

УДК 551.465

**РАЗВИТИЕ И ВАЛИДАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ NEMO ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВОД СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО
ОКЕАНА****Даньшина Анна Владимировна**

кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела океанологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург
danshina@aari.ru

Аннотация

Для воспроизведения и мониторинга климатических изменений, происходящих в структуре вод Северного Ледовитого океана, была адаптирована для Арктического региона модель NEMO. В этой статье рассматриваются все этапы ее развития и предоставляются на рассмотрение основные результаты проведенной валидации данной региональной модели на основе натурных данных, спутниковой информации и данных океанского реанализа. Анализ оценок точности и качества воспроизведения океанографических параметров показал адекватную работу модели по восстановлению термохалинных полей, полученных в ходе проведения ретроспективных расчетов.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Арктический регион, численное моделирование, модель NEMO, структура вод, гидрофизический режим

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF NEMO-BASED REGIONAL
MODEL FOR STUDYING OF THE ARCTIC OCEAN WATER STRUCTURE****Anna V. Danshina**

candidate of physics and mathematics sciences, senior researcher of the Department of Oceanology, Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute", St.Petersburg
danshina@aari.ru

ABSTRACT

The NEMO model was adapted for the Arctic region to reproduce and monitor the climate changes occurring in the Arctic Ocean water structure. The paper considers all stages of model development and the major results of regional model validation using direct observations, satellite information and ocean reanalysis data. An analysis of estimates of the accuracy and quality of reproduction of oceanographic parameters demonstrated adequate performance of the model on reconstruction of thermohaline fields obtained in the course of retrospective simulations.

Keywords: Arctic Ocean, Arctic region, numerical simulation, NEMO model, water structure, hydrophysical regime

Введение

На протяжении последних лет исследованию и освоению Арктики уделяется особое внимание [1,2]. Так в указе президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» в мерах по выполнению основных задач в сфере развития науки и технологий в интересах освоения Арктики говорится о «наращивании деятельности по проведению фундаментальных и прикладных научных исследований» [3]. Отмечается также, что риски по освоению этого региона могут возникнуть в результате «интенсивного потепления климата в Арктике, происходящего в 2 - 2,5 раза быстрее, чем в целом по планете». Следовательно, исследования изменений в структуре и режиме вод Северного Ледовитого океана (СЛО) на фоне активного трансформирования климата Арктики и реконструирование термохалинных полей и полей течений на основе численных моделей океана является важной и актуальной задачей. В данной статье рассматриваются результаты валидации региональной модели NEMO (англ. The Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO)) [4], которая была адаптирована для бассейна Северного Ледовитого океана.

Материалы и методы исследования

Используемая модель и этапы ее развития

Первый опыт работы с программным комплексом NEMO был связан с построением на его версии 3.4 конфигурации на основе глобальной модели ORCA2-LIM2 [5] с двойной телескопизацией для района Северо-Европейского бассейна, включая Белое и Баренцево моря и часть Карского. Стандартная глобальная конфигурация состоит из блока ORA – блока, описывающего гидротермодинамические процессы в океана и ледового блока LIM2 (англ. Louvain-la-Neuve sea Ice Model) [6] и основана на криволинейной триполярной сетке семейства ORCA с 2° градусным разрешением. Для региональной конфигурации модели в области СЕБ была произведена двойная телескопизация, которая заключалась в вырезании из глобальной модели двух дочерних сеток, причем первая вырезалась из глобальной, а вторая дочерняя сетка из первой дочерней сетки, чтобы детализировать расчет в районе Лофотенской котловины. Каждая дочерняя сетка телескопизировалась в 4 раза (рекомендованная максимальная величина детализации для корректной работы модели). Таким образом, пространственное разрешение во второй дочерней сетке составило около 13,75 км. Несмотря на незначительные вычислительные затраты и то, что не требовалось специально задавать граничные условия на открытых границах расчетной области за счет использования режима телескопизации, а также несмотря на адекватную работу модели, которую подтвердили результаты анализа численных экспериментов, все же разрешения по пространству в 13,75 км не хватило, чтобы воспроизвести некоторые особенности циркуляции вод в Лофотенской котловине.

