43 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 53 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....  | 54 |

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время по всему миру наблюдается повышенный интерес к изучению океанов и морей, их экосистем и связанных с ними процессов. Более того, как показывают последние исследования, океаны играют ключевую роль в сохранении стабильного климата и обеспечении продовольственной безопасности нашей планеты. Текущая ситуация в различных частях акватории Японского моря привела к необходимости мониторинга и анализа важнейших параметров экологического состояния морской среды.

Одной из основных характеристик акваторий является исследование изменения характеристик первичной продукции в пространстве и времени, что в свою очередь связано с решением основополагающих проблем в области экологии, океанологии и биогеохимии океана.

Первичная продукция - процесс создания органического вещества из неорганических соединений, осуществляемый фитопланктоном в период фотосинтеза при участии такого зелёного пигмента, как хлорофилл. Оценка его величины является основополагающей в анализе биопродуктивности вод, поскольку именно фитопланктон обуславливает функционирование и продукцию высших трофических звеньев экосистемы моря, а также играет важнейшую роль в циклах кислорода и углерода.

Говоря о жизнедеятельности фитопланктона, следует учесть, что для него свойственна высокая степень неоднородности в пространстве, которая зависит от биологических особенностей функционирования и влияния внешних факторов. Например, температуры, скоростей течений, освещённости, состава воды и ряд других параметров.

Задача исследования и оценки объёма биологической продуктивности водоёмов на сегодняшний день весьма актуальна. Её решение позволит выявить общую картину о состоянии экологической ситуации в исследуемом районе.

В связи с этим первостепенной проблемой на сегодняшний день является анализ и оценка экосистемы водного объекта и дальнейшее поддержание его существования в долгосрочной перспективе. Для этого необходимы особые методы получения данных, охватывающие большую площадь поверхности и обрабатывающие колоссальные массивы данных за единицу времени. К таким методам относится дистанционное зондирование Земли. Искусственные спутники, на борту которых установлен ряд датчиков, в том числе и спектрорадиометр, с их помощью способны получать информацию, обрабатывать и хранить её в общей базе данных. Для исследователя подобная информация служит основой в дальнейшем изучении, так как это позволяет определить межгодовую динамику фитопланктона, учитывая при этом сезонный и годовой ход, а также региональные особенности выбранной акватории.

Цель работы заключается в выявлении взаимосвязи хлорофилла-а между динамикой температуры воды и течениями в Японском море.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Сформировать базу данных за 20 летний период по распределению температуры воды, хлорофилла-а, скоростей течений в Японском море, используя базы данных реанализа Copernicus.
2. Проанализировать межгодовую изменчивость характеристик температуры воды, хлорофилла-а, скоростей течений.
3. Оценить пространственно-временное распределение взаимосвязи температуры воды, хлорофилла-а, скоростей течений.

# 1 ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Физико-географическое описание Японского моря

Японское море - обширный глубоководный бассейн. Сахалино-Японская островная дуга отделяет его от океана и Охотского моря. Море имеет большую меридиональную протяжённость в 1200 миль, поэтому оно не только служит границей между умеренным и субтропическим поясами, но и значительно простирается в каждую из них [1].

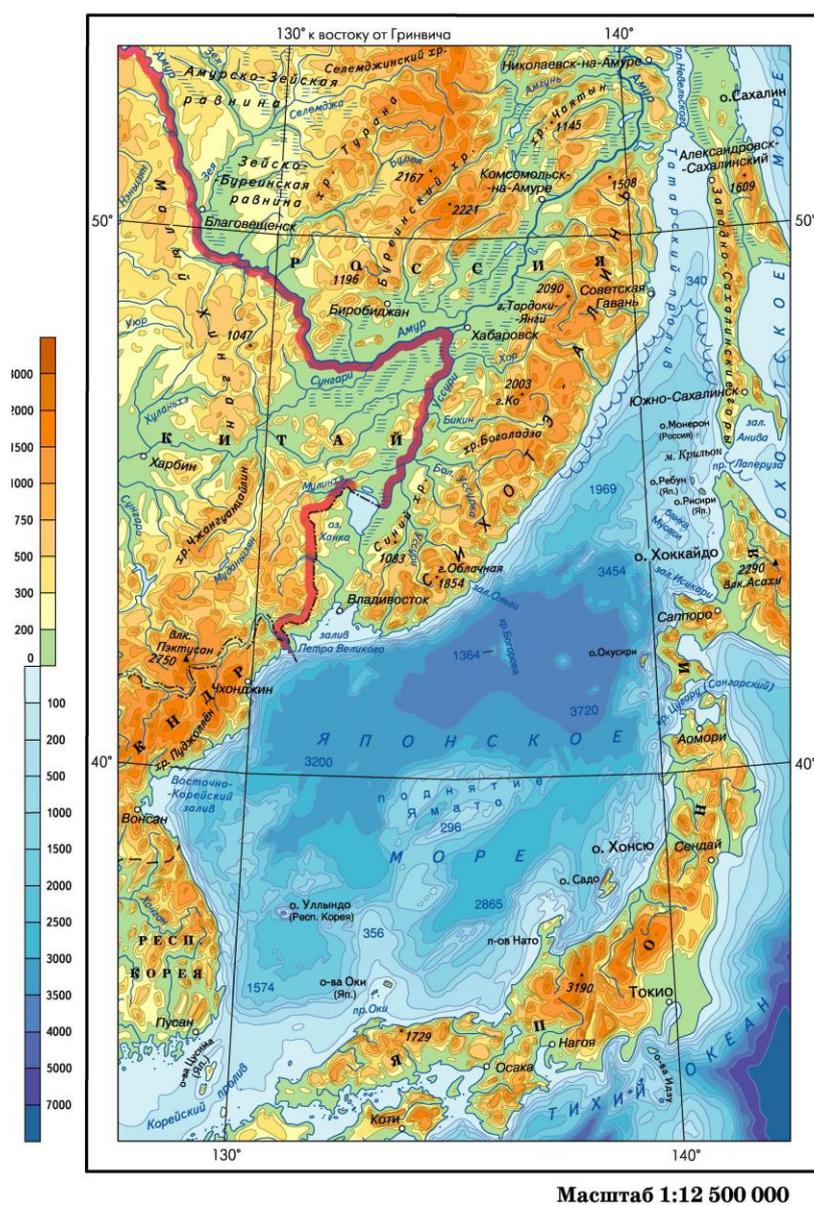


Рисунок 1.1 Физико-географическое расположение Японского моря [2].

По своему географическому положению Японское море относится к типу окраинных океанических морей. Площадь моря занимает 1062 тыс. км<sup>2</sup>, объём равен 1630 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина 1535 м, а наибольшая глубина 3699 м. Для моря характерна большая меридиональная протяжённость, расширяясь в центральной и южной частях, постепенно суживаясь на севере. Японское море имеет свои особенности, которые отличают его от других морей, и в то же время придают некоторое сходство с Чукотским морем. Впадающие реки являются маловодными, береговая линия слабо изрезана, а на акватории как таковых крупных островов нет, зато наиболее значительны мелкие острова. Побережье склонно к разрушению в результате абразии, хотя в прибрежных районах также заметны некоторые изменения. Вдоль побережья из воды выступают характерные образования в виде одиночных скал [3].

Морфометрия дна Японского моря по-своему уникальна и подразделяется на три сектора: северную, центральную и южную. В каждой из них присутствуют свои основные черты и особенности строения. Северная часть представляет собой большой жёлоб, заходящий с юга в Татарский пролив. Он же образует ступени с различными уступами. Центральную часть можно охарактеризовать как глубоководную котловину. В южной же части чередуются многочисленные подводные возвышенности и хребты [1]. Дно Японского моря в целом неровное, здесь преобладают отдельные поднятия и возвышенности разной степени высоты, центральную часть которую занимает обширная возвышенность Ямато [3].

Материковый склон на большом протяжении вдоль материка и островов Японии узкий и крутой. Общей чертой рельефа дна следует считать существование глубоких котловин, отделённых от Тихого океана дугами островов. Такие образования связаны с тем, что море находится на периферии Евразийской и Тихоокеанской плит земной коры. Когда они соприкасаются, происходит вертикальное смещение земной коры, что приводит к трансгрессии и регрессии моря [4].

## 1.2 Климатическая характеристика

Климат Японского моря определяется местной атмосферной циркуляцией, связью с Охотским морем на севере и Тихим океаном на юге, а также расположением в зоне муссонного климата высоких широт. Отличительной чертой климата являются значительные различия между различными частями моря. Север и запад имеют прохладный климат, а восток и юг имеют тёплый климат.

Многочисленные крупные барические системы влияют на море в период с осени по зиму. В частности, Алеутская депрессия и Сибирский антициклон создают горизонтальные градиенты давления. Следствием такого распределения барических систем является нестабильность направления ветров над морем. Из-за особенностей рельефа берегов в северных районах акватории преобладает высокая повторяемость, а в некоторых местах даже есть штили. В среднем скорость ветра составляет 12-15 м/с. С наступлением холодов начинают появляться континентальные циклоны, которые вызывают сильные штормы, а иногда и ураганы, которые могут продолжаться до трёх суток. С приходом осени тропические циклоны нависают над морем, вызывая тайфуны и сильные ветра. Воздух зимой сухой и холодный. Температура в среднем за месяц в северной части моря достигает  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на юге около  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  во время сильных холодов. Зимой в северо-западной части моря сохраняется сухая и ясная погода, а на юго-востоке пасмурно и влажно. В тёплое время года Гавайский максимум достигает своего максимума, вызывая ветер с юга и юго-запада. Из-за слабого градиента давления эти ветры имеют низкую скорость 2-7 м/с. В период перехода от лета к осени ветры резко усиливаются. Летом характерен влажный и тёплый воздух. На протяжении самого тёплого месяца августа в северной части моря температура достигает  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на юге примерно  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Континентальные циклоны вызывают значительные похолодания в северо-западной части моря [3].

### 1.3 Гидрологический режим

Водный баланс зависит от того, как вода связана с окружающими водоёмами. Со всех проливов в Японское море ежегодно поступает около 57 тыс. км<sup>3</sup> воды. Корейский пролив обеспечивает наибольшее поступление вод, примерно 55 тыс. км<sup>3</sup>/год. Речной сток составляет около 212 км<sup>3</sup>/год, а осадки составляют 1390 км<sup>3</sup>/год. Основной расход вод происходит через проливы Сангарский и Лаперуза в размере 25 % и 64 % соответственно. На Корейский пролив приходится лишь небольшая часть стока, около 10 %. Проливы Невельского и Симоносеки, также известный как Каммон, играют наименьшую роль в процессе водообмена. Испарение, достигающее примерно 900 км<sup>3</sup>/год, является важной частью водного баланса [5]. Характер и интенсивность обмена вод Японского моря с Тихим океаном зависит от размера и глубины проливов между островами [4].

Водных масс в Японском море четыре: поверхностная япономорская, поверхностная тихоокеанская, промежуточная тихоокеанская и глубинная япономорская. Со стороны атмосферных процессов, тёплых и холодных течений все они подвержены сильным климатическим воздействиям. Таким образом, структура слоя меняется в зависимости от времени года. Летом водные массы расслоены сильнее, чем зимой. Толщина поверхностной япономорской водной массы различна от места к месту и изменяется от 10 до 50 м. Местами данный слой простирается и до 150 м. Поверхностная тихоокеанская водная масса формируется вне акватории Японского моря и поступает вместе с Цусимским течением. Её толщина также примерно 20-50 м, а максимум - 150м. Промежуточная тихоокеанская водная масса распространяется по вертикали от глубин 25-50 до 200 м, а по горизонтам занимает около 60 % площади моря. Всё остальное водное пространство занято глубинной япономорской водной массой, где наиболее активна осенне-зимняя конвекция [5].

### 1.3.1 Течения

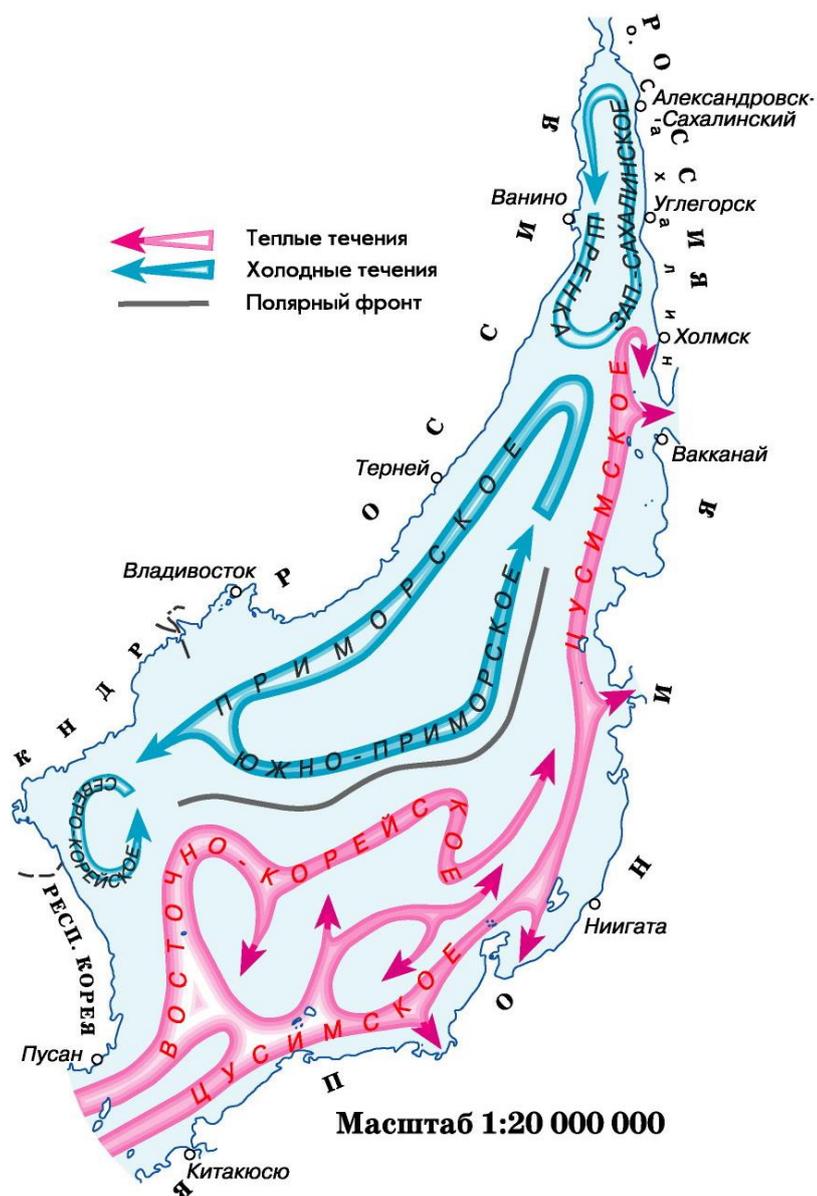


Рисунок 1.2 Горизонтальная циркуляция вод Японского моря [2].

