

Правительство Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет

**Методические указания к практическим работам**  
**по учебной дисциплине:**  
**«Промысловая океанология»**  
*Fishery Oceanography*

Авторы: А.В. Зимин, П.В. Лобанова  
Рецензенты: Т.В. Белоненко, А.А. Родионов

Санкт-Петербург  
2024

УДК 551.46

ББК

ISBN

Зимин А.В., Лобанова П.В. Методические указания к практическим работам по учебной дисциплине: «Промысловая океанология». Учебное пособие – СПб: Лема, 2024. – 72 с.

Рецензенты: чл.-корр. РАН А.А. Родионов (ИО РАН), д.г.н. Белоненко Т.В. (СПбГУ)

В учебном пособии по изучению дисциплины «Промысловая океанология» представлены описания шести практических работ по предмету, включающие теоретическую часть, подробный план и примеры выполнения по каждой из них.

Предназначено для студентов гидрометеорологических и экологических специальности университета.

Рекомендовано к использованию в учебном процессе Учебно-методической комиссией по УГСН 05.00.00. Науки о Земле ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ) протокол № 05/2.1/05-03-9 от 31.10.2024

© СПбГУ, 2024

© А.В. Зимин, П.В. Лобанова, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>4</b>
<b>Работа №1: Расчёт первичной продукции планктона (сообщества) по результатам натурного эксперимента.....</b>	<b>8</b>
<b>Работа №2: Восстановление первичной продукции по спутниковым данным (модель VGPM).....</b>	<b>23</b>
<b>Работа №3: Оценка влияния температуры воды на продолжительность инкубационного периода икры рыб.....</b>	<b>34</b>
<b>Работа №4: Выделение района поиска промысловых скоплений рыб по оптимальной температуре.....</b>	<b>43</b>
<b>Работа №5: Прогнозирование долгосрочной изменчивости абиотических факторов среды методом гармонического анализа.....</b>	<b>51</b>
<b>Работа №6: Прогнозирование нерестового запаса статистическими методами .....</b>	<b>60</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы посвящают свой труд учителю и коллеге к.г.н. Дмитрию Константиновичу Старицыну, который читал курс «Промысловая океанология» на кафедре океанологии СПбГУ более 30 лет. Дмитрий Константинович окончил кафедру океанологии географического факультета ЛГУ в 1966 г. В 1968-1985 гг. руководил учебными практиками студентов–океанологов, 2002-2005 гг. заведовал лабораторией «Региональной океанологии» НИИГ СПбГУ. Он соавтор 4-х монографий и более 60 научных статей. Награждён Почётной грамотой Министерства образования и науки РФ. Принимал активное участие в научных экспедициях в рамках работ СПбГУ с Тихоокеанским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии.

В курсе «Промысловая океанология» изучаются особенности пространственно-временной изменчивости биологических ресурсов Мирового океана (МО), а также влияние океанологических факторов на воспроизводство, распределение и поведение промысловых объектов. Учебная дисциплина предназначена для студентов, имеющих базовую подготовку в области физики и динамики океана, статистики, методов и средств океанологических измерений.

В рамках курса студенты знакомятся с влиянием биотических и абиотических факторов на формирование зон повышенной и высокой биопродуктивности; получают представления о поведении главнейших объектов промысла в зависимости от изменения гидрометеорологических условий и физико-химических параметров среды; овладевают основными принципами прогнозирования промысловой обстановки в различных районах Мирового океана.

Основное место в данном курсе отводится анализу и прогнозу состояния среды обитания промысловых рыб. В представляемом методическом пособии описаны методы, с помощью которых анализируются характеристики морской среды, необходимые для изучения и освоения биологических ресурсов Мирового океана. Экосистемная сущность промысловой океанологии заключается в тесной взаимосвязи абиотических условий окружающей водной среды с особенностями жизнедеятельности гидробионтов различных трофических уровней.

Особое внимание в курсе уделено также разделу, посвящённому процессам первичного продуцирования морского фитопланктона, благодаря которому возможны построение трофической цепи и передача энергии для развития растительного и животного сообществ в экосистеме МО. В предлагаемом методическом пособии описаны методы измерения первичной продукции, её виды, а также способы моделирования скорости синтеза органических соединений фитопланктоном, в том числе с использованием данных спутникового мониторинга.

Биологические ресурсы Мирового океана важны для решения продовольственной проблемы человечества. Согласно подсчётам учёных, перейдя рубеж в 10-12 млрд человек, земная цивилизация столкнётся с серьёзным недостатком пищевых ресурсов. Под угрозой окажется порядка 30% населения Земли, прежде всего, в странах Африки, Южной Азии и Латинской Америки.

Экстенсивные методы ведения сельского хозяйства практически исчерпали себя. Неиспользованных земель, пригодных для обработки, осталось крайне мало. Интенсивные методы, такие как химизация и генная инженерия, вызывают все больше и больше нареканий в силу потенциально возможных негативных эффектов. Выходом из

создавшегося положения может стать активное освоение биологических ресурсов МО.

Основная цель курса – изучение влияния океанологических факторов на воспроизводство, распределение и поведение промысловых объектов и ознакомления с методами промыслового прогнозирования.

В задачи курса «Промысловая океанология» входит ознакомление студентов со следующими вопросами:

- особенности процесса синтеза органического вещества;
- основные параметры, формирующие биологическую продуктивность вод МО;
- влияние биотических и абиотических факторов на формирование зон повышенной промысловой продуктивности;
- поведение объектов промысла в зависимости от изменения гидрометеорологических условий и физико-химических параметров среды;
- основные принципы прогнозирования промысловой обстановки в тех или иных районах Мирового океана;
- основные проблемы современной промысловой океанологии (антропогенное загрязнение вод, бесконтрольное изъятие промысловых объектов и др.);
- современные подходы, используемые при разработке мер регулирования доступа к морским биологическим ресурсам.

В работе над пособием авторы использовали материалы методических разработок ВНИРО, ИО РАН, РГГМУ, БФУ.

Данное методическое пособие состоит из шести практических работ, направленных на получение навыков, связанных с различными методами диагноза, оценки и прогноза промыслово-океанологических

процессов. В рамках выполнения практических работ студенты смогут научиться:

1. Производить расчёты первичной продукции на основе данных измерений растворённого кислорода в пробах воды с учётом возможных ошибок метода, а также оценивать суточную первичную продукцию эвфотического слоя МО.
2. Восстанавливать величины первичной продукции с использованием спутниковых данных зондирования океана из космоса для описания её пространственной изменчивости.
3. Оценивать влияние температуры воды на сроки нереста и развитие икры промысловых рыб.
4. Определять по заданному диапазону «оптимальной температуры» область частой встречаемости промыслового гидробионта в течение года с последующей оценкой её пространственной и временной изменчивости.
5. Выполнять прогноз изменчивости абиотического фактора среды при помощи спектральной модели по заданному ряду.
6. Описывать промысловые объекты и разрабатывать статистический прогноз его нерестового запаса на основе методов корреляционного и регрессионного анализов.

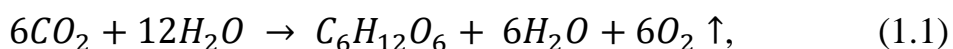
Авторы выражают благодарность Е.И. Свергуну за помощь в создании обложки.

# РАБОТА №1: РАСЧЁТ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПЛАНКТОНА (СООБЩЕСТВА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

## Общие сведения

Первичная продукция (ПП) - количество органического вещества, образованного в процессе фотосинтеза растениями из неорганических соединений углерода за период времени, или скорость его образования в определённом объёме. В биологических сообществах процессы синтеза органических соединений непрерывны и отличаются от «выхода» в химических реакциях, следовательно, всегда необходимо подразумевать элемент времени. Именно поэтому ПП измеряется в единицах скорости обычно в миллиграммах углерода на единицу объёма за единицу времени -  $\text{мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  или  $\text{мг С} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{час}^{-1}$ . В первом случае речь идёт о суточной продукции всего эвфотического слоя, во втором – о продукции на конкретном горизонте за час.

Для того, чтобы фотосинтез происходил (выражение 1.1), фитопланктону, в первую очередь, необходим свет и специальный пигмент хлорофилл, который находится в органеллах его клеток - хлоропластах.



где  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  – первичное органическое вещество (глюкоза).

Основная функция хлорофилла – поглощение световой энергии, её трансформация и передача для последующих реакций фотосинтеза, включающих синтез органических соединений. Существует несколько видов хлорофиллов, при этом основным фотосинтезирующим пигментом является хлорофилл *a*, остальные - вспомогательные. Биогенные микроэлементы (углерод, фосфор, азот, кремний и др.) являются также необходимым условием для синтеза органических



соединений и последующего роста клеток фитопланктона. Их концентрацию можно определить по соотношению Редфильда:  $C:N:P = 106:16:1$ .

По современным оценкам, морской фитопланктон фиксирует и переводит в органическую форму около 50 млрд т углерода в год. Такие оценки сопоставимы с ПП наземных растений. Наибольший вклад в общую ПП Мирового океана вносят диатомовые водоросли (около 50%), зелёные водоросли, кокколитофорида (около 20%), 10 % приходится на сине-зелёные водоросли (цианобактерии).

ПП бывает двух типов (рис. 1.1):

*Тип 1.* Валовая первичная продукция или валовый фотосинтез (Gross Primary Production, *GPP*) - общая, созданная фитопланктоном (автотрофными растениями) продукция – всё количество новообразовавшихся углеводов за единицу времени. Эти новообразовавшиеся углеводы сразу расходуются на процессы жизнедеятельности растений: в основном автотрофное дыхание (*AR*), а также на различные биосинтетические процессы и т.п.

*Тип 2.* Чистая первичная продукция (Net Primary Production, *NPP*) - оставшаяся часть органических соединений, которую фитопланктон расходует на синтез компонент своих клеток и рост фитомассы (выражение 1.2), которая, в свою очередь, служит пищей для последующих трофических звеньев морской экосистемы.

$$NPP = GPP - AR \quad (1.2)$$

Обычно затраты на дыхание фитопланктона составляют 15-20% валовой продукции. Исходя из этого, можно записать, что:

$$NPP = 0,8 \cdot GPP \quad (1.3)$$

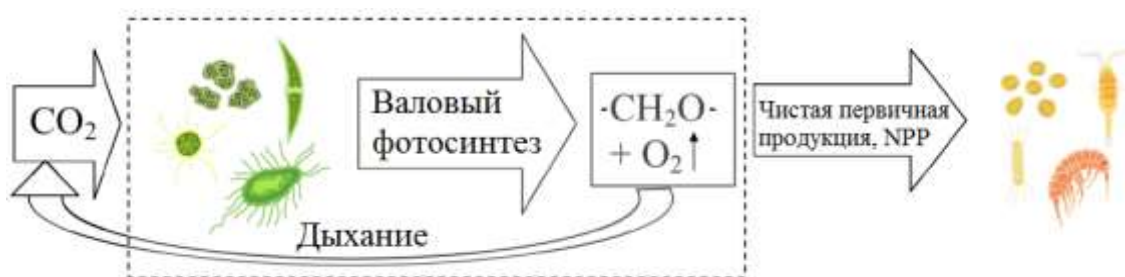


Рис. 1.1. Схема понятия «первичная продукция» (Основано на Oceanography 200)

Существует несколько способов измерения ПП в природных условиях, но классическим является метод «тёмных и светлых сосудов» (или «склянок»), предложенный Х.Х. Граном (Haaften Hasberg Gran) в 1910 г., для которого необходимо экспонирование проб воды в специально созданных условиях, имитирующих естественную освещённость и температуру. Поэтому такой метод относится к методам *in vitro* (с лат. — «в стекле»). При этом есть две модификации скляночного метода: радиоуглеродный и кислородный.

**Радиоуглеродный метод** предложен и впервые применён в 1949-1952 гг. датским физиологом растений Х.Э. Стиман Нильсеном (Halfdan Einer Steemann Nielsen). Он основан на измерении излучения радиоактивного изотопа углерода  $^{14}\text{C}$ , усвоенного в процессе фотосинтеза, предполагая, что количество ассимилированного  $^{14}\text{C}$  пропорционально ассимилированному  $^{12}\text{C}$ .

Перед началом экспонирования проб воды в светлых склянках, в них добавляют  $^{14}\text{C}$  в виде раствора карбоната или гидрокарбоната с известной радиоактивностью. После экспонирования (обычно в течение светового дня, т.е. от рассвета до заката) пробы фильтруют, а радиоактивность фильтров измеряют на специальных приборах (Liquid Scintillation Counting). Далее на основании полученной величины радиоактивности пробы воды после экспонирования (т.е.  $^{14}\text{C}$ , сохранённый в органическом веществе, оставшемся в клетках

фитопланктона после дыхания) и радиоактивности, внесённой в пробу, учитывая концентрацию растворённого неорганического углерода в пробе до экспонирования, можно рассчитать *чистую первичную продукцию (NPP)*. Применяя этот метод, следует помнить, что радиоактивность используемых препаратов в разы превышает фоновую радиоактивность живых организмов, следовательно, является небезопасной для человека и требует специальных условий для проведения эксперимента.

Радиоуглеродная модификация скляночного метода сильно чувствительнее, чем кислородная (почти на два порядка), поэтому хорошо подходит для олиготрофных вод с концентрацией хлорофилла *a* менее 1 мг м<sup>-3</sup>.

**Кислородная модификация** скляночного метода основана на измерении концентрации растворённого кислорода в тёмных и светлых склянках до и после экспонирования. Здесь важно отметить, что, используя этот метод, возможно определение *валовой первичной продукции (GPP)* и, так называемой, *чистой первичной продукции планктона/сообщества (Net Community Production, NCP)*, которая в каком-то смысле является аналогом *NPP*:

$$NCP = GPP - R, \quad (1.4)$$

где *R* – деструкция органических соединений: в основном расход кислорода на дыхание автотрофного и гетеротрофного сообществ (фитопланктон, зоопланктон, бактерии), а также разложение органических соединений бактериями. При этом, единицами измерения *NCP* на конкретном горизонте будут, например, мкМ О<sub>2</sub> · час<sup>-1</sup>.

Концентрацию растворённого кислорода в склянках обычно определяют либо методом йодометрического титрования (Метод Винклера), либо измеряют с помощью оптических датчиков

кислорода. Современные оптические приборы позволяют измерять концентрацию кислорода в склянке бесконтактным способом, благодаря чему можно исследовать её изменчивость на протяжении всего периода экспонирования пробы.

Метод йодометрического титрования для определения кислорода в пробах воды был разработан ещё в 1888 г. венгерским химиком и фармацевтом Лайошем Винклером (Lajos Winkler) и используется до сих пор, однако ручные техники заменились автоматическим титрованием, проводимым с помощью специальных приборов - титраторов. Метод основан на фиксации кислорода (т.е. его количественном связывании) в пробе воды с помощью соли  $Mn(II)$ , которая в щелочной среде реагирует с кислородом с образованием нерастворимого дегидратированного гидроксида  $Mn(IV)$ . Затем в пробу добавляются раствор сильной кислоты (соляной,  $HCl$  или серной,  $H_2SO_4$ ) и раствор йодида калия ( $KI$ ), в результате этой реакции образуется свободный йод в эквивалентных кислороду количествах. Именно поэтому, чем коричневее вода в склянке после добавления реактивов, тем больше в ней кислорода (рис. 1.2). Чтобы определить концентрацию кислорода, пробу титруют раствором тиосульфата ( $S_2O_3$ ) натрия в присутствии крахмала. Количество раствора тиосульфата натрия, израсходованное на титрование, пропорционально концентрации растворенного кислорода.