Поэтому следующим этапом был переход к построению региональной конфигурации, расчетная сетка которой еще больше детализировала процессы и охватывала весь Северный Ледовитый океан и прилегающую часть Северной Атлантики. Для этой конфигурации была специально разработана ортогональной криволинейной сетка с двумя открытыми границами. Такая региональная модель была сконфигурирована на базе усовершенствованного программного комплекса NEMO v3.6 [7] и имела пространственное разрешение уже до 3 км в морях прибрежной зоны Российской Федерации. Поскольку в пакете программ модели NEMO на тот момент времени

существовала лишь стандартная региональная конфигурация без ледового блока, то сборка адаптируемой конфигурации производилась на базе глобальной конфигурации, в которой уже был подключен ледовый блок. Для достижения требуемых параметров конфигурации региональной модели с открытыми границами во время компиляции была удалена часть неиспользуемых ключей глобальной стандартной конфигурации и добавлены необходимые ключи региональной. Например, для возможности задавать граничные условия на открытых границах расчетной области был введен ключ «key_bdy», а для учета приливов, которые играют значительную роль в формировании гидродинамического режима Арктики добавлен ключа «key_tide». Подробно об используемых граничных условиях и о том, на основе каких данных задавались начальные условия и условия на открытых границах расчетной области и границе океан-атмосфера и лед-атмосфера подробно изложено в статье [8]. В дальнейшем, при задании атмосферных форсингов ушли от использования данных ERA-interim, заменив их на более качественные данные реанализа ERA-5 Европейского центра среднесрочного прогноза погоды ECMWF (англ. European Centre for Medium Range Weather Forecast) [9].

Последняя модернизация региональной конфигурации модели для Северного Ледовитого океана заключалась в переходе на программный комплекс NEMO v4.0 с учетом всех изменений при сборке региональных конфигураций, внесенных разработчиками этого пакета. Вместо ледового блока LIM в региональную модель теперь включен встроенный усовершенствованный ледовый блок SI3 (англ. Sea Ice modeling Integrated Initiative) [10], который объединяет лучшие возможности трех моделей морского льда: LIM, CICE [11], GELATO [12].

Используемые данные

С помощью этой конфигурации модели были выполнены ретроспективные расчеты для восстановления термohалинных полей, полей течения и льда в бассейне Северного Ледовитого океана. Эти данные и послужили материалами для данного исследования при проведении валидации региональной модели NEMO для арктического бассейна.

В процессе валидации региональной модели также были задействованы натурные данные, а именно данные, полученные в ходе экспедиций «NABOS», «Арктика-2018» и «Трансарктика-2019», в том числе и временные серии температуры, солёности и скоростей течений за период 2013-2015 гг. и 2015-2018 гг. с ПАБС [13] - притопленных автономных буйковых станций. Схема расположения STD-станций и ПАБС (mooring) во время экспедиции 2018 г. приведена на рисунке 1.