Течения в Японском море формируются рядом факторов и условий, определяющих их поведение. На поверхности моря преобладают три ветви течений, главное из которых - Цусимское, берущее свои корни в Восточно-Китайском море. На Цусимское течение влияет Куроисио, усиливая его. Вдоль северо-западного побережья Японии течение идёт на север через Корейский пролив. В этом месте Восточно-Корейская тёплая ветвь отделяется от Цусимского течения, идущего на север. Позже она присоединяется к основному

потоку. Цусимское течение движется на северо-восток со скоростью 0,26-0,51 м/с. Здесь оно разделяется на два тёплых течения - Сангарское и Лаперуза, выходящие в Тихий океан через Сангарский пролив, и в Охотское море, через пролив Лаперуза. Помимо тёплых течений, в Японском море выделяют ещё и холодные. К ним относятся Северо-Корейское течение, которое движется на юг в районе Владивостока, Лиманское течение, которое движется с малыми скоростями на юго-запад в район Приморья, и Приморское течение, которое начинается в Татарском проливе и движется в сторону Сангарского пролива. Холодные течения в Японском море образуют петли направленные против часовой стрелки и создают границу между тёплыми и холодными течениями, называемую полярным фронтом. Скорость Лиманского течения равна примерно 0,15 м/с, впрочем, как и для Приморского, но немного меньше. Другое дело Северо-Корейское течение, оно наиболее мощное среди холодных, скорость которого достигает 0,26 м/с. В целом, тёплые течения характеризуются гораздо большей скоростью, чем холодные [6].

Интенсивные течения в юго-восточном секторе моря, а также преобладание северного и восточного поверхностного переноса вод, обуславливает перераспределение водных масс на промежуточных и глубинных водных слоях. Движение вод осуществляется в основном по замкнутой системе вертикальной циркуляции, где поверхностной границей являются различного рода вергенции. В этом плане течения Японского моря являются горизонтальными составляющими, а вертикальные циркуляции служат связующим звеном в общей динамике вод [1].

Несмотря на то, что вода в Японском море циркулирует в течение всего года, скорость течений, особенно поверхностных, сильно меняется. Интенсивность поступления в море тихоокеанских вод и изменчивость ветровых течений являются частями климатического режима и водообмена моря, которые вызывают подобные изменения [4].

### 1.3.2 Термохалинная структура

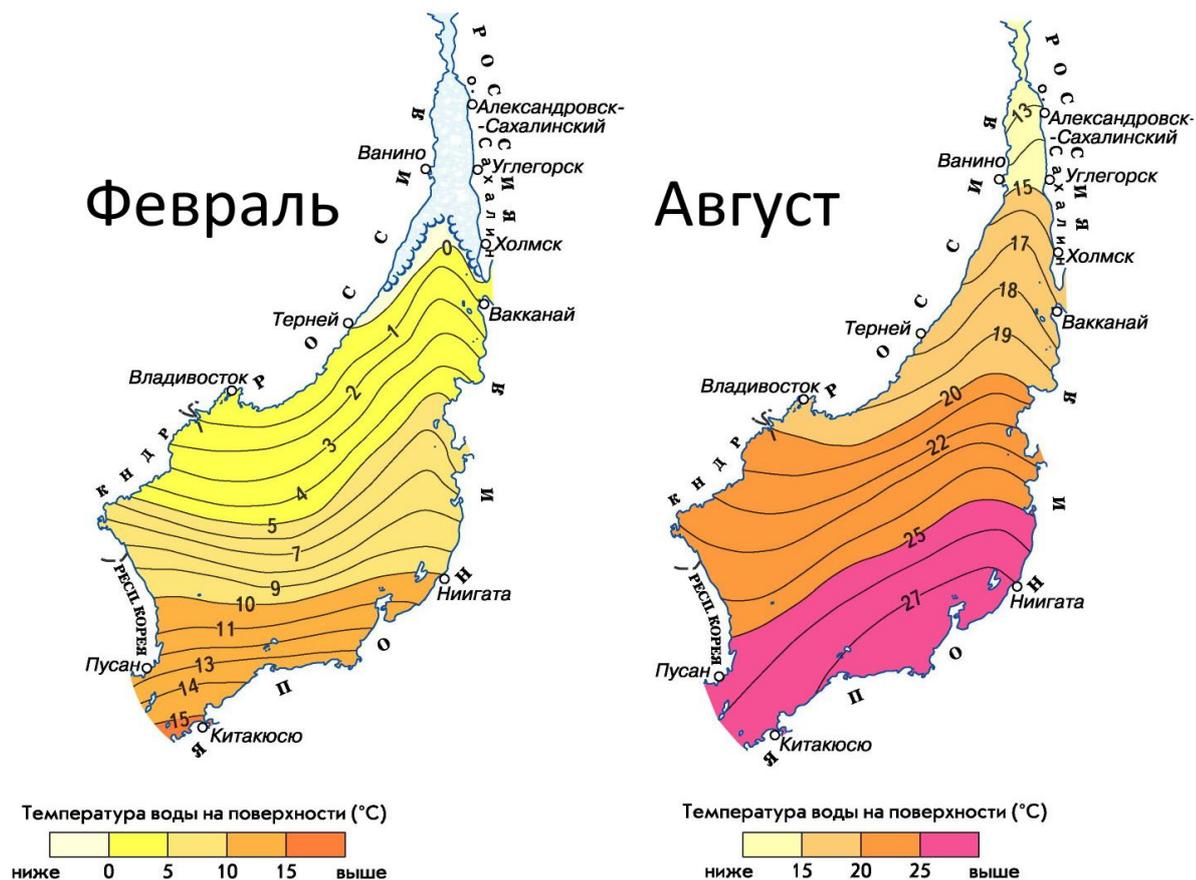


Рисунок 1.4 Температура воды на поверхности Японского моря [2].

Климат и меридиональная протяжённость моря определяют неоднородность распределения температуры воды. Температура в восточной половине моря выше, чем в западной, из-за циклонической системы течений. В феврале поверхностная вода имеет самую низкую температуру, а в августе самую высокую. Температура воды на севере моря падает до точки замерзания. Цусимское течение проходит через Корейский пролив и приносит тепло на юг моря, где температура обычно достигает 13 °C в феврале. Вблизи островов Сахалин и Хоккайдо, где изотермы искривляются к югу, можно заметить охлаждающее влияние восточного побережья. Летом вода на поверхности в северной части моря достигает температуры 15 °C, а в глубоких бухтах до 25 °C. В этот момент на юге моря температура в среднем составляет 27 °C.

Непосредственно в Корейском проливе температура может достигать 32 °С. Характерный изгиб изотерм к северу между 131 и 132° в. д. соответствует летнему распределению температуры воды. Летом хорошо заметно влияние Приморского течения у восточных берегов Кореи, где изотермы опускаются к югу. У островов Хонсю и Хоккайдо отчётливо прослеживается влияние Цусимского течения. Температурные распределения воды в деятельном слое моря (0-200 м) идентичны тем, что наблюдаются на поверхности. В этих районах температура воды наиболее различается между 39 и 42° с. ш. На востоке вода деятельного слоя выше на 6-8 °С, чем на западе моря. Температура воды во всём деятельном слое составляет 14-15 °С на севере и юге моря, и она остаётся стабильной во все сезоны года. В зоне фронта, который меняет своё положение в разные сезоны года, наблюдаются наиболее значительные горизонтальные градиенты температуры воды.

Процессы горизонтальной адвекции и перемешивания влияют на вертикальное распределение температуры воды. Они сильно различаются как в тёплом, так и в холодном районах моря. Три слоя воды в тёплом районе демонстрируют заметные изменения температуры воды с глубиной. Слой 0-250 м демонстрирует резкие сезонные изменения температуры, слой 250-400 м демонстрирует незначительные сезонные изменения, а температура слабо и равномерно снижается с глубиной, и слой ниже 400 м, где температура воды с глубиной почти не меняется. По вертикали северо-западный холодный район моря разделён на два слоя. Слои от 0 до 250 м включают сезонные изменения температуры, а слои от 250 м до дна имеют умеренные или отсутствующие колебания температуры [5].

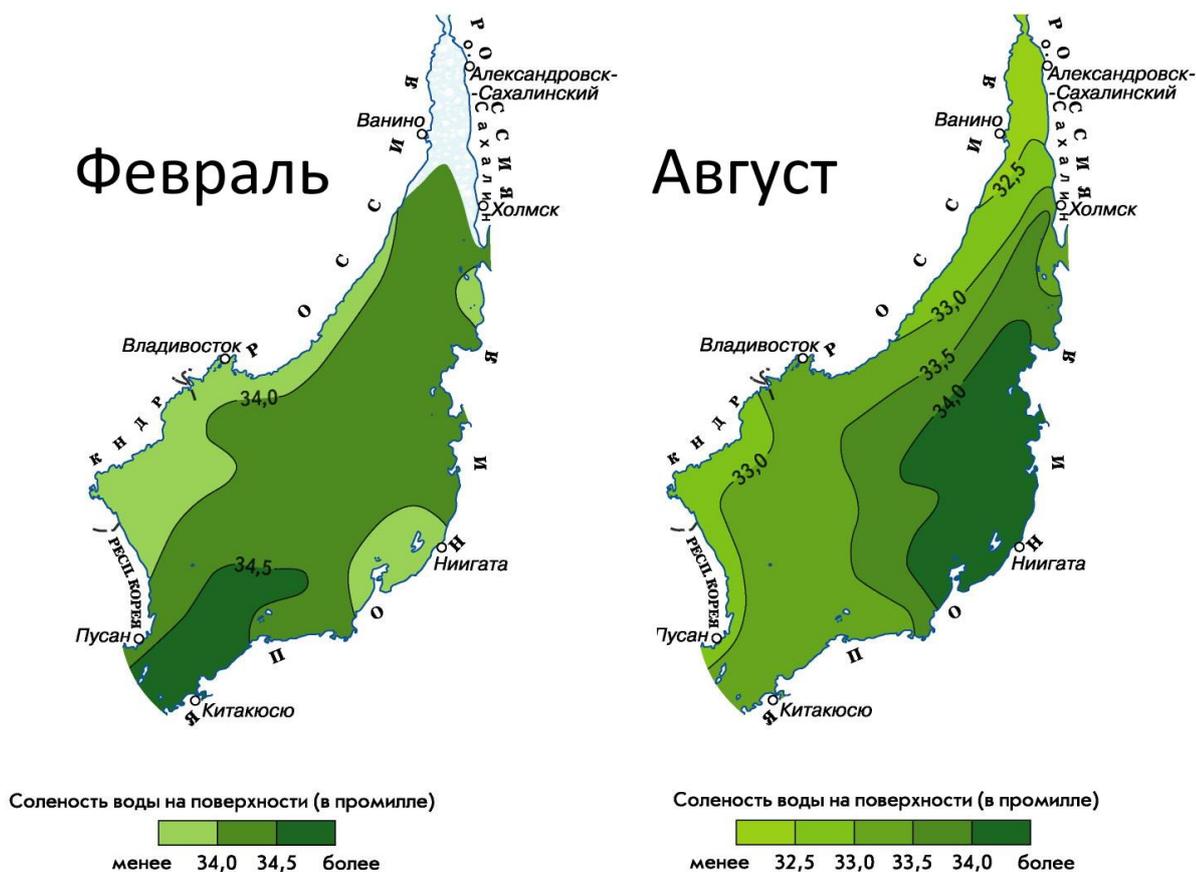


Рисунок 1.5 Солёность воды на поверхности Японского моря [2].

Небольшой пресный сток рек, значительное испарение, низкая связь с океаном и сильная осенне-зимняя конвекция влияют на распределение солёности воды в Японском море. Когда глубокие циклоны и тайфуны с сильными дождями выходят на море, возможно кратковременное распреснение поверхностного слоя воды, особенно вблизи берега. Зимой солёность на поверхности моря достигает 34,0 ‰. Осадки и сток рек минимальны. Увеличение солёности воды на поверхности северной половины моря способствует интенсивному конвективному перемешиванию и образованию льда в холодном регионе. В тёплом секторе Цусимское течение ослаблено, что несколько уменьшает солёность южной половины моря. Вследствие этого, зимой на поверхности Японского моря наблюдается выравнивание солёности, и горизонтальные градиенты солёности становятся минимальными. Для весны характерно постепенное усиление Цусимского течения, приносящего в

Японское море воды с солёностью до 35 ‰. В этот момент осенне-зимняя конвекция прекращается, и таяние льда усиливается на севере моря, что приводит к распреснению и расслоению поверхностной толщи вод. На поверхности градиенты солёности увеличиваются в горизонтальном направлении от холодного к тёплому. Летом существенно снижается солёность на севере и юге моря. В первом районе это происходит под влиянием интенсивных осадков и стока рек, короткий паводок которых наблюдается в конце лета. На юге моря понижение солёности происходит за счёт осадков и значительного опреснения вод Жёлтого моря, проникающих с водами Цусимского течения в Японское море. Максимум солёности на поверхности в это время наблюдается в центральной части моря вблизи островов Хоккайдо и Хонсю. Такому распределению солёности воды способствует усиливающееся испарение в зоне струи Цусимского течения. Средняя солёность на поверхности моря в августе составляет 33,3 ‰. В результате повышенной солёности воды, поступающей через Корейский пролив и Цусимское течение, вода в южной половине моря становится более солёной во время осени. В целом, наивысшая поверхностная солёность вод наблюдается в центральной части Японского моря, от 33,8 ‰ у берегов Кореи до 34,2 ‰ в районе северо-запада острова Хоккайдо.

Солёность вод Японского моря делится на две основные группы в зависимости от вертикального распределения. В холодном секторе моря солёность постепенно увеличивается от поверхности до горизонта 100 м. Она почти не меняется с глубиной. Летом в слое 0-50 м ближе к побережью материка происходит распреснение и изменение солёности от 32 ‰ и почти до 34 ‰ в придонном слое. Зимой здесь наблюдается гомохалинность от поверхности до дна, а солёность достигает почти всегда 34,0-34,1 ‰. В тёплом секторе моря, расположенном к югу от 40° с. ш., солёность резко увеличивается от поверхности до глубины 100 м. Затем она постепенно уменьшается до глубины 400 м, но до дна она остаётся примерно неизменной [5].

### 1.3.3 Ледовая обстановка

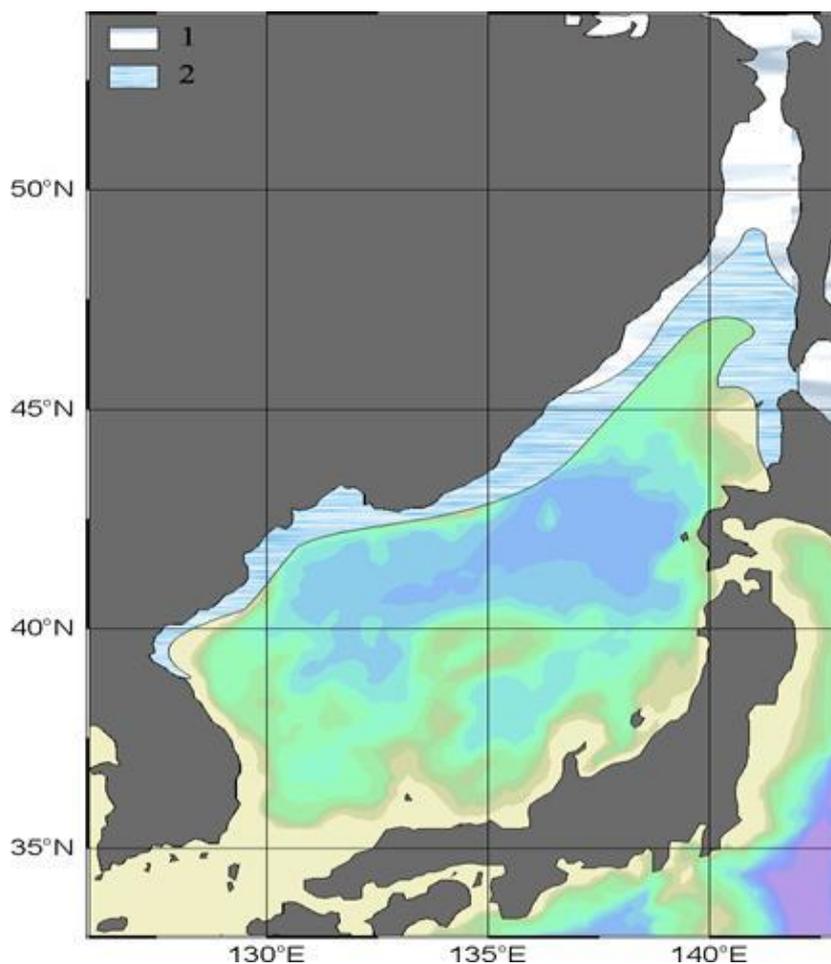


Рисунок 1.6 Среднее многолетнее положение кромки льда в период максимального развития ледяного покрова (1) и предельная граница распространения льда (2) в Японском море [7].

