

*Д.К. Нгуен, В.Н. Малинин, С.М. Гордеева*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ И ПРОМЫСЛОВОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ**

*D.K. Nguyen, V.N. Malinin, S.M. Gordeeva*

## **THE EFFECT OF WATER TEMPERATURE ON THE FORMATION OF BIOLOGICAL AND FISHERY PRODUCTIVITY OF THE SOUTH CHINA SEA**

*Влияние температуры воды на биологическую продуктивность Южно-Китайского моря. Показано, что глубина изотермы 24 °С определяет практически все характеристики биологической продуктивности вод моря. На основе факторного анализа выполнено районирование акватории моря по характеру межгодовых колебаний изотермы 24 °С. Построена статистическая модель суммарного годового вылова тунца в зависимости от температуры поверхности моря.*

*Ключевые слова: Южно-Китайское море, биопродуктивность, температура поверхности моря, изотерма 24 °С, факторный анализ, статистическая модель вылова тунца.*

*This paper provides some information about the effect of water temperature on the biological productivity of the South China Sea. It is shown that the depth of 24 °C isotherm defines almost all the characteristics of the biological productivity of the sea water. Regionalization of the sea area based on the factor analysis is performed by the character of interannual fluctuations of 24 °C isotherm. Constructed is a statistical model of the total annual tuna catch depending on the temperature of the sea surface.*

*Key words: South China Sea, biological productivity, sea surface temperature, 24 °C isotherm, factor analysis, statistical model of tuna catch.*

### ***Введение***

Южно-Китайское море (ЮКМ) расположено в западной части Тихого океана, между побережьем материковой Азии и островами Тайвань, Лусон, Палаван и Калимантан. Общая площадь акватории ЮКМ составляет 3 537 тыс. км<sup>2</sup>, максимальная глубина 5 560 м, средняя глубина 1 024 м, объём вод 3 623 тыс. км<sup>3</sup> [1]. Для ЮКМ характерна исключительно высокая биологическая продуктивность его вод, что способствует формированию здесь больших промысловых запасов пелагических рыб: тунцы, южная сельдь, сардины, скумбрия, горбыли, морской угорь и др. Но особое значение имеет

промысел тунца, который занимает 1-е место в структуре экспорта рыбопродуктов из Вьетнама в более чем 60 стран мира [2]. Поэтому выявление закономерностей формирования и пространственно-временной изменчивости характеристик биологической продуктивности вод ЮКМ, а также их долгосрочный прогноз представляет очень важную задачу, с практической точки зрения. Основные зоны вылова тунца вьетнамским флотом приведены на рис. 1. Нетрудно видеть, что он находится в пределах района, ограниченного 7–17° с.ш. и 107–115° в.д.

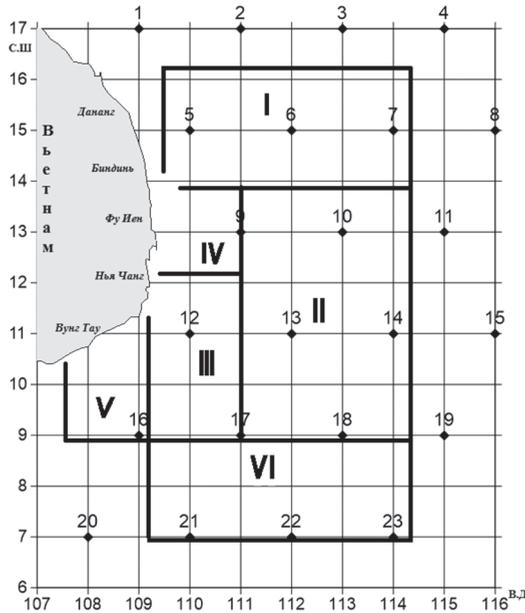


Рис. 1. Районы промысла:

*I* — Хоангса (Парасельские острова); *II* — Чыонгса (Острова Спратли); *III* — Фукуй; *IV* — Фуиен; *V* — Вунгтау; *VI* — южная часть Южно-Китайского моря. Квадратиками обозначены узлы географической сетки, в которых выбирались данные по температуре воды

### ***Влияние температуры воды на биологическую продуктивность ЮКМ***

Как известно, из большого числа абиотических факторов наибольшее влияние на биологическую продуктивность имеет температура воды, воздействие которой на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно [3]. Температура воды может ускорять или замедлять рост численности отдельных видов и даже приводить к массовой гибели организмов. В связи с этим Научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства Вьетнама проделана огромная многолетняя работа по оценке влияния различных характеристик температуры воды на изменения параметров биопроductивности. Район исследования был ограничен следующей широтно-долготной зоной: 6–17° с.ш., 107–117° в.д. В данном районе выполнялись