Рис. 1.2. Пробы воды с «фиксированным» кислородом: слева – в склянке практически отсутствует растворённый кислород, справа – растворённого кислорода в склянке в достаточном количестве

**Схема постановки натурного эксперимента** для определения первичной продукции методом «тёмных и светлых склянок» в природных условиях представлена на рис. 1.3.

Эксперимент лучше проводить в естественных условиях, вывешивая склянки за борт (при стоящем судне), на пирсе или закрепляя их на специальный буй. Склянки вывешиваются на разные глубины в пределах эвфотического слоя. Обычно это 3-6 фотических горизонтов, где первый и последний — это поверхностный (100% приходящей на поверхность солнечной радиации) и глубинный (0,1-1%). Считается, что 1% от приходящей солнечной радиации соответствует примерно 2,5 глубинам прозрачности, измеренной диском Секки. Также рекомендовано учитывать горизонты,

соответствующие 30-50% от поверхностной освещённости, когда наблюдаются условия максимальных скоростей фотосинтеза.

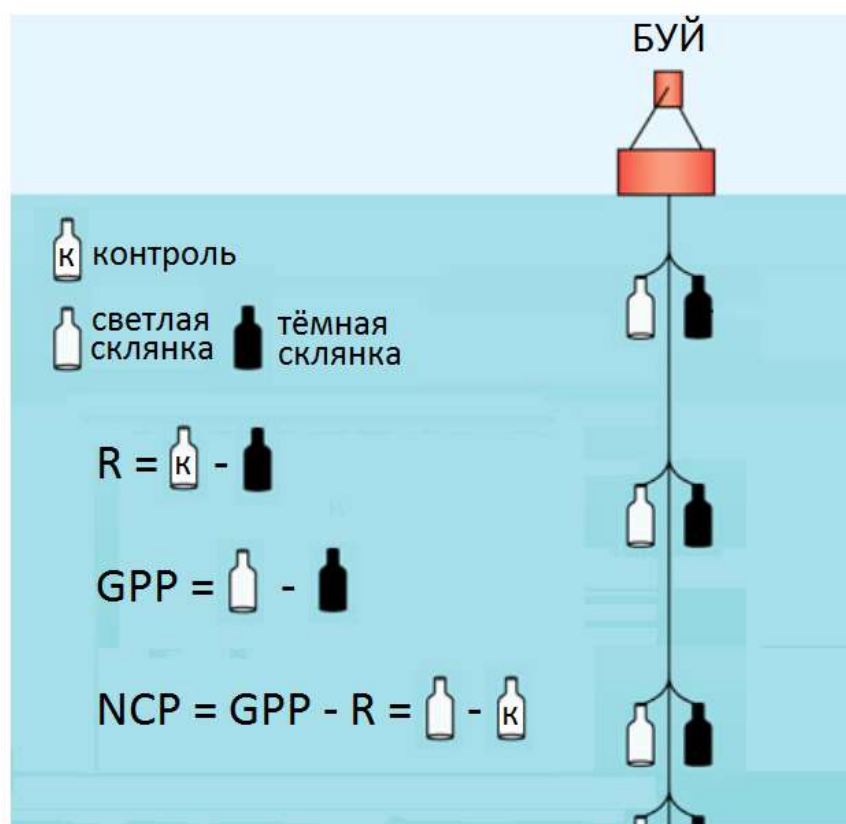


Рис. 1.3. Схема постановки натурного эксперимента для определения дневной первичной продукции всего эвфотического слоя с помощью кислородной модификации метода «тёмных и светлых склянок»

Подобный эксперимент возможно повторить и в искусственно созданных условиях, например, на борту судна во время его движения. Для этого необходимые уровни освещённости имитируют с помощью специальных поликарбонатных фильтров, а склянкам обеспечивают температуру соответствующих горизонтов охладителями/нагревателями и системой проточной воды.

На каждом горизонте из батометра отбирают воду для 9 склянок: контрольная, светлая и тёмная (по три каждой). В контрольных склянках измеряют содержание кислорода и больше не используют. А

светлые и тёмные склянки экспонируют. Время экспонирования зависит от концентрации фитопланктона в воде. При высоких концентрациях хлорофилла *a* (эвфтрофные воды) оно может составлять 2-4 часа, при низких (олиготрофные воды) – 24 часа и более.

Во время экспонирования в светлых склянках происходит фотосинтез и дыхание сообщества, а в тёмных склянках – только дыхание. По окончании экспонирования в склянках измеряют концентрацию кислорода, вычисляют среднюю величину для каждого типа склянки и стандартное отклонение, по которому можно судить о погрешности метода. Затем выполняют необходимые расчёты – расход кислорода на дыхание сообщества, величины валового фотосинтеза и чистой первичной продукции планктона/сообщества, а также интегральные характеристики всего эвфотического слоя.

**Важно.** Величина *NCР* может быть как положительной, так и отрицательной. Положительная величина говорит о том, что валовый фотосинтез превалирует над дыханием сообщества, следовательно, сообщество преимущественно автотрофное. Отрицательная величина, наоборот, говорит о том, что сообщество является преимущественно гетеротрофным. Это понимание имеет важный смысл в контексте современных климатических изменений и оценки усвоения/эмиссии углекислого газа океаном. Автотрофное сообщество активно усваивает углекислый газ из среды для фотосинтеза, тем самым понижается его парциальное давление, и океан усваивает углекислый газ из атмосферы. Гетеротрофное сообщество возвращает углекислый газ обратно вводу в результате своего дыхания и деструкции органического вещества бактериями, в результате чего океан служит источником углекислого газа для атмосферы.

### Цель работы

Оценить интегральную величину чистой продукции планктона/сообщества ( $NCP$ ) в столбе воды с учётом ошибки измерений на основании изменения концентрации растворённого кислорода в тёмных и светлых склянках.

### Исходные данные

- Концентрация растворённого кислорода в склянках: контрольные, тёмные, светлые (мкМ) на различных горизонтах.
- Глубина горизонтов (м)
- Время экспозиции – 24 ч.

### Выполнение работы

1. Расчёт среднего значения и стандартного отклонения измерений для каждого типа склянок: контрольная, тёмная, светлая.

Средняя величина,  $\bar{X}$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Среднеквадратическое отклонение,  $\sigma$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

2. Расчёт расхода кислорода на дыхание сообщества, величины валового фотосинтеза и чистой первичной продукции планктона/сообщества в мкМ · сут<sup>-1</sup> (рис. 1.3).

$$R = O_2(\text{тёмная}) - O_2(\text{контроль}), < 0$$

$$GPP = O_2(\text{светлая}) - O_2(\text{тёмная})$$

$$NCP = O_2(\text{светлая}) - O_2(\text{контроль})$$



3. Расчёт ошибок измерений (*Error*) на примере *GPP* в мкМ·сут<sup>-1</sup>.

	$\bar{X} - \sigma$	$\bar{X}$	$\bar{X} + \sigma$
$O_2$ (светлая), мкМ	$C_{\bar{X}-\sigma}$	$C_{\bar{X}}$	$C_{\bar{X}+\sigma}$
$O_2$ (тёмная), мкМ	$T_{\bar{X}-\sigma}$	$T_{\bar{X}}$	$T_{\bar{X}+\sigma}$

$$GPP_{\bar{X}} = C_{\bar{X}} - T_{\bar{X}}$$

$$GPP_{\bar{X}-\sigma} = C_{\bar{X}-\sigma} - T_{\bar{X}-\sigma}$$

$$GPP_{\bar{X}+\sigma} = C_{\bar{X}+\sigma} - T_{\bar{X}+\sigma}$$

$$Error = |GPP_{\bar{X}} - GPP_{\bar{X}-\sigma}| = |GPP_{\bar{X}} - GPP_{\bar{X}+\sigma}|$$

4. Расчёт интегральных характеристик (*R*, *GPP*, *NCP*) и их интегральных ошибок в мкО<sub>2</sub>·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>.

Глубина, м	Характеристика/ошибка O <sub>2</sub> , мкМ
Г <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>
Г <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>
Г <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>

$$\sum X = \Gamma_1 \cdot X_1 + (\Gamma_2 - \Gamma_1) \cdot \left( \frac{X_1 + X_2}{2} \right) + (\Gamma_3 - \Gamma_2) \cdot \left( \frac{X_2 + X_3}{2} \right)$$

### Составление отчёта

1. Описание уравнений, используемых для расчётов (расход кислорода на дыхание сообщества, величины валового фотосинтеза и чистой первичной продукции планктона/сообщества, интегральные характеристики).
2. Исходные данные и результаты расчётов в виде таблиц (см. табл. 1.1-1.3).

3. График вертикальной изменчивости параметров (расхода кислорода на дыхание сообщества, валового фотосинтеза и чистой первичной продукции планктона/сообщества) (см. рис. 1.4)
4. Расчёт интегральных характеристик (см. табл. 1.4)
5. Анализ результатов с описанием вертикальной изменчивости параметров.

### Пример выполнения работы

*Таблица 1.1. Концентрация  $O_2$  (мкМ) в склянках: начальные и конечные условия*

	№ пробы	Начало эксперимента	Окончание эксперимента	
		Контроль	Светлая	Тёмная
Поверхность	1	283,04	274,34	265,94
	2	283,13	279,17	266,15
	3	284, 03	277,09	264,23
Глубина, 3 м	1	266,55	267,68	260,54
	2	271,31	266,59	260,94
	3	276,06	266,32	258,40
Дно, 6 м	1	276,14	271,33	262,31
	2	276,89	267,71	265,21
	3	276,51	267,38	262,06

*Таблица 1.2. Средние значения ( $\bar{X}$ ) и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) измерений (мкМ)*

	Склянка	$\bar{X}$	$\sigma$
Поверхность	Контроль	283,40	0,55
	Светлая	276,87	2,42
	Тёмная	265,44	1,05
Глубина, 3 м	Контроль	271,31	4,76
	Светлая	266,86	0,72
	Тёмная	259,96	1,37

Дно, 6 м	Контроль	276,51	0,38
	Светлая	268,81	2,19
	Тёмная	263,20	1,75

Таблица 1.3. Величины  $R$ ,  $GPP$ ,  $NCP$  и ошибки их измерений ( $\text{мкМ} \cdot \text{сут}^{-1}$ )

	Характеристика	Значение	Ошибка, $\pm$
Поверхность	$R$	-17,96	0,50
	$GPP$	11,43	1,37
	$NCP$	-6,53	1,87
Глубина, 3 м	$R$	-11,35	3,39
	$GPP$	6,9	0,65
	$NCP$	-4,45	4,04
Дно, 6 м	$R$	-13,31	1,37
	$GPP$	5,61	0,44
	$NCP$	-7,70	-1,81

Таблица 1.4. Интегральные величины  $R$ ,  $GPP$ ,  $NCP$  и ошибок их измерений

Характеристика	$\text{мк моль } \text{O}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$		$\text{г } \text{O}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$	
	Значение	Ошибка, $\pm$	Значение	Ошибка, $\pm$
$R$	-84259,19	39674,16	-2,70	-1,27
$GPP$	48529,96	5036,88	1,55	0,16
$NCP$	-35729,23	8759,34	-1,14	0,28

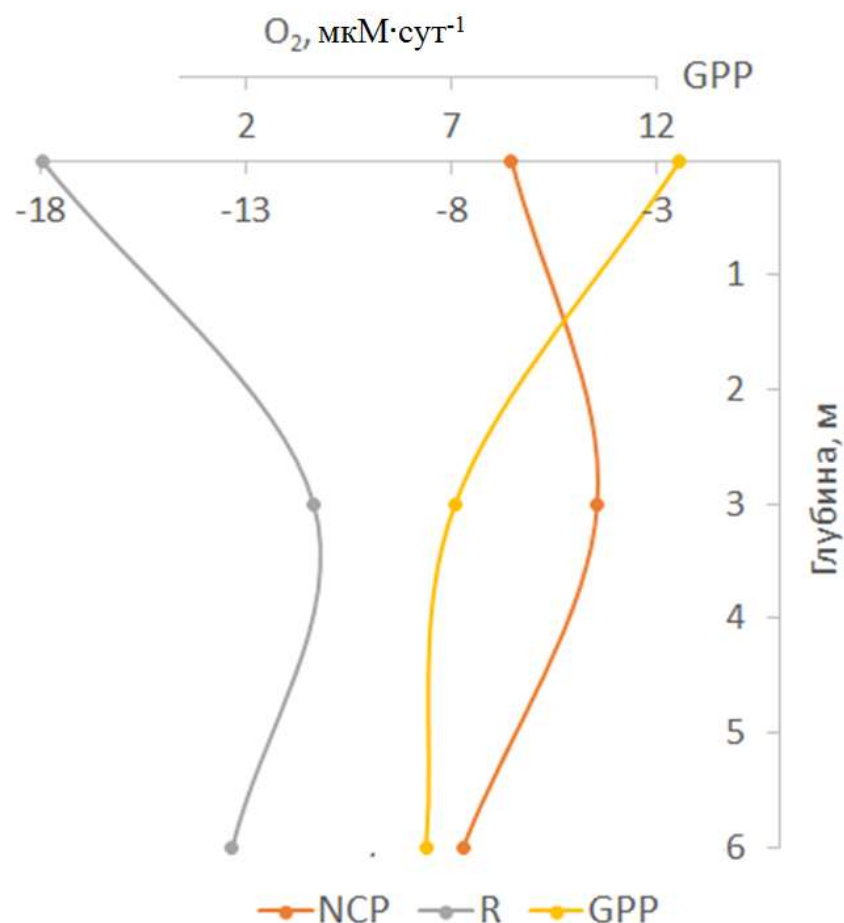


Рис. 1.4. Вертикальная изменчивость параметров (мкМ·сут<sup>-1</sup>): *NCP* — чистая продукция планктона/сообщества, *R* — дыхание сообщества, *GPP* — валовая первичная продукция.

### Список литературы

- Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 152 с.
- Лобанова П.В. Спутниковые алгоритмы оценки первичной продукции в водах с различными океанологическими условиями (на примере Северо-восточной Атлантики и Японского моря) // Дисс. .... канд. геогр. наук. Санкт-Петербург, 2017. 25.00.28 — Океанология. Защита состоялась 13 июня 2018.
- Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. 3-е изд., доп. и перераб. — СПб.: «Крисмас+», 2004. — 248 с. [Электронный источник]

- Одум Ю. Экология. Т.1. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
- Примаков И.М., Петросян Н.В., Полякова Н.В. Анализ гидробиологических материалов: гидролого-гидрохимические работы на Белом море. Методическое пособие. – СПб.: ЛЕМА, 2010. – 48 с.
- Сорокин Ю.И., Снопков В.Г., Гркиберг В.М. Определение взаимосвязи фотосинтеза и подводной освещённости в водах центральной Атлантики // Доклады академии наук СССР. - 1959. - Т.125. - №2
- Справочник «Органическое вещество Азовского моря и прилегающих районов Чёрного моря». Первичная продукция и деструкция органического вещества // В книге: Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П. и др. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 2. Чёрное, Азовское и Каспийское моря. - Ростов н/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2014. – 256 с. [Электронный источник]
- Cushing D.H., Humphrey G.F., Banse B., Laevastu T. Report of the committee on terms and equivalents // Rapports et Proces-verbaux des Réunions. Conseil International pour l'Exploration de la Mer. – 1958. – Т.144. – С.15-16
- Measuring Primary Production Using  $^{14}\text{C}$  Radiolabeling. [Электронный источник]
- Oceanography 200, School of Oceanography, University of Washington. [Электронный источник]
- Platt T., Denman K.L., Jassby A.D. The mathematical representation and prediction of phytoplankton productivity // Fisheries and Marine Service. Technical report. – 1975. - №523. – 110 с.
- Rousseaux C.S., Gregg W.W. Interannual variation in phytoplankton primary production at a global scale // Remote sensing. – 2013. – Т.6. –

№. 1. – C. 1-19.