Замерзание Японского моря начинается в середине ноября в районе Татарского пролива и в начале декабря в верховье залива Петра Великого. В середине декабря замерзают районы у северной части Приморского края и залива Петра Великого. В конце декабря на берегах Приморского края появляется лёд. Площадь ледяного покрова увеличивается в сторону открытого моря в январе. С образованием льда навигация в этих местах, естественно, становится более сложной или невозможной. В начале-середине февраля начинается замерзание северного побережья Японского моря, хотя этот процесс

несколько замедлен. В местах, удалённых от берега, таяние льда начинается раньше. Во второй половине марта Японское море уже не покрыто льдом, за исключением районов, расположенных близко к берегу. В северной части моря лёд у берегов обычно стаивает в середине апреля, в это время возобновляется навигация во Владивостоке. Последний лёд в Татарском проливе наблюдается в начале-середине мая. Вдоль берега Приморского края ледяной покров сохраняется в течение 120 дней, тогда как в гавани Де-Кастри в Татарском проливе он сохраняется в течение 201 дня. Вдоль северных берегов КНДР практически нет льда. Поскольку Холмск находится на западном берегу Сахалина, где Цусимское течение проходит через него, он является единственным городом, свободным от льда. Другие части побережья замерзают почти на три месяца, в течение которых прекращается навигация [6].

В период с января по март небольшое количество льда может выйти из Охотского моря в Японское море через пролив Лаперуза. Обычно ветры и течения приводят лёд с севера моря на юг к ледовой кромке, когда низкие температуры увеличивают его толщину. С глубиной увеличивается приток тепла к поверхности из водной толщи, который разрушает прикромочный лёд с его нижней поверхности. Поэтому нередко уже в конце января-феврале у кромки льда встречается подтаявший разрушенный лёд, хотя в целом граница распространения льда продолжает смещаться к югу [5].

Ледовитость Японского моря испытывает значительные изменения от года к году. Нередки случаи, когда ледовитость одного года превышала значения другого [3].

#### 1.4 Условия формирования первичной продукции

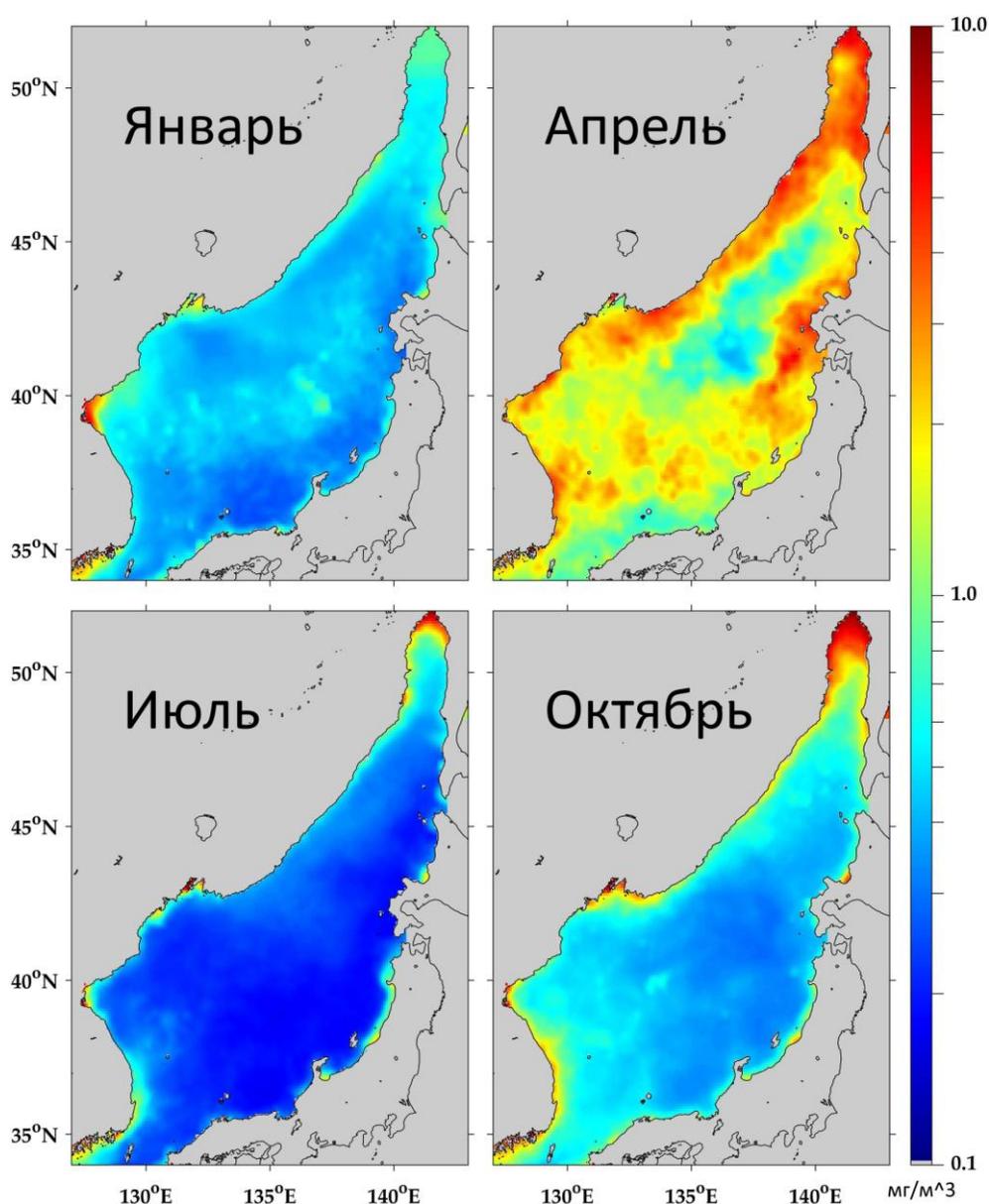


Рисунок 1.7 Сезонное распределение концентраций хлорофилла-а в фитопланктоне, рассчитанное с использованием спутниковых данных MODIS для зимы (январь), весны (апрель), лета (июль), и осени (октябрь) за период 2003-2020 годов [8].

Главным продуцентом органики в водоёмах за счёт явления фотосинтеза является фитопланктон, который благодаря хлорофиллу-а способен преобразовывать воду и углекислый газ в органическое вещество [9].

Большинство трофических цепей основаны на первичной продукции, которая в значительной степени определяет окружающую среду водоема. В этом плане хлорофилл-а играет ключевую роль в процессе фотосинтеза. Важнейшая характеристика, по которой определяют приблизительные показатели биомассы фитопланктона - это его содержание [1].

Так, в Японском море сезонное распределение концентраций хлорофилла-а весной значительно выше по сравнению с другими сезонами. Весной его концентрация достигает  $10 \text{ мг/м}^3$  в основном вдоль восточного побережья Корейского полуострова и России, а также в районе Цусимского течения. Летом его концентрация низкая и составляет менее  $0,3 \text{ мг/м}^3$ . Однако, в результате апвеллинга на юго-восточном и восточном побережье Корейского полуострова, концентрация увеличивается до  $1,0 \text{ мг/м}^3$ . Объясняется это поступлением питательных веществ в поверхностную толщу воды. Осенью хлорофилл-а имеет ту же тенденцию к увеличению концентрации, но в меньшей степени, чем весной [8].

Многочисленные факторы влияют на количество фитопланктона и его способность размножаться. Количество поступающей солнечной энергии (освещённости) и биогенных веществ, а также их соотношение, являются основными факторами, определяющими масштабы производства. Однако сейчас хорошо известно, что механизм количественного развития фитопланктона весьма сложен. Кроме того, он зависит от температуры, устойчивости водных масс и циркуляции вод. Многофакторность влияния на размножение и рост водорослей предопределяет важность сочетания различных факторов (здесь немалую роль может сыграть и обычная случайность), но в то же время она нередко делает относительным значение каждого из них. Например, при хорошем освещении и достаточным количеством биогенов, развитие фитопланктона может быть слабым при большой интенсивности вертикального перемешивания вод, более того, оно может даже подавляться. В этом смысле весьма продуктивными являются представления о компенсационной точке (или критической глубине), соответствующей глубине,

ниже которой не происходит рост водорослей, а также о соотношении эвфотического слоя с толщиной слоя интенсивного перемешивания. Если слой перемешивания большой и превышает критическую глубину, как это происходит в субарктической зоне во время зимней конвекции, прирост водорослей может быть затруднен или невозможен. С другой стороны, при стратификации вод и более высоком положении плотностного скачка (не глубже границы эвфотического слоя), как правило, создаются условия для фотосинтеза. Тем не менее, даже при наличии вертикальной устойчивости вод интенсивность фотосинтеза значительно снижается или вообще прекращается при истощении поверхностных вод биогенами. Несомненно, определённое значение здесь имеют и внутренние физиологические и биологические ритмы, являющиеся следствием адаптации к сезонной циклике климато-океанологических условий, а также результатом конкурентных межвидовых отношений. Данные обстоятельства должны накладывать свой отпечаток на характер годовых циклов фитопланктона в целом и на конвейерное чередование его группировок в ходе сезонных и внутрисезонных сукцессий. И конечно, здесь большое значение имеет региональная специфика физико-географических условий [1].

## 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

### 2.1 База данных морской службы Copernicus

Для изучения биопродуктивности Японского моря были использованы данные с сайта <https://marine.copernicus.eu/> [10]. Морская служба Copernicus (служба мониторинга морской среды) принадлежит Европейскому Союзу и направлена на изучение Земли. Проект предоставляет пользователю открытую, достоверную и систематическую справочную информацию о физическом, а также биогеохимическом состоянии Мирового океана, его динамике и изменчивости, как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Портал позволяет наблюдать состояние погоды за достаточно большой промежуток времени. По всей поверхности можно узнать температуру и солёность воды, скорость ветра и течений, высоту волн, распределение хлорофилла-а, льда и целый ряд других характеристик, как на поверхности, так и с глубиной.

Выборка включала в себя два набора базы данных:

1. Global Ocean Physics Reanalysis. Продукт GLOBAL\_MULTIYEAR\_PHY\_001\_030.
2. Global Ocean Biogeochemistry Hindcast. Продукт GLOBAL\_MULTIYEAR\_BGC\_001\_029.

В качестве исходной информации используются среднемесячные значения температуры, скоростей течений и концентрации хлорофилла-а за 20 летний промежуток времени (с января 1999 по декабрь 2018 года) с глубинами до 200 метров.

Формат файлов NetCDF (.nc), который чаще всего используется для хранения гидрометеорологических данных в последнее время. Популярность этого формата связана с высокой степенью сжатия информации без каких-либо потерь, так что даже огромные объёмы данных занимают небольшую память [11]. Визуализация данных проводилась через графический пакет Panoply [12].

Исследование динамики и закономерностей распределения выбранных характеристик осуществлялось на 65 станциях в Японском море. Все они расположены примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Из-за особенностей места, а точнее его ограниченности в северной и южной части моря, количество станций разнится по группам: от 2-3 в северной части и 2-4 в южной части моря, а в центральной - от 4 до 5 станций.

Также стоит подчеркнуть, что данные в некоторых станциях при вертикальном распределении характеристик, по тем же причинам, неполные или отсутствуют. На это в основном повлияло строение морфометрии дна моря.



Рисунок 2.1 Карта и нумерация исследуемых станций в Японском море.

Таблица 1 Нумерация станций и их координаты.

| С.Ш.  | В.Д.   | №<br>станции |
|-------|--------|--------------|
| 51    | 141    | 1            |
| 51    | 141.48 | 2            |
| 50.18 | 141    | 3            |
| 50.18 | 141.48 | 4            |
| 49.3  | 140.48 | 5            |
| 49.3  | 141.42 | 6            |
| 48.3  | 140.36 | 7            |
| 48.3  | 141.36 | 8            |
| 47.48 | 139.48 | 9            |
| 47.48 | 140.42 | 10           |
| 47.48 | 141.42 | 11           |
| 47    | 139    | 12           |
| 47    | 140.18 | 13           |
| 47    | 141.3  | 14           |
| 45.48 | 138.18 | 15           |
| 45.48 | 139    | 16           |
| 45.48 | 140.24 | 17           |
| 45.48 | 141.3  | 18           |
| 44.54 | 137    | 19           |
| 44.54 | 138.3  | 20           |
| 44.54 | 140    | 21           |
| 44.54 | 141.18 | 22           |
| 44    | 136    | 23           |
| 44    | 137.3  | 24           |
| 44    | 139.3  | 25           |
| 44    | 141    | 26           |
| 43.12 | 135.18 | 27           |
| 43.12 | 136.3  | 28           |
| 43.12 | 138    | 29           |
| 43.12 | 139.48 | 30           |

|       |        |    |
|-------|--------|----|
| 42.24 | 132    | 31 |
| 42.24 | 133.3  | 32 |
| 42.24 | 135    | 33 |
| 42.24 | 137    | 34 |
| 42.24 | 139    | 35 |
| 41.3  | 130.36 | 36 |
| 41.3  | 132.3  | 37 |
| 41.3  | 134.3  | 38 |
| 41.3  | 136.3  | 39 |
| 41.3  | 138.3  | 40 |
| 40.18 | 129.42 | 41 |
| 40.18 | 131.24 | 42 |
| 40.18 | 133.3  | 43 |
| 40.18 | 135.36 | 44 |
| 40.18 | 138    | 45 |
| 39.3  | 128.3  | 46 |
| 39.3  | 130.36 | 47 |
| 39.3  | 133    | 48 |
| 39.3  | 135.3  | 49 |
| 39.3  | 138.12 | 50 |
| 38.36 | 129.18 | 51 |
| 38.36 | 131.3  | 52 |
| 38.36 | 133.36 | 53 |
| 38.36 | 135.36 | 54 |
| 38.36 | 137.36 | 55 |
| 37    | 130    | 56 |
| 37    | 131.3  | 57 |
| 37    | 133.3  | 58 |
| 37    | 135.36 | 59 |
| 36    | 130    | 60 |
| 36    | 131.3  | 61 |
| 36    | 133.3  | 62 |
| 36    | 135.36 | 63 |

|       |        |    |
|-------|--------|----|
| 35.12 | 129.48 | 64 |
| 35.12 | 131.3  | 65 |

## 2.2 Методика выполнения работы

В ходе работы массив данных за весь исследуемый промежуток времени был усреднён по месяцам. По полученным пространственно-временным рядам были построены графики вертикального распределения характеристик, чтобы определить до какой глубины исследуемые параметры сохраняют устойчивое и положительное значение состояние среды.

