

Климатические колебания как главный фактор
изменчивости условий среды обитания про-
мысловых биоресурсов и функционирования
морских экосистем

УДК 551.46 (268.45)

Изменчивость термических фронтальных зон Баренцева моря за период 1960–2018 гг.

В.А. Ившин, А.Г. Трофимов, О.В. Титов

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), г. Мурманск

E-mail: trofimov@pinro.ru

Работа посвящена изучению межгодовой изменчивости термических фронтальных зон Баренцева моря. Для района 73–78° с. ш. и 15–43° в. д., где наиболее ярко выражены фронтальные зоны, с 1960 г. по 2018 г. рассчитаны индексы протяжённости термических фронтальных зон (количество узлов расчётной сетки со значимым градиентом температуры) и средние значения горизонтальных градиентов температуры в них на горизонте 50 м в августе-сентябре. Термическая фронтальная зона выделялась на участках, где градиент температуры превышал 0,04 °C/км. С начала текущего столетия отмечается уменьшение протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря и ослабление градиентов температуры в них. В 2010 г. индекс протяжённости фронтальных зон и средний градиент температуры достигли своих абсолютных минимумов за весь расчётный период с 1960 г. Для оценки межгодовой изменчивости положения термических фронтальных зон рассчитаны их географические центроиды, взвешенные центры масс для узлов расчётной сетки со значимым градиентом температуры, с использованием величин горизонтальных градиентов температуры воды в качестве весовых коэффициентов. От 1960-х к 2010-м годам произошло смещение среднедекадных центроидов фронтальных зон на 150 км в северо-восточном направлении.

Ключевые слова: Баренцево море, Полярный фронт, термическая фронтальная зона, индекс протяжённости, градиент температуры, межгодовая изменчивость, центроиды.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-180-60-71

ВВЕДЕНИЕ

Океанографический режим Баренцева моря в большой степени обуславливается взаимодействием вод атлантического и арктического происхождения, которое обеспечивает наличие протяжённых фронтальных зон [Агеноров, 1946; Ижевский, 1958; Johannessen, Foster, 1978; Ожигин, 1989; Loeng, 1991; Ожигин и др., 2016]. Наиболее ярко выраженной из них является Полярная

фронтальная зона, отделяющая тёплые и солёные воды атлантического происхождения от холодных и распреснённых арктических вод. Положение фронтальных зон в Баренцевом море тесно связано с особенностями донной топографии [Ожигин, 1989; Loeng, 1991; Parsons et al., 1996; Lien, 2010]. В районах Шпицбергенской банки и возвышенности Персея положение термического фронта хорошо согласуется с 250-метровой изоба-

той [Harris, 1996; Harris et al., 1998; Morozov et al. 2017]. Ширина участков с наиболее обострёнными градиентами температуры составляет около 3 км [Morozov et al. 2017], а общая протяжённость Полярного фронта в Баренцевом море — около 1500 км [Vage, 2010]. Поскольку фронтальные зоны образуются в районах контакта вод, имеющих разное происхождение и существенно различающихся по своим характеристикам, наиболее яркой особенностью, выделяющей фронтальные зоны среди прочих явлений в океане, является резкий перепад (горизонтальный градиент) одного или нескольких гидрофизических параметров на конкретном участке моря или океана [Фёдоров, 1983; Грузинов, 1986; Ожигин и др., 2016].

Повышенная биологическая продуктивность фронтальных зон обуславливается резко меняющимися характеристиками среды обитания гидробионтов [Olson et al., 1994; Russell et al., 1999; Doniol-Valcroze et al., 2007]. На этих участках отмечаются благоприятные условия для образования вихрей и активных вертикальных движений, которые способствуют подъёму питательных веществ в верхние слои, что является благоприятным фактором для развития фито- и зоопланктона, служащего кормовой базой для гидробионтов более высоких трофических уровней [Bakun, 2006; Kushnir et al., 2011]. Поэтому важность фронтальных зон в функционировании экосистемы Баренцева моря очевидна.

Несмотря на то, что изучению фронтальных зон Баренцева моря посвящено достаточно много работ, чёткого представления об их пространственной структуре и межгодовой изменчивости, к сожалению, нет. В данной работе предпринята попытка, используя накопленные за длительный период инструментальные наблюдения, проанализировать и количественно оценить пространственно-временную изменчивость термических фронтальных зон Баренцева моря за продолжительный ряд лет (1960–2018 гг.).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использовались материалы океанографических наблюдений из базы данных ПИНРО за август–сентябрь 1960–2018 гг. Эти

месяцы были выбраны, так как в этот сезон Баренцево море максимально свободно ото льда, а проводимая в эти сроки международная экосистемная съёмка достаточно полно покрывает акваторию моря сетью океанографических станций (с пространственным шагом около 30 миль). Для анализа изменчивости термических фронтальных зон Баренцева моря был выбран район, ограниченный координатами 73–78° с. ш. и 15–43° в. д., где они проявляются наиболее отчётливо [Ожигин, 1989; Ожигин и др., 2016].

Пространственная протяжённость термических фронтальных зон оценивалась с помощью индекса протяжённости, расчёт которого базировался на следующих действиях [Titov et al., 2007; Титов и др., 2007]. Для выбранного района моря строились поля температуры воды на стандартных горизонтах в узлах регулярной сетки с пространственными шагами 10' по широте и 30' по долготе. На основе полученных полей температуры в каждом узле рассчитывались её горизонтальные градиенты. Индекс протяжённости термических фронтальных зон определялся как количество узлов, градиент температуры в которых превышал значение 0,04 °C/км, используемое в качестве критерия для выделения термических фронтальных зон [Titov et al., 2007]. Также для этих узлов рассчитывалось среднее значение градиента температуры, характеризующее «обострённость» фронтальных зон.