наблюдения за глубоководной температурой воды в течение 1990–2009 гг. При этом значения температуры были разделены на 18 показателей, которые представлены в табл. 1. Очевидно, указанный набор показателей практически исчерпывающим образом характеризует термические условия деятельного слоя моря. Одновременно с этим выполнялись измерения биопараметров, что позволило оценить различные виды биомассы фито- и зоопланктона, а также некоторые характеристики первичной и вторичной продукции в слое фотосинтеза [4].

Таблица 1

**Характеристики температуры воды и биологической продуктивности моря**

№	Параметр	Размерность	Название компонентов
1	$T_0$	°C	Температура поверхности морской воды
2	$\Delta T_0$	°C	Аномалии температуры поверхности моря
3	$H_0$	м	Толщина верхнего однородного слоя
4	$T_1$	°C	Температура нижней границы слоя скачка
5	$H_1$	м	Глубина нижней границы слоя скачка
6	$H_1 - H_0$	м	Толщина слоя скачка
7	Grad $T_z$	°C/м	Средний градиент температуры в слое скачка
8	$H_{15}$	м	Глубина изотермы 15 °C
9	$H_{20}$	м	Глубина изотермы 20 °C
10	$H_{24}$	м	Глубина изотермы 24 °C
11	$H_{20-15}$	м	Толщина слоя между изотермами 15–20 °C
12	$H_{24-20}$	м	Толщина слоя между изотермами 20–24 °C
13	Grad $T_0$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры поверхностного слоя воды
14	Grad $T_{25}$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры в слое 0–25 м
15	Grad $T_{50}$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры в слое 0–50 м
16	Grad $T_{75}$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры в слое 0–75 м
17	Grad $T_{100}$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры в слое 0–100 м
18	Grad $T_{150}$	°C/10 км	Максимальный горизонтальный градиент температуры в слое 0–150 м
19	$TV$	мг/м <sup>3</sup>	Средняя биомасса фитопланктона в слое фотосинтеза
20	$DV$	мг/м <sup>3</sup>	Средняя биомасса зоопланктона в слое фотосинтеза
21	$ToTV$	г/м <sup>2</sup>	Суммарная биомасса фитопланктона в водной колонке 1 м <sup>2</sup> слоя фотосинтеза
22	$ToDV$	г/м <sup>2</sup>	Суммарная биомасса зоопланктона в водной колонке 1 м <sup>2</sup> слоя фотосинтеза
23	$NNSC$	мгС/м <sup>3</sup> /день	Средняя первичная продукция в слое фотосинтеза
24	$NSTC$	мгС/м <sup>3</sup> /день	Средняя вторичная продукция в слое фотосинтеза
25	$ToNSC$	гС/м <sup>2</sup> /день	Суммарная первичная продукция в водной колонке 1 м <sup>2</sup> слоя фотосинтеза
26	$ToNTC$	гС/м <sup>2</sup> /день	Суммарная вторичная продукция в водной колонке 1 м <sup>2</sup> слоя фотосинтеза

Полученные оценки показателей термических условий и характеристик биологической продуктивности вод моря позволили рассчитать между ними коэффициенты корреляции за период 1990–2009 гг., оценки которых приводятся в табл. 2.

Предварительно отметим, что все характеристики биопродуктивности тесно связаны друг с другом, корреляция между ними не опускается ниже  $r = 0,85$ . Как видно из табл. 2, максимальная корреляция всех параметров биопродуктивности отмечается для глубины изотермы 24 °С ( $r = 0,70-0,94$ ). Второй по значимости является глубина изотермы 20 °С. Значимая на уровне  $\alpha = 0,05$  корреляция ( $r_{кр} = 0,42$ ) отмечается также с толщиной верхнего однородного слоя воды и температурой поверхности моря. Со всеми указанными параметрами корреляция оказывается отрицательной. Это означает, что с углублением изотерм 20 и 24 °С, увеличением толщины квазиоднородного слоя и ростом температуры поверхности моря все характеристики биопродуктивности должны уменьшаться. В то же время, характеристики биопродуктивности слабо реагируют на изменчивость толщины слоя между изотермами 20 и 24 °С ( $r = 0,20-0,52$ ). Отметим также, что температурный диапазон 20–24 °С является оптимальным в распределении тунца [5].

