

Среда обитания
водных биологических ресурсов
Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК 551.46 (268.45)

**Восстановление данных по температуре воды на
разрезе «Кольский меридиан» в 2016–2017 гг.**

*А.Л. Карсаков¹, А.Г. Трофимов¹, В.А. Ившин¹, М.Ю. Анциферов¹, Д.В. Густов²,
А.С. Аверкиев²*

¹Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (ФГБНУ «ПИНРО»), г. Мурманск

²Российский государственный гидрометеорологический университет (ФГБОУ «РГГМУ»), г. Санкт-Петербург

E-mail: trofimov@pinro.ru

Океанографический разрез «Кольский меридиан» располагается преимущественно в южной части Баренцева моря и пересекает атлантические воды, идущие из Норвежского моря в Баренцево и далее в Арктический бассейн. Разрез выполняется с мая 1900 г. и его данные представляют один из самых длинных временных рядов в мире. К сожалению, в 2016–2017 гг. наблюдения на разрезе «Кольский меридиан» не выполнялись в течение 12 мес. (с июня 2016 г. по май 2017 г. включительно), т. е. этот уникальный ряд был прерван. В данной работе представлены методы и результаты восстановления пропущенных данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016–2017 гг. Восстановление выполнялось с использованием: (1) внутренней структуры ряда данных с самого разреза «Кольский меридиан», (2) метода множественной линейной регрессии и данных с других расположенных рядом разрезов, а именно: «Фулей–Медвежий» и «Вардё–Север», (3) модельных данных с сайта *SeaLevel*. В результате, были восстановлены данные по температуре воды в слоях 0–50, 0–200, 50–200 и 150–200 м во внутренней (станции 1–3), центральной (станции 3–7) и внешней (станции 8–10) частях разреза «Кольский меридиан» за каждый месяц с июня 2016 г. по май 2017 г.

Ключевые слова: Баренцево море, океанографический разрез «Кольский меридиан», температура воды, восстановление данных.

ВВЕДЕНИЕ

Длительные ряды наблюдений на стандартных океанографических разрезах имеют неоспоримую ценность для изучения сезонных и межгодовых изменений океанографических параметров и выявления особенностей развития океанологических процессов. Такие данные дают возможность выполнять мониторинг

климатообразующих факторов и использовать полученные данные для разработки долгосрочных температурных, ледовых и рыбопромысловых прогнозов. Стандартный разрез «Кольский меридиан» в Баренцевом море является одним из самых длинных в мире рядов океанографических данных, он имеет не только почти 120-летнюю историю выполнения, но и доста-

точно высокое временное разрешение. Впервые наблюдения на этом разрезе были выполнены в мае 1900 г. в экспедиции на научно-исследовательском судне «Андрей Первозванный» под руководством Н.М. Книповича [Карсаков, 2009]. Эти наблюдения положили начало регулярным исследованиям Баренцева моря и легли в основу изучения закономерностей колебания климата и воздействия его изменений на динамику запасов и распределение промысловых рыб. В свете возрастания степени неустойчивости современных изменений климатических систем Северного полушария ещё больше увеличивается значимость наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» для выявления основных закономерностей изменчивости природных процессов.

По длительности выполнения, количеству данных и их пространственному охвату разрез «Кольский меридиан» признан уникальным и получил широкую известность в мировых научных кругах [Ozhigin et al., 2011; Voitsov et al., 2012; Yashayaev, Seidov, 2015]. Ещё в начале 1960-х годов Г.К. Ижевский [1961, 1964] отмечал, что для изучения сезонных и много-

летних колебаний запасов тепла, соли и других характеристик вод в Баренцевом море вполне достаточно использовать регулярные наблюдения на одном разрезе «Кольский меридиан», и что по характеристикам этого разреза в такой же мере можно анализировать процессы, происходящие в морях западной части Северного полушария.

По разным причинам с июня 2016 г. по май 2017 г. (в течение целого года) наблюдения на разрезе «Кольский меридиан» не проводились, что поставило под угрозу все многолетние наработки по долгосрочному прогнозированию теплового состояния вод в этом районе.

Целью настоящей работы стало восстановление пропущенных данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан».

ПРОБЛЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗРЕЗА «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

Стандартный океанографический разрез «Кольский меридиан» расположен в Баренцевом море к северу от Кольского залива вдоль 33°30' в. д. от 69°30' до 77°00' с. ш. и состоит из 16 станций. Его протяжённость состав-

Таблица 1. Координаты и глубины станций разреза «Кольский меридиан»

№ станции	Широта, северная	Долгота, восточная	Глубина, м
1	69°30'	33°30'	260
2	70°00'	33°30'	150
3	70°30'	33°30'	250
4	71°00'	33°30'	225
5	71°30'	33°30'	275
6	72°00'	33°30'	260
7	72°30'	33°30'	280
8	73°00'	33°30'	220
9	73°30'	33°30'	290
10	74°00'	33°30'	310
11	74°30'	33°30'	260
12	75°00'	33°30'	170
13	75°30'	33°30'	225
14	76°00'	33°30'	300
15	76°30'	33°30'	250
16	77°00'	33°30'	175

ляет 450 миль. Глубина на станциях варьирует от 150 м до 310 м и в среднем составляет 245 м (табл. 1).

Количество станций на разрезе менялось в разные годы. Нередко, особенно в первые годы исследований, выполнялись лишь две-три станции, а иногда и просто отдельные станции, расположенные между $69^{\circ}30'$ и $73^{\circ}00'$ с. ш. В отдельные годы выполнение северных участков разреза существенно ограничивалось ледовыми условиями. В последние годы регулярно выполняется участок разреза с $69^{\circ}30'$ до $74^{\circ}00'$ с. ш., т. е. первые десять станций (рис. 1). Именно эти станции, расположенные в области распространения вод Прибрежной и Основной ветвей Мурманского и Центральной ветви Нордкапского течений, являются наиболее часто выполняемыми [Бойцов и др., 2010].

Наибольший вклад в общий объём наблюдений на разрезе внесли ПИНРО и Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (МУГМС), а основной массив информации (99,7% от её общего количества) сформирован российскими организациями [Алексеев и др., 2005]. Последние 25 лет океанографические наблюдения на разрезе «Кольский меридиан» осуществляются в основном на судах ПИНРО.