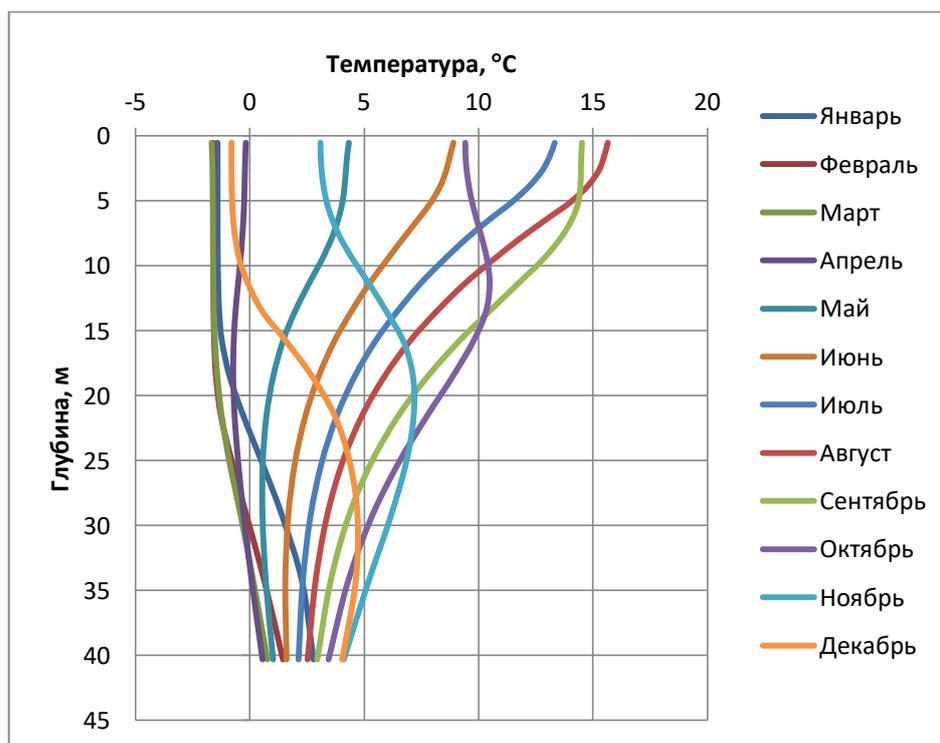


Рисунок 2.2 Вертикальное распределение температуры воды в 40 метровом поверхностном слое, станция 1.

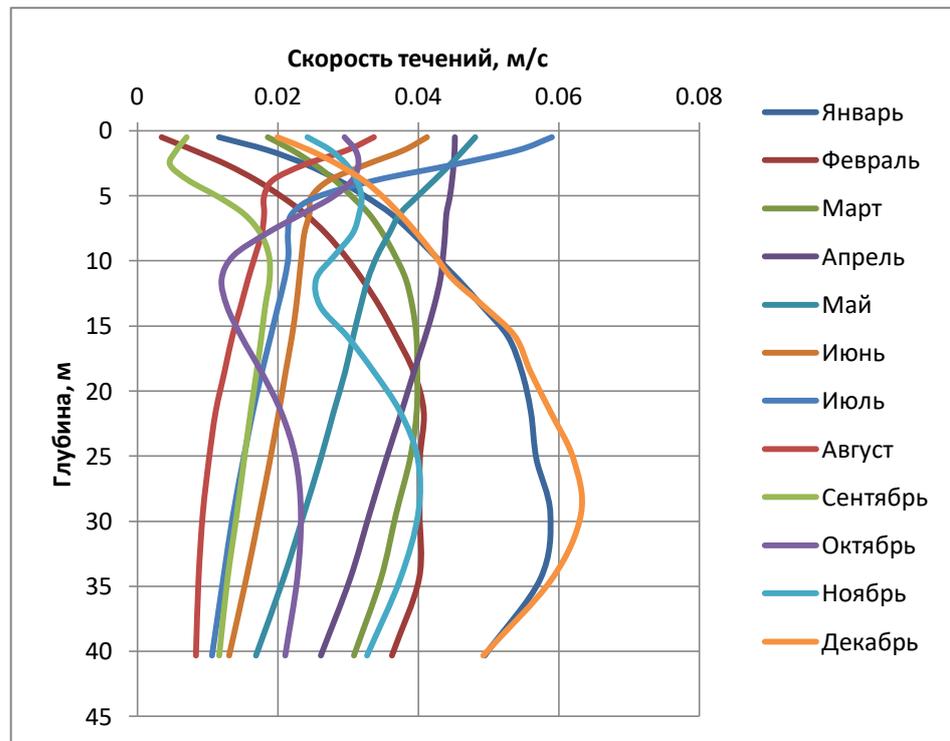


Рисунок 2.3 Вертикальное распределение скорости течений в 40 метровом поверхностном слое, станция 1.

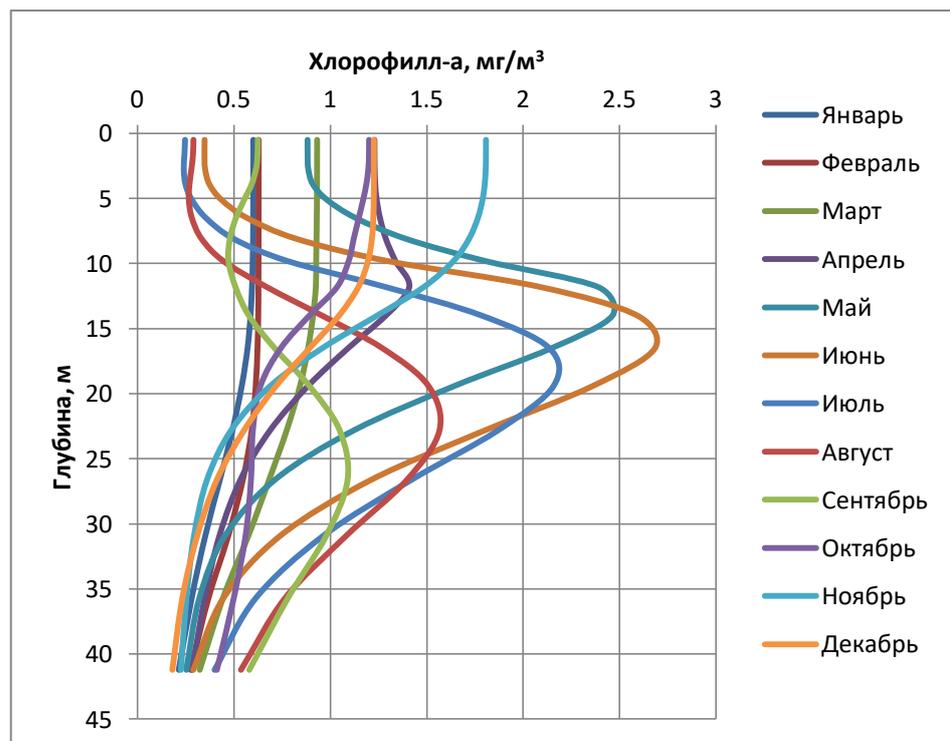


Рисунок 2.4 Вертикальное распределение хлорофилла-а в 40 метровом поверхностном слое, станция 1.

Как видно из рисунков 2.2-2.4, исследуемые характеристики имеют тенденцию убывать с глубиной. У каждой характеристики своя природа поведения. Так, температура в основном плавно понижается, достигая 40 метровой глубины. Интенсивность течений распространяется по вертикали схожим образом, хотя видны некоторые различия по сезонам. Другое дело хлорофилл-а, если в поверхностном слое его значение не так велико, то глубже, на глубине примерно 10-25 метров, видны явные скачки значений. С глубиной же его концентрация начинает резко падать, и уже ближе к 40 метрам достигает минимальных значений.

Горизонты глубже 40 метров в данной работе не рассматриваются, т.к. значения характеристик в них крайне малы.

Именно поэтом было решено ограничиться только верхним 40 метровым слоем и дальнейшим его разбиением на три подслоя, где характеристики проявляются наиболее активно. Подобное решение обуславливается особенностями распространения хлорофилла-а в пространстве и влияния климатических факторов на поверхностную толщу воды. Данный подход позволит более точно отследить различного рода аномалии в распределении характеристик и выявить закономерности между ними.

Как известно, физические процессы могут происходить синхронно, когда они испытывают колебания параметров одновременно. Однако чаще всего процессы происходят асинхронно, когда изменение одного параметра отражается на другом через определённое время, которое определяется запаздыванием.

В рамках данной работы, процесс исследования осуществлялся в целом статистическими методами, а именно: проводился анализ первичных статистик, кросс-корреляционный анализ и кластерный анализ (методом К-средних). Последние в свою очередь представляют основу в изучении и анализе физических и биохимических характеристик, а также их взаимосвязей.

## 2.2.1 Кросс-корреляционный анализ

Для оценки взаимосвязей между исследуемыми переменными используется показатель корреляции.

Коэффициент корреляции  $r$  характеризует степень близости линейной зависимости.

Линейная зависимость двух случайных величин заключается в том, что при увеличении одной величины другая имеет тенденцию возрастать (или убывать) по линейному закону.

Если значение первой переменной совпадает с одним и единственным значением второй переменной, можно считать, что их связь является функциональной. В этом случае  $|r| = 1$ . Если одно значение первой переменной совпадает с любым другим второй переменной, то связь между ними является абсолютно случайной и  $|r| = 0$ . В остальных же случаях связь является стохастической, то есть одному значению первой переменной соответствует некоторое значение второй переменной с некоторой вероятностью,  $0 < |r| < 1$ .

Соотношение значений двух переменных позволяет определить характер связи. Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать, то это прямая зависимость, тогда  $r > 0$ . Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию убывать, то это уже обратная зависимость, и тогда  $r < 0$ .

Если необходимо рассчитать коэффициенты корреляции для нескольких переменных в каждом сочетании друг с другом (обычно больше двух), то можно записать набор полученных коэффициентов корреляции в виде корреляционной матрицы.

Если связь стохастическая, то рассчитанная величина  $r$  может быть большой или маленькой, что отражает степень связи. Чтобы её оценить, необходимо выполнить проверку коэффициента корреляции на значимость. Для этого используется критерий Стьюдента, рассчитывается его эмпирическое

значение  $t^*$ . Затем рассчитывается его критическое значение  $t_{кр}$ , при уровне значимости 5 %. После чего они сравниваются.

Если  $t^* > t_{кр}$ , коэффициент корреляции значим, то есть между двумя переменными существует статистически значимая прямая (или обратная, в зависимости от знака) связь.

Если  $t^* < t_{кр}$  предполагается, что коэффициент корреляции незначим, то есть между двумя переменными статистически значимая линейная связь отсутствует.

Нужно помнить, что наличие значимой корреляции между двумя переменными не определяет причинно-следственных отношений между ними, то есть не значит, что одна переменная зависит от другой [13].

Взаимная корреляция, также известная как кросс-корреляция, представляет собой измерение, отслеживающее движение двух или более наборов данных временных рядов относительно друг друга [14]. Она используется для сравнения нескольких временных рядов и объективного определения того, насколько хорошо они совпадают друг с другом, а также для определения наилучшего совпадения. Кросс-корреляция также может обнаружить какие-либо периодичности в данных.

Для двух стационарных временных рядов кросс-корреляционная функция определяется как коэффициент корреляции между  $x_t$  и  $y_{t+k}$  в зависимости от  $k$ :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} X_t Y_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} Y_t \sum_{t=1}^{n-k} X_{t+k} / (n - k)}{\sqrt{[\sum_{t=k}^{n-k} Y_t^2 - \sum_{t=k}^{n-k} Y_t^2 / (n - k)][\sum_{t=k+1}^n X_t^2 - \sum_{t=k+1}^n X_t^2 / (n - k)]}}$$

Таблично заданная корреляционная функция затухает довольно быстро и представлена рядом  $r_k = r(k)$ . Наличие пиков в ККФ указывает на наличие временного лага. Взаимное влияние рядов носит периодический характер, если пики функции  $r(k)$  повторяются через определённое время [14].

### 2.2.2 Кластерный анализ

Кластерный анализ использует методы и алгоритмы теории распознавания образов для решения задачи классификации большого количества объектов в многомерном пространстве признаков [15].

Смысл метода заключается в том, чтобы разделить данные на определённое количество однотипных групп; иными словами, если два или более объекта находятся близко друг к другу, то это означает, что их физические состояния сходны. Чем ближе данные расположены друг к другу в пространстве признаков, тем меньше различия в их физических характеристиках [16].

Таким образом, главной задачей кластерного анализа является выделение компактных групп точек в многомерном пространстве исходных признаков. При этом важно иметь представление о количестве классов, которые выделяются, что обычно бывает неизвестно до начала классификации. Кроме того, считается, что изменчивость или варьирование характеристик внутри класса можно считать несущественным. Иными словами, дисперсия характеристик внутри класса должна быть малой [15].

Кластером называется такая группа объектов из рассматриваемого множества, для которой средний квадрат расстояния внутри класса до центра группы меньше среднего квадрата расстояния до общего центра в исходной совокупности.

Цель метода K-средних состоит в том, чтобы разделить  $m$  наблюдений (из пространства  $R^n$ ) на  $k$  кластеров, при этом каждое наблюдение относится к кластеру, к которому оно ближе всего относится [17].

В качестве меры близости используется Евклидово расстояние:

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2}$$

где  $x, y \in \mathbb{R}^n$

Например, есть несколько наблюдений  $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$ ,  $x^{(i)} \in \mathbb{R}^n$ . Чтобы минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центроидов, метод K-средних разделяет  $m$  наблюдений на  $k$  групп (или кластеров) ( $k \leq m$ )  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ :

$$\min \left[ \sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_i} \|x^{(j)} - \mu_i\|^2 \right]$$

где  $x^{(i)} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mu_i \in \mathbb{R}^n$ ;  $\mu_i$  - центроид для кластера  $S_i$

Разбиение исследуемых объектов на кластеры сводится к определению центроидов этих кластеров, если мера близости до центроида определена, при этом исследователем предварительно задаётся число кластеров  $k$ .

Рассмотрим стартовый набор  $k$  средних (центроидов)  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  в кластерах  $S_1, S_2, \dots, S_k$ . Изначально, центроиды кластеров выбираются по определённому правилу или случайным образом (например, выбрать центроиды, максимизирующие начальные расстояния между кластерами).

Для дальнейшей оценки сравниваем наши наблюдения с кластерами, где среднее (центроид), находится ближе всего к ним.

Важно: наблюдение принадлежит только одному кластеру, даже если его можно отнести к двум или более кластерам [18].