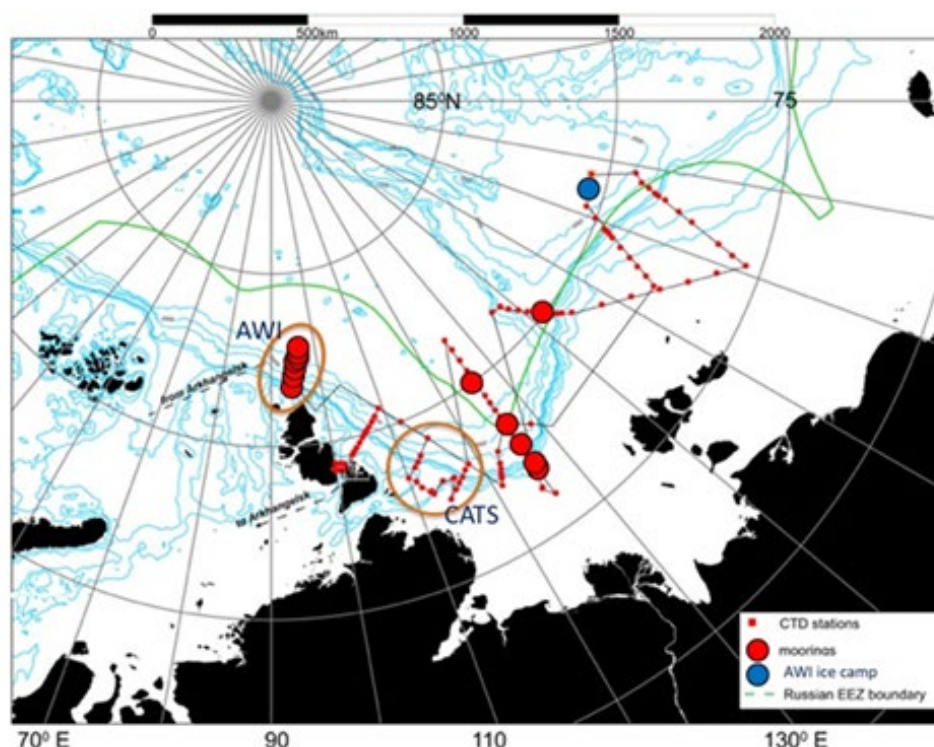


Рисунок 1. Положение СТД-станций (красные квадраты), выполненных в экспедиции 2018, и ПАБС (красные круги)

В качестве натуральных данных использовались и данные с профилографов ИТР (англ. Ice-Tethered Profiler) океанографического института WHOI (англ. Woods Hole Oceanographic Institution) [14]. Также привлекалась спутниковая информация - толщины и концентрация льда [15,16], и массивы данных океанского реанализа продукта GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 сервиса CMEMS [17].

Статистические оценки при проведении валидации модели

Валидация модели осуществлялась в основном посредством анализа статистических данных. При оценке качества воспроизведения моделью полей океанографических параметров использовались следующие статистические данные: средняя ошибка смещения (МБЕ - mean bias error), среднеквадратическая ошибка (RMSE - root mean squared error), и коэффициент корреляции (r - correlation coefficient) Пирсона [18,19]. Они вычислялись следующим образом:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

где M - модельные значения, O - наблюдаемые значения, n - длина ряда. Для оценки степени связи коэффициент корреляции дополнительно проверялся на значимость с привлечением критерия Стьюдента.

Основное внимание в статье уделено оценке качества воспроизведения моделью термохалинной структуры вод.

Результаты валидации

Одновременно с выходными данными адаптированной для Арктического региона модели NEMO по натурным и спутниковым данным анализировалось и качество зарекомендовавшего себя, как один из лучших продуктов океанского реанализа - реанализ GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030, выдающим величины океанографических и ледовых параметров в узлах регулярной сетки с пространственным разрешением по горизонтали $1/12^\circ$ и 50 расчетными уровнями по вертикали. В этом продукте учтена ассимиляция данных, что повышает его качество. В адаптированной для Арктического региона модели ассимиляция данных не используется. Разработчики GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 приводят некоторые статистические оценки его качества для всего океана в целом, основываясь на данных ассимиляции и делая упоминание, что в Арктическом регионе оценки получаются несколько хуже. В таблице 1 и 2 сведены для трех временных интервалов средние величины температуры и солёности, а также их среднеквадратическая ошибка для всего Мирового океана,

Таблица 1. Температура ($^\circ\text{C}$)

Слой, м	Период лет					
	1993-2016		1993-2005		2005-2016	
	Mean	RMSE	Mean	RMSE	Mean	RMSE
0-100	-0.05	0.97	-0.03	1	-0.07	0.91
100-300	-0.02	0.85	0.01	0.93	-0.04	0.80
300-800	-0.005	0.48	0.01	0.55	-0.01	0.43

Таблица 2. Солёность (psu)

Слой, м	Период лет					
	1993-2016		1993-2005		2005-2016	
	Mean	RMSE	Mean	RMSE	Mean	RMSE
0-100	-0.003	0.293	-0.007	0.407	-0.002	0.26
100-300	-0.007	0.165	0.015	0.249	-0.004	0.13
300-800	-0.001	0.082	0.002	0.112	-0.001	0.07

В таблицы 3 и 4 сведена статистическая информация, полученная в ходе обработки данных с ИТР-буев и экспедиционных данных зондирования на океанографических станциях. Валидация модели шла территориально неравномерно, поскольку для центральной части Северного Ледовитого океана данных натурных данных для валидации мало.