Собранный на разрезе океанографический материал распределён по времени не всегда равномерно. Периоды, когда наблюдения проводились крайне редко или вообще не проводились, чередуются с периодами регулярных наблюдений. В результате весь почти 120-летний ряд на разрезе «Кольский меридиан» можно разбить на несколько периодов:

- 1) 1900–1906 гг. — 7 лет;

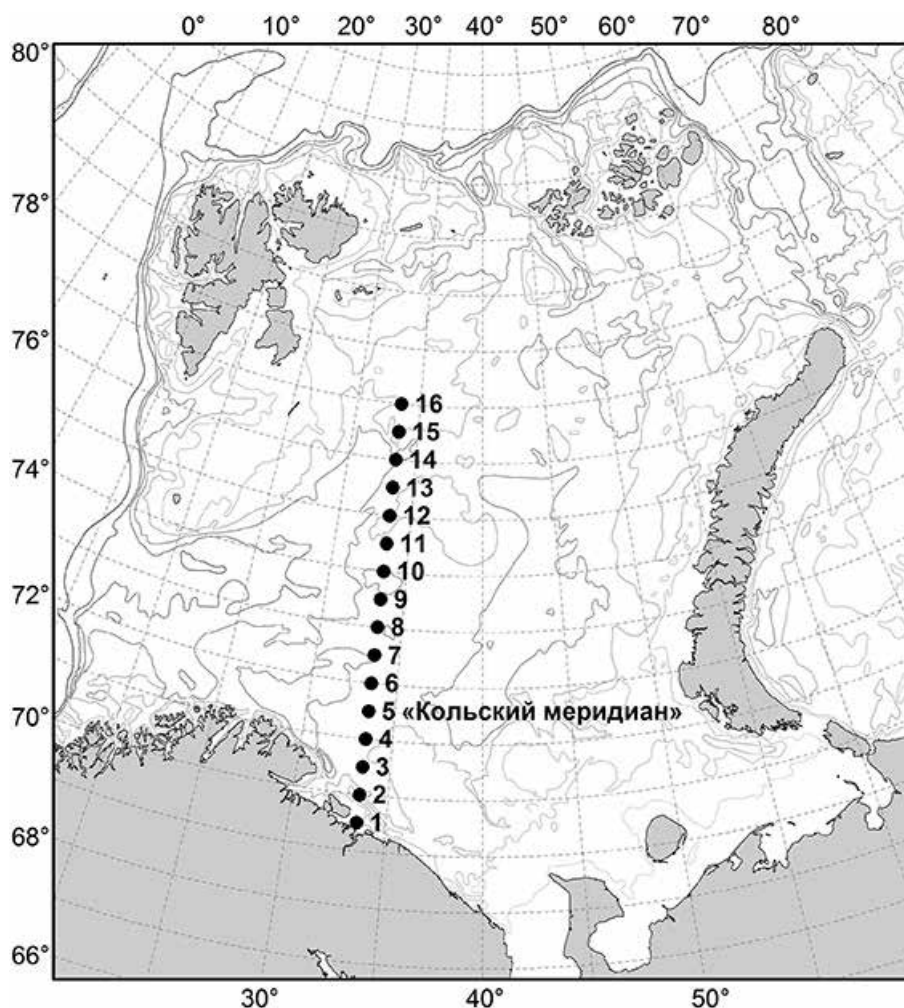


Рис. 1. Положение разреза «Кольский меридиан» в Баренцевом море (станции 1–16)

- 2) 1921–1941 гг. — 21 год;
- 3) 1945–2016 гг. — 72 года;
- 4) 2017 г. — по настоящее время.

Таким образом, общее количество лет, когда на разрезе «Кольский меридиан» действительно проводились наблюдения, составляет 100 лет. Всего же за период с 1900 г. по 2017 г. разрез выполнялся 1209 раз, при этом основным океанографическим параметром наблюдений является температура воды [Карсаков, 2007, 2009] (рис. 2).

Пропуски в рядах средних по слоям величин температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» были впервые восстановлены П.А. Геворкянц [1945] в конце 1930-х годов. Затем его данные были уточнены А.А. Зверевым в 1952 г. Им были сформированы помесечные ряды температуры воды в различных слоях за период 1921–1952 гг., но, к сожалению, в открытой печати эти данные не были опубликованы. При восстановлении пропусков А.А. Зверев исходил из принципа наличия большой инерции в термическом режиме вод на разрезе «Кольский меридиан», т. е. сохранения температурных аномалий. Для периода сравнительно постоянных наблюдений на разрезе (1921–1939 гг.) им был определён сезонный ход, и затем графическим методом, нанося на кривую хода средние по слоям температуры, А.А. Зверев восстанавливал пропущенные месячные значения. Несмотря на этот относительно условный метод восстановления, полученные им помесечные ряды данных средней температуры за период 1921–1941 гг. до сих

пор используются некоторыми учёными для выявления общего хода изучаемых процессов и для качественных сопоставлений.

В 1960-х годах данные А.А. Зверева были проверены и уточнены Г.Н. Зайцевым [1967]. Методика этой проверки заключалась в следующем. Используя данные береговых гидрометеорологических станций Норвегии, он сопоставлял их с данными по разрезу «Кольский меридиан» послевоенного периода, когда наблюдения велись уже регулярно, чтобы с помощью полученной математической зависимости проверить довоенные материалы, вызывающие сомнения. В результате проведённых исследований им было установлено двухмесячное запаздывание в наступлении характерных моментов температурного режима на разрезе «Кольский меридиан» по сравнению с температурой воды на поверхности у норвежского побережья. Одновременно с этим Г.Н. Зайцев установил, что при подобных расчётах следует учитывать характер атмосферной циркуляции, т. к. при меридиональном переносе воздушных масс температура воды на разрезе «Кольский меридиан» возрастает относительно быстрее, чем на поверхности у норвежского побережья.

В 1982 г. Ю.А. Бочковым были вновь уточнены и пересчитаны пропуски в данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» [Бочков, 1982]. С использованием метода группового учёта аргументов им были рассчитаны сезонные (квартальные) и годовые значения температуры воды на разрезе за 1900–1920 гг. и 1940–1944 гг. В каче-

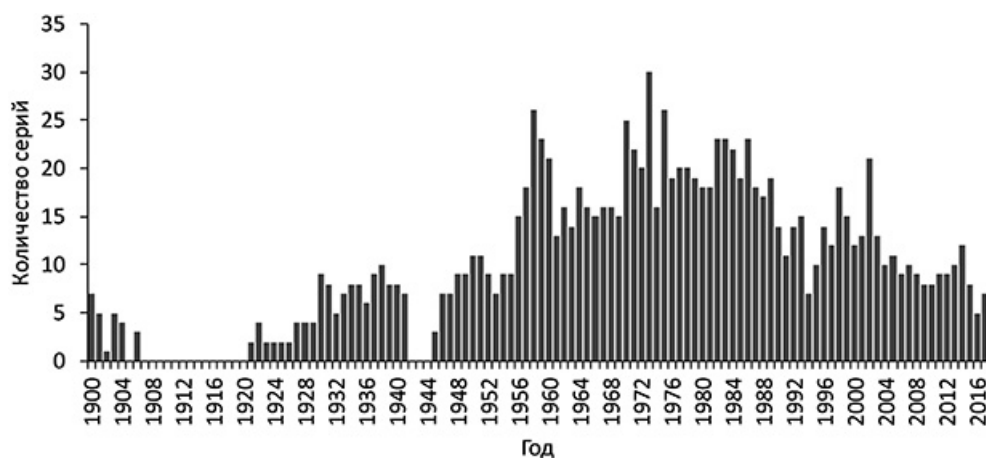


Рис. 2. Количество серий наблюдений за температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» в 1900–2017 гг.