- Steemann Nielsen E. The use of radio-active carbon ( $C^{14}$ ) for measuring organic production in the sea // Journal de Conseil. – 1952. – T.18. – C. 117-140.
- Wang Y, Wang K, Bai Y, Wu D, Zheng H. Research progress in calculating net community production of marine ecosystem by remote sensing // Frontiers in Marine Science. – 2023. – T.10. – 1191013.
- Winkler L.W. Die Bestimmung des im Wasser gelösten Sauerstoffes // Chem. Ber. – 1888. - T.21. - C. 2843-2855.

## РАБОТА №2: ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ (МОДЕЛЬ VGPM)

### Общие сведения

Первичную продукцию (ПП) можно определять не только методами *in vitro* (см. ПР №1), но и рассчитывать (или восстанавливать) с помощью специальных моделей или алгоритмов. При этом ПП воспринимается как скорость образования органического вещества в процессе фотосинтеза. Следует отметить, что с помощью моделей восстанавливают *чистую первичную продукцию* (Net Primary Production, *NPP*).

Поскольку свет – это главный энергетический фактор синтеза органических соединений, то в основе многих моделей ПП лежит *световая* или *фотосинтетическая кривая*, которая описывается функцией зависимости скорости фотосинтеза от подводной освещённости (рис. 2.1). Её также называют – *кривая светового насыщения фотосинтеза*, поскольку она описывает в том числе и выход скорости реакции на плато насыщения, согласно закону лимитирующего фактора Ю. фон Либиха (Justus von Liebig).

Впервые аналитическое описание световой кривой было опубликовано в 1905 г. Ф.Ф. Блэкмэном (Frederick Frost Blackman). Он представил её в виде ломаной линии («ломаная Блэкмана»): скорость фотосинтеза ( $P$ ) сначала линейно возрастает, но при определённой интенсивности света ( $I_k$ ) происходит насыщение, при котором наблюдается максимальная величина скорости фотосинтеза ( $P_{max}$ ), и процесс перестаёт далее зависеть от освещённости ( $I$ ). Однако, как было показано в последствии, реальные световые кривые имеют более плавный переход от линейного участка к насыщению. В 1935 г. Э.Ч.С. Бэйли (Edward Charles Cyril Baly) предложил использовать другую

функцию для описания фотосинтеза высших растений, которая представляет собой графическое изображение представленного в 1913 г. уравнения ферментативной кинетики – уравнения Михаэлиса-Ментен (Michaelis-Menten). Если в качестве субстрата взять освещённость, а в качестве скорости ферментативной реакции – скорость фотосинтеза, то получим:

$$P = P_{max} \cdot \frac{I}{I_k + I}, \quad (2.1)$$

где  $I_k$  – это *световая константа*, которая характеризует адаптацию растений к световому режиму. В случае уравнения Михаэлиса-Ментен она также называется *константой полунасыщения*, поскольку при этой величине субстрата скорость реакции равна половине от своего максимального значения.

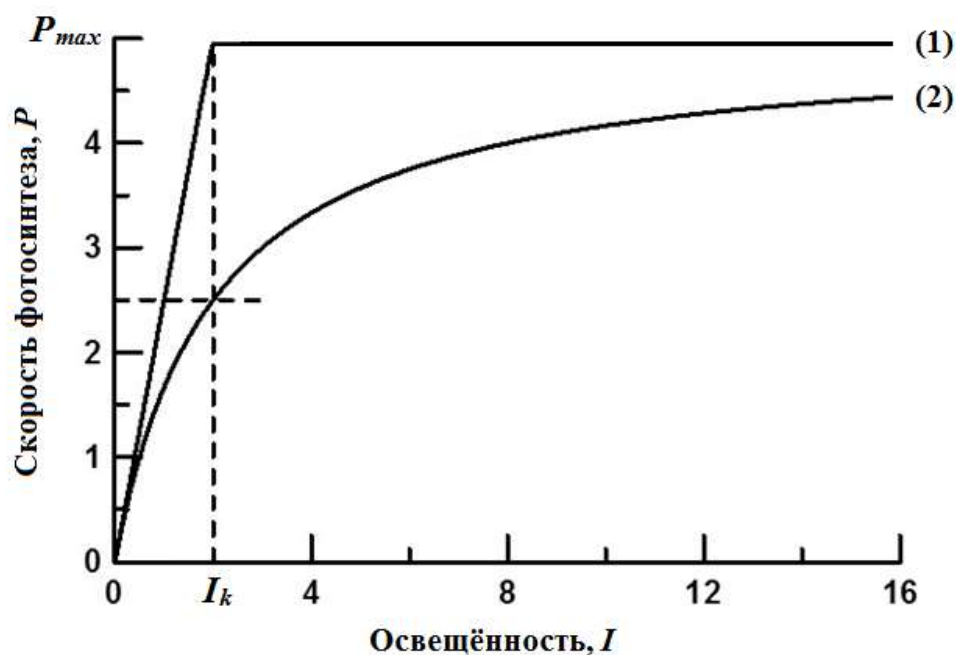


Рис. 2.1. Примеры световых кривых: ломаная Блэкмана (1), кривая, подчиняющаяся уравнению Михаэлиса-Ментен (2)

В дальнейшем были представлены и другие аналитические световые кривые, которые, однако, все лежат в пределах ломаной Блэкмана и кривой, подчиняющейся уравнению Михаэлиса-Ментен.



Поскольку фотосинтез происходит в клетках растений, то при моделировании ПП также учитывают и массу фитопланктона, вовлечённую в процесс фотосинтеза. В качестве индекса биомассы ( $B$ ) чаще всего выступает основной фотосинтезирующий пигмент хлорофилл  $a$ . Однако могут быть и другие параметры: коэффициент абсорбции света фитопланктоном, концентрация углерода в фитопланктоне и др. Когда все параметры световой кривой нормируются на индекс биомассы, то скорость фотосинтеза и её максимальное значение представляются как удельные характеристики -  $P^B$  и  $P_{max}^B$ , соответственно. Последний называется *ассимиляционное число*, которое соответствует максимально возможной удельной скорости синтеза органических соединений при условии светового насыщения фотосистемы.

С развитием спутникового зондирования цвета океана, начиная с конца 80-х годов XX века, началось и развитие моделирования ПП на основе спутниковых данных. Первые спутниковые эмпирические модели, основанные на регрессионных зависимостях, представляли ПП как функцию от поверхностной концентрации хлорофилла  $a$ . В дальнейшем в качестве параметров стали добавлять температуру поверхности океана, фотосинтетически активную радиацию (ФАР<sup>1</sup>) на поверхности моря и т.д. Более сложные модели включают в себя световую функцию.

Рассмотрим, одну из известных моделей ПП, представленную в 1997 г. – **VGPM (Vertically Generalized Production Model)**, которая позволяет восстановить дневную ПП (т.е. в течение светового дня) в колонке воды до глубины эвфотического слоя ( $PP_{eu}$ ) с использованием только спутниковых данных (выражение 2.2). Модель

---

<sup>1</sup> Фотосинтетически активная радиация (ФАР) – видимая часть солнечного спектра (400-700 нм), используемая растениями для фотосинтеза.

разрабатывалась на основе более 11 000 *in vitro* измерений ПП по всему Мировому океану. При этом, её валидация показала сильную значимую корреляцию между натурными и модельными данными ( $r = 0,58-0,87$ ). Единицы измерения ПП в случае VGPM - мг С м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>.

$$PP_{eu} = Chl_{sat} \cdot 0.66125 \cdot P_{opt}^B \cdot \frac{I_0}{4.1 + I_0} \cdot z_{eu} \cdot DL \quad (2.2)$$

В выражении 2.2  $Chl_{sat}$  – это концентрация хлорофилла *a*, [мг Хл м<sup>-3</sup>], измеренная дистанционно;  $P_{opt}^B$  - оптимальная удельная скорость фотосинтеза, [мг С (мг Хл)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup>], которая по смыслу схожа с  $P_{max}^B$ , но, при рассмотрении всей продукционной колонки воды в целом, характеризует максимальную скорость фотосинтеза в слое оптимальных условий (свет, микроэлементы, температура);  $I_0$  - ФАР на поверхности моря, [моль квантов м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>],  $z_{eu}$  - глубина эвфотического слоя, [м],  $DL$  - длина светового дня, [ч].

Как видно, VGPM основана на уравнении Михаэлиса-Ментен, а в качестве индекса биомассы выступает концентрация хлорофилла *a*. Константа полунасыщения равна 4,1 моль квантов м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>, а 0,66125 – это эмпирический безразмерный коэффициент, связывающий концентрацию хлорофилла *a* и подводную освещённость.

VGPM относится к классу моделей, которые восстанавливают ПП через интегральные величины параметров, рассчитанных из их поверхностных значений и независящих от длины волны света, изменчивости по глубине и по времени в течении суток.

Чтобы восстановить  $PP_{eu}$  с помощью VGPM, используя только спутниковую информацию, необходимо иметь следующие данные: концентрация хлорофилла *a*, температура поверхности океана (ТПО) [°С], ФАР и коэффициент диффузного ослабления света в воде на длине волны 490 нм, [м<sup>-1</sup>].

Авторы модели представляют  $P_{opt}^B$  как функцию ТПО (выражение

2.3), поскольку последняя оказывает непосредственное влияние на протекание процессов темновой стадии фотосинтеза, во время которой происходит синтез органических соединений. Следует отметить, что температурный алгоритм работает только в диапазоне ТПО от -1 до 29<sup>0</sup>С, при этом, если ТПО < -1<sup>0</sup>С, то  $P_{opt}^B = 1,3 \text{ мг С (мг Хл)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ , если ТПО > 28,5<sup>0</sup>С, то  $P_{opt}^B = 4 \text{ мг С (мг Хл)}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ . При его использовании в VGPM необходимо учитывать, что корреляция модельных оценок  $PP_{eu}$  с натурными данными снижается до 0,58.

$$P_{opt}^B = 1.2956 + 2.749 \cdot 10^{-1} \cdot T_{ss} + 6.17 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ss}^2 - 2.05 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ss}^3 + 2.462 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ss}^4 - 1.348 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ss}^5 + 3.4132 \cdot 10^{-6} \cdot T_{ss}^6 - 3.27 \cdot 10^{-8} \cdot T_{ss}^7 \quad (2.3)$$

Согласно закону распространения света в морской воде, при условии, что поверхностная ФАР соответствует 100%, а ФАР на глубине эвфотической зоны – 1%,  $z_{eu}$  можно рассчитать по следующей формуле:

$$z_{eu} = \frac{\ln(100)}{k_d} = \frac{4,6}{k_d}, \quad (2.4)$$

где  $k_d$  - коэффициент диффузного ослабления света в воде для всего спектра ФАР, [м<sup>-1</sup>], который, в свою очередь, можно получить из эмпирического выражения, как функцию  $k_d$  для длины волны 490 нм:

$$k_d(PAR) = 0.0864 + 0.884 \times k_d(490) - \frac{0.00137}{k_d(490)} \quad (2.5)$$

Длину светового дня обычно рассчитывают с использованием комплекса выражений на основе информации о широте местности и номера дня года.

### Цель работы

Восстановить и картировать для отдельной акватории (по выбору)

величину дневной чистой первичной продукции в колонке воды до глубины эвфотического слоя ( $PP_{eu}$ ) с использованием спутниковых данных с помощью модели VGPM.

### **Исходные данные**

Двухмерные массивы спутниковых данных:

- Концентрация хлорофилла  $a$ , [мг Хл м<sup>-3</sup>];
- Температура поверхности океана (ТПО), [°C];
- Фотосинтетически активная радиация (ФАР), [моль квантов м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>];
- Коэффициент диффузного ослабления света в воде на длине волны 490 нм, [м<sup>-1</sup>].

Одномерные массивы данных:

- Широта;
- Длина светового дня, [ч].

### **Выполнение работы**

1. Рассчитать величину оптимальной удельной скорости фотосинтеза, используя выражение 2.3.
2. Рассчитать глубину эвфотического слоя, используя выражения 2.4-2.5.
3. Рассчитать величину дневной чистой первичной продукции в колонке воды до глубины эвфотического слоя, используя VGPM.

### **Составление отчёта**

1. Описание выражений, используемых для расчётов (первичная продукция, оптимальная удельная скорость фотосинтеза, глубина эвфотического слоя).

2. Карты пространственной изменчивости входящих в модель параметров (концентрация хлорофилла  $a$ , ТПО, оптимальная удельная скорость фотосинтеза, ФАР, глубина эвфотического слоя) и первичной продукции.
3. Анализ результатов с описанием пространственной изменчивости первичной продукции и входящих в модель параметров.

### Пример выполнения работы

В работе на основе спутниковых данных и модели Vertically Generalized Production Model (VGPM) восстановлена дневная чистая первичная продукция в колонке воды до глубины эвфотического слоя ( $PP_{eu}$ ). Регион исследования - Баренцево море (июнь 2020 г.).

Для получения спутниковых оценок  $PP_{eu}$  использовались следующие данные (временная дискретность – месяц, пространственная – 4х4 км): концентрация хлорофилла  $a$ , коэффициент диффузного ослабления света в воде для длины волны 490 нм, температура поверхности океана (ТПО) и фотосинтетически активная радиация (ФАР). Удельная оптимальная скорость фотосинтеза ( $P_{opt}^B$ ) рассчитана как функция ТПО.

Пространственное распределение  $P_{opt}^B$  представлено на рисунке 2.1. Максимальные значения наблюдаются у западного побережья Новой Земли, а также у восточного побережья архипелага Шпицберген. Хорошо видно, что максимальные значения  $P_{opt}^B$  характерны для вод с температурой 1-3°C.

На рисунке 2.2 представлено пространственное распределение хлорофилла  $a$ . Максимальные значения концентрации хлорофилла  $a$  (8-10 мг Хл м<sup>-3</sup>) находятся к югу от архипелага Шпицберген, в то время как для большей части акватории характерны величины не более 1 мг Хл м<sup>-3</sup>.

Глубина эвфотического слоя рассчитывалась на основе коэффициента диффузного ослабления света в воде для длины волны 490 нм. Наибольшая глубина эвфотической зоны ( $> 50$  м) наблюдается у западного побережья Новой Земли в акватории с характерными небольшими значениями концентрации хлорофилла  $a$ . Наименьшая ( $< 10$  м), наоборот, к югу от архипелага Шпицберген, где концентрации хлорофилла  $a$  максимальны.