Таблица 2

**Распределение выборочных коэффициентов корреляции между показателями термических условий и характеристиками биопродуктивности вод моря. Критическое значение коэффициента корреляции при  $\alpha = 0,05$   $r_{кр} = 0,42$**

Параметр	$TV$	$DV$	$NSSC$	$NSTC$	$ToTV$	$ToDV$	$ToNSC$	$ToNTC$
$T_0$	-0,42	-0,42	-0,52	-0,53	-0,47	-0,59	-0,6	-0,63
$\Delta T_0$	-0,2	-0,24	-0,3	-0,31	-0,21	-0,31	-0,32	-0,35
$H_0$	-0,51	-0,46	-0,56	-0,55	-0,55	-0,61	-0,62	-0,63
$T_1$	0,05	0,09	0,12	0,12	0,04	0,1	0,12	0,13
$H_1$	-0,23	-0,2	-0,23	-0,21	-0,23	-0,23	-0,24	-0,23
$H_1 - H_0$	-0,11	-0,09	-0,1	-0,08	-0,1	-0,08	-0,1	-0,08
Grad $T_z$	-0,06	-0,14	-0,16	-0,2	-0,06	-0,19	-0,17	-0,22
$H_{15}$	-0,37	-0,19	-0,16	-0,13	-0,38	-0,2	-0,16	-0,12
$H_{20}$	-0,73	-0,48	-0,56	-0,5	-0,8	-0,65	-0,63	-0,57
$H_{24}$	-0,80	-0,70	-0,87	-0,83	-0,84	-0,89	-0,94	-0,94
$H_{20-15}$	0,15	0,17	0,26	0,25	0,19	0,28	0,31	0,31
$H_{24-20}$	0,21	0,33	0,45	0,48	0,20	0,39	0,48	0,52
Grad $T_0$	0,18	0,16	0,21	0,2	0,16	0,16	0,21	0,2
Grad $T_{25}$	0,41	0,38	0,43	0,42	0,34	0,34	0,4	0,39
Grad $T_{50}$	0,09	0,08	0,04	0,03	0,02	-0,02	-0,01	-0,03
Grad $T_{75}$	-0,23	-0,24	-0,28	-0,29	-0,21	-0,25	-0,28	-0,29
Grad $T_{100}$	-0,24	-0,26	-0,27	-0,27	-0,18	-0,21	-0,23	-0,24
Grad $T_{150}$	0,04	-0,03	0,07	0,05	0,19	0,19	0,18	0,17

**Пространственно-временная изменчивость глубины изотермы 24 °С**

Учитывая исключительно большое значение глубины изотермы 24 °С в формировании биопродуктивности ЮКМ, рассмотрим ее пространственно-временные

особенности. Для оценки этой характеристики был использован архив CARTON-GIESE SODA (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.CARTON-GIESE/.SODA/.v2p0r2-4>), который содержит данные о среднемесячных значениях температуры воды до глубины 5 474 м [6]. В рассматриваемом районе были выбраны значения температуры воды в узлах двухградусной сетки от поверхности (5 м) до дна за период 1980–2008 гг. Всего таких узлов было 23 (рис. 1). Глубина залегания изотермы 24 °С определялась линейной интерполяцией между соответствующими горизонтами.

На рис. 2 дается пространственное среднегодовое (1980–2008 гг.) распределение глубины изотермы 24 °С. Нетрудно видеть, что  $H_{24}$  плавно возрастает от 51 м на крайнем северо-западе района до 76–78 м в его южной части на широте 9° с.ш. Далее на юг  $H_{24}$  начинает уменьшаться.

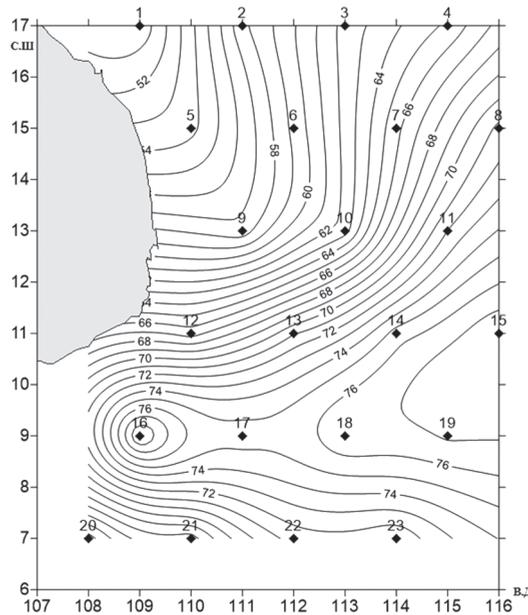


Рис. 2. Пространственное распределение среднегодовой глубины изотермы 24 °С за многолетний (1980–2008 гг.) период времени в метрах