стве предикторов использовались сезонные и годовые значения температуры воздуха на станциях Полярный и Кола, ледовитость Баренцева моря в апреле-августе, число глубоких циклонов для районов Норвежского, Гренландского и Баренцева морей в зимний период (декабрь-февраль) и годовые значения температуры поверхностного слоя Норвежского моря на ряде прибрежных станций. Ю.А. Бочков в своей работе впервые опубликовал не только восстановленные данные за 1900–1920 гг. и 1940–1944 гг., но и весь непрерывный их массив за 1945–1981 гг.

С 1946 г. по 2016 г. наблюдения на разрезе проводились практически ежемесячно и пропусков данных не было. За этот период минимальное количество серий наблюдений в год было 7 (1946, 1947, 1953, 1994 гг.), а максимальное — 30 (1973 г.). В мае 2016 г. наблюдения на разрезе «Кольский меридиан» были прерваны и возобновлены лишь спустя год в июне 2017 г. К сожалению, прерывание регулярных океанографических наблюдений на разрезе произошло на фоне экстремально высокого теплового состояния вод Баренцева моря. Это обстоятельство значительно усложняет задачу восстановления пропущенных данных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В этой работе предпринята попытка восстановить средние значения температуры воды в слоях 0–50, 0–200, 50–200 и 150–200 м на внутреннем (станции 1–3), центральном (станции 3–7) и внешнем (станции 8–10) участках разреза «Кольский меридиан» за каждый месяц с июня 2016 г. по май 2017 г. Далее будут рассмотрены три метода восстановления данных: (1) использование внутренней структуры ряда данных самого разреза «Кольский меридиан», (2) использование метода множественной линейной регрессии и данных с других стандартных разрезов, (3) использование модельных данных с сайта Copernicus [Global ocean..., 2018] (океанографическая модель NEMO).

1. Использование внутренней структуры ряда данных самого разреза «Кольский меридиан». Суть подхода заключается в следующем: вначале анализируется внутренняя

структура временного ряда данных путём выделения квазипериодических составляющих полосовым фильтром Баттерворта, затем эти составляющие экстраполируются статистико-вероятностными методами на один или несколько шагов вперёд по времени для получения отсутствующих значений.

Восстановление пропущенных данных на разрезе «Кольский меридиан» этим методом проводилось при помощи комплексов «АСАПлюс» и «ПРИЗМА» [Аверкиев и др., 1997], реализующих указанный подход и используемых для долгосрочного прогнозирования температуры воды.

Предпосылки для использования результатов прогноза для заполнения пропусков во временных сериях следующие: оправдываемость прогнозов среднемесячных значений за 2008–2015 гг. составила 91% по численному значению и 100% по знаку, что и явилось основанием использования прогнозов для заполнения пропусков.

Прогностические значения, используемые для заполнения пропусков данных, рассчитываются с учётом особенностей межгодовой изменчивости временных рядов на разрезе «Кольский меридиан» и никаким образом не могут её нарушить, исказить или изменить.

Подробный алгоритм следующий:

- расчёт спектральной функции;
- разделение спектральной структуры исходного ряда на отдельные компоненты при помощи полосовой фильтрации (тангенсный фильтр Баттерворта);
- прогнозирование каждой компоненты наиболее подходящим для неё статистическим методом (климат, инерция, байесовский, динамико-статистический, динамико-стохастический, регрессионный, Фурье, комплексный средний, комплексный регрессионный);
- оценка качества прогнозов на основании методической оправданности независимого прогнозирования каждой компоненты каждым из методов;
- получение итогового прогностического значения путём суммирования лучших прогностических значений по каждой из прогнозируемых компонент внутренней структуры ряда.

На рис. 3 представлен пример результатов восстановления данных на разрезе «Кольский

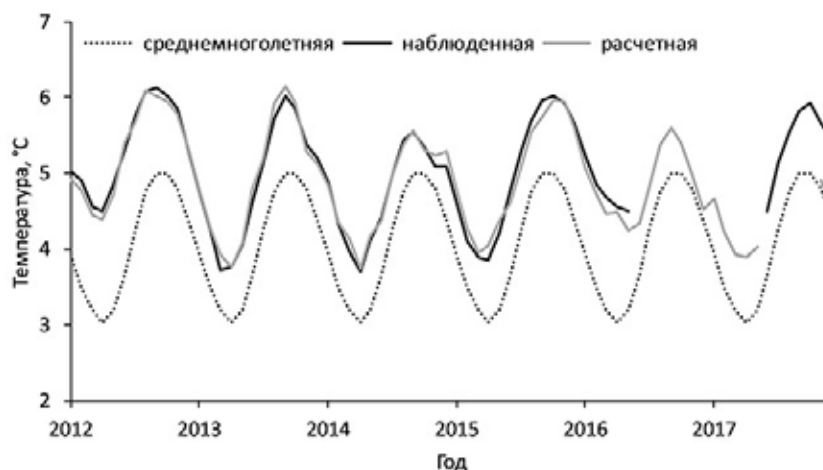


Рис. 3. Среднемноголетняя за 1951–2010 гг. (пунктирная линия), наблюдённая (чёрная линия) и расчётная (серая линия) температура воды в слое 0–200 м в центральной части разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7)

меридиан» (ст. 3–7, слой 0–200 м) с помощью этого метода.

2. Использование метода множественной линейной регрессии и данных с других стандартных разрезов. Суть подхода заключается в проведении регрессионного анализа рядов данных с разреза «Кольский меридиан» и с других расположенных рядом разрезов с целью получения регрессионных моделей, позволяющих рассчитывать данные на разрезе «Кольский меридиан» (предиктант), используя данные с соседних разрезов (предикторы).