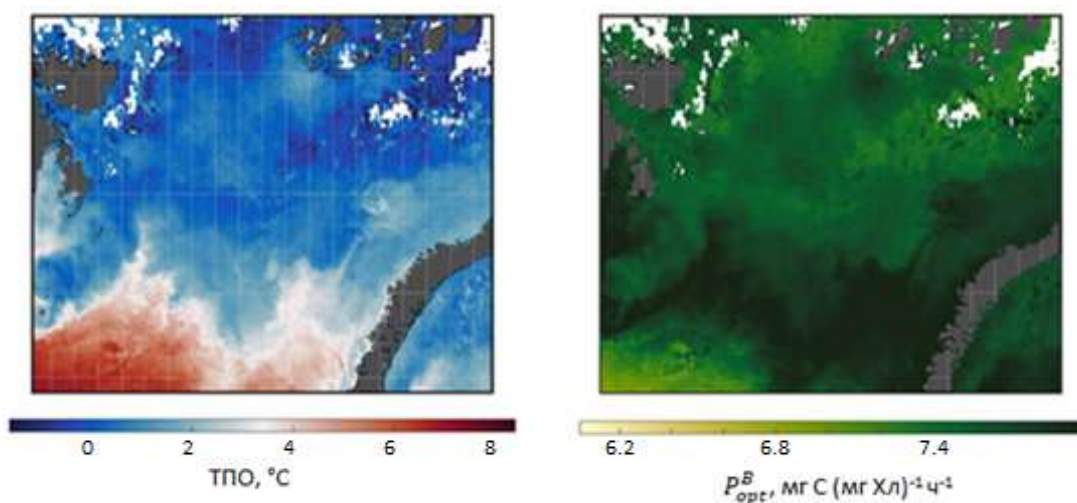


Рис. 2.1. Температура поверхности океана (слева) и оптимальная удельная скорость фотосинтеза (справа)

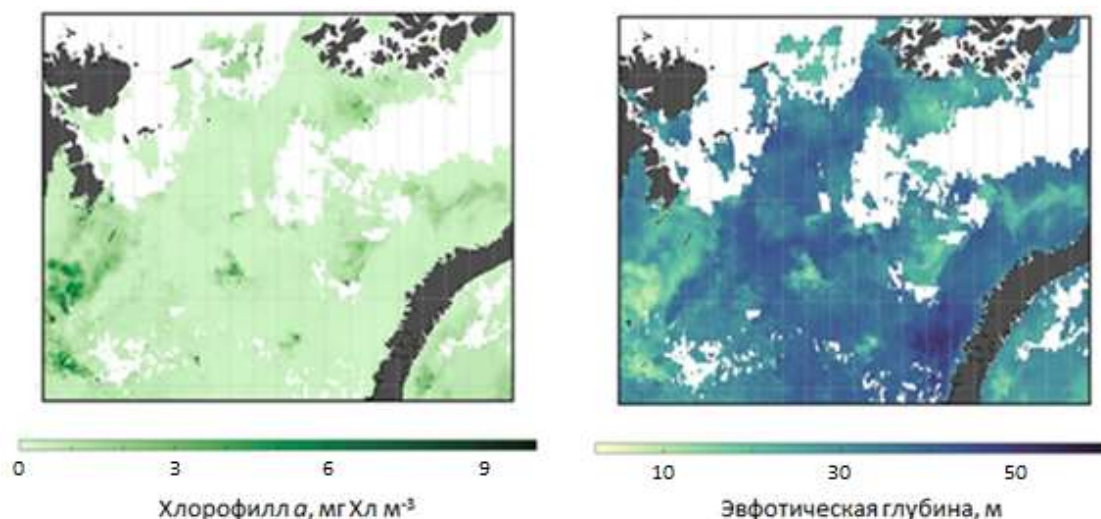


Рис. 2.2. Концентрация хлорофилла  $a$  (слева) и глубина эвфотического слоя (справа)

Продолжительность светового дня рассчитывалась как функция широты района исследования и дня года. Так как использовались среднемесячные данные для июня 2020 года, была выбрана дата - 15 июня. В зависимости от широты (от 72° до 81° с.ш.) длина светового дня менялась от 18 до 19 часов.

Пространственная изменчивость  $PP_{eu}$  представлена на рисунке 2.3. Как видно, наибольшие значения наблюдаются в местах с наибольшей концентрации хлорофилла *a*. При этом очаги максимальных и минимальных равновесных значений никак не связаны с изменчивостью ТПО. Однако в целом для более тёплых вод характерны более высокие значения  $PP_{eu}$ .

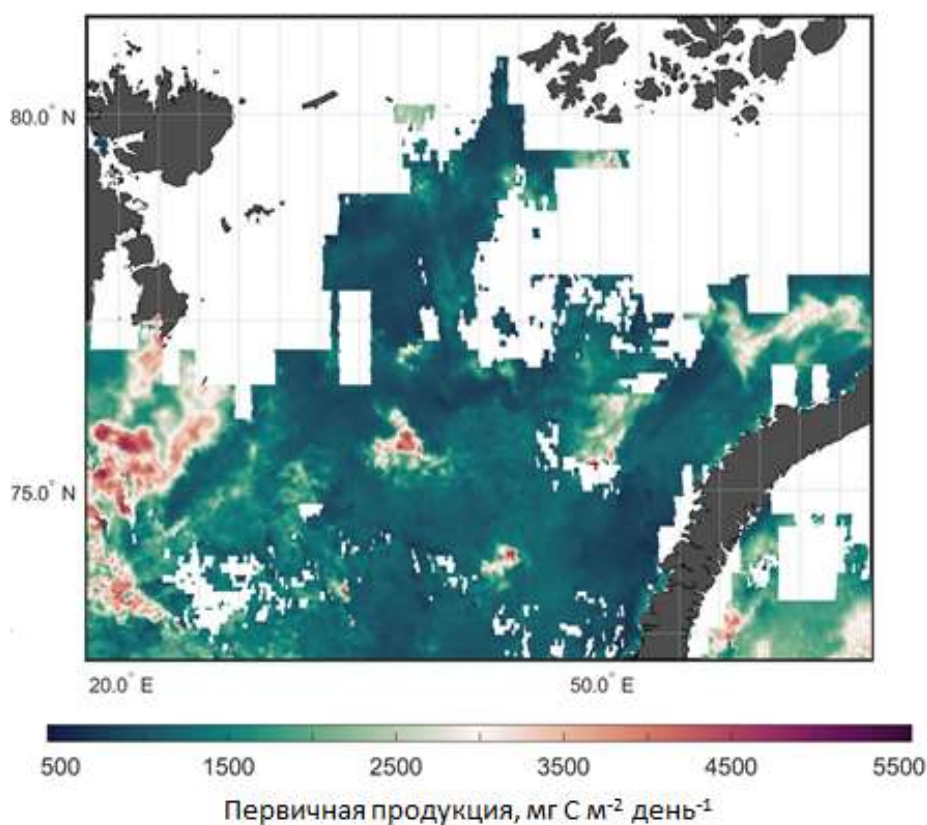


Рис. 2.3. Пространственная изменчивость первичной продукции (мг С м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>), восстановленной с помощью модели VGPM, в Баренцевом море в июне 2020 года

### Список литературы

- Ведерников В.И. Ассимиляционное число и пределы его колебаний в культурах и природных популяциях планктонных водорослей //Океанический фитопланктон и первичная продукция. - М.: Наука, 1982. - С. 92 – 112.
- Лобанова П.В. Спутниковые алгоритмы оценки первичной продукции в водах с различными океанологическими условиями (на примере Северо-восточной Атлантики и Японского моря) // Дисс. .... канд. геогр. наук. Санкт-Петербург, 2017. 25.00.28 – Океанология. Защита состоялась 13 июня 2018.
- Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанология. - 2016. - Т. 56. - №4. - С. 577-591.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration //Limnology and oceanography. – 1997. – Т. 42. – №. 1. – С. 1-20.
- Behrenfeld M.J., Boss E., Siegel D.A., Shea D.M. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space //Global biogeochemical cycles. – 2005. – Т. 19. – №. 1.
- Kirk J.T.O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (3d ed.). – UK: Cambridge University Press. 2011 – 649 p.
- Morel A., Huot Y., Gentili B., Werdell P.J., Hooker, S.B., Franz, B.A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach //Remote Sensing of Environment. – 2007. – Т. 111. – №. 1. – С. 69-88.
- Morel A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications //Progress in oceanography. – 1991. – Т. 26. – №. 3. – С. 263-306



- Platt T., Sathyendranath S. Modelling marine primary production. – Halifax, Nova Scotia, 2002. - 280 c.

### **РАБОТА №3: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ИНКУБАЦИОННОГО ПЕРИОДА ИКРЫ РЫБ**

#### **Общие сведения**

Температура — это важнейшая характеристика вод Мирового океана. Она оказывает большое влияние на происходящие в океане физические, химические и биологические процессы. Температура воды влияет на скорость химических реакций: при её повышении увеличивается способность воды растворять твёрдые вещества, но уменьшается количество растворенных в ней газов, в частности кислорода. Температура оказывает огромное влияние на биологические процессы, в том числе на развитие, размещение и распределение промысловых объектов. Это влияние может быть как непосредственным, так и косвенным, обусловленным зависящими от неё процессами.

Известно, что рыбы очень чувствительны к температуре воды и её изменениям. Особенно ярко влияние температуры на промысловые гидробионты проявляется в периоды времени, непосредственно предшествующие нересту, во время нереста, а период развития икры и личинок является наиболее критическим периодом в жизненном цикле рыб.

В период, предшествующий нересту, температура в районах зимовки или нагула оказывает влияние на скорость созревания половых продуктов взрослых рыб. Каждой промысловой популяции свойственен свой «нормальный» диапазон температур. При температуре ниже указанного диапазона созревание гонад задерживается, и рыбы могут прийти на нерест позже обычных сроков. При температурах более высоких процесс созревания ускоряется, и сроки смещаются на более ранние даты. Следовательно, появление

нерестового косяка рыб определяется предшествующим ходом температуры. Узость диапазона температур, благоприятных для нереста, влияет на географическое распределение районов нереста. Следовательно, долгопериодные изменения температуры воды могут обуславливать смещения районов нереста.

Узость диапазона температур, благоприятных для нереста (в некоторых случаях различного для разных популяций рыб одного и того же вида), влияет на географию нереста (табл. 3.1). Например, треска в Мотовском заливе Баренцева моря нерестится тремя неделями позже, чем у Лофотенских островов в Норвежском море и до двух месяцев позднее, чем в Северном море.

Уже в районах нереста температурный режим влияет не только на сроки начала нереста, но и на все важнейшие стадии формирования поколения, такие как инкубационный период развития икры, темп развития и роста личинок, а также мальков. Развитие эмбрионов рыб возможно только при достижении температуры воды определённого значения. Также в сочетании с солёностью температура определяет плотность воды, воздействуя на способность икры держаться на плаву.

*Таблица 3.1. Температура воды (°C), благоприятная для нереста некоторых видов рыб*

Вид рыбы	Район нереста	Температура воды
Треска	Баренцево море	0,4 – 2,0
Треска	Норвежское море	2,5 – 5,0
Треска	Северное море	4,0 – 6,0
Сардина калифорнийская	акватория Тихого океана у полуострова Калифорния	13,0 – 17,0

Южноафриканская сардина	акватория Атлантического океана у юго-западного побережья Африки	14,9 – 19,6
Обыкновенная скумбрия	Северная часть Атлантического океана	12,0 – 15,0
Тихоокеанская сельдь	акватория Тихого океана у полуострова Калифорния	8,0 – 10,0
Тихоокеанская сельдь	акватория Тихого океана у полуострова Аляска	3,0 – 5,5
Атлантическая сельдь	акватория Атлантического океана около северо-восточного побережья Северной Америки	11,9 – 13,9

В основе динамики численности гидробионтов лежит чередование поколений разной численности: появление урожайного годового класса или серии среднечисленных генераций через несколько лет приводит к росту запасов, а малочисленных поколений — их снижению.

Огромная плодовитость рыб является приспособлением, компенсирующим эту гибель для сохранения численности вида. Уменьшение гибели хотя бы на доли процента при оптимальных для вида условиях окружающей среды уже приводит к значительному увеличению численности.

У большинства рыб урожайность поколений зависит от условий выживания эмбрионов и пищевой обеспеченности личинок на ранних стадиях развития. Кроме того, прямое и косвенное влияние на выживаемость личинок оказывает температура. Этот факт учитывается при прогнозировании численности возрастных групп рыб на следующий год. Считается, что в умеренных и субполярных широтах высоким температурам воды в период нереста промыслового вида соответствует появление в следующем году новых возрастных групп

рыб, имеющих большую численность, а низким – появление групп малой численности.

Для большинства пелагических видов рыб получена эмпирическая зависимость связывающая продолжительность инкубационного периода ( $\Delta t_{и}$ ) и среднюю температуру окружающих вод:

$$\Delta t_{и} = A + B e^{-C \bar{T}_{и}}, \quad (3.1)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – заданные коэффициенты,  $\bar{T}_{и}$  – средняя температура инкубации, которая рассчитывается путём решения вышеуказанного уравнения методом итераций от минимальной наблюдаемой в исходных данных температуры, пока решение не будет сходиться с точностью до  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Вид приведённого выше выражения (3.1) определяется нормальной или экспоненциальной формой развития эмбриона рыбы при постоянной температуре воды. Однако существует минимальный срок развития икры, который практически не зависит от температуры, даже если она находится в оптимальном диапазоне. Коэффициент  $A$  характеризует минимальную продолжительность инкубационного периода. Коэффициенты  $B$  и  $C$  описывают скорость развития эмбриона в зависимости от температуры воды. Числовые параметры ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) получены с помощью статистических методов по данным натурных экспериментов. Они заметно отличаются для разных видов рыб. Значения констант для разных видов представлены в табл. 3.2.

*Таблица 3.2. Значения числовых коэффициентов для расчёта времени инкубационного периода у икры различных видов рыб*

Вид рыб	A	B	C
Сельдь	4	44,7	0,167
Треска	7	30,3	0,215
Сардина	0,5	28,8	0,159

Положения нерестилищ рыб в умеренных и в высоких широтах, как правило, довольно постоянны и расположены строго определённым образом по отношению к доминирующей на акватории системе течений. Потому что начало нереста и продолжительность инкубационного периода тесно связаны не только с температурным режимом на нерестилище, но и с появлением пищевых организмов в водной среде в районах появления ранних стадий развития рыб. Икра рыб пассивно выносится течением с мест нереста в районы обитания молоди, т.е. в акватории, где в этот период наблюдается максимум развития первичной продукции. Таким образом период нереста и положение нерестилищ тесно связаны с продукционными циклами популяций фитопланктона.

### **Цель работы**

Оценить влияние температуры воды на сроки нереста и развитие икры промысловых видов рыб.

### **Исходные данные**

- вид рыб;
- координаты области нереста;
- глубина нереста, [м];
- температура начала нереста, [°C];
- заданная годовая аномалия температуры воды, [°C].