Горизонтальный градиент температуры рассчитывался по формуле:

$$|Grad P| = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)^2}.$$

Выбор 5-точечной схемы расчета основывался на том, что пространственные шаги сетки по долготе и широте имели близкие значения (около 10 миль), поэтому расчёты можно было производить без учёта весовых коэффициентов расстояний. Для расчёта градиента в узле сетки i, j , сначала рассчитывались его зональная и меридиональная составляющие по формулам:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = (P_{i,j+1} - P_{i,j-1}) / 2S_1;$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = (P_{i+1,j} - P_{i-1,j}) / 2S_2,$$

где P — значения температуры в узлах регулярной сетки; i и j — индексы, указывающие на положение узла в регулярной сетке; S_1 — шаг сетки по параллели, км; S_2 — шаг сетки по меридиану, км. Шаги сетки рассчитывались как:

$$S_1 = 1,852 |\lambda_{j+1} - \lambda_j| \cos \varphi_i$$

и

$$S_2 = 1,852 |\varphi_{i+1} - \varphi_i|,$$

где φ и λ — широта и долгота. Модули разностей $|\lambda_{j+1} - \lambda_j|$ и $|\varphi_{i+1} - \varphi_i|$ вычислялись в минутах долготы и широты, соответственно.

Для оценки межгодовой изменчивости положения термических фронтальных зон рассчитывались их географические центры с учётом весовых коэффициентов (величин горизонтальных градиентов температуры воды). Расчёт центров проводился в среде ArcGis 10.2.2 for Desktop с использованием группы инструментов «Пространственная статистика — Измерение пространственного распределения — Усреднённый центр» («Spatial statistics — Measuring Geographic Distributions — Mean Center»), где в качестве весовой функции использовалась величина градиента температуры воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами расчётные значения горизонтального градиента температуры воды, несмотря на дискретность съёмки (расстояние между станциями составляло приблизительно 30 миль), позволяют получить достоверное представление о положении фронтальных зон и о степени их обострённости на отдельных участках.

По предложенной выше методике были рассчитаны горизонтальные градиенты температуры воды в узлах регулярной сетки и индексы протяжённости термических фронтальных зон в пределах рассматриваемой акватории Баренцева моря (73–78° с. ш. и 15–43° в. д.). Из таблицы 1 видно, что наибольшая область распространения термических высокоградиентных зон прослеживается на глубинах 30–50 м в августе–сентябре, что соответствует результатам исследований прошлых лет [Ожигин, 1989; Oziel et al. 2016]. На этих глубинах достаточно чётко просматривается сезонный ход с минимумом в феврале–апреле. Однако, при изучении сезонных изменений необходимо учитывать ледовые условия, которые в летние месяцы характеризуются полным освобождением акватории ото льда, в зимние — частичным. Как следствие, разными будут расчётные поля и характеристики фронтальных зон.

Дальнейший анализ изменчивости термических фронтальных зон выполнялся для глубины 50 м и для периода с августа по

Таблица 1. Среднемноголетние (1960–2010 гг.) значения индексов протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря на стандартных горизонтах

		Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Глубина, м	0	76	64	62	63	87	96	109	113	160	144	128	83
	10	69	61	60	59	81	87	106	116	137	126	119	77
	20	77	55	52	55	78	85	113	191	175	124	115	73
	30	75	54	52	55	77	84	113	242	232	129	112	71
	50	65	56	57	56	80	80	110	216	288	162	121	71
	75	57	55	48	52	65	70	86	165	193	134	92	61
	100	50	47	48	49	62	67	78	137	184	126	92	54
	150	37	35	36	39	47	50	54	84	100	86	72	43
	200	30	25	29	30	40	39	40	66	70	64	71	39

сентябрь. В этот период наблюдается максимальное развитие фронтальных зон в Баренцевом море (см. табл. 1). Выбор глубины 50 м был обусловлен тем, что на этой глубине также наиболее отчётливо проявляются фронтальные зоны (см. табл. 1), и, кроме того, в данный период года нижняя граница термоклина залегает выше этой глубины, и слой скачка температуры не оказывает влияние на её горизонтальное распределение на глубине 50 м [Ozhigin et al., 2011; Ожигин и др., 2016].

Иногда спутниковая информация позволяет получить достаточно точное представление о структуре и изменчивости термических фронтальных зон на поверхности. Однако для Баренцева моря этот вариант не совсем подходит, так как в летний период фронты на поверхности здесь выражены слабо (см. табл. 1).

На рис. 1 представлено распределение вероятности появления значимых градиентов температуры воды (более $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$)

на глубине 50 м в августе-сентябре за 1960–2018 гг. Видно, что в рассматриваемый период значимые градиенты наиболее часто наблюдались в западной и центральной частях Баренцева моря. Области с наибольшей встречаемостью фронтальных зон (более 65%) огибали о. Медвежий с запада и юга, распространяясь далее в северо-восточном направлении. Рис. 1 подтверждает, что выбор участка, ограниченного координатами $73\text{--}78^{\circ}$ с. ш. и $15\text{--}43^{\circ}$ в. д., для анализа изменчивости термических фронтальных зон сделан корректно: области, где наиболее часто наблюдаются значимые градиенты температуры воды, целиком расположены в границах выбранного участка.