В качестве предикторов использовались ряды наблюдений на норвежских разрезах

«Фулей–Медвежий» («Fugløya–Vjørnøya») и «Вардё–Север» («Vardø–N») за период с 1977 г. по 2017 г., любезно предоставленные Институтом морских исследований (г. Берген, Норвегия). Для построения регрессионных моделей были выбраны ряды данных в январе, марте, апреле-мае, августе-сентябре и октябре на разрезе «Фулей–Медвежий» и в январе, марте и августе-сентябре на разрезе «Вардё–Север». Построение уравнений регрессии выполнялось в пакете Statistica 13.3 методом пошаговой регрессии (Stepwise regression, Method: forward selection, P-to-enter: 0,05, P-to-remove: 0,05) для каждого месяца отдельно, т. е. анализировалась межгодовая изменчивость, так что

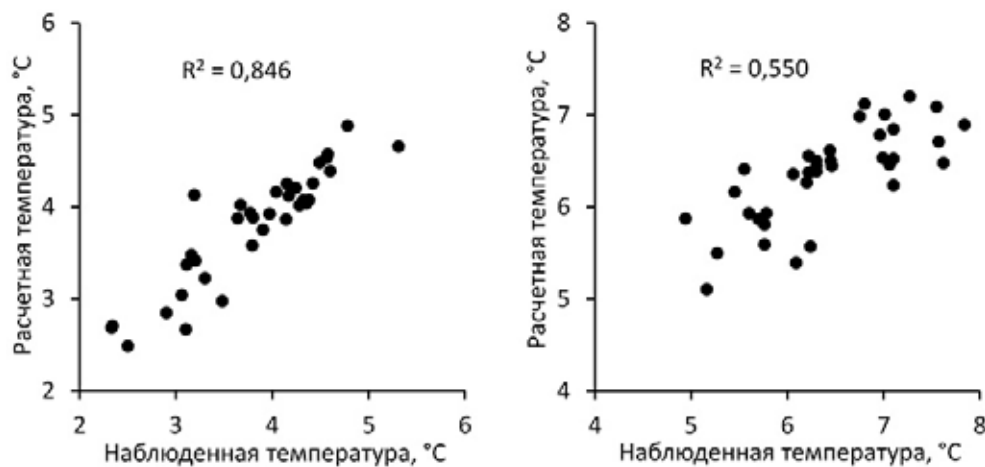


Рис. 4. Распределение наблюдённых и расчётных значений температуры воды в центральной части разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7) в слое 0–200 м в июне (слева) и в слое 0–50 м в июле (справа) за период с 1977 г. по 2017 г.

исключать сезонный ход из рядов данных не было необходимым. Всего было построено 132 уравнения для 12 месяцев 3-х (или 4) слоёв на 3-х участках разреза «Кольский меридиан»: 3 слоя на внутреннем участке разреза и 4 — на центральном и внешнем участках.

Коэффициенты детерминации полученных моделей говорят о достаточно высокой степени

соответствия модельных и натуральных данных по всем расчётным слоям и участкам разреза «Кольский меридиан», за исключением периода июль-сентябрь в слое 0–50 м во внешней части разреза (станции 8–10) (табл. 2). Таким образом, данные, рассчитанные с помощью полученных уравнений регрессии, удовлетворительно описывают межгодовую

Таблица 2. Коэффициенты детерминации регрессионных моделей температуры воды на разрезе «Кольский меридиан»

Участок разреза «Кольский меридиан»	Слой, м	Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Станции 1–3	0–50	0,573	0,637	0,620	0,596	0,590	0,561	0,474	0,719	0,604	0,741		0,526
	0–200	0,619	0,647	0,630	0,636	0,641	0,842	0,772	0,852	0,740	0,718		0,539
	50–200	0,597	0,657	0,634	0,650	0,643	0,832	0,769	0,794	0,633	0,628		0,495
Станции 3–7	0–50	0,703	0,749	0,734	0,718	0,660	0,698	0,550	0,569	0,592	0,580	0,572	0,662
	0–200	0,703	0,742	0,732	0,693	0,670	0,846	0,781	0,837	0,830	0,812	0,688	0,689
	50–200	0,699	0,722	0,720	0,681	0,667	0,859	0,817	0,866	0,841	0,814	0,660	0,635
	150–200	0,727	0,690	0,687	0,663	0,643	0,772	0,805	0,833	0,804	0,800	0,714	0,697
Станции 8–10	0–50	0,762	0,741	0,676	0,529	0,554	0,667	0,203	0,374	0,284	0,590	0,697	0,733
	0–200	0,723	0,802	0,719	0,602	0,617	0,857	0,560	0,753	0,814	0,797	0,742	0,677
	50–200	0,690	0,808	0,717	0,565	0,564	0,798	0,668	0,870	0,917	0,835	0,763	0,675
	150–200	0,594	0,742	0,719	0,600	0,607	0,689	0,707	0,832	0,837	0,829	0,819	0,810

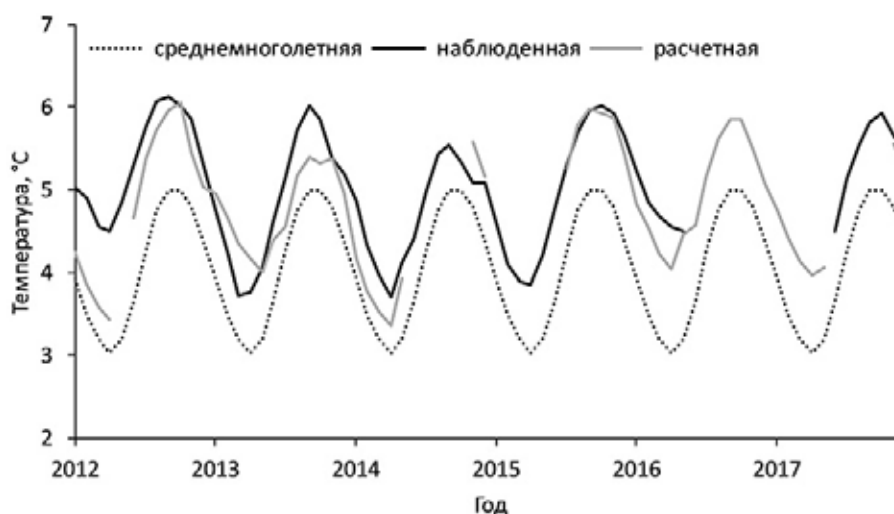


Рис. 5. Среднегодовая за 1951–2010 гг. (пунктирная линия), наблюденная (чёрная линия) и рассчитанная по уравнениям регрессии (серая линия) температура воды в слое 0–200 м в центральной части разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7)

и внутригодовую изменчивость температуры воды на разрезе «Кольский меридиан».