Перечень данных из иных информационных источников:

- годовой ход температуры воды [°C] в заданных координатах области нереста по данным из World Ocean Atlas за несколько лет.

### **Выполнение работы**

1. Выбрать ежемесячные данные о годовом ходе температуры в заданном квадрате Мирового океана из массива World Ocean Atlas на заданной глубине за несколько лет.
2. Рассчитать значения температур по месяцам для годов постоянной отрицательной (ТПО-А) и положительной аномалий (ТПО+А).
3. В графическом редакторе построить график годового хода температуры воды на указанной акватории для климатического значения температуры и для аномально холодного и аномально тёплого года.
4. По заданной температуре нереста с помощью интерполяции или графически определить и нанести на график на дату начала нереста для климатически нормального, аномально холодного и аномально тёплого годов.
5. Провести расчёт продолжительности инкубационного периода ( $\Delta t_{и}$ ) для климатически нормального, аномально холодного и аномально тёплого года, используя выражение (3.1):
  - Расчёт  $\Delta t_{и}$  производится итерационным способом. На первом итерационном шаге принимаем среднюю температуру инкубации равной температуре нереста и выполняем расчёт продолжительности инкубационного периода. Далее прибавляя к дате нереста ( $D_H$ ) полученную продолжительность инкубационного периода ( $\Delta t_{и}$ ), определяем дату выклева из икринки ( $D_B$ ). При этой температуре будет наблюдаться самая большая продолжительность инкубационного периода.
  - По дате выклева ( $D_B$ ) на графике годового хода или с помощью линейной интерполяции данных о временной изменчивости температуры определяем температуру в момент выклева личинки ( $T_B$ ). Далее получаем среднюю температуру инкубационного периода ( $T_{и}$ ) на первом шаге итерации путём суммы температур на

дату нереста ( $T_H$ ) и на дату выклева ( $T_B$ ).

- На втором итерационном шаге выполняем расчёт  $\Delta t_{\text{и}}$  и все остальные расчёты, как и на первом итерационном шаге.
- Итерационные расчёты продолжать до тех пор, пока разница ( $\delta$ ) между значениями продолжительности инкубационного периода для соседних итерационных шагов не станет меньше 0,5 суток:

$$0,5 > \delta = (\Delta t)_i - (\Delta t)_{i-1}$$

6. Описанный в предыдущем пункте расчёт выполняется как для среднего климатического года, так и для аномально холодного и аномально тёплого годов.
7. Результаты расчётов дат нереста и выклева, а также промежуточные итерационные расчёты представляются в табличной форме.

### **Составление отчёта**

1. Описание методической части работы.
2. Таблица с исходными данными.
3. Графики годового хода температуры воды в районе нерестилища для среднего, тёплого и холодного годов с необходимыми отметками для расчётов.
4. Таблицы с итерационными расчётами дат нереста, выклева и соответствующих температур.
5. Анализ полученных результатов с оценкой влияния температуры на начало нереста, описанием длительности инкубационного периода и крайних сроков нереста, а также особенностей появления личинок в аномальные года.

### **Примеры табличного представления материалов в отчёт**

*Таблица 3.3. Результаты определения средней температуры инкубации методом итераций*



ТПО (норм.)			ТПО-А (хол.)			ТПО+А (тепл.)		
T, °C	$\Delta t$ , сутки	$\delta$ , сутки	T, °C	$\Delta t$ , сутки	$\Delta$ , сутки	T, °C	$\Delta t$ , сутки	$\delta$ , сутки
6,00	15,37	1,32	6,00	15,37	1,45	6,00	15,37	1,18
6,80	14,05	-0,08	6,89	13,92	-0,10	6,71	14,19	-0,11
6,75	14,13		6,82	14,02	0,02	6,64	14,30	0,02
			6,83	14,01		6,65	14,28	

Таблица 3.4. Результаты расчёта даты нереста, даты и температуры выклева трески

$T_H$ , °C	Тип года	$D_H$ , сутки	$\Delta t$ , сутки	$D_B$ , сутки	$T_B$ , °C
6	ХОЛ	118,5	14	132,5	8,65
	НОРМА	109	14,1	123,1	7,51
	ТЕПЛ	97,5	14,3	111,8	6,31

### Примеры графического представления материалов в отчёт

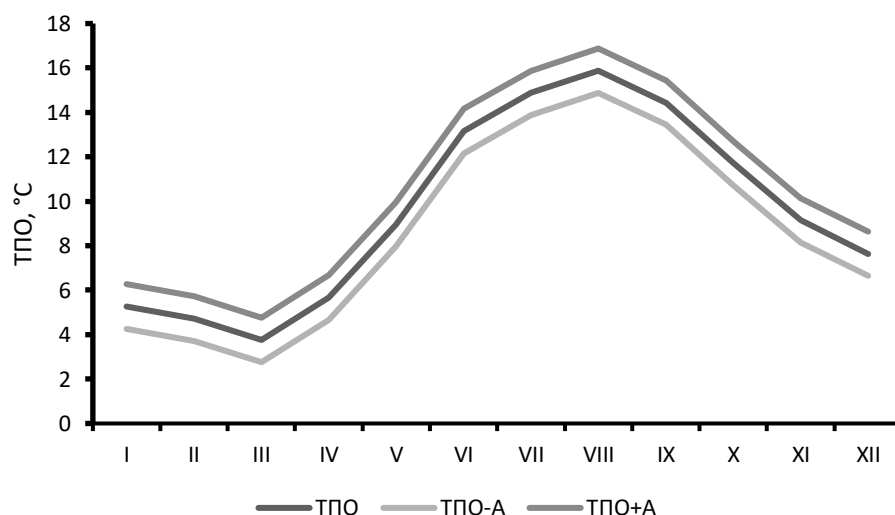


Рис. 3.1. Годовой ход температуры нормального (ТПО), anomalно тёплого (ТПО+А) и anomalно холодного годов (ТПО-А)

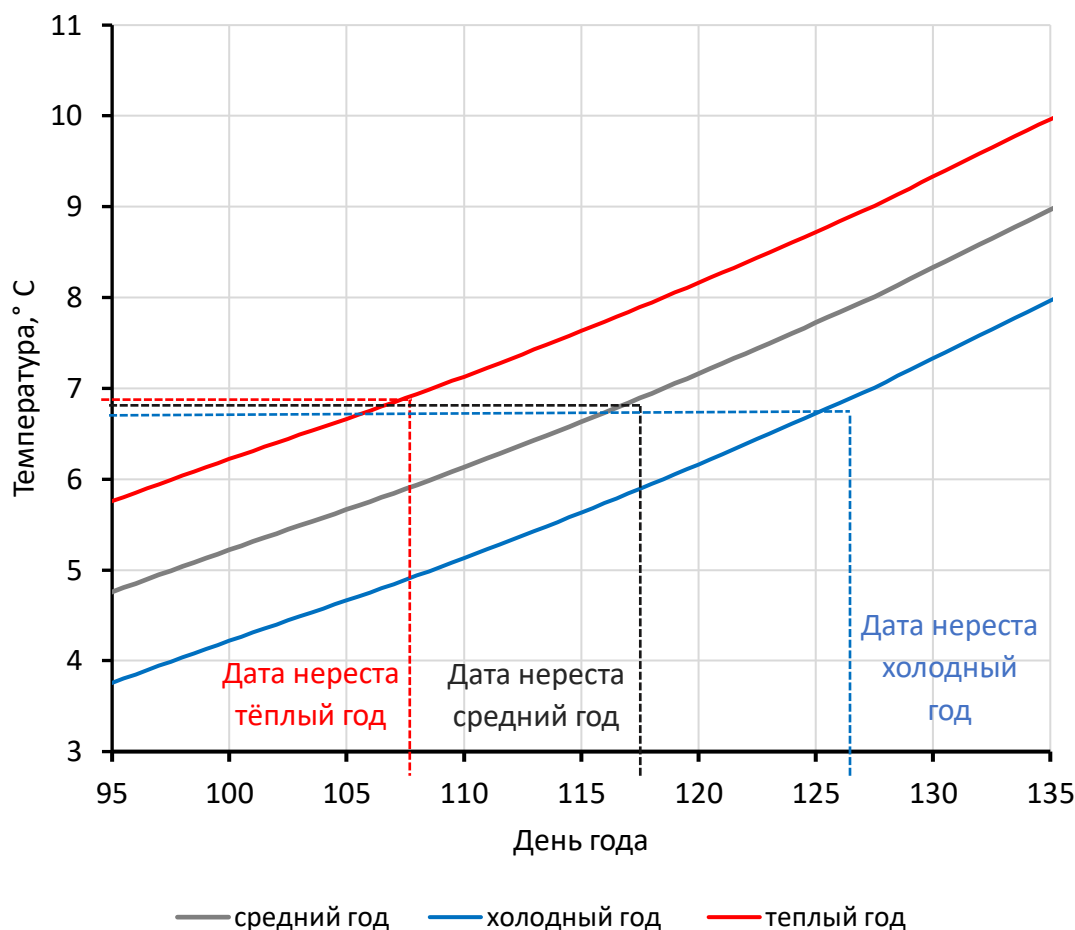


Рис. 3.2. Графическая интерпретация определения параметров нереста и выклева из икры трески

### Список литературы

- Дементьева Т.Ф. Роль пополнения в формировании промысловых стад и оценке запасов рыб // Труды ВНИРО, 1971. – Т. 79. С. 50–57.
- Захаров Л.А. Введение в промысловую океанологию : учеб. пособие / Захаров Л.А. – 2-е изд., испр. и доп. – Калининград: КГУ, 2001. – 94 с.
- Левасту Т. Промысловая океанография : пер.с англ. / Левасту Т.; авт. Хела И. –Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. – 295 с.
- World Ocean Atlas, [Электронный источник].

## РАБОТА №4: ВЫДЕЛЕНИЕ РАЙОНА ПОИСКА ПРОМЫСЛОВЫХ СКОПЛЕНИЙ РЫБ ПО ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

### Общие сведения

Температура воды оказывает большое влияние на питание, на процессы обмена веществ и на рост рыб. При низкой температуре воды большинство видов рыб умеренных широт, как правило, перестают питаться. Также установлено, что некоторые холодноводные рыбы, например, камбала-ёрш, плохо питаются при высокой температуре воды. Кроме того, например, увеличение температуры воды на Кольском меридиане, соответствует подъёму трескового промысла в Баренцевом море в целом (рис. 4.1).

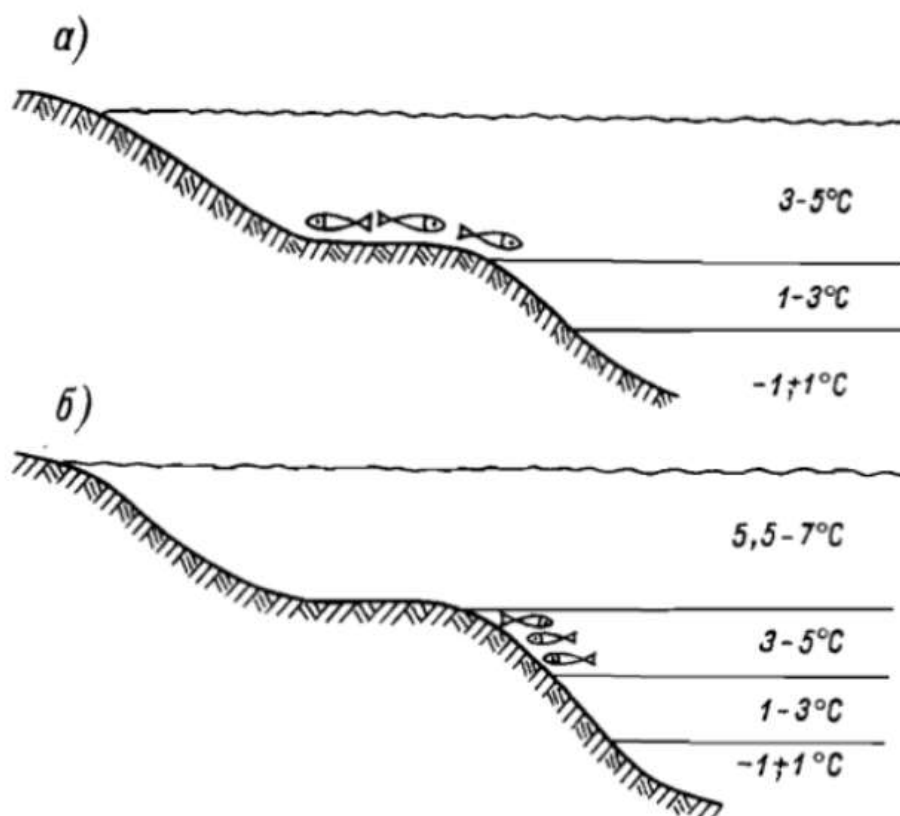


Рис. 4.1. Схематический пример влияния anomalно высоких температур на распределение трески: а) условия близкие к климатическим и рыба находится на шельфе в доступных для промысла условиях; б) температура на шельфе в обычных метях

обитания слишком высокая и рыба смещается глубже на материковый склон в менее доступные области

При этом концентрации доступных для промысла косяков рыбы увеличиваются только в восточных районах моря (она даже проникает в Карское море), а в западных, наоборот, за счёт перераспределения по глубине уменьшаются.

Ощущение температуры у рыб очень развито. На основании экспериментов установлено, что отдельные виды костных рыб ощущают изменения температуры воды на 0,03 - 0,05 °С и реагируют на него.

Рыбы могут жить при самой разнообразной температуре воды. Однако весьма важное значение для их расселения и жизни в различных условиях имеет амплитуда колебаний температур, при которых могут жить одни и те же виды. При этом рыб подразделяют на stenotherмных, т.е. приспособленных к узкой амплитуде колебания температуры, и eurytherмных - тех, которые могут жить в пределах значительных изменений температуры. Обычно рыбы тропической и субтропической зон более stenotherмны, чем рыбы умеренных и высоких широт. Если общая амплитуда температур, при которых может жить вид рыбы, часто может быть велика, то для каждой стадии развития она обычно значительно меньше. Рыба выбирает воду определённой, оптимальной для каждого этапа развития температуры. Эту особенность поведения рыб следует учитывать и в ходе планирования промысловых операций (рис. 4.2).

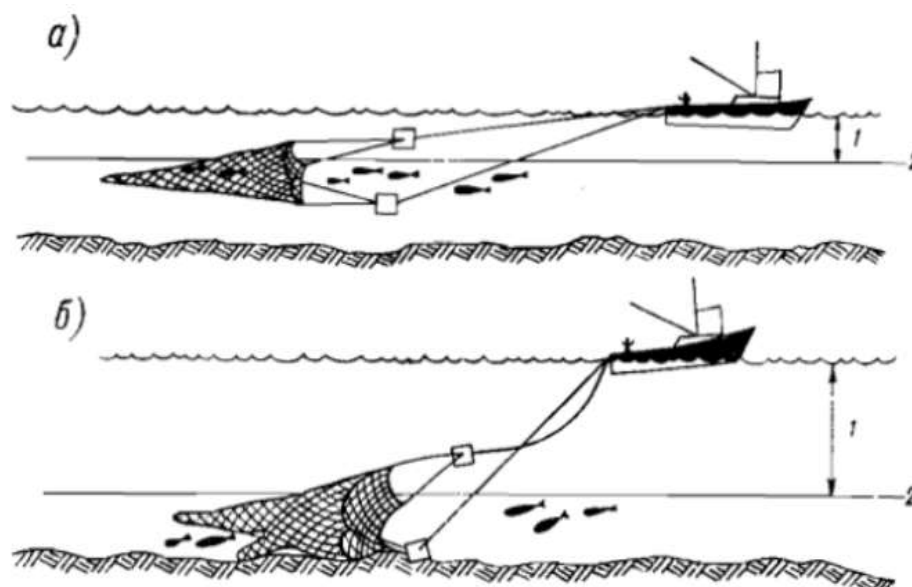


Рис. 4.2. Схематический пример влияния на лов разноглубинным тралом температурных аномалий в вертикальной структуре вод: 1 - верхний квазиоднородный слой; 2 – термоклин.