Таблица 3. Температура ($^\circ\text{C}$)

Слои, м	2015-2019 гг.					
	Океанский реанализ			Региональная модель		
	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R
0-100	-0.222	0.3788	0.68	-0.441	0.998	0.59
100-300	0.019	0.259	0.87	0.093	0.711	0.74
300-800	-0.113	0.184	0.76	-0.235	0.472	0.72

Таблица 4. Соленость (psu)

Слои, м	2015-2019 гг.					
	Океанский реанализ			Региональная модель		
	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R
0-100	0.574	0.801	0.89	0.721	0.952	0.71
100-300	-0.237	0.208	0.87	-0.346.	0.299	0.63
300-800	-0.093	0.078	0.75	0.034	0.086	0.69

Как видно из таблиц, качество данных океанского реанализа и модельных расчетов для Арктического района несколько отличается от его оценок для всего океана с учетом ассимилированных данных, что может быть связано с рядом причин. Одной из главных причин такого расхождения стало сравнение мгновенно измеренных величин в точке с проинтерполированными в эту точку из узлов расчетной сетки с 3 – 8 км разрешением и осредненными за сутки модельными данными и данными реанализа. Поскольку данные океанского реанализа предоставляются пользователям именно с таким временным осреднением, то для проведения сравнительного анализа модельные данные брались с аналогичным среднесуточным разрешением. Наличие высокоградиентных зон различной природы формирования также негативно могут сказываться на оценках качества данных численных расчетов и реанализа.

Тем не менее, степень линейной зависимости между натурными данными и модельными данными и данными реанализа высока. Все коэффициенты корреляции Пирсона положительны и значимы. Полученные статистические оценки в целом подтверждают и профили распределения температуры и солености (рисунок 2а и 2б).