На рис. 4 в качестве примера представлены одна из лучших ($R^2=0,846$) и одна из худших ($R^2=0,550$) моделей для центральной части разреза «Кольский меридиан». Для других слоёв и участков разреза получены похожие результаты согласованности между модельными и фактическими данными. Наилучшие модели получены для летне-осеннего периода и более глубоких слоёв. Качество моделей ухудшается в зимний период, а также в поверхностном слое и на внутреннем участке разреза (станции 1–3). Вероятнее всего, это связано с более высокой изменчивостью термических условий здесь, а также с синоптическими процессами, влияние которых в зимний период распространяется на большую глубину.

На рис. 5 показан пример результатов восстановления данных на разрезе «Кольский меридиан» с помощью представленного подхода.

Наибольшие расхождения между фактическими и расчётными значениями температуры воды отмечались в 2012 г., когда наблюдались рекордно высокие аномалии температуры воды [González-Pola et al., 2018].

3. Использование океанографической модели NEMO. В рамках этого подхода для восстановления пропусков данных использовались результаты расчётов, выполненных на основе многоуровневой модели высокого разрешения NEMO [Madec, 2008], представленные на сайте Copernicus [Global ocean..., 2018].

Горизонтальное разрешение модели 9 км по экватору, вертикальное — 50 уровней, представлены месячные и суточные данные. При заполнении пропусков использовались месячные (с января 2007 г. по декабрь 2017 г.) модельные данные по температуре воды на стандартных горизонтах в координатах стандартных станций разреза «Кольский меридиан». По вы-

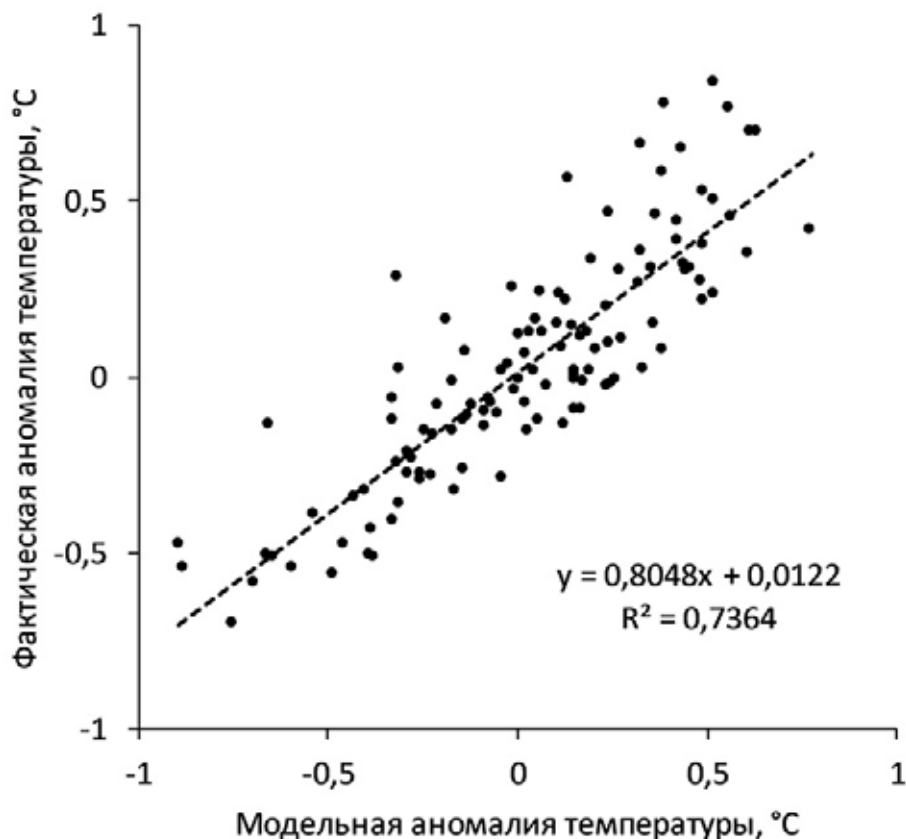


Рис. 6. Распределение фактических и модельных аномалий температуры в слое 0–200 м на центральном участке разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7) за период с января 2007 г. по декабрь 2014 г. (пунктирной линией показан линейный тренд)

бренным данным для каждого месяца рассчитывались средние значения температуры воды в слоях 0–50, 0–200, 50–200 и 150–200 м на внутреннем (станции 1–3), центральном (станции 3–7) и внешнем (станции 8–10) участках разреза. Затем выполнялся регрессионный анализ полученных модельных и имеющихся фактических данных по температуре воды. Построенные для каждого слоя и участка разреза уравнения регрессии между модельными и фактическими данными использовались для заполнения пропусков данных. Чтобы исключить влияние сезонного хода, в расчётах использовались аномалии температуры воды.

В качестве примера, на рис. 6 представлено распределение фактических и модельных аномалий температуры воды в слое 0–200 м на центральном участке разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7). Как видно из рисунка, связь этих двух рядов является статистически значимой и достаточно тесной ($R^2 = 0,74$, при $n = 120$). При этом наибольшие отклонения от линии регрессии отмечаются в области больших положительных аномалий. По другим слоям и участкам разреза были получены похожие результаты согласованности между модельными и фактическими данными (табл. 3). Хуже всего ($R^2 = 0,46$) модель описывает изменчивость аномалий температуры воды в слое 50–200 м на внутреннем участке разреза (станции

Таблица 3. Коэффициенты детерминации (R^2) регрессионных уравнений, использованных для расчёта аномалий температуры воды на разрезе «Кольский меридиан»

Участок разреза «Кольский меридиан»	Слой, м	R^2
Станции 1–3	0–50	0,74
	0–200	0,61
	50–200	0,46
Станции 3–7	0–50	0,78
	0–200	0,74
	50–200	0,72
	150–200	0,75
Станции 8–10	0–50	0,84
	0–200	0,78
	50–200	0,77
	150–200	0,72

1–3), хотя связь между модельными и фактическими данными остаётся здесь статистически значимой. Вероятно, это связано со сложным характером гидрофизических и гидродинамических процессов в прибрежной зоне.