Вариант (а): квазиоднородный слой не имеет аномалий, слой скачка расположен ближе к поверхности, рыба находится под термоклинном, в толще воды условия для промысла разноглубинным тралом хорошие. Вариант (б): квазиоднородный слой имеет значительное развитие, косяки рыбы располагаются у дна, лов разноглубинным тралом невозможен.

Совершая длительные миграции в поисках пищи или перемещаясь к местам нереста и зимовки, рыбы практически не выходят за пределы диапазона своих оптимальных температур. Этим определяется ареал распространения данного вида. Следовательно, зная диапазон «оптимальной температуры» того или иного вида рыб и динамику пространственно-временного распределения температур в интересующем районе Мирового океана, можно предположить, где, когда и на каких глубинах будут проходить пути их миграций, а также появляется возможность определить районы поиска промысловых скоплений рыб (табл. 4.1).

*Таблица 4.1. Оптимальные температуры воды (°C) для нагула и миграции некоторых видов рыб*

Вид рыбы	Район нагула и миграции	Оптимальный диапазон температур
Треска	акватория Баренцева моря около архипелага Шпицберген	2,0– 4,0
Треска	акватория Атлантического океана около северо-восточного побережья Северной Америки	3,5 – 5,5
Треска	Норвежское море	1,5 – 4,0
Треска	Северо-западная часть Атлантического океана	3,0 – 5,0
Обыкновенная скумбрия	Северная часть Атлантического океана	12,0 – 14,0
Дальневосточная сардина	Японское море	12,0 – 16,0
Сардина калифорнийская	акватория Тихого океана у полуострова Калифорния	15,0 – 16,0
Тунец обыкновенный	Северо-восточная часть Тихого океана	18,0 – 20,0
Обыкновенный анчоус	Средиземное море	6,0 – 29,0
Обыкновенный анчоус	Атлантический океан	13,0 – 17,5
Пикша	Северо-западная часть Атлантического океана	3,0 – 6,0

### **Цель работы**

По заданному диапазону «оптимальной температуры» определить область частой встречаемости промыслового гидробионта в течение

года с последующей оценкой её пространственной и временной изменчивости.

### **Исходные данные**

- вид промыслового объекта (рыбы);
- рассматриваемый регион;
- глубины, доступные для промысла, [м].

Перечень данных из иных информационных источников:

- годовой ход температуры воды [ $^{\circ}\text{C}$ ] в заданных координатах рассматриваемого региона по данным из World Ocean Atlas за несколько лет.

### **Выполнение работы**

1. Выбрать ежемесячные данные о годовом ходе температуры в заданной области Мирового океана из массива World Ocean Atlas за несколько лет.
2. Составить краткое описание промыслового объекта (рыбы) для выявления особенностей распространения выбранного объекта на рассматриваемой акватории (включающее внешний вид рыбы, ареал распространения, типичные районы нагула, нереста, миграции, глубины обитания).
3. Построить карты распределения температуры верхней и нижней границ глубин, доступных для промысла с учётом сведений о глубинах обитания заданного вида рыб, по месяцам по полям температуры из World Ocean Atlas для рассматриваемой акватории.
4. Определить и отметить на картах области частой встречаемости рыб с учётом их доступности для промысла, как пространство,

заклѹчѣнное между изолиниями оптимальной для данного вида температуры.

5. Оценить площади областей частой встречаемости промыслового объекта и её сезонную изменчивость.
6. Провести анализ пространственно-временной изменчивости возможной области промысла на рассматриваемых горизонтах. При анализе следует учитывать сезонность поступления тепловой энергии к океану, влияние течений и других термогидродинамических факторов.

### **Составление отчѣта**

1. Описание методической части работы.
2. Таблица с исходными данными.
3. Описание промыслового объекта с акцентом на описание особенностей ареала заданного вида рыб. Со ссылками на литературные источники.
4. Ежемесячные карты с нанесѣнными границами областей частой встречаемости рыб с учѣтом их доступности для промысла.
5. График годового хода площади области частой встречаемости по горизонтам.
6. Описание выделенного района и характера его внутригодовой изменчивости с привязкой к сезонной изменчивости и учѣтом влияния основных океанических течений, топографии дна и положения береговой черты. Указать, попадает ли выделенный район в исключительные экономические зоны прибрежных государств.



## Примеры графического представления материалов в отчёт

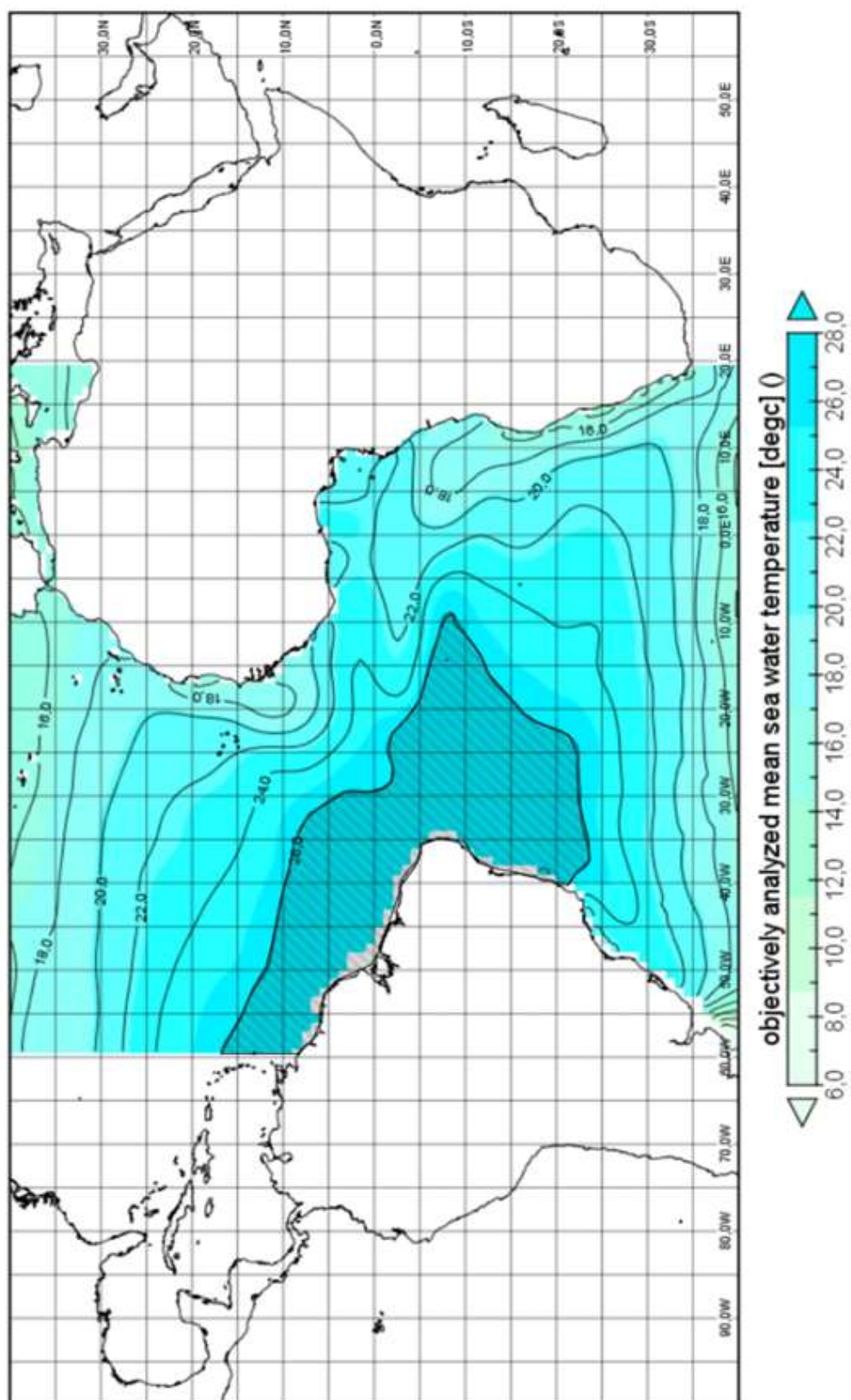


Рис. 4.3. Карта распределения температуры на глубине 50 метров

в августе с выделением штриховкой области частой встречаемости заданного промыслового объекта (сардинеллы) с учётом её доступности для промысла

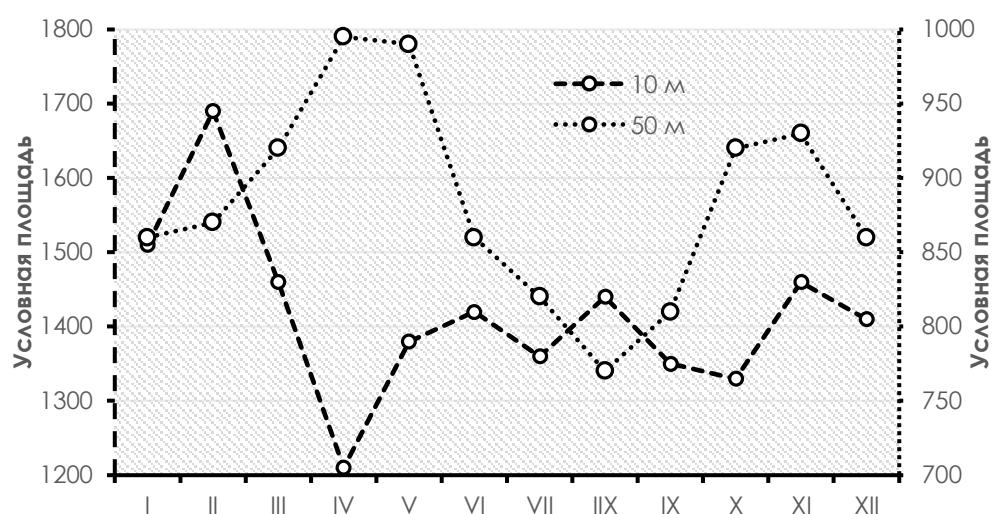


Рис. 4.4. Внутригодовой ход площади (млн км<sup>2</sup>) области частой встречаемости заданного промыслового объекта (сардины) с учётом её доступности для промысла

### Список литературы

- Волобуев В.В., Марченко С.Л. Тихоокеанские лососи континентального побережья Охотского моря // ФГУП «МагаданНИРО». – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2011. – 303 с.
- Захаров Л.А. Введение в промысловую океанологию: учеб. пособие / Захаров Л.А. – 2-е изд., испр. и доп. - Калининград: КГУ, 2001. – 94 с.
- Карпенко В.И. Оценка состояния запасов и управление промыслом тихоокеанских лососей на Камчатке // Петропавловск-Камчатский, 2013. – 64 с.
- Левасту Т. Промысловая океанография: пер. с англ. / Левасту Т.; авт. Хела И. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 295 с.
- World Ocean Atlas, [Электронный источник].

## **РАБОТА №5: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОСРОЧНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

### **Общие сведения**

В связи с исключительным разнообразием рыб и особенностями их жизни влияние океанологических условий на отдельные виды далеко не одинаково. Эти условия по-разному влияют даже на отдельные популяции рыб одного вида и на рыб одной популяции, но разного возраста. В связи с этим численность большинства представителей нектона испытывает значительные долгопериодные колебания, связанные с изменениями климата, направленностью и интенсивностью воздушных, и водных потоков и другими гидрометеорологическими и гидрофизическими процессами. Однако многочисленные исследования показали, что существуют общие закономерности зависимости ихтиофауны от внешней среды. Проблема изучения в различных временных масштабах и соответствующих изменений внешней среды не может быть решена без рассмотрения и изучения всей системы океан-атмосфера. Можно было бы ожидать, что во временных климатических масштабах, которые представляют практический интерес, от месяцев до многих сотен лет, процессы изменения динамики численности гидробионтов сказываются в виде долгопериодных однонаправленных трендов – неслучайных изменений математического ожидания.

Основной целью исследований в области промысловой океанологии являются диагноз и прогноз промыслово-океанологических процессов.

Под **диагнозом океанологических процессов** обычно понимается последовательность процедур обобщения, систематизации и интерпретации изменчивости океанологических характеристик с

целью построения достоверной модели происходящих процессов. Диагноз предполагает два основных этапа: анализ и синтез.

Первым этапом диагноза является анализ данных. Анализ – это описание изучаемых процессов и явлений по отдельности после представления исходных данных в виде, удобном для исследования.

Методы анализа могут быть различны: картирование распределения физико-химических, гидробиологических, промысловых и других параметров, описание пространственно-временной структуры рядов и океанологических полей и т.д. Цель анализа состоит в описании составных частей процессов формирования биологической и промысловой продуктивности вод океана.

Второй этап диагноза – синтез полученных в результате анализа представлений, т.е. объединение их некую модель, достаточно простую для понимания взаимодействия и взаимовлияния происходящих процессов и достаточно сложную для адекватного описания всей изучаемой природной системы. При этом полученное описание должно соответствовать существующим физическим, химическим и биологическим законам природы.

Результатом синтеза является описание масштабов и механизмов взаимодействия происходящих процессов с определением главных и второстепенных связей, т.е. научная интерпретация полученных результатов.

В силу сложности взаимодействия биотических и абиотических компонент промыслово-океанологических систем, а также в зависимости от конкретной прикладной задачи, стоящей перед исследователями в конкретном промысловом районе, в промысловой океанологии выделяются два основных типа диагноза: феноменологический и статистический.

Под **феноменологическим диагнозом**, который является в настоящее время важнейшим этапом промыслово-океанологических исследований, будем понимать качественное и количественное описание масштабов и механизмов формирования биологической и промысловой продуктивности вод на основе результатов анализа изменчивости различных биотических и абиотических процессов.

Методология феноменологического диагноза представляет собой набор эмпирических приёмов количественного анализа в сочетании с практическими методами качественной обработки и описания. Этот подход – результат опыта, накопленного в процессе многолетних практических работ, но научному обеспечению промысла (т.е. результат осмысление и обобщение научных данных).

**Статистический диагноз** потенциально имеет более широкие возможности практического применения в промыслово-океанологических исследованиях по сравнению с феноменологическим. Эти возможности обусловлены гораздо большим разнообразием статистических методов преобразования информации. В последние годы статистические методы дали обнадеживающие результаты в рыбопромысловом прогнозировании и успешно реализуются.