Значительно более сложный характер свойствен сезонным изменениям среднегодовых месячных значений  $H_{24}$ . Так, для большинства точек практически отсутствует годовой ход  $H_{24}$ . Он присутствует лишь в трех точках (1, 2 и 12), в которых максимум  $H_{24}$  наблюдается в декабре, а минимум — в июне. При этом максимальная внутригодовая амплитуда изменений  $H_{24}$  отмечается в точке 1 ( $R_{\max} - R_{\min} = 82,7 - 33,2 = 49,5$  м). Случайный характер колебаний  $H_{24}$  обусловлен тем, что максимальные и минимальные значения  $H_{24}$  могут встречаться в любой сезон года. Абсолютный максимум  $H_{24}$  отмечается в январе в точке 17 (101,4 м), а абсолютный минимум — в июне в точке 1 (33,2 м).

Учитывая сравнительно небольшую длину временных рядов  $H_{24}$  ( $n = 29$ ), расчет циклических колебаний нецелесообразен, поэтому мы ограничились оценкой только линейных трендов для всех точек выбранной акватории. Пространственное распределение угловых коэффициентов тренда ( $Tr$ ) представлено на рис. 3. Как видно из рис. 3, все тренды являются положительными, то есть отмечается тенденция к углублению изотермы  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В южной части района они отсутствуют. Максимальные значения  $Tr$  приурочены к мелководной северо-западной части района. При этом значимые тренды, то есть отклоняющиеся от нуля неслучайным образом, свойственны величине  $Tr \geq 0,35$ . Итак, можно сделать вывод, что в северной части района в рассматриваемый период времени отмечалась тенденция к уменьшению биопродуктивности вод моря.

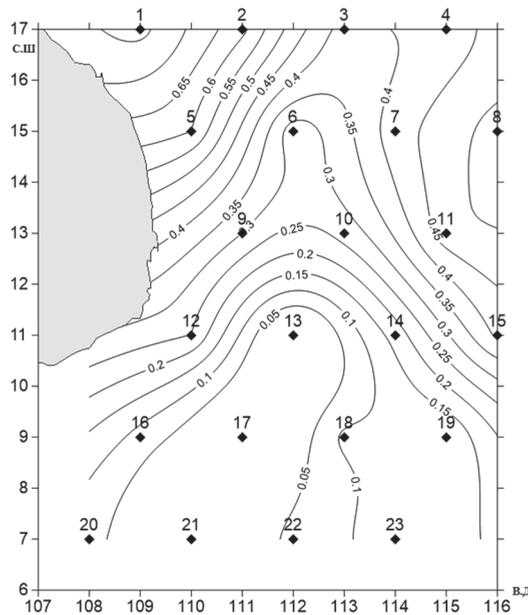


Рис. 3. Пространственное распределение угловых коэффициентов линейного тренда глубины залегания изотермы  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , м/год

С целью более детального изучения пространственно-временной структуры матрица средних годовых значений  $H_{24}$  размером  $23 \times 29$  была подвергнута классическому факторному анализу. Анализ собственных чисел показал, что можно ограничиться первыми пятью факторами, которые описывают 79 % дисперсии исходного поля. В табл. 3 дается вклад отдельных собственных чисел (факторов) в дисперсию поля  $H_{24}$  после второго ортогонального вращения методом варимакс Кайзера, которое частично перераспределило дисперсию между факторами. В результате четвертый фактор стал вторым, а третий — пятым. Именно поэтому между факторами не очень существенные различия.