На основе рассчитанных по уравнениям регрессии аномалий температуры воды за период с пропущенными данными были вычислены абсолютные значения температуры. На рис. 7 показан пример результатов восстанов-

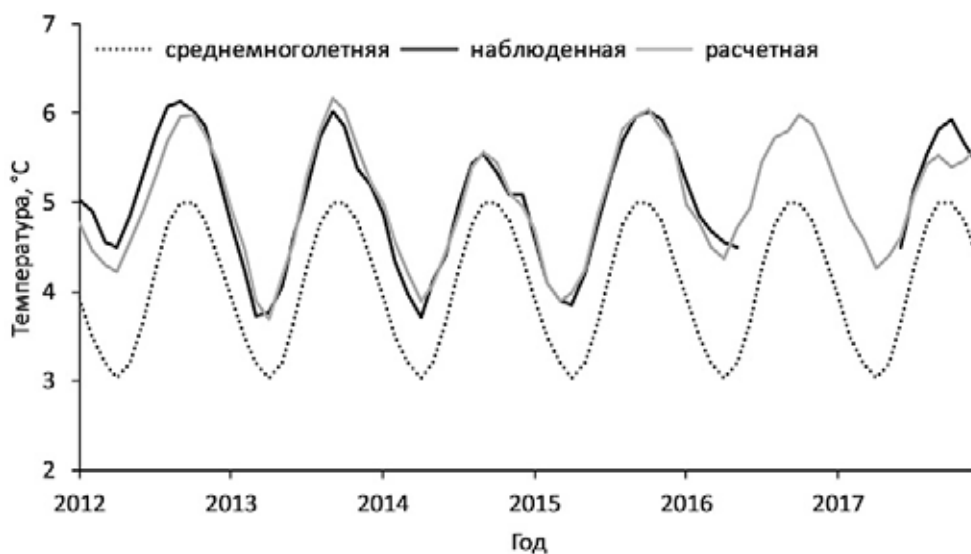


Рис. 7. Среднегодовое за 1951–2010 гг. (пунктирная линия), наблюденная (чёрная линия) и рассчитанная по модели (серая линия) температура воды в слое 0–200 м в центральной части разреза «Кольский меридиан» (станции 3–7)

ления данных на разрезе «Кольский меридиан» с помощью представленного подхода. Относительно большие расхождение между фактической и расчётной температурой воды отмечались в основном в 2012 г., когда наблюдались рекордно высокие значения температуры [González-Pola et al., 2018].

В целом, модельные результаты достаточно хорошо описывают межгодовую и внутригодовую изменчивость температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и с достаточной степенью надёжности могут быть использованы при заполнении пропусков в рядах наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить качество рассмотренных подходов по восстановлению данных на разрезе «Кольский меридиан» и выбрать лучший из них, были рассчитаны абсолютные ошибки, а именно, модули разностей между фактическими и рассчитанными значениями температуры воды. Затем на их основе были вычислены средние значения, максимальные значения и $2,5\sigma$ (σ — стандартное отклонение) (табл. 4). Величина $2,5\sigma$ означает, что около 99% всех абсолютных ошибок имеют значение меньше чем $2,5\sigma$.

Из табл. 4 видно, что наилучшие результаты были получены при использовании модельных данных с сайта Copernicus (модель NEMO). Наибольшие абсолютные ошибки отмечались при использовании метода множественной линейной регрессии и данных с других стандартных разрезов. Что касается первого подхода (использование внутренней структуры ряда данных самого разреза «Кольский меридиан»), то средняя абсолютная ошибка была сопоставима с таковой для третьего подхода, однако максимальная ошиб-

ка оказалась в два раза больше. Также следует отметить, что первый подход дает хорошие результаты на зависимых данных, но при расчётах на независимых данных (а это именно то, что нужно при восстановлении пропусков) ошибка значительно возрастает (см. рис. 3). Это объясняется тем, что при разложении ряда на квазипериодические составляющие, они в сумме хорошо описывают данные, которые использовались для их выделения. Но при прогнозе, т. е. при восстановлении пропусков, результат ухудшается, особенно в случае аномальных ситуаций, как например в 2016 г., когда в Баренцевом море наблюдались рекордно высокие температуры [González-Pola et al., 2018]. Результаты, полученные с помощью первого подхода, выглядят заниженными. Во-первых, в августе-сентябре 2016 г. во время ежегодной экосистемной съёмки Баренцева моря аномалии температуры воды в районе разреза «Кольский меридиан» были примерно в два раза выше восстановленных значений. Во-вторых, наблюдения, выполненные на разрезе в ноябре и декабре 2017 г., показали, что фактические аномалии температуры воды ($0,70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,90\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно) были гораздо выше, чем восстановленные ($-0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно).

В результате было принято решение использовать для восстановления данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» третий подход, а именно: модельные данные, полученные с помощью океанографической модели NEMO. Восстановленные значения температуры представлены в табл. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для восстановления пропусков данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» рассмотрены и реализованы три подхода,

Таблица 4. Статистики абсолютной ошибки для разных подходов восстановления данных на разрезе «Кольский меридиан» на примере центрального участка (станции 3–7) и слоя 0–200 м за период с 2007 г. по 2017 г.

Статистика абсолютной ошибки, $^{\circ}\text{C}$	Подход восстановления данных*		
	1	2	3
Среднее значение	0,10	0,35	0,13
$2,5\sigma$ (σ — стандартное отклонение)	0,40	1,32	0,42
Максимальное значение	1,02	2,54	0,54

* Расшифровка подходов дана в разделе «Материал и методика».

Таблица 5. Средние значения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016 г. и 2017 г. (восстановленные значения выделены жирным шрифтом)