**Циклы** – основа любых гидрометеорологических процессов на всём земном шаре во всех масштабах пространства и времени. Цикличны внешние условия, например, солнце и приливные силы, цикличны и внутренние автоколебания системы океан-атмосфера.

Любое повторяющееся изменение характеристики во времени можно теоретически рассматривать как результат сложения простых гармонических колебаний, а любое волновое движение — как сумму простых гармонических волн. Этот тезис, доказанный французским

математиком и физиком Ж.Б. Фурье в 1822 г., служит основой для изучения всех циклических явлений в гидрометеорологии.

Если возникает задача выявить в исследуемом процессе только циклические составляющие, можно воспользоваться спектральным или гармоническим анализом.

В основе гармонического анализа лежит идея, что любой ряд можно разложить в ряд Фурье без остатка. Ряд Фурье представляет собой полную совокупность гармоник. **Гармониками** называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда. Уравнение гармоники можно представить в следующем виде:

$$G_k = A_k \cdot \cos(\omega_k \cdot t - \varphi_k)$$
$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}, \quad (5.1)$$

где  $k$  – номер гармоники,  $A_k$  – амплитуда  $k$ -той гармоники,  $\omega$  – частота  $k$ -той гармоники,  $T_k$  – период  $k$ -той гармоники,  $\varphi_k$  – фаза  $k$ -той гармоники,  $t$  – время.

Полное разложение в ряд Фурье предполагает определение гармоник количеством  $N/2$ .

Гармоники, как правило, нумеруются. Гармоника № 1 ( $G_1$ ) имеет период равный длине ряда  $N$ , далее период гармоники уменьшается:  $G_2$  имеет период  $N/2$ ;  $G_3$  –  $N/3$  и т.д. Последняя гармоника имеет период равный 2 единицы дискретности (**частота Найквиста**).

Характеристики гармоники определяются на основании **коэффициентов Фурье**  $a_k$  и  $b_k$ :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [Y_i \sin(\omega_k) \cdot t_i], \quad (5.2)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [Y_i \cos(\omega_k) \cdot t_i], \quad (5.3)$$

где  $Y_i$  – исходный ряд,  $N$  – длина этого ряда,  $t_i$  – ряд времени, где  $i = 1, 2, 3 \dots N$ ,  $\omega_k$  – частота  $k$ -той гармоники.

Тогда характеристики гармоники определяются по следующим формулам:

- Амплитуда гармоники

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (5.4)$$

- Фаза гармоники

$$\varphi_k = \arcsin\left(\frac{a_k}{A_k}\right) = \arccos\left(\frac{b_k}{A_k}\right) \quad (5.5)$$

- Дисперсия гармоники

$$D_k = \frac{A_k^2}{2} \quad (5.6)$$

- Вклад гармоники в общую дисперсию ряда

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}, \quad (5.7)$$

где  $D_y$  – дисперсия исходного ряда.

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда, по сути, является аналогом коэффициента детерминации  $R^2$ . Если потом соответствующие характеристики подставить в уравнение гармоники, то можно рассчитать её значения на каждый момент времени. Нужно обратить внимание, что в связи с тем, что функции  $\arcsin$  и  $\arccos$  дают двойственный результат, то фаза в уравнении гармоники может быть как с плюсом, так и с минусом – какова она в реальности, лучше всего подбирать визуально по совмещённому графику гармоники и исходного ряда.

Современные статистические программы («Statistica», «SPSS» и т.п.) рассчитывают разложение Фурье методом БПФ («Быстрого

преобразования Фурье»), при этом, теряя информацию о некоторых характеристиках гармонических составляющих. По сути, в качестве результата там представляется зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты и называется это **спектром**. Тогда гармоники, имеющие большую дисперсию (и, соответственно, амплитуду), будут представлены «пиками» на соответствующем графике спектра.

В большинстве исследований представляется достаточным выявление частот (и, соответственно, периодов), для которых отмечаются пики спектра и совокупность выявленных периодов (частот), которая и определяет циклические составляющие процесса.

Однако часто возникает необходимость *восстановить* исходный процесс по нескольким значимым гармоникам. Тогда необходимо прибегнуть к процедуре *гармонического анализа на основе рассчитанного спектра*.

По таблицам и графикам спектров, полученных методом БПФ, нужно определить периоды для пиков спектра, а потом для этих периодов провести гармонический анализ: рассчитать характеристики гармоник, сформулировать для них уравнения, рассчитать ряды этих гармоник (в зависимости от времени) и путём сложения этих рядов получить восстановленный ряд.

### **Цель работы**

Выполнить прогноз изменчивости абиотического фактора среды при помощи спектральной модели.

### **Исходные данные**

Перечень данных из электронного реанализа:



- среднемесячные значения индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции (NAO, SCAND, EA, EA/WR);
- температура воздуха над морем, [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- температура поверхности океана, [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- поверхностная солёность океана, [‰];
- скорость ветра за определённый период, [ $\text{м сек}^{-1}$ ].

### **Выполнение работы**

1. Выполнить разложение исходного ряда при помощи Фурье спектра.
2. Выявить до пяти наиболее значимых периода в спектре исходного ряда. По таблице и рисунку определить периоды, соответствующие «пикам» спектра.
3. Для каждого из выделенных периодов отдельно рассчитать характеристики гармоники:
  - коэффициенты Фурье;
  - амплитуду;
  - фазу;
  - дисперсию гармоники;
  - вклад гармоники в общую дисперсию ряда;
  - сформулировать уравнение гармоники.
4. Для каждого момента времени рассчитать ряды для всех гармоник и найти их сумму.
5. Построить совмещённый график исходного ряда и суммы гармоник.
6. Выполнить прогноз на два года по полученной спектральной модели.
7. Провести анализ качества воспроизводства и прогноза рассматриваемого ряда при помощи спектральной модели.

## Составление отчёта

1. Описание методической части работы.
2. Таблица с исходными данными.
3. Результат расчёта периодограммы характеристик выделенных гармоник.
4. Совмещённый график исходного ряда и суммы гармоник.
5. Анализ характеристик рассматриваемого ряда и его прогноза.

## Примеры графического представления материалов в отчёт

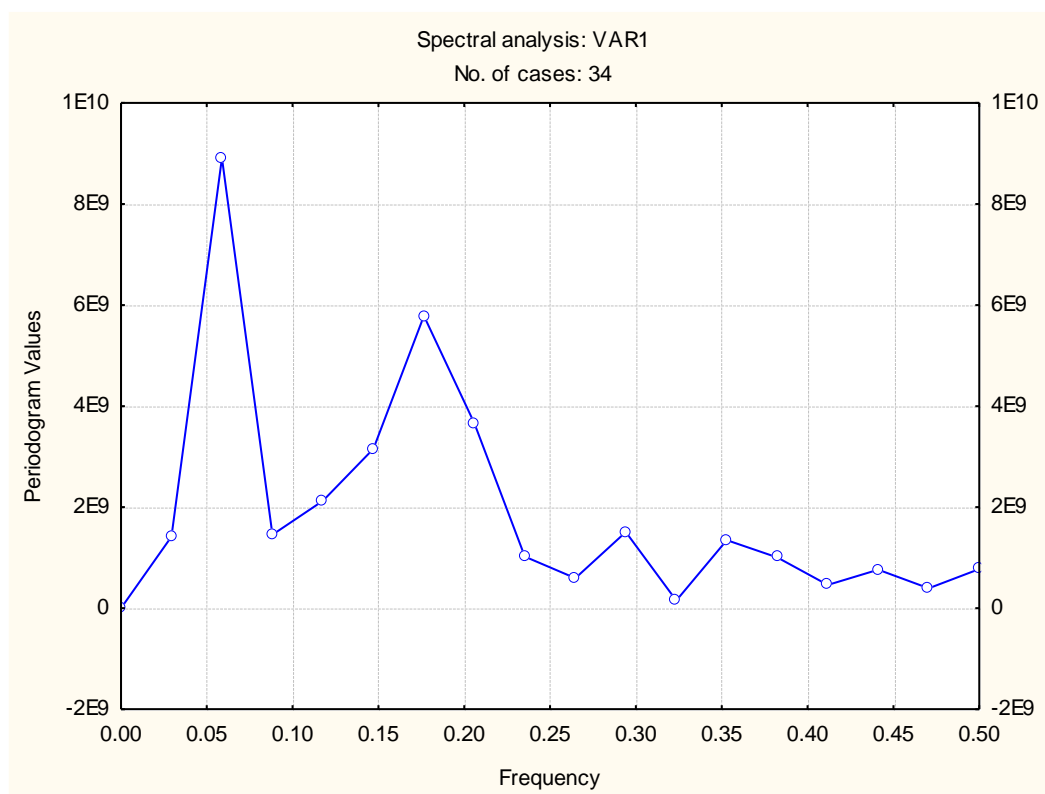


Рис. 5.1. Периодограмма исходного ряда

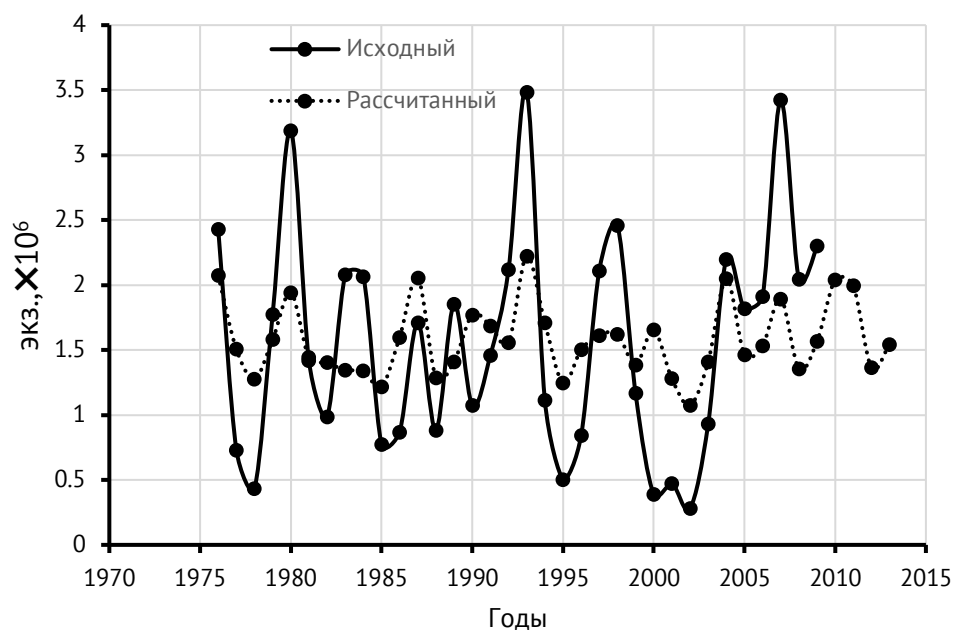


Рис. 5.2. Исходный ряд и его аппроксимация спектральной моделью с прогнозом

### Список литературы

- Гордеева С.М. Практикум по дисциплине статистические методы обработки гидрометеорологической информации / С.М. Гордеева. – СПб.: РГГМУ, 2010. – 74 с.
- Захаров Л.А. Введение в промысловую океанологию: учеб. пособие / Л. А. Захаров. - 2-е изд., испр. и доп. – Калининград: КГУ, 2001 – 94 с.
- Левасту Т. Промысловая океанография: пер.с англ. / Левасту Т.; авт. Хела И. –Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 295 с.

## **РАБОТА №6: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕРЕСТОВОГО ЗАПАСА СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

### **Общие сведения**

Для обнаружения причинно-следственной связи между случайными величинами или факторами в промысловой океанографии часто используют методы статистики. Причины этого следующие:

- Несмотря на то, что для большинства эксплуатируемых популяций и промысловых районов известны основные закономерности формирования биологической и промысловой продуктивности вод, особенности поведения и распределения промысловых скоплений, все ещё отсутствует количественное описание этих закономерностей.
- Применение современных методов статистического анализа подкреплено соответствующей технической базой. Вычислительные возможности персональных компьютеров и функционирующих на их основе баз данных существенно расширили границы статистического анализа информации на практике.

Из большого количества факторов, влияющих на распределение и поведение промысловых объектов, в настоящее время предпочтение отдаётся температуре воды. Помимо лёгкости и относительной доступности измерений температуры воды следует учитывать, что аномалии последней весьма устойчивы как во времени, так и в пространстве.

Уже давно установлено, что сроки нереста рыб в умеренных и высоких широтах весьма значительно колеблются. Так колебания сроков начала нереста азовской хамсы и салаки Вислинского залива составляют около 2 месяцев, путассу в Северо-восточной Атлантике - 1,5 месяца, тюльки Азовского моря - 2 месяца. Основной причиной

колебания сроков нерестовых подходов и нереста весенне-нерестующих рыб является температура воды в преднерестовый период. Разработаны методики прогноза нерестовых подходов многих промысловых объектов в зависимости от различных показателей температуры: температура воды и воздуха (среднемесячная), температура воды по разрезу (средняя по слоям), придонная температура воды и т.п.

Иногда при отсутствии данных по температуре воды либо при наличии связи атмосферных процессов с последующей термической ситуацией в качестве предикторов используют соответствующие индексы атмосферной циркуляции. Прогнозирование сроков нерестовых подходов и нереста должно основываться на достаточном числе лет наблюдений за нерестовыми подходами и нерестом (не менее 10-15 лет) и соответствующем количестве наблюдений за гидрометеорологическими показателями (атмосферная циркуляция, температура воды и воздуха). При прогнозе сроков начала нереста атлантическо-скандинавской сельди в качестве индекса атмосферной циркуляции используют число дней с глубокими циклонами (заблаговременность 2 месяца) или долготу положения исландского минимума (заблаговременность 5-6 месяцев). При прогнозе нерестовых подходов охотоморской сельди используют разность давления в двух пунктах Охотского моря в марте-апреле (заблаговременность до 2 месяцев).

Как видно из приведённых примеров, в прогнозах промысловой обстановки одним из широко применяемых методов является сочетание корреляционного и регрессионного анализов. Считается, что физические и биологические процессы протекают чаще всего асинхронно, когда изменение одного параметра отразится в другом

параметре через некоторое время, которое определяется запаздыванием.

Однако, когда рассчитывается коэффициент парной корреляции, оценивается связь параметров при их синхронном взаимодействии, и в большинстве случаев, когда между характеристиками существует асинхронное взаимодействие, коэффициент корреляции оказывается мал. В результате мы полностью теряем представление о связи двух характеристик. Чтобы разрешить эту проблему, т.е. определить наличие связи двух характеристик при асинхронном взаимодействии, и применяется взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).

**Взаимная корреляция** (кросскорреляция) – это корреляция двух статистических рядов друг с другом при разных сдвигах во времени.

Например, взяты два исходных ряда  $X$  и  $Y$ . Рассчитаем между парой этих рядов коэффициент корреляции  $R_0$ , который может быть рассчитан по формуле:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{N\sigma_x\sigma_y}, \quad (6.1)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – значения первой и второй переменных, соответственно;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения первой и второй переменных, соответственно;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – стандартные отклонения первой и второй переменных, соответственно;  $N$  – длина рядов первой и второй переменных.

Коэффициент корреляции  $R_0$  характеризует степень тесноты линейной зависимости. Линейная зависимость двух случайных величин заключается в том, что при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать (или убывать) по линейному закону.