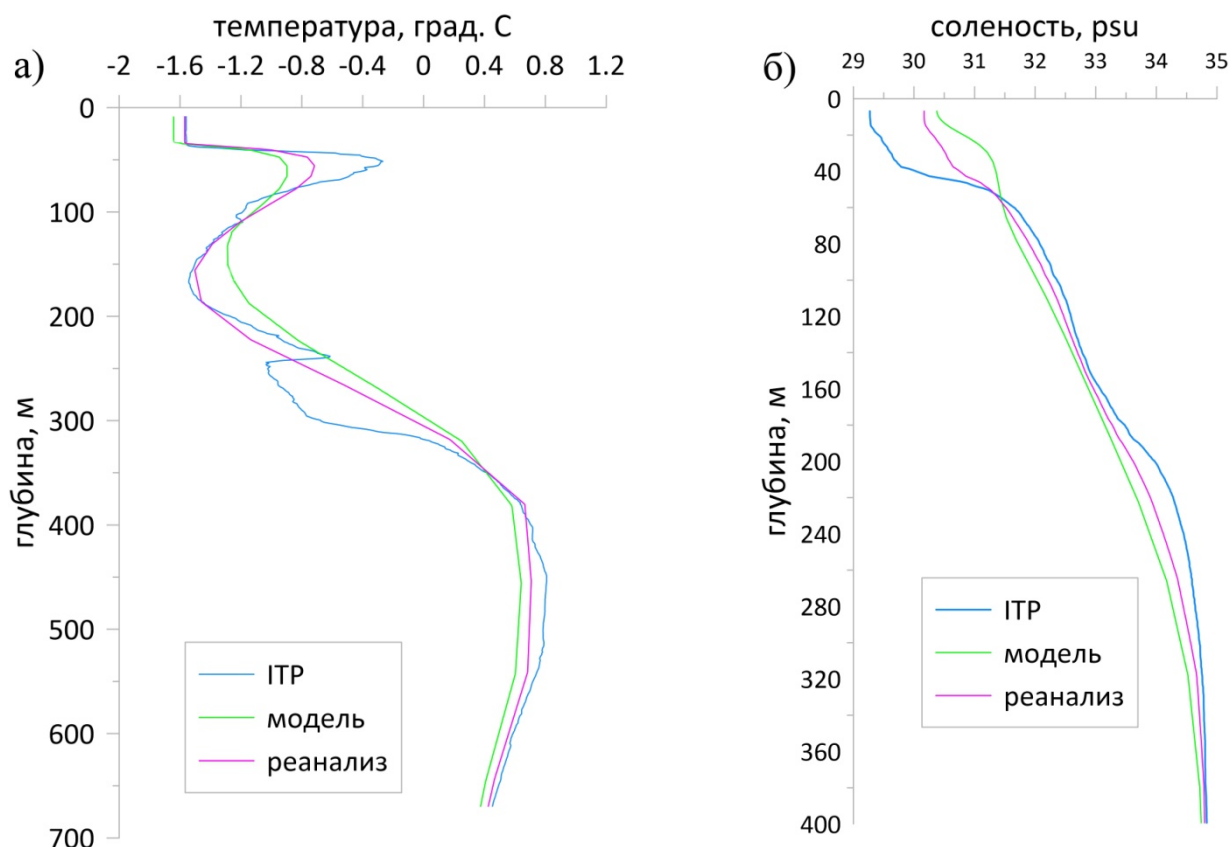


Рисунок 2. Вертикальное распределение температуры и солёности в точках измерения ИТР: (а) ИТР-108 (дата: 15.01.2018, координаты: -141.5961° з.д. и 78.3421° с.ш.) и (б) ИТР-105 (дата: 08.10.2018, координаты: -141.2172° з.д. и 80.1221° с.ш.)

Как видно, наибольшие ошибки возникают в верхнем 100 м слое. Данные реанализа меньше расходятся по величине с данными прямых измерений. Тем не менее, ни данные на основе численных расчетов даже с привлечением ассимиляции данных, ни модельные расчеты не воспроизводят полностью локальные экстремумы в вертикальной структуре вод и выдают достаточно сглаженное распределение величин океанографических параметров.

Большие расхождения с данными контактных измерений были получены при анализе многолетних рядов термохалинных параметров в точках расположения ПАБС. Эти ПАБС были установлены на континентальном склоне (рисунок 1). Координаты установки двух станций, временной ход температуры и солёности которых рассмотрен на рисунках 3 и 4, следующие: АК2 - 81.90283° с.ш. и 94.48200° в.д., М1_2 - 77.17288° с.ш. и 125.7996° в.д.

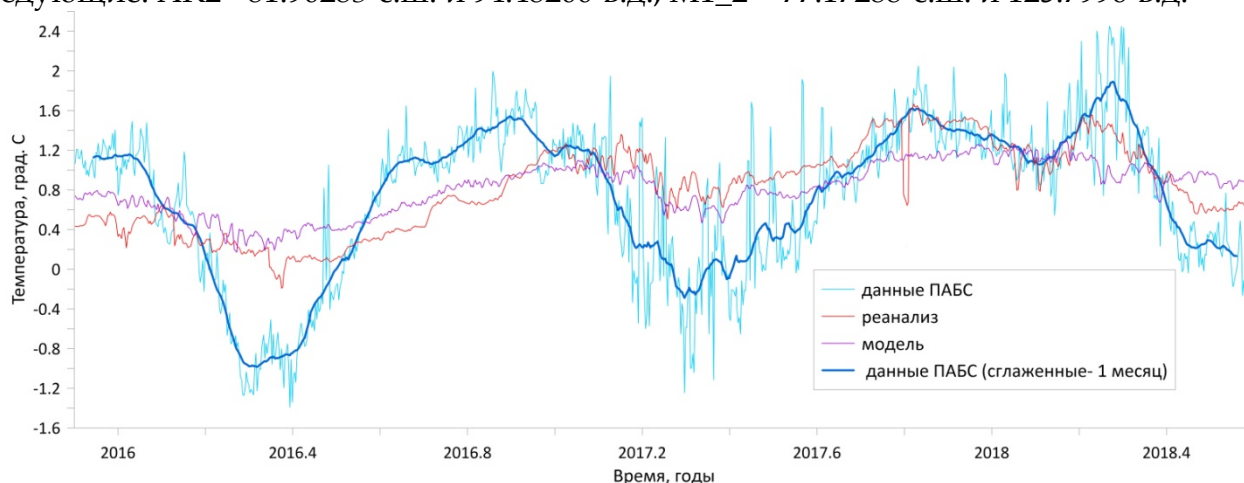


Рисунок 3. Временной ход температуры морской воды на глубине 190 м в месте установки ПАБС АК2