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Станции 1–3 (Прибрежная ветвь Мурманского течения), слой 0–50 м												
2016	4,84	4,02	3,58	3,57	4,47	5,39	7,19	8,37	8,74	8,13	7,26	6,03
2017	5,11	4,39	3,90	3,56	3,89	4,82	6,71	8,35	8,55	7,62	6,79	5,87
Станции 1–3 (Прибрежная ветвь Мурманского течения), слой 0–200 м												
2016	5,06	4,26	3,80	3,68	4,13	4,35	5,10	5,62	6,16	6,84	7,00	5,94
2017	5,07	4,37	3,92	3,53	3,68	4,19	5,04	5,90	6,43	6,38	6,36	5,87
Станции 1–3 (Прибрежная ветвь Мурманского течения), слой 50–200 м												
2016	5,18	4,49	3,94	3,75	4,01	3,86	4,17	4,42	5,08	6,37	6,92	5,91
2017	5,06	4,35	3,93	3,52	3,59	3,96	4,25	4,81	5,53	5,87	6,26	5,87
Станции 3–7 (Основная ветвь Мурманского течения), слой 0–50 м												
2016	4,91	4,40	4,33	4,39	4,85	5,78	7,68	8,72	8,30	7,54	6,45	5,65
2017	5,09	4,68	4,40	4,14	4,40	4,90	6,80	7,98	8,09	7,35	6,18	5,61
Станции 3–7 (Основная ветвь Мурманского течения), слой 0–200 м												
2016	5,23	4,84	4,68	4,55	4,50	5,05	5,56	5,83	5,92	6,08	5,98	5,64
2017	5,25	4,94	4,70	4,36	4,52	4,49	5,13	5,54	5,82	5,92	5,65	5,44
Станции 3–7 (Основная ветвь Мурманского течения), слой 50–200 м												
2016	5,33	4,99	4,80	4,62	4,36	4,66	4,72	4,73	4,98	5,44	5,70	5,50
2017	5,17	4,87	4,66	4,30	4,42	4,35	4,57	4,73	5,07	5,44	5,45	5,39
Станции 3–7 (Основная ветвь Мурманского течения), слой 150–200 м												
2016	5,28	5,11	4,87	4,55	4,01	4,55	4,60	4,46	4,56	4,85	5,00	5,09
2017	5,02	4,88	4,79	4,40	4,49	4,17	4,24	4,36	4,53	4,80	4,94	5,13
Станции 8–10 (Центральная ветвь Нордкапского течения), слой 0–50 м												
2016	4,51	4,15	3,94	3,88	4,40	5,33	6,97	8,12	7,59	6,93	5,68	4,93
2017	4,30	4,04	4,04	3,88	4,02	4,48	5,84	7,04	7,19	6,53	5,37	4,75
Станции 8–10 (Центральная ветвь Нордкапского течения), слой 0–200 м												
2016	4,48	4,07	3,84	3,68	3,85	4,28	4,92	5,38	5,62	5,73	5,26	4,74
2017	4,15	3,89	3,89	3,69	3,81	3,85	4,48	4,89	5,19	5,13	5,15	4,54
Станции 8–10 (Центральная ветвь Нордкапского течения), слой 50–200 м												
2016	4,47	4,04	3,81	3,61	3,66	3,98	4,25	4,46	4,96	5,34	5,12	4,69
2017	4,11	3,85	3,85	3,64	3,75	3,63	4,02	4,17	4,51	4,66	5,05	4,48
Станции 8–10 (Центральная ветвь Нордкапского течения), слой 150–200 м												
2016	4,36	3,92	3,65	3,40	3,31	3,56	3,78	3,89	4,18	4,67	4,47	4,43
2017	4,02	3,75	3,65	3,35	3,46	3,28	3,51	3,64	3,82	3,84	4,51	4,20

основанные на использовании (1) внутренней структуры ряда данных самого разреза «Кольский меридиан», (2) метода множественной линейной регрессии и данных с других стандартных разрезов, (3) модельных данных с сайта Copernicus [Global ocean..., 2018].

Использование модельных данных с сайта Copernicus (океанографическая модель NEMO) для восстановления пропусков показало наилучший результат, и этот подход был использован для окончательного восстановления отсутствующих данных.

За каждый месяц с июня 2016 г. по май 2017 г. восстановлены средние значения температуры воды в слоях 0–50, 0–200, 50–200 и 150–200 м на внутреннем, центральном и внешнем участках разреза «Кольский меридиан».

В дальнейшем планируется выполнить аналогичную работу для восстановления данных по солёности воды.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П. 1997. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». Мурманск: Изд-во ПИНРО. 40 с.
- Алексеев А.П., Семенов А.В., Боровков В.А., Терещенко В.В., Шлейник В.Н. 2005. История океанографических исследований на разрезе «Кольский меридиан» // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море. Сб. докл. Междунар. симпозиума. Мурманск: Изд-во ПИНРО. С. 4–14.
- Бойцов В.Д., Карсаков А.Л., Аверкиев А.С., Густоев Д.В., Карпова И.П. 2010. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // Учёные записки РГГМУ. № 15. С. 135–149.
- Бочков Ю.А. 1982. Ретроспектива температуры воды в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900–1981 гг.) // Экология и промысел донных рыб Северо-Европейского бассейна. Мурманск: ПИНРО. С. 113–122.
- Геворкянц П.А. 1945. Колебания температуры воды на Кольском меридиане и причины этого явления // Проблемы Арктики. № 5–6. С. 5–16.
- Зайцев Г.Н. 1967. Новые данные о среднегодовых температурах воды на Кольском меридиане // Труды ВНИРО. Т. 62. С. 256–267.
- Ижевский Г.К. 1961. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. М.: Пищепромиздат. 215 с.
- Ижевский Г.К. 1964. Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб. М.: Изд-во ВНИРО. 165 с.
- Карсаков А.Л. 2007. Закономерности и особенности режима вод Баренцева моря (по наблюдениям на вековом разрезе «Кольский меридиан»). Дисс. ... канд. геогр. наук. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН. 198 с.
- Карсаков А.Л. 2009. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море в 1900–2008 гг. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 139 с.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Mar. Sci. 69(5): 833–840.
- Global ocean 1/12° physics analysis and forecast. Copernicus Marine environment monitoring service. Accessible via: <http://marine.copernicus.eu>. 20.04.2018.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A., Hughes S.L. (Eds). 2018. ICES Report on Ocean Climate 2016. ICES Cooperative Research Report No. 339. 110 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4069>.
- Madec, G. 2008. NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). France. No. 27. ISSN1288–1619.
- 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.
- Yashayaev I., Seidov D. 2015. The role of the Atlantic water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents seas // Progress in Oceanography. V. 132. P. 68–127.

Поступила в редакцию 19.07.2018 г.
Принята после рецензии 09.08.2018 г.

Habitat of aquatic biological resources Diagnosis and forecasting of habitat conditions of hydrobio

Restoration of data on water temperature in the Kola Section for 2016–2017

*A.L. Karsakov¹, A.G. Trofimov¹, V.A. Ivshin¹, M. Yu. Antsiferov¹, D.V. Gustoev²,
A.S. Averkiev²*

¹N.M. Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (FSBSI «PINRO»), Murmansk

²Russian State Hydrometeorological University (FSBEI «RSHU»), Saint-Petersburg

The Kola Section is mainly located in the southern part of the Barents Sea and crosses the Atlantic waters flowing from the Norwegian Sea into the Barents Sea and further into the Arctic Basin. Observations along the section started in May 1900 and it is one of the world's longest time-series. Unfortunately, in 2016 and 2017, the Kola Section was not occupied during 12 months (from June 2016 to May 2017 inclusive); this unique time-series was interrupted. This paper presents methods and results of restoration of missed data on water temperature in the Kola Section in 2016–2017. The restoration was carried out using: (1) internal structure of data series from the Kola Section, (2) multiple linear regression method and data from other nearby sections, namely: «Fugløya–Bjørnøya» and «Vardø-N», (3) modelled data from the Copernicus website. As a result, data on water temperature in the 0–50, 0–200, 50–200 and 150–200 m layers in the inner (stations 1–3), central (stations 3–7) and outer (stations 8–10) parts of the Kola Section were restored for each month from June 2016 to May 2017.