Среднемноголетнее (за период с 1981 г. по 2010 г.) распределение значимых (более $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) градиентов температуры воды на 50 м в августе-сентябре (рис. 2) практически полностью повторяет распределение вероятности таких градиентов (см. рис. 1), при этом области максимальных значений обоих

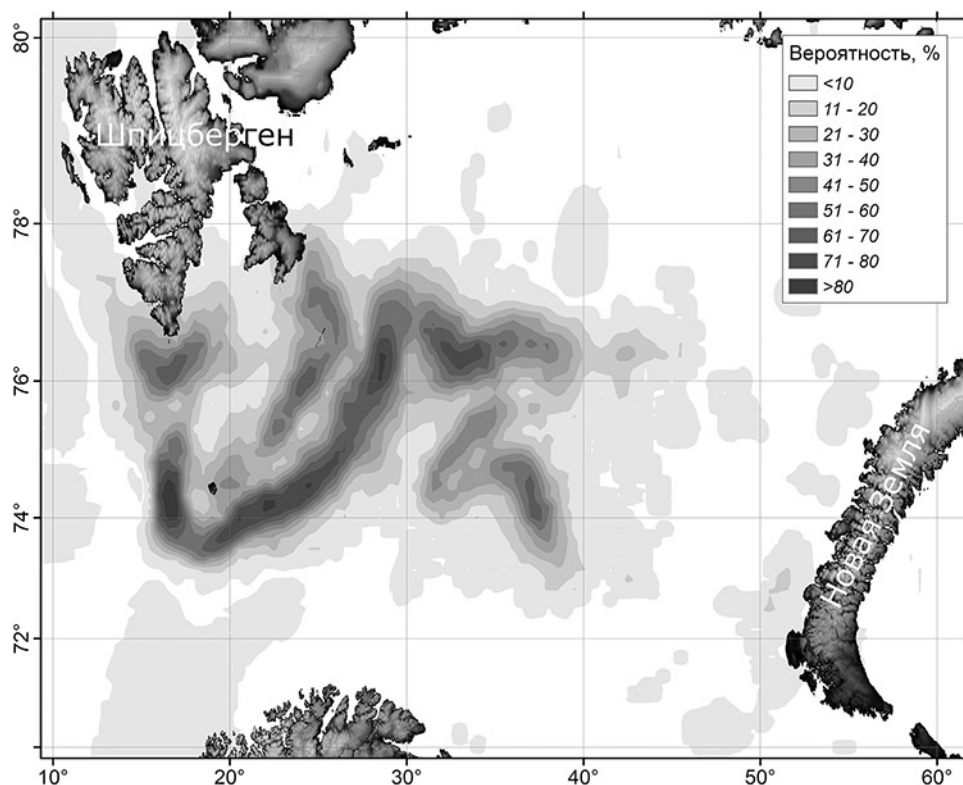


Рис. 1. Вероятность (%) встречаемости значимых градиентов температуры воды (более $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) в Баренцевом море на глубине 50 м в августе-сентябре за период 1960–2018 гг.

параметров совпадают. Это свидетельствует о квазистационарности термических фронтальных зон в Баренцевом море.

Максимальные градиенты температуры (более $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) в границах выделенных фронтальных зон отмечаются к западу от о. Медвежий (см. рис. 2). Повышенная обострённость градиентов в этом районе, скорее всего, является результатом более точного их расчёта, благодаря данным проходящего здесь стандартного океанографического разреза № 31 («Медвежий — Запад») (вдоль $74^{\circ}30'\text{с.ш.}$, $9^{\circ}50'-18^{\circ}30'\text{в.д.}$), имеющего высокую плотность станций. Обострённость фронтальной зоны отмечается также к востоку от о-вов Медвежий и Надежда и, вероятно, определяется тесным взаимодействием тёплых вод атлантического происхождения и холодных арктического.

Межгодовые колебания индекса протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря на глубине 50 м в августе-сентябре имеют большую амплитуду (от 105 до 644) за рассматриваемый период при

среднегодовом (1960–2010 гг.) значении 393 (рис. 3, табл. 2). До середины 1970-х годов данный индекс характеризовался значительными межгодовыми изменениями, что, вероятно, было обусловлено разной плотностью океанографических наблюдений.

К наиболее «стабильному» периоду в характере изменения индекса следует отнести период с начала 1980-х годов. К этому времени сформировалась достаточно чёткая схема проведения наблюдений в период экосистемной съёмки, имеющая практически однородную по плотности сетку станций, что, возможно, привело к уменьшению межгодовых изменений индекса. Следует отметить, что с середины 1970-х по начало 2000-х годов индекс плавно возрастал, после чего начал падать вплоть до абсолютного минимума в 2010 г. При этом площадь термических фронтальных зон на анализируемой акватории сократилась в пять раз от 2001 г. к 2010 г. После 2010 г. индекс оставался на низком уровне и только в 2011 г. и 2017 г. был близок к среднегодовому значению.