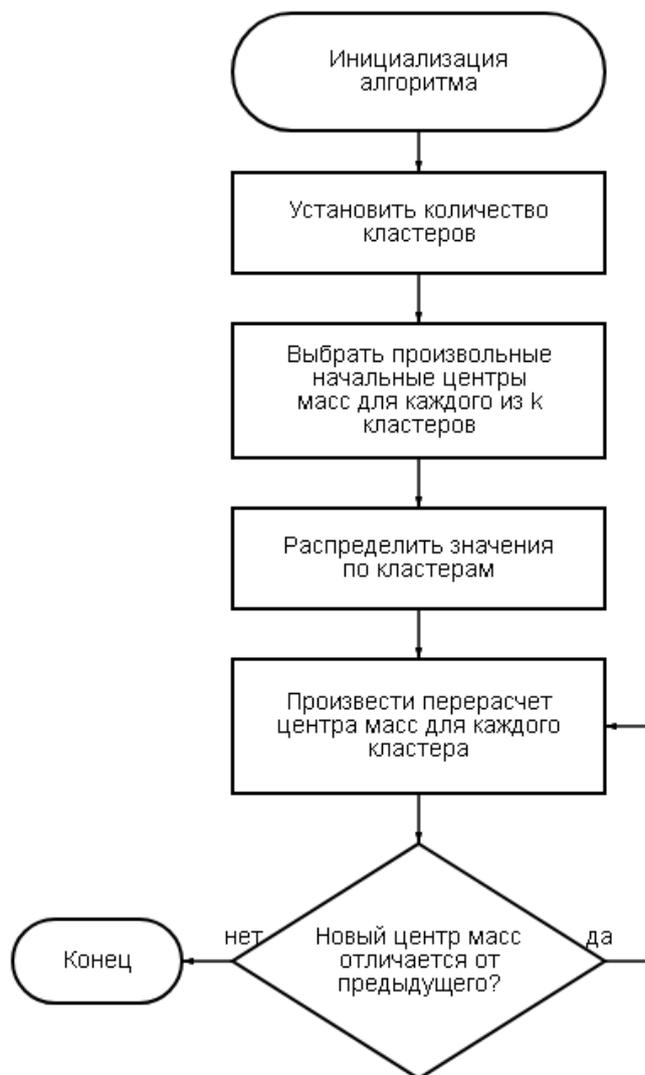


Рисунок 2.5 Блок-схема (алгоритм) выполнения кластеризации методом К-средних.

После центроид каждого  $i$ -го кластера перевычисляется по правилу:

$$\mu_j = \frac{1}{s_i} \sum_{x^{(j)} \in S_i} x^{(j)}$$

Таким образом, на каждом шаге алгоритм К-средних перевычисляет центроид для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге.

Когда значения  $\mu_j$  остаются неизменными, то есть не изменяются, алгоритм завершается:  $\mu_j^{\text{шаг } t} = \mu_j^{\text{шаг } t+1}$ .

Здесь также необходимо отметить, что на некорректность результата может повлиять неправильный выбор первоначального числа кластеров  $k$ , следовательно, применяя метод К-средних необходимо осуществить первоначальную проверку подходящего числа кластеров для данного набора данных.

Выделим ключевые особенности метода К-средних:

1. Евклидово расстояние используется как мера близости.
2. Число кластеров предварительно неизвестно и задаётся исследователем.
3. На качество кластеризации влияет первоначальное разбиение.

### 3 АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Для того чтобы визуально отследить изменчивость распределения первичной продукции в Японском море, были построены сезонные карты распределения температуры воды, хлорофилла-а, а также карты внутригодового хода скоростей течений и их направлений в 40 метровом поверхностном слое (разбитый на три подслоя). Кроме того, для полноты картины приведены результаты кластерного и кросс-корреляционного анализа внутри каждого класса для выявления связей между исследуемыми характеристиками.

По данным исследования [8] максимальные показатели концентрации хлорофилла-а наблюдаются в апреле и октябре, а минимальные в январе и июле, поэтому, последующий анализ изменчивости распределения характеристик, будет основан на результатах поверхностного (1) и промежуточного (2) слоях для весны (апреля) и осени (октября).

#### 3.1 Сезонная изменчивость температуры воды в Японском море

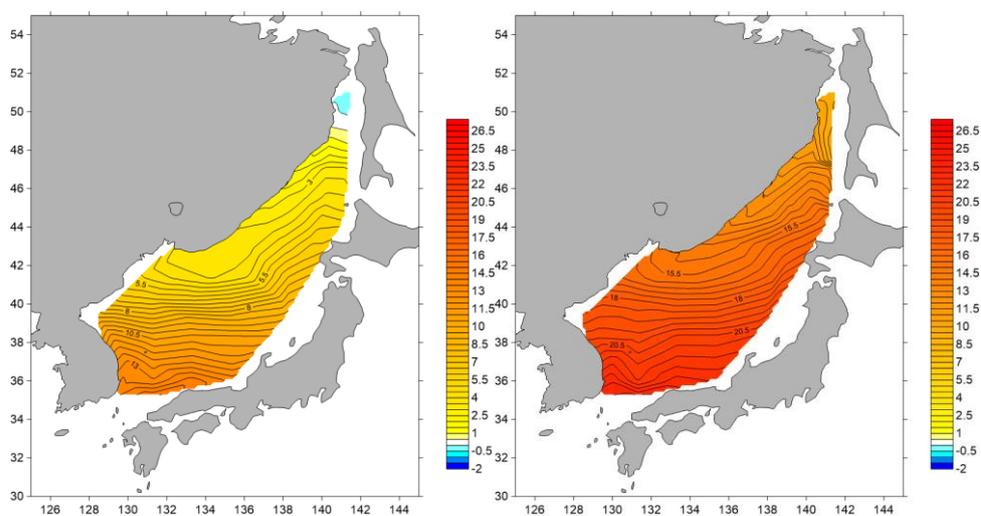


Рисунок 3.1 Распределение температуры воды в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

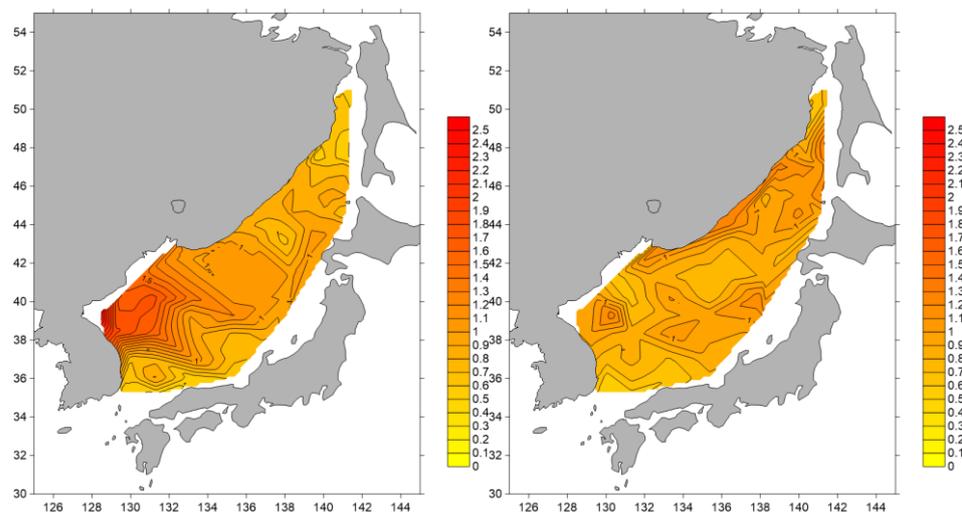


Рисунок 3.2 Среднеквадратическое отклонение (СКО) температуры воды в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

На рисунках 3.1 и 3.2 продемонстрированы климатические изменения температуры воды и их СКО для 1 слоя соответственно.

Так, в апреле средние значения температуры воды по всей акватории равны примерно  $6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , исключением является северный сектор моря, где значения температуры в этот сезон отрицательные, от  $-0,2$  до  $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимум приходится на южную часть акватории, где температура достигает  $15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В октябре поверхностная толща воды сильно прогрета. Средние показатели температуры воды по всему морю равны примерно  $16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Минимальные значения наблюдаются в северной части моря, около  $9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимум в южной части, тут значения доходят до  $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Наибольшие изменения наблюдаются в апреле, в зоне циркуляции Северо-Корейского и Восточно-Корейского течений. СКО в этих местах составляет примерно  $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Некоторые изменения прослеживаются и в октябре, значение которых равно  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  у побережья Приморского и Хабаровского краёв, а также в Татарском проливе, и в области струи Восточно-Корейского и Цусимского течений.

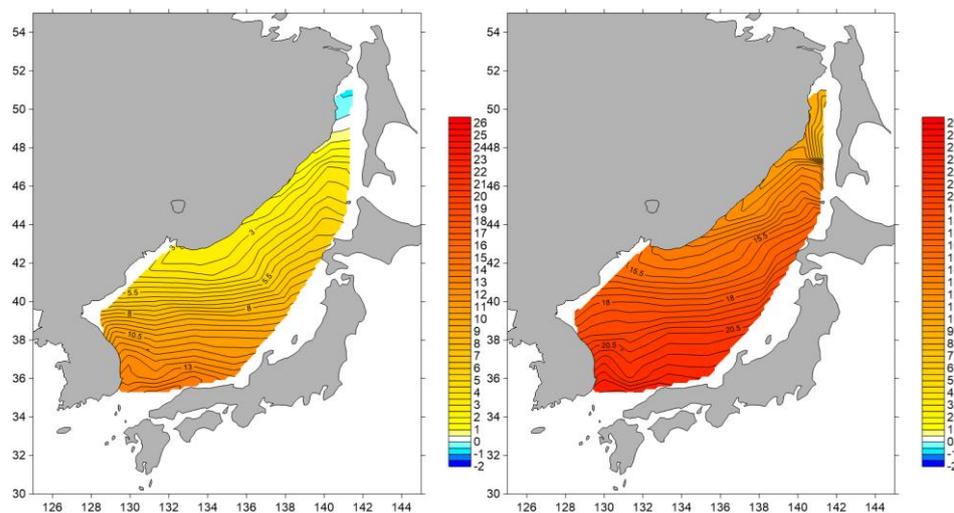


Рисунок 3.3 Распределение температуры воды в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

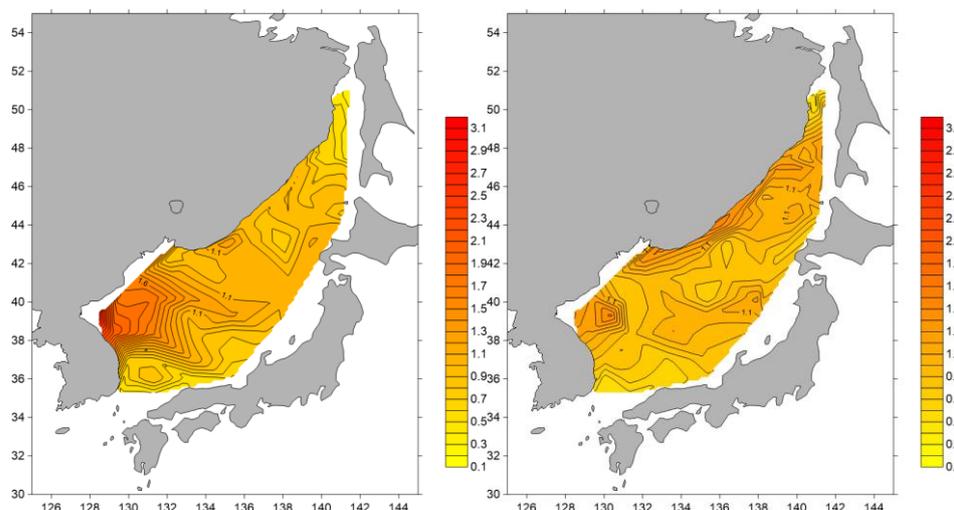


Рисунок 3.4 Среднеквадратическое отклонение (СКО) температуры воды в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

На рисунках 3.3 и 3.4 показана схожая обстановка как и в поверхностном слое, но с некоторыми изменениями.

Температура воды в апреле, в среднем, не превышает  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в октябре  $15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В апреле вода прогревается до  $15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в октябре до  $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В это же время северная часть моря по-прежнему покрыта льдом, отрицательные значения в данной области варьируются от  $-0,3$  до  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В октябре минимальные показатели температуры равны примерно  $6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Как и в поверхностном слое, сильные изменения расположены в зоне Северо-Корейского и Восточно-Корейского течений. СКО здесь равно  $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Похожая обстановка наблюдается и в октябре. Значимые изменения прослеживаются вдоль берегов России и КНДР, где СКО порядка  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла-а в Японском море

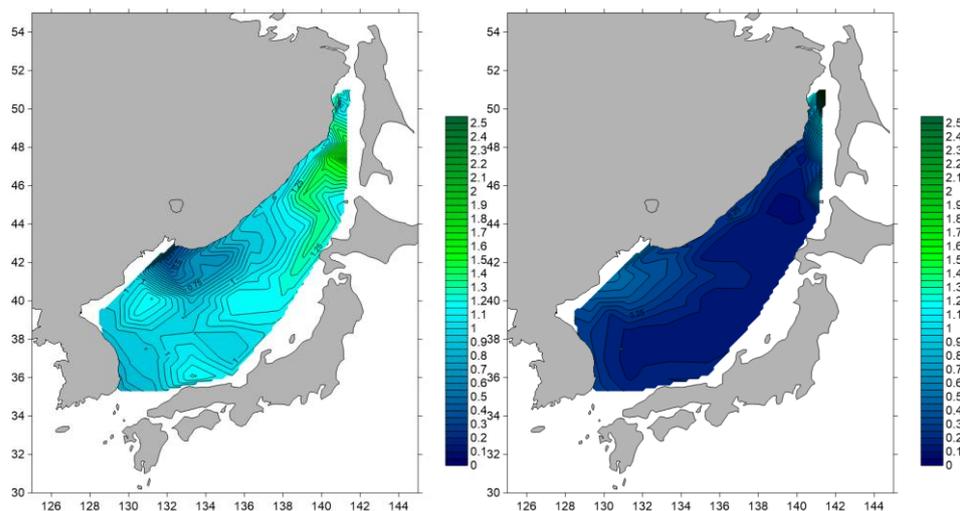


Рисунок 3.5 Распределение концентрации хлорофилла-а в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

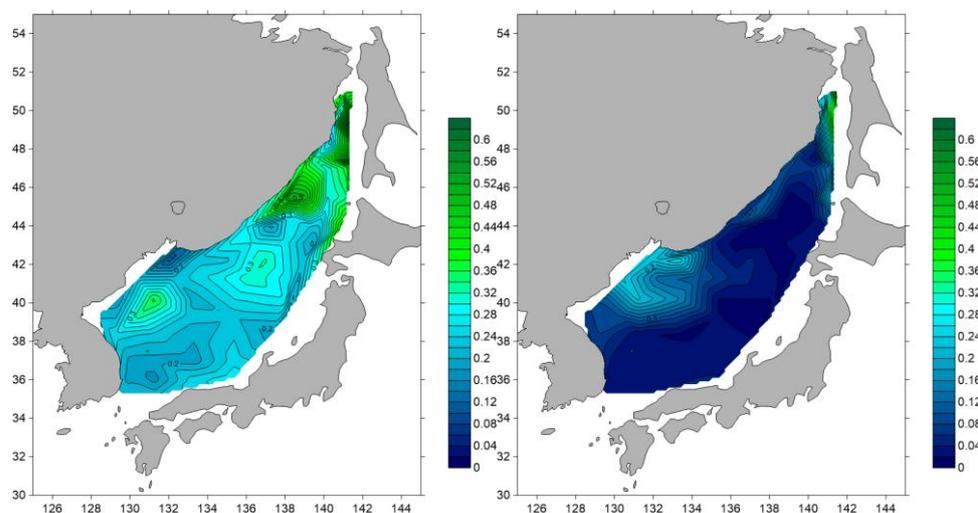


Рисунок 3.6 Среднеквадратическое отклонение (СКО) концентрации хлорофилла-а в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

Концентрация фитопланктона на рисунках 3.5 и 3.6 отражает его распределение в поверхностной толще воды.