В случае, когда при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать – это прямая зависимость, тогда  $R_0 > 0$ . Если

при возрастании одной величины другая имеет тенденцию убывать – это обратная зависимость, тогда  $R_0 < 0$ .

Если мы сдвинем ряд  $X$  относительно ряда  $Y$  на 1 число вперёд (ряд  $X_1$ ) и уравнием длины рядов  $Y$  и  $X_1$ , обрезав на 1 число ряд  $Y$  с начала, а ряд  $X_1$  – с конца. И снова рассчитаем коэффициент корреляции между этими рядами –  $R_1$ . И так можно сдвигать ряды далее, на каждом сдвиге уравнивая их длины и рассчитывая коэффициенты корреляции.

Так как взаимная корреляционная функция несимметрична, ряд  $X$  нужно сдвигать и в другую сторону (назад) на то же количество сдвигов (отрицательное направление сдвигов). Если все коэффициенты корреляции нанести на график зависимости  $R$  от  $\tau$  (сдвига) и соединить плавной кривой, получим **взаимокорреляционную функцию (ВКФ)**. Пример ВКФ представлен на рис. 6.1.

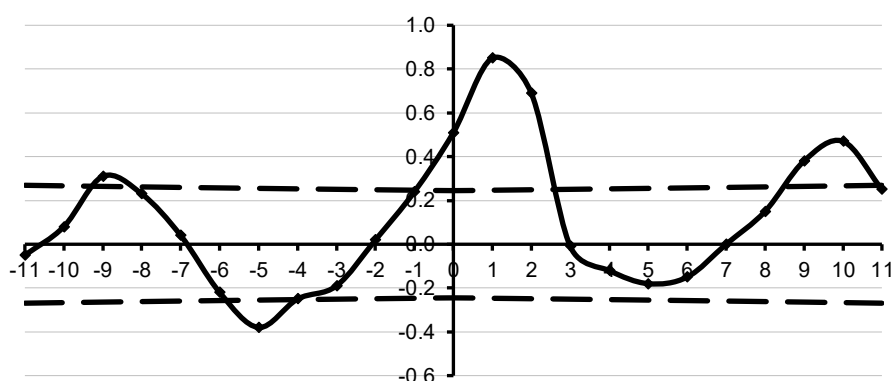


Рис. 6.1. Пример взаимокорреляционной функции

С другой стороны, коэффициент взаимной корреляции  $R(\tau)$  на каждом сдвиге можно рассчитать по формуле:

$$r(\mp\tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y (N-1-|\tau|)} \cdot \sum_{i=1}^{N-|\tau|} [(x_i - \bar{x})(y_{i\mp\tau} - \bar{y})], \quad (6.2)$$

где  $N$  – длина ряда или его реализации,  $\tau$  – сдвиг, который меняется от  $-\tau_{min}$  до  $\tau_{max}$ ,  $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum \Delta Y^2}{N}}$ ,  $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum \Delta X^2}{N}}$  – стандартные отклонения зависимой ( $Y$ ) и независимой ( $X$ ) переменной, соответственно.

Максимальное количество сдвигов  $\tau_{max}$  (длина ВКФ) зависит от длины ряда  $N$ . Если ряд короткий ( $N \sim 30$ ), то  $\tau_{max} = 1/3 N$ . Если ряд длинный ( $N \sim 1000$ ), то  $\tau_{max} = 1/10 N$ . То есть, чем длиннее ряд, тем меньшую долю составляет количество сдвигов.

Если на ВКФ присутствуют один или несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, *отличных от нуля* – значит эти две характеристики связаны *асинхронно*.

Если на ВКФ присутствует *один* значимый коэффициент корреляции на сдвиге  $\tau = 0$  – эти две характеристики связаны *синхронно*.

Если на ВКФ нет значимых коэффициентов корреляции – эти две характеристики вообще линейно не связаны.

Если асинхронные связи обнаружены, определяется *направление запаздывания* – какая характеристика изменяется раньше, а какая позже. Этому соответствуют разные направления сдвигов ВКФ (положительное или отрицательное). Например, при способе расчёта на рис. 6.1 положительному направлению сдвигов ВКФ соответствует более раннее наступление характеристики  $X$ , а затем, через какой-то сдвиг – наступление характеристики  $Y$  (т.е.  $Y = f(X)$ ). Тогда отрицательному направлению сдвигов ВКФ соответствует, наоборот,  $X = f(Y)$ .

Если в ВКФ отмечаются *значимые* коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, следовательно, *можно сделать прогноз*. Тогда



**заблаговременность прогноза** определяется как сдвиг, при котором коэффициент корреляции значим.

Если таких коэффициентов несколько, то существует возможность делать прогноз *с разной заблаговременностью*. Чем больше заблаговременность, тем интереснее прогноз.

С другой стороны, качество прогноза будет зависеть от величины коэффициента корреляции – чем больше  $R$ , тем лучше прогноз. Как правило, два требования к прогнозу (лучшее качество и большая заблаговременность) противоречат друг другу. В этих случаях предпочтение отдаётся качеству.

С другой стороны, имеет значение, в какой области сдвигов (положительной или отрицательной) находятся эти значимые коэффициенты корреляции. Иногда прогноз не имеет смысла из физических соображений.

Основанный на ВКФ прогноз любой заблаговременности выполняется на основе модели парной линейной регрессии.

Уравнение прогностической модели формулируется в общем виде:

$$Y_{i+k} = a_1 * X_i + a_0, \quad (6.3)$$

где  $k$  – заблаговременность прогноза.

Для нахождения коэффициентов и параметров регрессии берутся два ряда:  $Y$  и  $X_k$ , т.е. два исходных ряда, сдвинутые друг относительно друга на  $k$ -чисел, и обрезанные, соответственно, один с начала, другой – с конца. Тогда ряд  $Y$  (обрезанный с начала) будет *зависимой переменной*, а ряд  $X_k$  (обрезанный с конца) – *независимой переменной*.

Далее определяются коэффициенты, все параметры регрессии и оценивается её качество.

В общем виде уравнение линейной регрессии может быть записано как:

$$Y = aX + b \quad (6.4)$$

Тогда  $Y$  – называется *зависимой переменной*,  $X$  – *независимой переменной*,  $a$  – *коэффициент регрессии*,  $b$  – *свободный член*.

Коэффициент регрессии  $a$  представляет собой тангенс угла наклона линии регрессии к оси абсцисс и определяется по формуле:

$$a = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad (6.5)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции переменных, входящих в регрессию;  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  – стандартные отклонения зависимой и независимой переменной, соответственно.

Свободный член  $b$  представляет собой расстояние от начала координат до пересечения оси ординат уравнением регрессии и рассчитывается:

$$b = \bar{y} - a\bar{x}, \quad (6.6)$$

где  $a$  – коэффициент регрессии;  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  – средние значения зависимой и независимой переменных соответственно.

Качество модели линейной регрессии определяется по параметрам (характеристикам) модели линейной регрессии, перечисленным ниже.

### 1. Коэффициенты регрессии и оценки их значимости.

Оценка значимости коэффициентов регрессии производится на основе проверки гипотезы:

$$H_0: a = 0; b = 0;$$

$$H_1: a \neq 0; b \neq 0;$$

для проверки рассчитывается критерий Стьюдента:

$$t_a^* = \frac{a}{\sigma_a}; t_b^* = \frac{b}{\sigma_b},$$

$$\text{где } \sigma_a = \frac{\sigma_x(1-R^2)}{(\sqrt{N-1})}, \sigma_b = \frac{\sigma_y(1-R^2)}{(\sqrt{N-1})},$$

где  $\sigma_a$  и  $\sigma_b$  – стандартные случайные погрешности расчёта коэффициентов  $a$  и  $b$ ,  $R$  – коэффициент корреляции переменных,

входящих в регрессию,  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  – стандартные отклонения зависимой и независимой переменной, соответственно,  $N$  – длина ряда.

Критическое значение  $t_{кр}(\alpha, \nu)$  определяется из таблицы критических значений  $t$ -критерия Стьюдента, по уровню значимости  $\alpha$  (принимается равным 5%) и числу степеней свободы  $\nu = N - 1$ , где  $N$  – длина ряда.

Сравниваем  $t^*$  с  $t_{кр}$  (по модулю).

Если  $|t^*| > t_{кр}$  нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим. Если  $|t^*| < t_{кр}$  нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии незначим.

## 2. Коэффициент детерминации $R^2$ .

Он показывает долю дисперсии исходного ряда, которая описывается моделью регрессии и рассчитывается как квадрат коэффициента корреляции.

## 3. Адекватность регрессионной модели генеральным данным.

Для оценки адекватности необходимо:

- Для каждого момента времени вычислить по уравнению регрессии *модельные значения* прогнозируемого ряда ( $\hat{y}$ );
- Рассчитать *дисперсию модели*  $\hat{y}$ , характеризующую изменчивость линии регрессии относительно среднего значения  $\bar{y}$ :

$$D_{\hat{y}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.7)$$

- Для каждого момента времени рассчитать *остатки регрессии*:

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$$

- Рассчитать *дисперсию остатков*  $\varepsilon$ , характеризующую отклонение уравнения регрессии от исходных данных  $y$

$$D_{\varepsilon} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (6.8)$$

- Оценить *адекватность* регрессионной модели.

Для этого выдвигаем нулевую гипотезу о равенстве дисперсий

$$H_0: D_{\hat{y}} = D_{\varepsilon}. \text{ И альтернативную: } D_{\hat{y}} \neq D_{\varepsilon}.$$

Для проверки используется критерий Фишера  $F^* = \frac{D_{\hat{y}}}{D_{\varepsilon}} \cdot N$ ,

который сравнивается с  $F_{кр}$  (выбирается из таблицы значений критерия Фишера) при заданном уровне значимости  $\alpha$  ( $\alpha=0.05$ ) и степенях свободы  $\nu_1 = 1$ ,  $\nu_2 = N - 2$ . Если  $F^* > F_{кр}$ , то нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, что означает в рассматриваемом случае адекватность регрессионной модели.

#### 4. Стандартная ошибка модели $\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{D_{\varepsilon}}$ .

Модель регрессии считается качественной, если выполняются следующие условия:

- Все коэффициенты регрессии значимы;
- Коэффициент детерминации больше 0,70. Это свидетельствует о том, что независимых переменных достаточно для описания дисперсии исходного ряда;
- Модель должна быть адекватна генеральным данным;
- Стандартная ошибка модели должна быть меньше 0,67 от стандартного отклонения ряда зависимой переменной  $y$ .

После нахождения коэффициентов регрессии и проверки качества формулируется окончательно прогностическое уравнение, связывающее абиотические факторы среды и объёмы нерестового запаса промысловых рыб.

### Цель работы

Дать описание промыслового объекта и разработать статистический прогноз его нерестового запаса на основе методов взаимнокорреляционного и регрессионного анализов.

### **Исходные данные**

- вид промыслового объекта (рыбы);
- рассматриваемый регион.

Перечень данных из электронного реанализа:

- среднемесячные значения индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции (NAO, SCAND, EA, EA/WR);
- температура воздуха над морем, [°C];
- температура поверхности океана, [°C];
- поверхностная солёность океана, [‰];
- скорость ветра за определённый период, [м сек<sup>-1</sup>].

### **Выполнение работы**

1. Согласно заданному варианту описать особенности объекта промысла и влияния на него абиотических факторов среды.
2. Произвести поиск и выборку рядов нерестового запаса и гидрометеорологических параметров, оказывающих влияние на выбранный промысловый объект по литературным данным.
3. Рассчитать набор ВКФ для рядов нерестового запаса и выбранных гидрометеорологических параметров.
4. На основе значений ВКФ выбрать ряд предиктор для составления модели.
5. Определить оптимальную заблаговременность прогноза.
6. Сформулировать уравнение регрессии (модели) с оптимальной заблаговременностью.

7. Рассчитать все характеристики модели.
8. Оценить качество модели (прогноза).
9. Сформулировать уравнение прогностической модели на основе полученных коэффициентов.
10. Построить совмещённый график фактических и рассчитанных по модели значений характеристики. Проанализировать его.

### **Составление отчёта**

1. Описание методической части работы.
2. Таблица с исходными данными.
3. Описание промышленного объекта с акцентом на особенности восприятия им абиотических факторов среды со ссылками на литературные источники.
4. Матрица коэффициентов корреляции для всех рядов на всех рассмотренных сдвигах по времени.
5. График ВКФ для выбранных рядов.
6. Прогностическое уравнение и результаты проверки качества модели.
7. Совмещённый график исходного ряда и суммы гармоник.
8. Анализ результатов прогнозирования.

### **Примеры графического представления материалов**

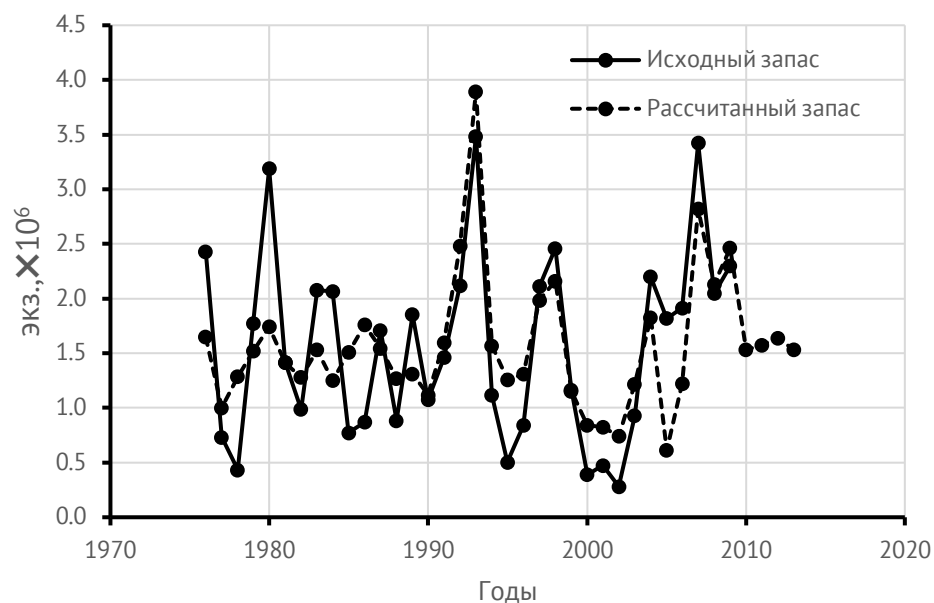


Рис. 6.2. Совместный график исходного и рассчитанного рядов нерестового запаса кижуча

### Список литературы

- Анализ использования сырьевой базы рыболовным флотом России в 2010 г. – М.: Изд-во ВНИРО, 2011. – 98 с.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с
- Гордеева С.М. Практикум по дисциплине статистические методы обработки гидрометеорологической информации / С.М. Гордеева. – СПб: РГГМУ, 2010. – 74 с.
- Захаров Л.А. Введение в промышленную океанологию: учеб. пособие / Захаров Л.А. - 2-е изд., испр. и доп. – Калининград: КГУ, 2001. – 94 с.
- Саускан В.И. Экология и биологическая продуктивность океана: Учебное пособие /Калинингр. ун-т. - Калининград, 1996. – 72 с.