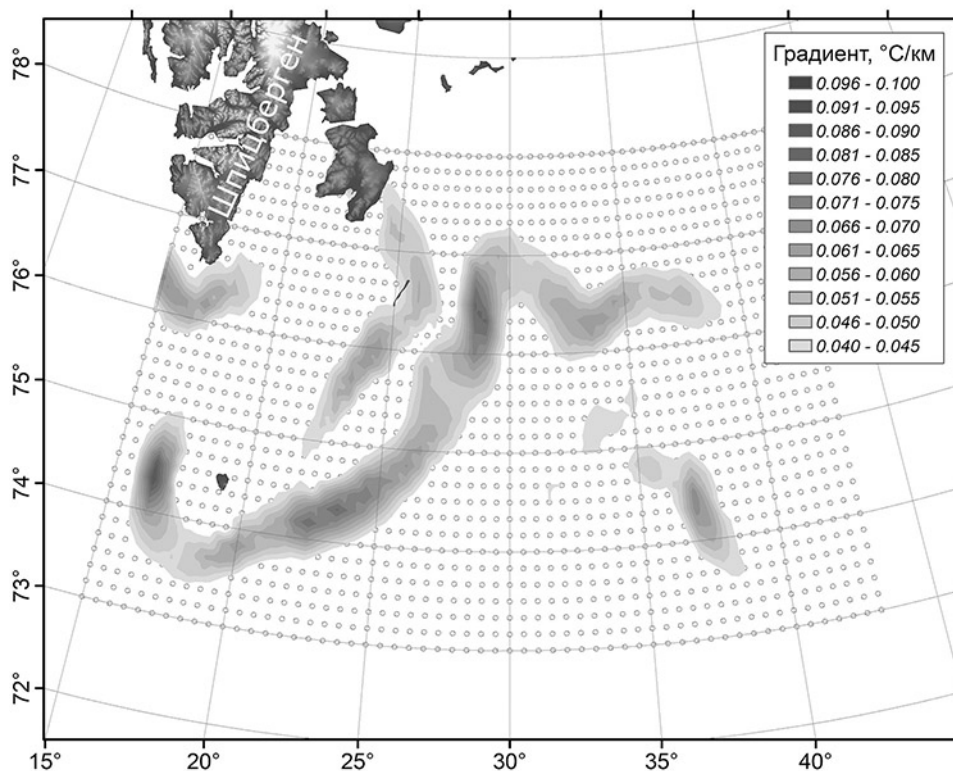


Рис. 2. Среднегодовое (1981–2010 гг.) положение термических фронтальных зон Баренцева моря на глубине 50 м в августе-сентябре. Точками показаны узлы расчётной сетки

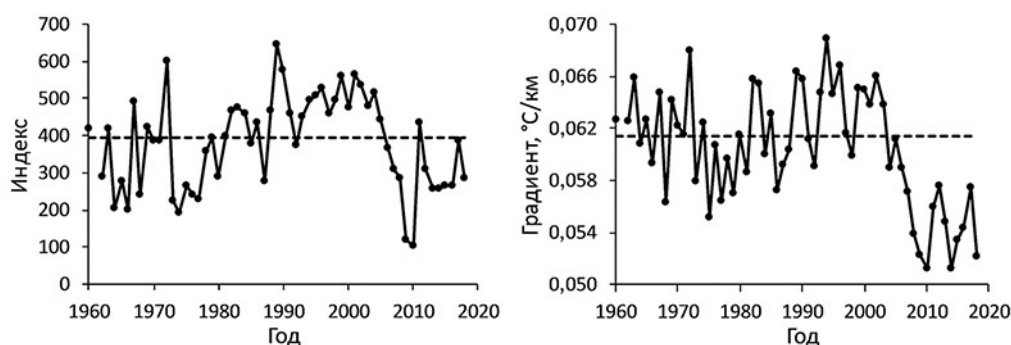


Рис. 3. Межгодовая изменчивость индекса протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря (слева) и среднего градиента температуры в них (справа) на глубине 50 м в августе-сентябре. Пунктирной линией показаны среднемноголетние (1960–2010 гг.) значения

Таблица 2. Значения индекса протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря и среднего горизонтального градиента температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$) в них на глубине 50 м в августе-сентябре

Год	Индекс	Градиент	Год	Индекс	Градиент	Год	Индекс	Градиент
1960	417	0,063	1980	288	0,061	2000	474	0,065
1961			1981	398	0,059	2001	565	0,064
1962	291	0,063	1982	469	0,066	2002	537	0,066
1963	418	0,066	1983	477	0,065	2003	481	0,064
1964	204	0,061	1984	460	0,060	2004	515	0,059
1965	277	0,063	1985	378	0,063	2005	442	0,061
1966	201	0,059	1986	434	0,057	2006	366	0,059
1967	490	0,065	1987	278	0,059	2007	311	0,057
1968	241	0,056	1988	468	0,060	2008	285	0,054
1969	424	0,064	1989	644	0,066	2009	118	0,052
1970	385	0,062	1990	575	0,066	2010	105	0,051
1971	385	0,061	1991	461	0,061	2011	437	0,056
1972	601	0,068	1992	375	0,059	2012	308	0,058
1973	223	0,058	1993	451	0,065	2013	256	0,055
1974	193	0,062	1994	497	0,069	2014	256	0,051
1975	263	0,055	1995	509	0,065	2015	267	0,053
1976	241	0,061	1996	529	0,067	2016	265	0,054
1977	229	0,056	1997	459	0,062	2017	385	0,057
1978	359	0,060	1998	494	0,060	2018	286	0,052
1979	393	0,057	1999	562	0,065			

Средний горизонтальный градиент температуры воды в выделенных фронтальных зонах изменялся от 0,051 до 0,069 $^{\circ}\text{C}/\text{км}$ при среднемноголетнем (1960–2010 гг.) значении 0,061 $^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (см. рис. 3, табл. 2). Начиная с середины 1990-х годов отмечалось его ослабление, в 2010 г. он достиг абсолютного минимума, после чего продолжал оставаться на низком уровне.

Между индексом протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря и средним градиентом температуры воды в них выявлена положительная значимая связь с коэффициентом детерминации 0,52 (при длине ряда $n=58$) (рис. 4). Из приведённого графика видно, что наилучшая согласованность этих параметров (минимальные отклонения от линии регрессии) отмечается

в области больших значений. Т.е. в годы, когда протяжённость термических фронтальных зон большая, средний градиент температуры в них, как правило, тоже высокий. Худшая согласованность между этими параметрами наблюдается в период слабого фронтогенеза (индекс протяжённости колеблется в пределах 200–300), тогда средний градиент температуры во фронтальных зонах практически равновероятно может быть и высоким, и низким.