Наиболее сконцентрирован он в апреле месяце, в это время года его значение в среднем по всему морю равно  $1,08 \text{ мг/м}^3$ . Максимум его распространения находится в Татарском проливе на линии прохождения Цусимского течения. Концентрация их равна  $1,92 \text{ мг/м}^3$ . Малые значения концентрации видны у берегов России и КНДР, около  $0,30 \text{ мг/м}^3$ .

Октябрь месяц можно охарактеризовать как бедный по общей концентрации хлорофилла-а. Средние значения невелики, менее  $0,32 \text{ мг/м}^3$ . Большая его часть расположена в прибрежных районах и бухтах, здесь он наиболее активен. Максимальная концентрация находится в северном секторе море и равна  $2,27 \text{ мг/м}^3$ , где преобладают холодные течения, а с ними и дивергенция водных масс. Небольшое количество фитопланктона отслеживается и в заливе Петра Великого, примерно  $0,09 \text{ мг/м}^3$ .

СКО выражен отчётливо в зонах циркуляции холодных и тёплых течений, где они взаимодействуют друг с другом. На апрель приходится около  $0,66 \text{ мг/м}^3$  в заливе Петра Великого и в северной части акватории, а  $0,47 \text{ мг/м}^3$  приходится на октябрь в северной части моря.

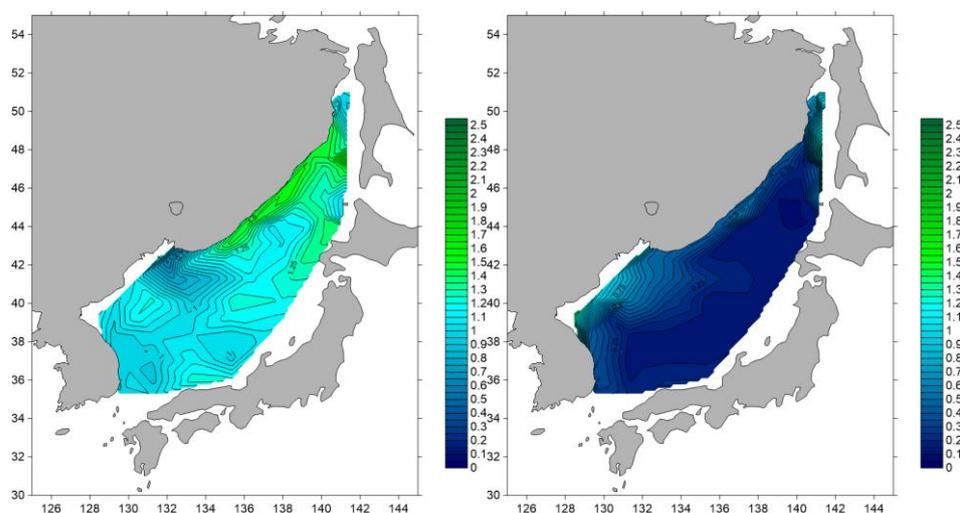


Рисунок 3.7 Распределение концентрации хлорофилла-а в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

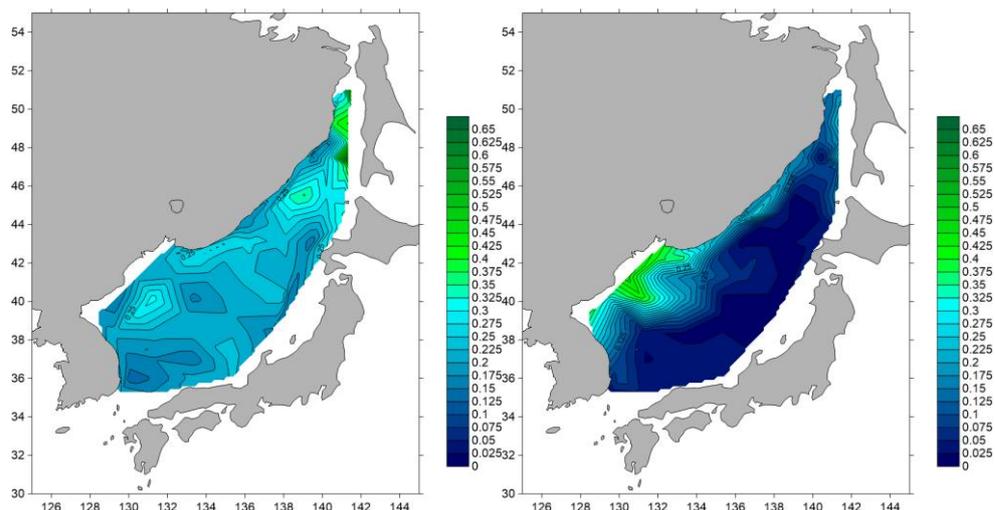


Рисунок 3.8 Среднеквадратическое отклонение (СКО) концентрации хлорофилла-а в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

В промежуточном слое концентрация хлорофилла-а ведёт себя немного иначе, чем на поверхности. На рисунках 3.7 и 3.8 это хорошо отслеживается.

В апреле, средняя концентрация по всему морю (в основном в южной и центральной частях) равна примерно  $0,37 \text{ мг/м}^3$ . Наивысшие показатели концентрации проходят по веткам Приморского и Цусимского течений, и на входе в пролив Лаперуза, а также в районе Татарского пролива, значения, которых около  $1,82 \text{ мг/м}^3$ . Минимальные значения сконцентрированы в заливе Петра Великого, здесь их концентрация достаточно велика и равна  $0,56 \text{ мг/м}^3$ .

В октябре хлорофилл-а распространён довольно слабо. Его среднее значение в этот сезон составляет всего  $0,37 \text{ мг/м}^3$ , а максимум, примерно  $1,52 \text{ мг/м}^3$ , сосредоточен в северной части моря и в заливе Петра Великого. Минимальные значения распространены в основном на всех тёплых потоках Японского моря, значение которых не превышает  $0,09 \text{ мг/м}^3$ .

Крупные изменения концентрации видны в апреле, в зоне действия холодного Приморского течения, берущее начало в Татарском проливе на севере. В этой области СКО равно  $1,82 \text{ мг/м}^3$ . В октябре, наибольшие изменения характеристики сконцентрированы в заливе Петра Великого и у

побережья Приморского, Хабаровского краёв. СКО в данных районах порядка  $1,52 \text{ мг/м}^3$ .

### 3.3 Внутригодовая изменчивость течений в Японском море

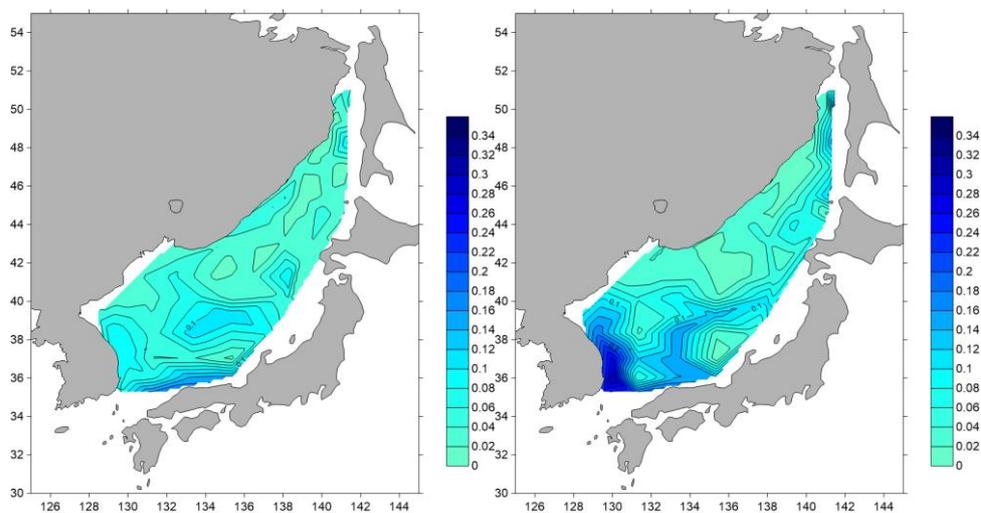


Рисунок 3.9 Распределение скорости течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

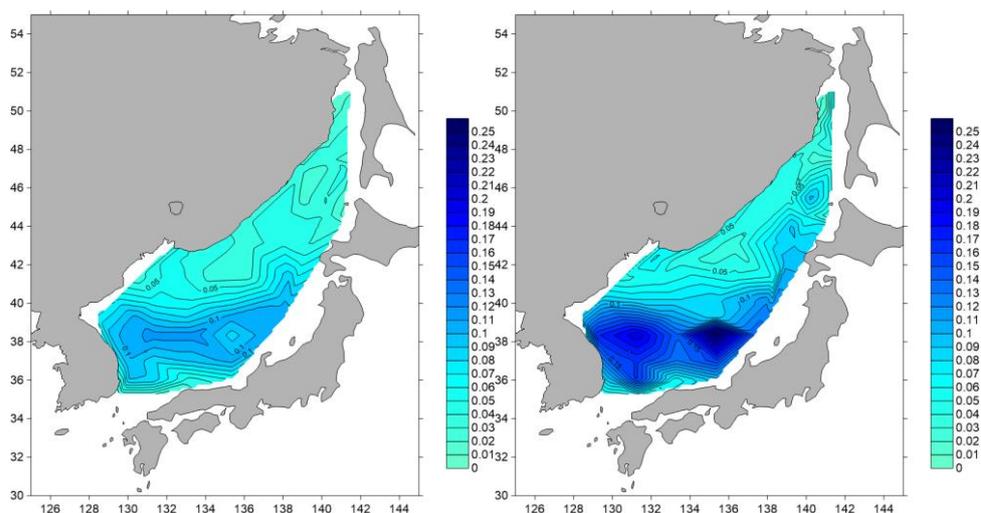


Рисунок 3.10 Среднеквадратическое отклонение (СКО) скорости течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

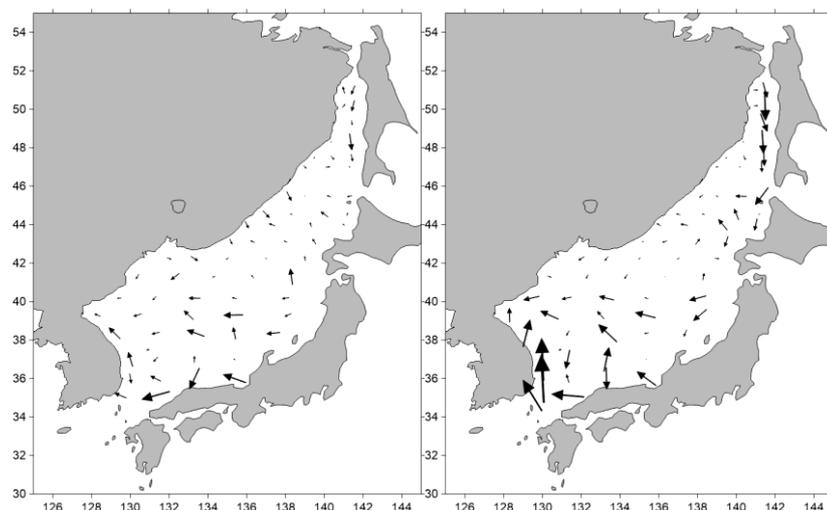


Рисунок 3.11 Направление течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

Скорость течений, их изменение и направление отображено на рисунках 3.9, 3.10 и 3.11.

Интенсивность течений в апреле по всей акватории моря в среднем равна 0,050 м/с. Максимальная скорость потоков достигает 0,183 м/с, а наименьшая 0,004 м/с. Высокая повторяемость ветров прослеживается в северной, центральной и южной частях моря, где преобладают в основном Ю, З и ЮЗ направления. Такое поведение обуславливает повышенное изменение скорости течений в южном секторе Японского моря, где циркулируют два потока тёплых течений - Восточно-Корейское и Цусимское. СКО здесь равно 0,018 м/с.

В октябре скорость течений усиливается практически в два раза. Их средняя скорость возросла, и равна 0,075 м/с. Максимальная же скорость доходит до отметки в 0,306 м/с, а минимальная до 0,002 м/с. Преобладают ветра высокой повторяемости, как на севере, так и на юге. В северной части высокая повторяемость у ветров Ю направления, а на севере доминируют вихри разных направленностей, в основном С и СЗ направления. Всё это в совокупности создаёт мощные порывы и завихренности. Наивысшие изменения скорости наблюдаются в зонах круговорота Восточно-Корейского и Цусимского течений. СКО достигает высоких значений, порядка 0,248 м/с.