Оценка вкладов первых пяти факторов в дисперсию поля глубины изотермы 24 °С

Номер	Собственное число	Вклад собственного числа в дисперсию поля $H_{24}$ , %	Суммарный вклад собственных чисел в дисперсию поля $H_{24}$ , %
1	4,20	18,3	18,3
2	3,84	16,7	35,0
3	3,63	15,8	50,8
4	3,53	15,3	66,1
5	3,03	13,2	79,3

Результаты факторного анализа позволяют выполнить районирование рассматриваемого региона ЮКМ в пространстве факторных нагрузок. Для этого в матрице  $5 \times 23$  ( $k \times m$ ) последовательно выбиралась каждая строка, состоящая из 5 чисел, и на ней фиксировалась максимальная факторная нагрузка (ФН). Так как число строк соответствует числу выделенных узлов на акватории, то получаем набор из  $m$  максимальных ФН. Отметим, что эти нагрузки превышали величину 0,60, обычно принимаемую в качестве порогового значения ФН. Если теперь нанести полученные результаты на карту, то получаем разбиение заданной акватории на  $k$  классов. При условии территориальной связности точек число выделенных классов должно соответствовать числу квазиоднородных районов.

Результаты районирования рассматриваемой акватории ЮКМ представлены на рис. 4. Номер района соответствует номеру фактора (собственного числа). Как и следовало ожидать, наибольшую площадь занимает первый район, для которого характерна наиболее высокая межгодовая изменчивость значений  $H_{24}$ . Самый маленький третий район служит буферной зоной между первым и вторым районами.

#### *Статистическая модель вылова тунца по данным температуры на поверхности моря*

Хотя глубина изотермы  $H_{24}$  наилучшим образом характеризует биопродуктивность вод моря, однако ее доступность и особенно оперативность получения создают затруднения в мониторинге и предсказании биопродуктивности. С этой точки зрения, наибольшего внимания заслуживает температура поверхности моря, которая определяется с высокой точностью, доступна почти в режиме он-лайн и имеет значимую корреляцию как с характеристиками биопродуктивности, так и с  $H_{24}$ . В связи с этим рассмотрим возможность построения статистической модели вылова тунца по данным о поверхностной температуре воды.

Температура поверхности моря бралась из архива NOAA NCDC ERSSTv4 (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version4/.SST>), в котором синтезируются данные о температуре поверхности моря (ТПМ) со всех надводных систем наблюдения, кроме спутниковых измерений. Шаг сетки этого архива составляет 2 градуса по широте и долготе, а продолжительность наблюдений — с 1854 г. по настоящее время.

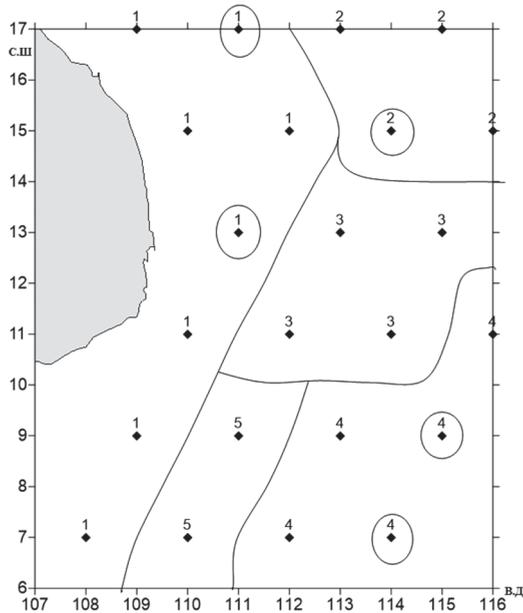


Рис. 4. Районирование центральной части акватории Южно-Китайского моря методом факторного анализа. Кругами обозначены реперные точки, в которых временные ряды по температуре поверхности моря сформировали оптимальную модель МЛР по вылову тунца

В результате были сформированы временные ряды среднегодовых значений  $T_0$  в 23 точках акватории ЮКМ за период 2000–2014 гг., соответствующий данным суммарного годового вылова тунцов вьетнамскими траулерами [7]. Итак, исходная модель имела вид  $V = f(T_{0j})$ , где  $j = 1 \dots m$ . Неизвестные коэффициенты определялись методом включения переменных в пошаговой процедуре модели множественной линейной регрессии (МЛР). Уже первая переменная в модели (16,5° с.ш., 108,5° в.д.) имеет коэффициент детерминации  $R^2 = 0,58$  и стандартную ошибку 12501 т (табл. 4). Оптимальной принята модель с пятью переменными, распределение которых дано на рис. 4. Нетрудно видеть, что они равномерно размещаются по акватории моря. Оптимальная модель вылова тунца (табл. 4) имеет высокий коэффициент детерминации ( $R^2 = 0,86$ ), малую среднеквадратическую ошибку (6743 т, или 13%), значимые критерии Фишера и Стьюдента (p-level).