Полярный фронт в Баренцевом море разделяет арктическую и атлантическую водные массы и является хорошим индикатором их взаимодействия [Gawarkiewicz, Plueddemann, 1995; Parsons et al., 1996]. Значения градиента температуры во фронтальных зонах не постоянны и во многом определяются температурой взаимодействующих вод. Области с максимальными градиентами сосредоточены на участках взаимодействия «чистых» водных масс. Ослабленные гради-

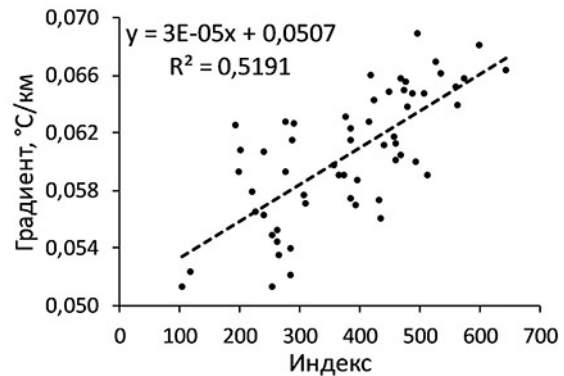


Рис. 4. Зависимость между индексом протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря и средним градиентом температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$) в них на глубине 50 м в августе-сентябре за период с 1960 г. по 2018 г.

енты указывают на наличие трансформированных вод. Смещение зон максимальных градиентов предполагает «доминирование» одной водной массы над другой. Так, для Баренцева моря смещение фронтальной зоны

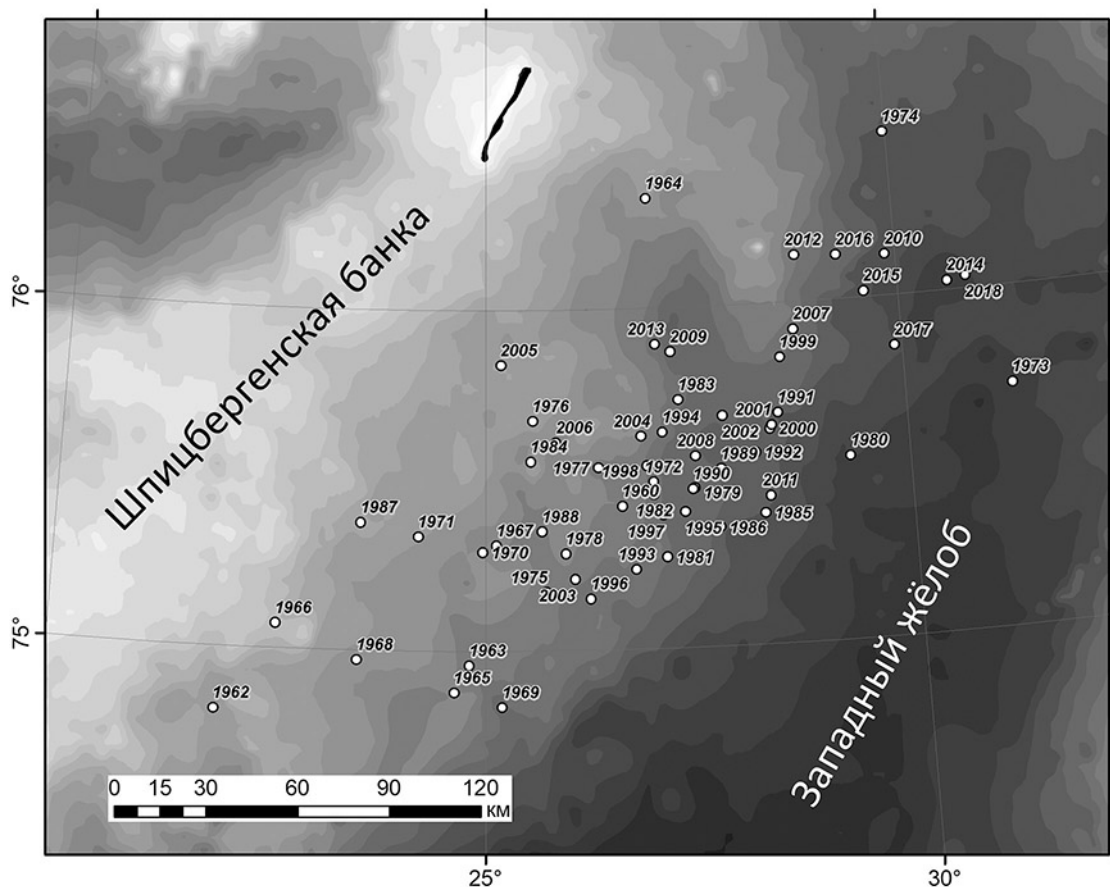


Рис. 5. Положение центроидов термических фронтальных зон Баренцева моря на глубине 50 м в августе-сентябре за период с 1960 г. по 2018 г.

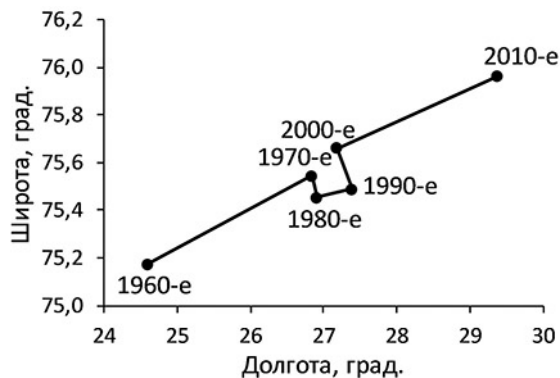


Рис. 6. Среднедекадное положение центроидов термических фронтальных зон Баренцева моря на глубине 50 м в августе-сентябре

в южном направлении указывает на доминирование арктических вод, в северном — атлантических. При большем распространении одной из водных масс происходит перераспределение теплового содержания вод Баренцева моря, что может значимо отразиться на циркуляции вод, ледовом покрове, гидрохимических характеристиках и т. д., что, в свою очередь, может оказать влияние на морскую флору и фауну.