Keywords: Barents Sea, Kola Section, water temperature, data restoration.

REFERENCES

- Averkiev A.S., Bulaeva V.M., Gustoev D.V., Karpova I.P.* 1997. Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu metoda sverkhdolgosrochnogo prognozirovaniya gidrometeorologicheskikh ehlementov (MSPGEH) i programmnoogo kompleksa «Prizma». [Methodical recommendations on using the method of long-term forecasting of hydrometeorological elements (MSPGE) and the software «Prizma»] Murmansk: Izd-vo PINRO. 40 s.
- Alekseev A.P., Semenov A.V., Borovkov V.A., Tereshchenko V.V., Shlejnik V.N.* 2005. Istoriya okeanograficheskikh issledovanij na razreze «Kol'skij meridian» [The history of oceanographic investigations along the Kola Section] // 100 let okeanograficheskikh nablyudenij na razreze «Kol'skij meridian» v Barentsevom more: Sb. dokl. Mezhdunar. simpoziuma. Murmansk: Izd-vo PINRO. S. 4–14.
- Bojtsov V.D., Karsakov A.L., Averkiev A.S., Gustoev D.V., Karpova I.P.* 2010. Issledovanie izmenchivosti gidrofizicheskikh kharakteristik po nablyudeniyam na razreze «Kol'skij meridian» [Investigation of variability in hydrophysical parameters according to observations along the Kola Section] // Uchenye zapiski RGGMU. № 15. S. 135–149.
- Bochkov Yu.A.* 1982. Retrospektiva temperatury vody v sloe 0–200 m na razreze «Kol'skij meridian» v Barentsevom more (1900–1981 gg.) [Historic data on water temperature in the 0–200 m layer in the Kola Section in the Barents Sea (1900–1981)]

- // *Ehkologiya i promysel donnykh ryb Severo-Evropejskogo bassejna*. Murmansk: PINRO. S. 113–122.
- Gevorkyants P.A.* 1945. Kolebaniya temperatury vody na Kol'skom meridiane i prichiny ehtogo yavleniya [Fluctuations in water temperature in the Kola Section and causes of this phenomenon] // *Problemy Arktiki*. № 5–6. S. 5–16.
- Zajtsev G.N.* 1967. Novye dannye o srednegodovykh temperaturakh vody na Kol'skom meridiane [New data on annual mean water temperatures in the Kola Section] // *Trudy VNIRO*. T. 62. S. 256–267.
- Izhevskij G.K.* 1961. Okeanologicheskie osnovy formirovaniya promyslovoj produktivnosti morej. [Oceanological basis for fishing productivity formation in the seas] M.: Pishchepromizdat. 215 s.
- Izhevskij G.K.* 1964. Sistemnaya osnova prognozirovaniya okeanologicheskikh uslovij i vosproizvodstva promyslovykh ryb. [Systemic basis for forecasting oceanological conditions and reproduction of commercial fishes] M.: Izd-vo VNIRO. 165 s.
- Karsakov A.L.* 2007. Zakonomernosti i osobennosti rezhima vod Barentseva morya (po nablyudeniyam na vekovom razreze «Kol'skij meridian»). [Patterns and features of the Barents Sea waters conditions (according to observations along the Kola Section)] Diss. ... kand. Geogr. nauk. Murmansk: MMBI KNTS RAS. 198 s.
- Karsakov A.L.* 2009. Okeanograficheskie issledovaniya na razreze «Kol'skij meridian» v Barentsevom more v 1900–2008 gg. [Oceanographic investigations along the Kola Section in the Barents Sea in 1900–2008] Murmansk: Izd-vo PINRO. 139 s.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G.* 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // *ICES J. of Mar. Sci.* 69(5): 833–840.
- Global ocean 1/12° physics analysis and forecast*. Copernicus Marine environment monitoring service. Accessible via: <http://marine.copernicus.eu>. 20.04.2018.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A., Hughes S.L.* (Eds). 2018. ICES Report on Ocean Climate 2016. ICES Cooperative Research Report No. 339. 110 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4069>.
- Madec, G.* 2008. NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). France. No. 27. ISSN1288–1619.
- 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.
- Yashayaev I., Seidov D.* 2015. The role of the Atlantic water in multidecadal ocean variability in the Nordic and Barents seas // *Progress in Oceanography*. V. 132. P. 68–127.

TABLE CAPTIONS

Table 1. Station coordinates and depths in the Kola Section.

Table 2. Coefficients of determination for regression models of temperature in the Kola Section.

Table 3. Coefficients of determination (R^2) of regression equations used for calculating temperature anomalies in the Kola Section.

Table 4. Absolute error statistics for different ways of data restoration in the Kola Section by the example of the central part of the section (stations 3–7) and 0–200 m layer for 2007–2017.

Table 5. Mean water temperatures in the Kola Section in 2016 and 2017 (restored values are shown in bold type).

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Position of the Kola Section in the Barents Sea (stations 1–16)

Fig. 2. Number of the Kola Section occupations for water temperature in 1900–2017

Fig. 3. Long-term (1951–2010) mean (dashed line), observed (black line) and calculated (grey line) temperatures in the 0–200 m layer in the central part of the Kola Section (stations 3–7)

Fig. 4. Distribution of observed and calculated temperatures in the central part of the Kola Section (stations 3–7) in the 0–200 m layer in June (left panel) and in the 0–50 m layer in July (right panel) for 1977–2017

Fig. 5. Long-term (1951–2010) mean (dashed line), observed (black line) and calculated with regression equations (grey line) temperatures in the 0–200 m layer in the central part of the Kola Section (stations 3–7)

Fig. 6. Distribution of observed and modelled temperature anomalies in the 0–200 m layer in the central part of the Kola Section (stations 3–7) from January 2007 to December 2014 (the dashed line shows a linear trend)

Fig. 7. Long-term (1951–2010) mean (dashed line), observed (black line) and modelled (grey line) temperatures in the 0–200 m layer in the central part of the Kola Section (stations 3–7)