Таблица 4

Статистические параметры модели множественной линейной регрессии суммарного годового вылова тунца от температуры поверхности моря

Шаг модели	Коэффициент детерминации	Среднеквадратическая ошибка вылова тунца	Критерий Фишера	Максимальный p-level
1	0,58	12501	17,7	0,000
3	0,77	7971	12,0	0,002
5	0,86	6743	11,3	0,040

Сопоставление фактических и вычисленных по модели МЛР значений годового вылова тунца приводится на рис. 5. Нетрудно видеть очень хорошее соответствие фактических и вычисленных значений вылова рыбы. Максимальная ошибка отмечается в 2000 г., когда она заметно превышает среднеквадратическое отклонение вылова тунца. В остальные годы расхождения невелики. Хотя данная модель является диагностической, однако, учитывая длительный процесс обработки данных по вылову рыбы, она может использоваться для предварительного прогноза вылова тунца.

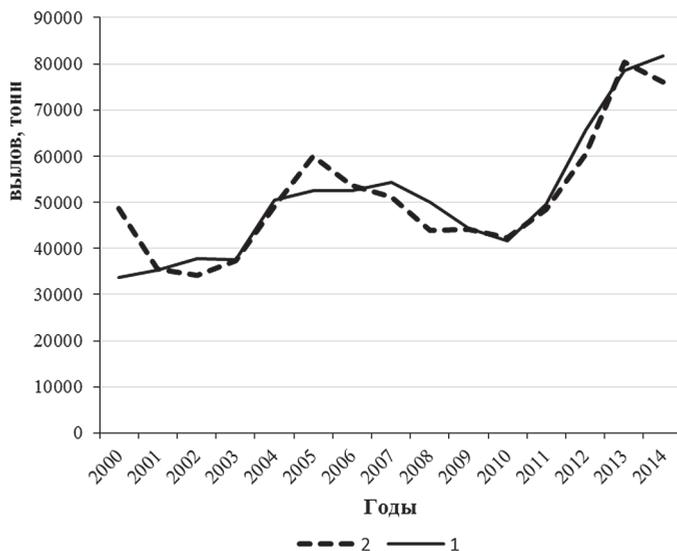


Рис. 5. Сопоставление фактических (1) и вычисленных (2) по модели МЛР с пятью переменными годовых значений вылова тунца

### **Выводы**

В данной работе рассматривались оценки влияния 18 различных показателей температуры воды на комплекс из 6 параметров биопродуктивности вод Южно-Китайского моря. Показано, что максимальная корреляция всех параметров биопродуктивности отмечается для глубины изотермы 24 °С ( $r = 0,70-0,94$ ). С ее углублением все характеристики биопродуктивности уменьшаются. Для северной части рассматриваемой акватории моря отмечаются значимые положительные тренды в межгодовых колебаниях изотермы 24 °С. Выполнен факторный анализ годовых значений изотермы 24 °С для района, ограниченного 7–17° с.ш. и 107–115° в.д. за период 1980–2008 гг. В пространстве факторных нагрузок выделено 4 квазиоднородных района. Построена статистическая модель суммарного годового вылова тунца в зависимости от температуры поверхности моря, которая содержит 5 переменных, описывает 86 % дисперсии исходного временного ряда вылова тунца и является значимой по критериям Фишера и Стьюдента.

**Литература**

1. Атлас океанов. Термины, понятия, справочные таблицы. — М., 1980. — 156 с.
2. *Нгуен Д.К., Бухарицин П.И.* Исследование влияния некоторых экологических факторов на распределение пелагических рыб в Южно-Китайском море (на примере тунца) // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбн. хоз-во, 2014, № 2, с. 13–20.
3. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. — СПб.: РГГМУ, 2009. — 278 с.
4. *Доан Во и др.* Применение и оптимизация технологического процесса прогноза пелагического промысла. Общ. доклад пр. КС.09.14/06-10, 2010, с. 76–80.
5. *Нгуен Д.К., Бухарицин П.И.* Биологические особенности условия обитания некоторых видов тунца // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбн. хоз-во, 2015, № 1, с. 134–140.
6. Электронный ресурс: [<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.CARTON-GIESE/.SODA/.v2p0p2-4>].
7. DECAFIREV. Report of the first Vietnam tuna fishery annual catch estimates workshop (vtfac-1). 2012. (Агентство по рыболовству — Министерство сельского хозяйства и развития районов).