При общей стационарности фронтальных зон Баренцева моря, положение участков с наиболее обострёнными градиентами температуры может изменяться от года к году. Что, в свою очередь, будет приводить к смещению приуроченных к ним областей, характеризующихся активным вихреобразованием, интенсивной вертикальной циркуляцией и, как следствие, высокой биопродуктивностью. Для оценки пространственного смещения термических фронтальных зон (точнее их наиболее высокоградиентных участков) от года к году в среде программного комплекса *ArcGis* рассчитывалось географическое положение их центроидов с учётом весовой функции, где в качестве веса использовался градиент температуры воды во фронтальных зонах.

Облако центроидов, рассчитанных за все годы рассматриваемого периода, оказалось вытянутым с юго-запада на северо-восток вдоль границы между Шпицбергенской банкой и Западным жёлобом (рис. 5). Расстояние между двумя наиболее удалёнными друг от друга центроидами (1962 и 1974 гг.)

составило около 290 км. Центроиды наиболее плотно были сосредоточены в небольшой области (75–76° с. ш. и 26–28° в. д.), что указывает на относительную стационарность фронтальных зон Баренцева моря. Из рисунка 5 видно, что положение центроидов в 1960-е годы тяготело к юго-западу, а в 2010-е годы сместилось в северо-восточном направлении.

Закономерности в изменении положения центроидов наиболее отчётливо можно проследить, если рассматривать отдельные десятилетия (рис. 6). Так, в 1960-е годы центроиды термических фронтальных зон Баренцева моря имели крайнее юго-западное положение. Возможно, на такое их положение оказало влияние то, что в те годы наблюдения проводились преимущественно на стандартных разрезах. В 1970-е годы положение центроидов сместилось примерно на 75 км в северо-восточном направлении и в последующие 40 лет (1970-е, 1980-е, 1990-е и 2000-е годы) среднедекадное положение центроидов оставалось квазистационарным в пределах небольшого участка 75,5–75,7° с. ш. и 26,8–27,4° в. д. С начала 2010-х годов произошло дальнейшее смещение центроидов в северо-восточном направлении. С учётом того, что на протяжении почти 40 лет положение «веса» фронтальных зон оставалось квазистационарным (по нашей оценке, смещение среднедекадных центроидов от центра составляло около 11 км в направлении на север или юг и около 8 км в направлении на запад или восток), смещение среднедекадного центроида в 2010-х годах на северо-восток на 75 км можно считать значительным. В результате, смещение среднедекадных центроидов термических фронтальных зон Баренцева моря от 1960-х к 2010-м годам составило около 150 км. Смещение линии фронта (от 1970-х к 2010-м годам) в генеральном северном направлении отмечали L. Oziel et al. [2016] и связывали это с атлантизацией водных масс Баренцева моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований выполнена количественная оценка протяжённости и обострённости термических

фронтальных зон Баренцева моря за 1960–2018 гг. и проанализирована их межгодовая изменчивость. Термические фронтальные зоны в Баренцевом море наиболее ярко выражены на глубинах 30–50 м в августе–сентябре. С начала 2000-х годов начался период уменьшения протяжённости термических фронтальных зон и ослабления горизонтальных градиентов температуры в них. В 2010 г. индекс протяжённости термических фронтальных зон и средний градиент температуры в них достигли своих абсолютных минимумов за весь расчётный период с 1960 г. При общей квазистационарности термических фронтальных зон Баренцева моря произошло смещение их среднедекадных центроидов на 150 км в северо-восточном направлении от 1960-х к 2010-м годам.

Полученные результаты позволяют лучше понять характер изменчивости Полярного фронта Баренцева моря, который является его важной океанографической чертой, поскольку разделяет две основные водные массы моря, тёплые и солёные атлантические воды от холодных и распреснённых арктических вод, и играет важную роль в функционировании морской экосистемы. Это особенно актуально в свете потепления Арктики, которое отразилось как на протяжённости, так и на обострённости термических фронтальных зон Баренцева моря. Однако для получения более детальной информации о структуре и изменчивости фронтов Баренцева моря необходимо выполнение натурных наблюдений с высоким пространственным разрешением. В дальнейшем планируется рассмотреть изменчивость халинных фронтальных зон Баренцева моря.