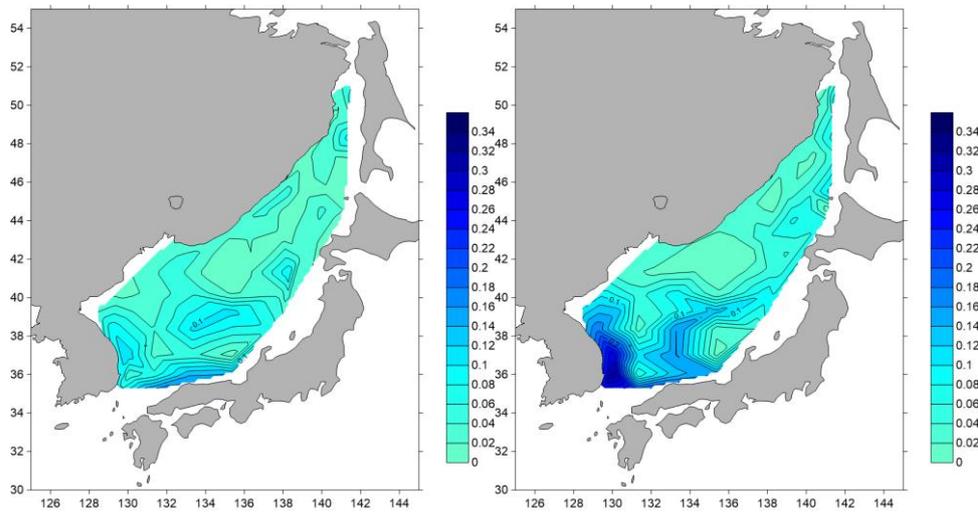


Рисунок 3.12 Распределение скорости течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

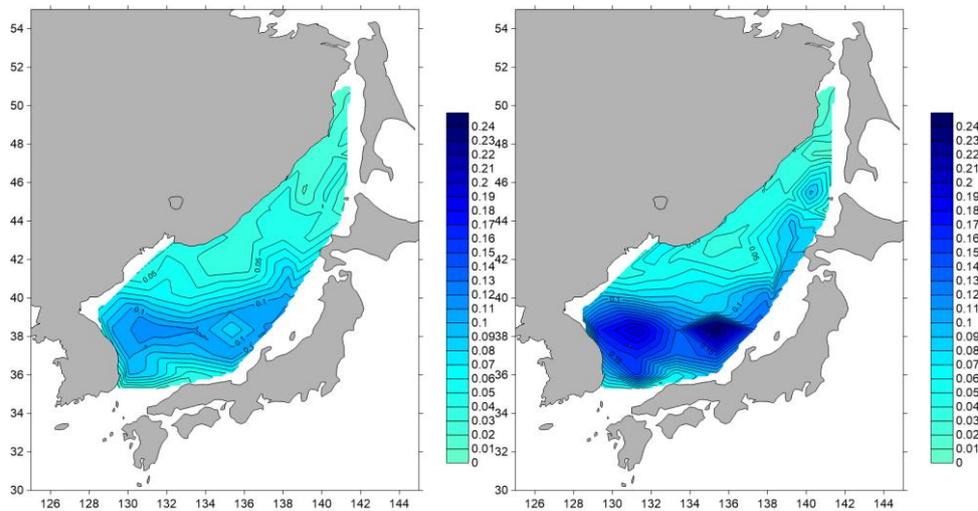


Рисунок 3.13 Среднеквадратическое отклонение (СКО) скорости течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

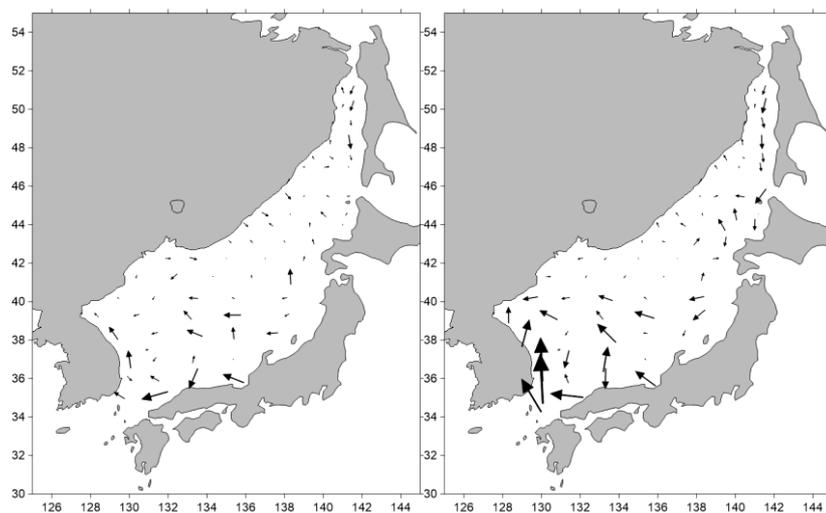


Рисунок 3.14 Направление течений в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

По сравнению с поверхностным слоем, промежуточный менее подвержен влиянию ветров в разные сезоны, однако на водную толщу, он всё же, кое-как, да влияет, как собственно и на скорость течений.

В целом, средние значения скоростей в январе месяце схожи с поверхностным слоем, но они немного меньше. Скорость их равна 0,044 м/с. Максимум интенсивности течений составляет 0,173 м/с, что также незначительно ниже, чем в поверхностном слое. На малые скорости течений, приходится и малая доля значений, около 0,004 м/с. Минимальные показатели одинаковы как в поверхностном, так и в промежуточном слое воды. Влияние ветра здесь ослабло, а в центральной части моря течения слабо выражены или отсутствуют, отсюда и невысокая скорость на большей части акватории. На Японское море в северной и южной частях, продолжают оказывать ветра Ю, З и ЮЗ направлений, но уже с меньшей частотой. Изменение характеристики прослеживается в тех же районах, что и на поверхности, а именно в зоне циркуляции Восточно-Корейского и Цусимского течений. СКО в этом регионе составляет 0,120 м/с.

В октябре, как и на поверхности, данный месяц подвергается сильным ветровым воздействиям. Средняя скорость практически одна и та же, равная

0,070 м/с. К особенностям данного слоя, в данном месяце, можно отнести его повышенную максимальную скорость течений, в отличие от тех значений, которые отмечаются на поверхности. Оно составляет 0,320 м/с, что на 0,014 м/с больше поверхностной. Минимальная же интенсивность равна 0,003 м/с. Как ранее упоминалось, ветер незначительно ослаб, однако повторяемость ветров максимальна и сфокусирована в основном в южной и центральной частях моря. Также как и на поверхности, здесь преобладают ветра С и СЗ направлений, образуя вихревые потоки Восточно-Корейского и Цусимского течений. В результате, скорость течений в этих районах достигает своего максимума и изменяется где-то на 0,242 м/с, что немного меньше, чем в поверхностном слое.

#### 3.4 Районирование взаимосвязи распределения хлорофилла-а с распределением температуры воды и течений

Для лучшего понимания особенностей акватории и закономерностей, приводящих к тем или иным изменениям, применяется районирование моря, в нашем случае по трём характеристикам (температуре воды, хлорофиллу-а и скорости течений). Задача выбора количества кластеров на данном этапе является ключевой, поскольку от этого зависит качество взаимосвязи.

В процессе выполнения работы, были рассмотрены разбиения на 5 и 4 классов, однако в конечном итоге выбор пал именно на 4 класса, так как в этом случае данные распространены равномерно и нет сильных разбросов (мозаики).

На основании данного разбиения по четырём классам было проведено районирование акватории Японского моря для полного рассмотрения динамики процессов, влияющих на распределение первичной продукции.

Были рассчитаны описательные статистики (таблицы 3.1-3.4) и построены корреляционные матрицы (таблицы 3.5-3.8) для каждого класса. Значимые коэффициенты корреляции в матрицах отмечены красным цветом.

Таблица 3.1 Описательные статистики для 1 класса.

| Класс 1 | N<br>набл. | Среднее | Минимум | Максим. | Ст.откл. |
|---------|------------|---------|---------|---------|----------|
| T       | 240        | 3.077   | 0.918   | 4.694   | 0.940    |
| CH      | 240        | 0.833   | 0.311   | 1.638   | 0.212    |
| V       | 240        | 0.050   | 0.008   | 0.127   | 0.024    |

Таблица 3.2 Описательные статистики для 2 класса.

| Класс 2 | N<br>набл. | Среднее | Минимум | Максим. | Ст.откл. |
|---------|------------|---------|---------|---------|----------|
| T       | 240        | 8.111   | 7.200   | 9.412   | 0.430    |
| CH      | 240        | 0.750   | 0.370   | 1.339   | 0.186    |
| V       | 240        | 0.074   | 0.031   | 0.178   | 0.031    |

Таблица 3.3 Описательные статистики для 3 класса.

| Класс 3 | N<br>набл. | Среднее | Минимум | Максим. | Ст.откл. |
|---------|------------|---------|---------|---------|----------|
| T       | 240        | 13.900  | 12.082  | 15.297  | 0.767    |
| CH      | 240        | 0.569   | 0.242   | 1.514   | 0.273    |
| V       | 240        | 0.113   | 0.054   | 0.216   | 0.033    |

Таблица 3.4 Описательные статистики для 4 класса.

| Класс 4 | N<br>набл. | Среднее | Минимум | Максим. | Ст.откл. |
|---------|------------|---------|---------|---------|----------|
| T       | 140        | 20.084  | 17.523  | 22.496  | 1.326    |
| CH      | 140        | 0.310   | 0.160   | 1.177   | 0.186    |
| V       | 140        | 0.161   | 0.079   | 0.272   | 0.033    |

Таблица 3.5 Корреляционная матрица для 1 класса.

| Класс 1 | T      | CH     | V      |
|---------|--------|--------|--------|
| T       | 1      | -0.044 | -0.272 |
| CH      | -0.044 | 1      | 0.070  |
| V       | -0.272 | 0.070  | 1      |

Таблица 3.6 Корреляционная матрица для 2 класса.

| Класс 2 | T      | CH     | V      |
|---------|--------|--------|--------|
| T       | 1      | -0.098 | -0.060 |
| CH      | -0.098 | 1      | 0.344  |
| V       | -0.060 | 0.344  | 1      |

Таблица 3.7 Корреляционная матрица для 3 класса.

| Класс 3 | T      | CH     | V      |
|---------|--------|--------|--------|
| T       | 1      | -0.711 | -0.299 |
| CH      | -0.711 | 1      | 0.492  |
| V       | -0.299 | 0.492  | 1      |

Таблица 3.8 Корреляционная матрица для 4 класса.

| Класс 4 | T      | CH     | V      |
|---------|--------|--------|--------|
| T       | 1      | -0.654 | 0.055  |
| CH      | -0.654 | 1      | -0.184 |
| V       | 0.055  | -0.184 | 1      |

Из таблиц 3.1-3.4 видно, что каждый класс по-своему уникален. Пройдёмся по каждой характеристике. Так, количество наблюдений, попавшее в классы не одинаково. С 1 по 3 классы значение составляет 240 наблюдений, а в четвёртом только 140. Средние значения классов также отличаются. Наивысшие средние значения температуры наблюдаются в 4 классе, а хлорофилла-а в 1 классе, как и скорость течений. Минимальные показатели характеристик среди всех классов различны. Для температуры минимум

приходится на 1 класс. Наименьшая концентрация хлорофилла-а отмечается в 3 классе, а скорость течений в 1 классе. Максимальные значения близки к средним показателям. Температура максимальна в 4 классе, а концентрация хлорофилла-а довольно высокая в 1 классе. Интенсивность течений, как и температура наиболее выражена в 4 классе. Отдельно стоит упомянуть стандартное отклонение, которое показывает изменения (разброс) той или иной характеристики. Среди всех четырёх классов, весомый разброс температуры прослеживается в 4 классе, чуть менее, но тоже высокое значение наблюдается и в 1 классе. Отклонения хлорофилла-а во всех классах примерно одинаково, однако наибольшие изменения среди всех остальных находятся в 3 классе. Каких-либо существенных изменений в скорости течений не наблюдается, они практически постоянны, исключением является 1 класс.

Для 1 класса (таблица 3.5) выявляется значимая обратная связь между температурой воды и скоростью течений. Вполне вероятно, что на подобное поведение оказывают различного рода циркуляции, а также скорость и направление ветра. Значимой взаимосвязи хлорофилла-а между другими характеристиками не наблюдается.

У 2 класса (таблица 3.6) отмечается значимая прямая связь между скоростью течений и концентрацией хлорофилла-а. Очевидно, здесь прямое влияние оказывают тёплые воды Цусимского течения, благополучно сказываясь на концентрациях хлорофилла-а.

В 3 классе (таблица 3.7) заметно существенное влияние каждой характеристики. Между температурой и хлорофиллом-а наблюдается мощная обратная связь. Подобная связь возникает и со скоростью течений. Также между скоростью течений и концентрацией хлорофилла-а явная и прямая взаимосвязь. По-видимому, в районах стыка полярного фронта, где в основном идёт тесное взаимодействие как тёплых, так и холодных потоков, образуются зоны дивергенции, способствующие притоку питательных веществ.

К 4 классу (таблица 3.8) можно отнести влияния обратных связей между температурой воды и концентрацией хлорофилла-а, и скоростью течений и

хлорофиллом-а, которые схожим образом влияют друг на друга. Здесь большую роль оказывают холодные потоки, приносимые Приморским течением.

На основании выявления связей, определялось наличие или отсутствие запаздывания климатической изменчивости исследуемых характеристик. Чтобы выяснить это, была рассчитана взаимнокорреляционная функция (ВКФ) для каждого класса. Пример ВКФ для всех зависимых характеристик и их переменных изображены на рисунках 3.15-3.17.

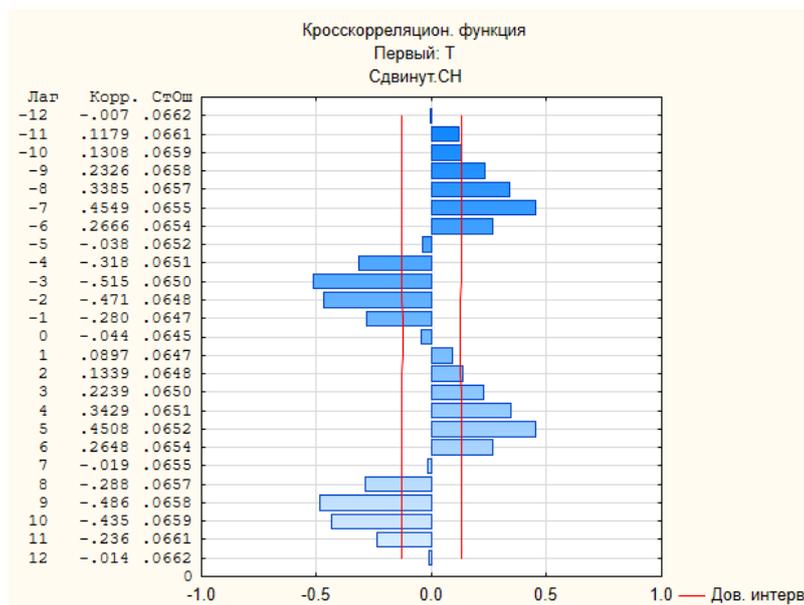


Рисунок 3.15 Кросс-корреляция (ВКФ) между рядами данных температуры и хлорофилла-а, класс 1.

Запаздывание зависимой характеристики (хлорофилла-а) относительно температуры воды для всех четырёх классов следующее:

1 класс - запаздывает на 5 месяцев после роста температуры. Коэффициент запаздывания равен +0,45.

2 и 3 классы - запаздывают на 6 месяцев. И эта связь обладает коэффициентом +0,37 и +0,59 соответственно.

4 класс - запаздывает на четыре месяца, с коэффициентом равным +0,59.

Увеличение зависимости хлорофилла-а обуславливается особенностями температурного режима моря и освещённости, когда наступает оптимальная

температура для генерации хлорофилла-а и способствует его значимому распространению.

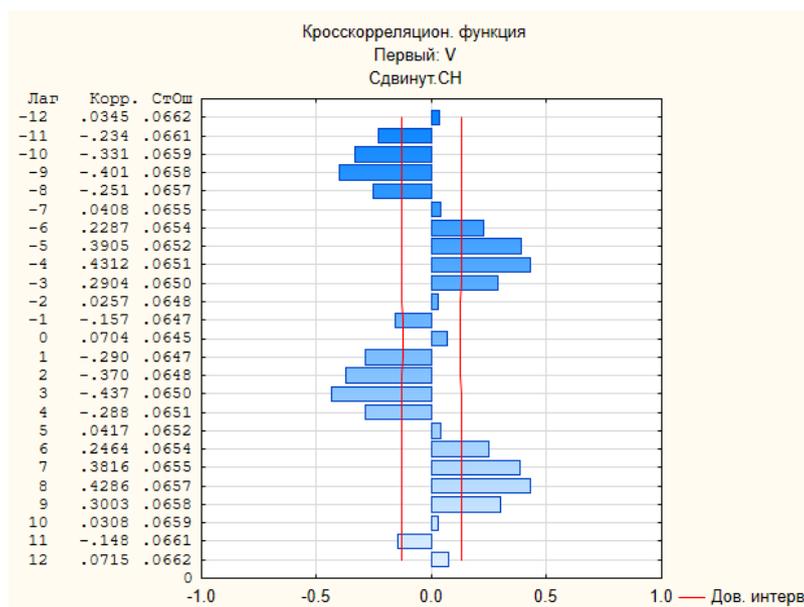


Рисунок 3.16 Кросс-корреляция (ВКФ) между рядами данных скорости течений и хлорофилла-а, класс 1.