ЛИТЕРАТУРА

- Агеноров В.К. 1946. О динамике вод Баренцева моря. М.-Л.: Гидрометеиздат. 132 с.
- Грузинов В.М. 1986. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 272 с.
- Ижевский Г.К. 1958. Воды полярного фронта и распределение атлантических сельдей. М.: Изд-во ВНИРО. 25 с.
- Ожигин В.К. 1989. О фронтальных зонах Баренцева моря // Вопросы промысловой океанологии Северного бассейна. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 89–103.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 260 с.
- Титов О.В., Ожигин В.К., Гусев Е.В., Ившин В.А. 2007. Теория функционирования экосистемы Баренцева моря: промыслово-океанографические аспекты // Материалы отчётной сессии ПИНРО, посвящённой 85-летию института. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 176–192.
- Федоров К.Н. 1983. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат. 296 с.
- Bakun A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage // *Scientia Marina*. V. 70. № S2. P. 105–122.
- Doniol-Valcroze T., Berteaux D., Larouche P., Sears R. 2007. Influence of thermal fronts on habitat selection by four rorqual whale species in the Gulf of St. Lawrence // *Marine Ecology Progress Series*. V. 335. P. 207–216.
- Gawarkiewicz G. G., Plueddemann A. J. 1995. Topographic control of thermohaline frontal structure in the Barents Sea Polar Front on the south flank of Spitsbergen Bank // *J. of Geophysical Research*. V. 100. № C3. P. 4509–4524.
- Harris C.L. 1996. Water mass distribution and polar front structure in the southwestern Barents Sea. Dissertation for the degree of Master of Science. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution. 106 pp.
- Harris C.L., Pluedemann A.J., Gawarkiewicz G.G. 1998. Water mass distribution and polar front structure in the western Barents Sea // *J. of Geophysical Research*. V. 103. № C2. P. 2905–2917.
- Johannessen O.M., Foster L.A. 1978. A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // *J. of Geophysical Research*. V. 83. № C9. P. 4567–4571.
- Kushnir V., Pavlov V., Morozov A., Pavlova O. 2011. “Flashes” of chlorophyll-*a* concentration derived from *in situ* and remote sensing data at the Polar Front in the Barents Sea // *The Open Oceanography J.V.* 5. P. 14–21.
- Lien V. 2010. Water mass transformations in the Barents Sea and linkages to the Polar Front. Dissertation for the degree Philosophiae Doctor. Bergen: University of Bergen. 151 pp.
- Loeng H. 1991. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea // *Polar Research*. V. 10. № 1. P. 5–18.
- Morozov A.N., Pavlov V.K., Pavlova O.A., Fedorov S.V. 2017. Polar frontal zone of the Barents Sea Western Trough based on the direct measurements in 2007 // *Physical Oceanography*. № 2. P. 36–50.
- Olson D.B., Hitchcock G.L., Mariano A.J., Ashjian C.J., Peng G., Nero R.W., Podestá G.P. 1994. Life on the

- edge: Marine life and fronts // *Oceanography*. V. 7. № 2. P. 52–60.
- Ozhigin V.K., Ingvaldsen R.B., Loeng H., Boitsov V.D., Karsakov A.L.* 2011. Introduction to the Barents Sea // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation*. Trondheim: Tapir Academic Press. P. 39–76.
- Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C.* 2016. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Science*. V. 12. № 1. P. 169–184.
- Parsons A.R., Bourke R.H., Muench R.D., Chiu C.-S., Lynch J.F., Miller J.H., Plueddemann A.J., Pawlowicz R.* 1996. The Barents Sea Polar Front in summer // *Journal of Geophysical Research*. V. 101. № C6. P. 14201–14221.
- Russell R.W., Harrison N.M., Hunt Jr G.L.* 1999. Foraging at a front: hydrography, zooplankton, and avian planktivory in the northern Bering Sea // *Marine Ecology Progress Series*. V. 182. P. 77–93.
- Titov O.V., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Ozhigin V.K.* 2007. Long-term variations in the Barents Sea frontal zones according to the data on oceanographic observations and model calculations // *ICES CM Documents 2007/B:21* (Poster & extended abstracts).
- Vage S.* 2010. Structure and dynamics of the Barents Sea Polar Front near the Great Bank and associated plankton distribution in August 2007. Dissertation for the degree Philosophiae Doctor. Tromsø: University of Tromsø. 57 pp.

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.
Принята после рецензии 20.05.2019 г.

Habitat of aquatic biological resources
Climatic factors of variability of environmental
conditions of fishery resources and marine
ecosystem functioning

Barents Sea thermal frontal zones variability in 1960–2018

V.A. Ivshin, A.G. Trofimov, O.V. Titov

Polar branch of FSBSI «VNIRO» (N.M. Knipovich «PINRO»), Murmansk, Russia

This paper discusses our research on the interannual variability in the Barents Sea thermal frontal zones. The length index of the thermal frontal zones (the number of grid nodes with a relevant temperature gradient) and their mean temperature gradients at 50 m depth in August–September 1960–2018 were calculated for an area between 73–78°N, 15–43°E, where the frontal zones are more evident. Thermal frontal zones were identified in the areas where temperature gradients exceeded 0.04 °C/km. Since the beginning of this century, the length index of thermal frontal zones in the Barents Sea has been decreasing and temperature gradients in them have been weakening; in 2010, the length index of frontal zones and the mean temperature gradient reached record low values since 1960. To estimate interannual variability in the positions of thermal frontal zones, their geographical centroids (weighted centers of mass for grid nodes with a relevant temperature gradient) were calculated, taking into account horizontal temperature gradients as weighting coefficients. From the 1960s to the 2010s, the decadal mean centroids of frontal zones shifted northeastwards by 150 km.

Keywords: Barents Sea, Polar Front, thermal frontal zone, length index, temperature gradient, interannual variability, centroids.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-180-60-71

REFERENCES

- Agenorov V.K.* 1946. O dinamike vod Barentseva moray [On the dynamics of the Barents Sea waters]. M.-L.: Gidrometeoizdat. 132 s.
- Gruzinov V.M.* 1986. Gidrologiya frontal'nykh zon Mirovogo okeana [Hydrology of the frontal zones in the World Ocean]. L.: Gidrometeoizdat. 272 s.
- Izhevskij G.K.* 1958. Vody polyarnogo fronta i raspredelenie atlanticheskikh sel'dej [The Polar front waters and Atlantic herring distribution]. M.: Izd-vo VNIRO. 25 s.
- Ozhigin V.K.* 1989. O frontal'nykh zonakh Barentseva morya [On the frontal zones in the Barents Sea] // Voprosy promyslovoj okeanologii Severnogo bassejna. Murmansk: Izd-vo PINRO. S. 89–103.
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M. Yu.* 2016. Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost' [The Barents Sea waters: structure, circulation, variability]. Murmansk: Izd-vo PINRO. 260 s.
- Titov O.V., Ozhigin V.K., Gusev E.V., Ivshin V.A.* 2007. Teoriya funktsionirovaniya ehkositemy Barentseva morya: promyslovo-okeanograficheskie aspekty [Theory of the functioning of the Barents Sea ecosystem: fisheries and oceanographic aspects] // Materialy otchetnoj sessii PINRO, posvyashchennoj 85-letiyu instituta. Murmansk: Izd-vo PINRO. S. 176–192.
- Fedorov K.N.* 1983. Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov [Physical nature and structure of oceanic fronts]. L.: Gidrometeoizdat. 296 s.
- Bakun A.* 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage // *Scientia Marina*. V. 70. № S2. P. 105–122.
- Doniol-Valcroze T., Berteaux D., Larouche P., Sears R.* 2007. Influence of thermal fronts on habitat selection by four rorqual whale species in the Gulf of St. Lawrence // *Marine Ecology Progress Series*. V. 335. P. 207–216.
- Gawarkiewicz G.G., Plueddemann A.J.* 1995. Topographic control of thermohaline frontal structure in the Barents Sea Polar Front on the south flank of Spitsbergen Bank // *J. of Geophysical Research*. V. 100. № C3. P. 4509–4524.

- Harris C.L. 1996. Water mass distribution and polar front structure in the southwestern Barents Sea. Dissertation for the degree of Master of Science. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution. 106 pp.
- Harris C.L., Plueddemann A.J., Gawarkiewicz G.G. 1998. Water mass distribution and polar front structure in the western Barents Sea // *J. of Geophysical Research*. V. 103. № C2. P. 2905–2917.
- Johannessen O.M., Foster L.A. 1978. A note on the topographically controlled Oceanic Polar Front in the Barents Sea // *J. of Geophysical Research*. V. 83. № C9. P. 4567–4571.
- Kushnir V., Pavlov V., Morozov A., Pavlova O. 2011. “Flashes” of chlorophyll-*a* concentration derived from *in situ* and remote sensing data at the Polar Front in the Barents Sea // *The Open Oceanography J.V.* 5. P. 14–21.
- Lien V. 2010. Water mass transformations in the Barents Sea and linkages to the Polar Front. Dissertation for the degree Philosophiae Doctor. Bergen: University of Bergen. 151 pp.
- Loeng H. 1991. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea // *Polar Research*. V. 10. № 1. P. 5–18.
- Morozov A.N., Pavlov V.K., Pavlova O.A., Fedorov S.V. 2017. Polar frontal zone of the Barents Sea Western Trough based on the direct measurements in 2007 // *Physical Oceanography*. № 2. P. 36–50.
- Olson D.B., Hitchcock G.L., Mariano A.J., Ashjian C.J., Peng G., Nero R.W., Podestà G.P. 1994. Life on the edge: Marine life and fronts // *Oceanography*. V. 7. № 2. P. 52–60.
- Ozhigin V.K., Ingvaldsen R.B., Loeng H., Boitsov V.D., Karsakov A.L. 2011. Introduction to the Barents Sea // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation*. Trondheim: Tapir Academic Press. P. 39–76.
- Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. 2016. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Science*. V. 12. № 1. P. 169–184.
- Parsons A.R., Bourke R.H., Muench R.D., Chiu C.-S., Lynch J.F., Miller J.H., Plueddemann A.J., Pawlowicz R. 1996. The Barents Sea Polar Front in summer // *Journal of Geophysical Research*. V. 101. № C6. P. 14201–14221.
- Russell R. W., Harrison N.M., Hunt Jr G.L. 1999. Foraging at a front: hydrography, zooplankton, and avian planktivory in the northern Bering Sea // *Marine Ecology Progress Series*. V. 182. P. 77–93.
- Titov O. V., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Ozhigin V.K. 2007. Long-term variations in the Barents Sea frontal zones according to the data on oceanographic observations and model calculations // *ICES CM Documents 2007/B:21* (Poster & extended abstracts).
- Vage S. 2010. Structure and dynamics of the Barents Sea Polar Front near the Great Bank and associated plankton distribution in August 2007. Dissertation for the degree Philosophiae Doctor. Tromsø: University of Tromsø. 57 pp.

TABLE CAPTIONS

Table 1. Long-term (1960–2010) mean length index of thermal frontal zones in the Barents Sea at standard depths

Table 2. The length index of thermal frontal zones in the Barents Sea and the mean horizontal temperature gradient (°C/km) in them at 50 m depth in August–September

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Probability (%) of relevant temperature gradients (more than 0.04 °C/km) in the Barents Sea at 50 m depth in August–September 1960–2018

Fig. 2. Long-term (1981–2010) mean position of thermal frontal zones in the Barents Sea at 50 m depth in August–September. Points indicate grid nodes

Fig. 3. Interannual variability of the length index of thermal frontal zones in the Barents Sea (left) and the mean temperature gradient in them (right) at 50 m depth in August–September. The dashed line shows the long-term (1960–2010) mean values

Fig. 4. Correlation between the length index and mean temperature gradient (°C/km) in the thermal frontal zones of the Barents Sea at 50 m depth in August–September 1960–2018

Fig. 5. Centroids of the Barents Sea thermal frontal zones at 50 m depth in August–September 1960–2018

Fig. 6. Decadal mean centroids of the Barents Sea thermal frontal zones at 50 m depth in August–September