Запаздывание зависимой характеристики (хлорофилла-а) относительно скорости течений для всех четырёх классов следующее:

1 класс - запаздывает на 8 месяцев, после роста скорости течений. Коэффициент запаздывания равен +0,43.

2 класс - запаздывание приходится на 11 месяц. Определяется коэффициентом в +0,38.

3 класс - запаздывает на 1 месяц. Коэффициент равен +0,53.

4 класс - запаздывание относится к 6 месяцу, с коэффициентом порядка +0,39.

Потоки, которые приносят с собой насыщенные минеральными веществами воды, приводят к обогащению верхних слоёв акватории. На это влияют и зоны поднятий, где глубинные течения в результате перемешивания слоёв, относят прохладные и питательные воды в верхние слои, всё это в совокупности также оказывает непосредственное влияние на инерционность

зависимости хлорофилла-а в различных подрайонах Японского моря от сезона к сезону.

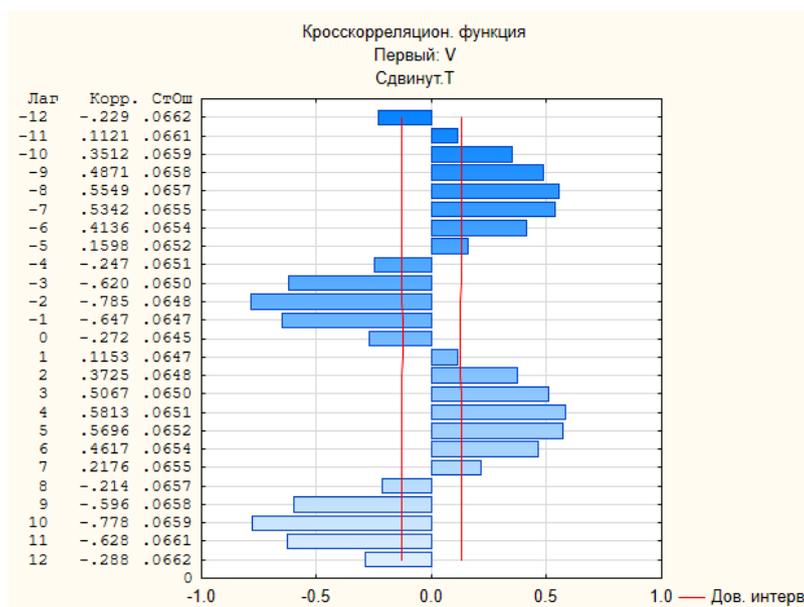


Рисунок 3.17 Кросс-корреляция (ВКФ) между рядами данных скорости течений и температуры воды, класс 1.

Запаздывание зависимой характеристики (температуры воды) относительно скорости течений для всех четырёх классов следующее:

1 класс - запаздывает на 4 месяца после роста скорости течений. Коэффициент запаздывания равен +0,58.

2 класс - данный класс с коэффициентом +0,32 запаздывает на 5 месяцев.

3 класс - наряду с первым классом, коэффициент запаздывания равен те же +0,58, однако само запаздывание наступает только через 6 месяцев.

4 класс - характеризуется явной и слабой периодичностью. Характеристика запаздывает на 2 месяца, а коэффициент равняется +0,27.

Температура воды связана с течениями и их циркуляциями как тёплых, так и холодных потоков, что способствует регулированию и распространению в пространстве определённых температурных слоёв. В некоторой степени специфика рельефа тоже участвует в этом плане, разгоняя и усиливая ветра в различные времена года.

Результаты разбиения по четырём классам продемонстрированы на рисунках 3.18 и 3.20.

Опишем каждый класс послойно:

1 класс (слой 1-2) - можно увидеть, что в апреле к нему относится район Корейского пролива, в зоне циркуляции Восточно-Корейского и Цусимского течений, а также в непосредственной близости действия Северо-Корейского течения. В октябре площадь действия данного класса расширилась и сместилась в центральные и северные районы акватории, полностью охватывая залив Петра Великого и центральный поток Приморского течения, границей которого служит полярный фронт. Под влиянием Восточно-Корейского и Цусимского течений, распространяется и до Татарского пролива, где его активность также прослеживается и в проливе Лаперуза.

1 класс (слой 3) - в апреле сохраняет своё положение, как и в вышележащих слоях (1-2). Изменения в распределении заметны в октябре, здесь его вытесняет 3 класс в направлении Северо-Корейского течения.

2 класс (слой 1-3) - во всех трёх слоях распространения данного класса не наблюдается в апреле месяце. В октябре для слоёв (1-2) наблюдается обширная область действия данного класса. Ему относится вся южная акватория Северо-Корейского и Южно-Корейского течений. К северу он распространяется по ветке Цусимского течения, где по пути огибает остров Хонсю. В Сангарском проливе он также имеет место. В это же время для (3) слоя область этого класса существенно уменьшилась по сравнению с поверхностными слоями. Теперь он занимает лишь небольшую область циркуляции тёплых течений на юге моря.

3 класс (слой 1-3) - занимает область соприкосновения холодных течений на севере и тёплых на юге в апреле, вдаваясь в Северо-Корейское течение, а также в Сангарский пролив и залив Исикари в (1) слое. Во (2) и (3) слоях его активность в заливе Исикари прекращается, однако усиливается в Восточно-Корейском заливе. На октябрь в (1-2) слоях приходится северная часть Японского моря, где он довольно слабо выражен. В целом занимает области Татарского и Невельского проливов. В (3) слое его вытеснил 4 класс, и теперь

он занимает всю прибрежную часть Хабаровского и Приморского краёв, а также встречается и в заливе Петра Великого.

4 класс (слой 1) - с апреля берёт своё начало в северном секторе моря, где протекают прохладные воды Приморского течения. Занимает обширную дугообразную область, которая обтекает Приморский и Хабаровский края, вдаваясь своими концами в залив Петра Великого и пролив Лаперуза. В октябре деятельность класса никак не выражена.

4 класс (слой 2-3) - как и в (1) слое, распространён подобным образом, однако всё же есть некоторые отличия в его распространении в апреле. Начиная с промежуточного (2) и до (3) слоя простирается всё шире, укрепляя свои границы. Так, данный класс замечен и в заливе Исикари, а в заливе Петра Великого заметно его усиление в сторону Восточно-Корейского залива. Наряду с (1) слоем в октябре месяце его деятельность не прослеживается. С глубинного (3) слоя класс очень слабо сконцентрирован в северной части Японского моря.

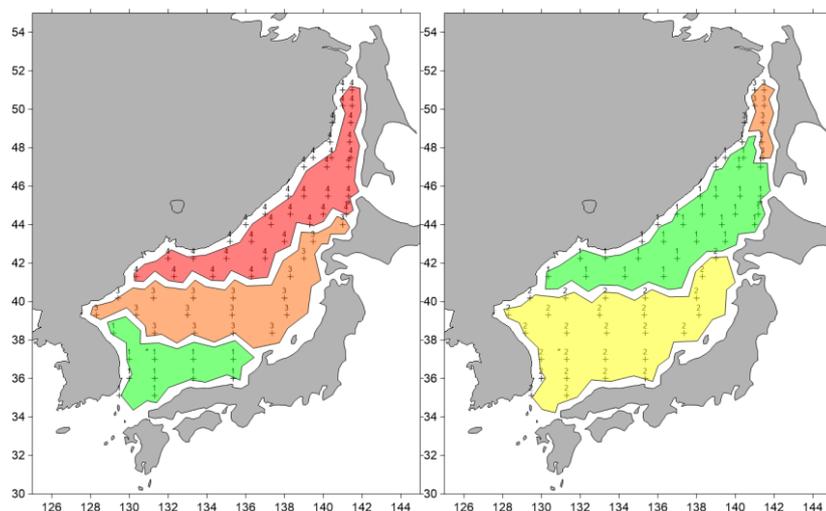


Рисунок 3.18 Районирование Японского моря по 4-м классам в апреле (слева), октябре (справа), слой 1.

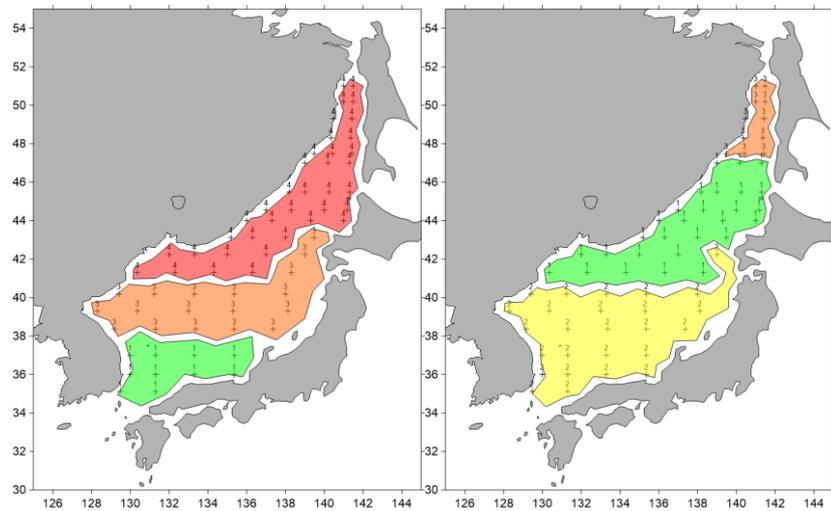


Рисунок 3.19 Районирование Японского моря по 4-м классам в апреле (слева), октябре (справа), слой 2.

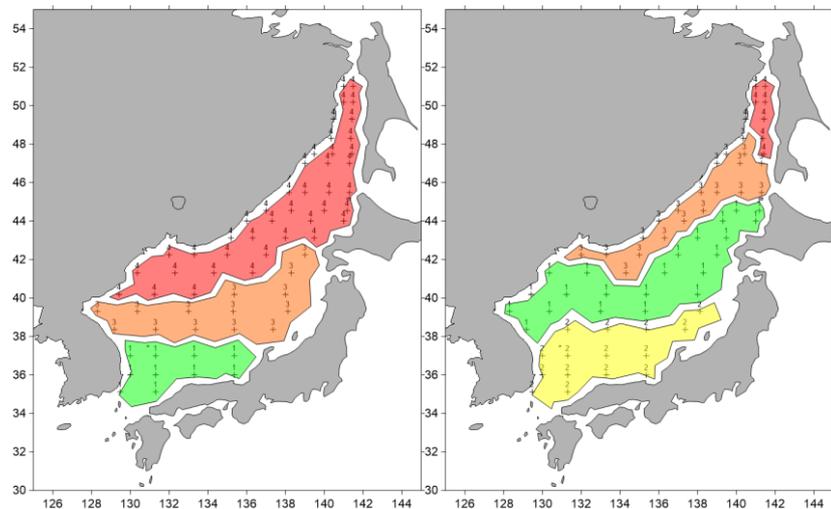


Рисунок 3.20 Районирование Японского моря по 4-м классам в апреле (слева), октябре (справа), слой 3.

Результаты районирования указывают, что каждому классу свойственна своя зона распространения, следовательно, и предпочтительные характеристики. Кто-то теплолюбивый и любит сильные течения, например 3 и 2 классы, а кто-то предпочитает прохладную и спокойную (в плане скорости течений) среду, к ним относятся 1 и 4 классы. Отсюда можно сделать вывод, что фитопланктон распространяется сложно и хаотично. В зависимости от вида и предпочтений каждого, его динамика может распространяться по-разному.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была рассмотрена межгодовая динамика биологической продуктивности Японского моря и сделаны основные выводы.

1. По данным реанализа морской службы Copernicus были построены карты распределения температуры воды, хлорофилла-а, скорости течений и их направлений для всей акватории Японского моря в пределах 40 метрового поверхностного слоя. Отмечено, что фитопланктон наиболее активен весной и осенью в периоды максимальной его вегетации, что связано с воздействием комплексного влияния факторов, таких как наличие биогенов, освещённости, а также температуры воды и течений.

2. Для четырёх классов рассчитаны описательные статистики и построены корреляционные матрицы. Выделены значимые коэффициенты каждого класса (1 класс - обратная связь между температурой и течениями; 2 класс - прямая связь между течениями и фитопланктоном; 3 класс - обратная связь между температурой и фитопланктоном; температурой и течениями, а прямая между фитопланктоном и течениями; 4 класс - обратная связь между температурой и фитопланктоном; течениями и фитопланктоном).

3. Кросс-корреляционный анализ показал, что связь между всеми характеристиками склонна запаздывать через разные промежутки времени, в зависимости от влияющего параметра.

4. На основе кластерного анализа проводилось районирование акватории Японского моря по 4-м классам. Определены зоны и особенности их пространственно-временного распространения.

Таким образом, работа даёт некоторое представление о динамике межгодовой изменчивости фитопланктона в поверхностном и нижележащих слоях, а также его взаимосвязях с температурой воды и течениями в различные времена года. В рамках работы все поставленные цели и задачи были выполнены.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шунтов В. П. Биология дальневосточных морей России. Т. 1. Владивосток: ТИНРО-центр, 2001 - 580 с.
2. Национальный атлас России: офиц. сайт. - URL: <https://национальныйатлас.рф/> (дата обращения: 09.05.2023).
3. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982 - 192 с.
4. Доронин Ю. П. Региональная океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1986 - 304 с.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 2003 - 398 с.
6. Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеиздат, 1974 - 631 с.
7. Портал Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО): офиц. сайт. - URL: <http://portal.esimo.ferhri.ru/> (дата обращения: 15.05.2023).
8. Park K., Park J. E., Kang C. K. Satellite-Observed Chlorophyll-a Concentration Variability in the East Sea (Japan Sea): Seasonal Cycle, Long-Term Trend, and Response to Climate Index // *Frontiers in Marine Science*. - 2022. - Т. 9. - С. 354.
9. Мордасова Н. В. Косвенная оценка фитопланктона по содержанию хлорофилла // *Среда обитания водных биологических ресурсов*. М.: Изд-во ВНИРО, 2014. С. 41-56 (Тр. ВНИРО. Т. 152).
10. Портал морского подразделения проекта Copernicus: офиц. сайт. - URL: <https://marine.copernicus.eu/> (дата обращения: 20.03.2023).
11. Гордеева С. М. Наумов Л. М. Работа с базами гидрометеорологических данных в сети Интернет: Методические указания. СПб.: РГГМУ, 2020 - 96 с.

12. National Aeronautics and Space Administration (NASA): офиц. сайт. - URL: <https://www.giss.nasa.gov/> (дата обращения: 25.03.2023).
13. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине: Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2010 - 74 с.
14. Розенберг Г. С., Шитиков В. К., Брусиловский П. М. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). Тольятти, 1994 - 182 с.
15. Дубровская Л. И., Князев Г. Б. Компьютерная обработка естественнонаучных данных методами многомерной прикладной статистики: Учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011 - 120 с.
16. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: РГГМУ, 2008 - 404 с.
17. Портал Знаний. Глобальный интеллектуальный ресурс: офиц. сайт. - URL: <http://statistica.ru/> (дата обращения: 29.05.2023).
18. Киселева Т. В. Программная инженерия. Часть 1. Учебное пособие. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2017 - 137 с.