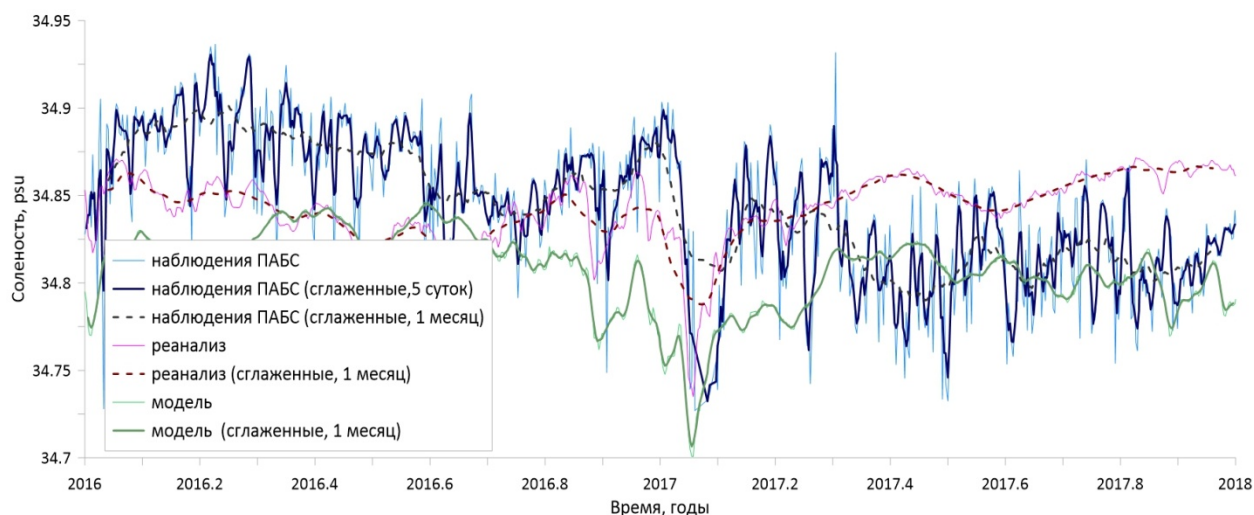


Рисунок 4. Временной ход солености морской воды на глубине 264 м в месте установки ПАБС М1_2

Полученные статистические оценки трехлетних рядов величин температуры показали, что линейная связь между натурными данными и модельными данными ($r=0.7$) и между натурными и данными реанализа ($r=0.6$) положительна, но несколько теснее между модельными данными. Причем среднеквадратическая ошибка их сопоставима. Для модельных данных она составила величину 0.628, а для реанализа - 0.629. По фазе в целом колебания величины температуры реанализа и модельных расчетов совпадают, но амплитуды колебаний натурных данных не достигают.

В случае распределения солености коэффициент Пирсона незначим и линейная связь между сравниваемыми величинами солености отсутствует. При этом ошибка смещения модельных данных отрицательная ($MBE = -0.0327$), а реанализа положительная ($MBE=0.0037$). Среднеквадратическая ошибка больше у модельной солености ($RMSE=0.0618$), чем у солености из данных реанализа ($RMSE=0.056$).

Соответствие качества полученных модельных данных данным наблюдений и данным океанского реанализа обсуждалось также в нескольких работах [20-23]. Вертикальное распределение океанографических параметров на разрезах и горизонтальные карты реконструированных термохалинных полей отражают основные структурные особенности водных масс СЛО и в целом соответствуют аналогичным распределениям, построенным по натурным данным (рисунок 5).

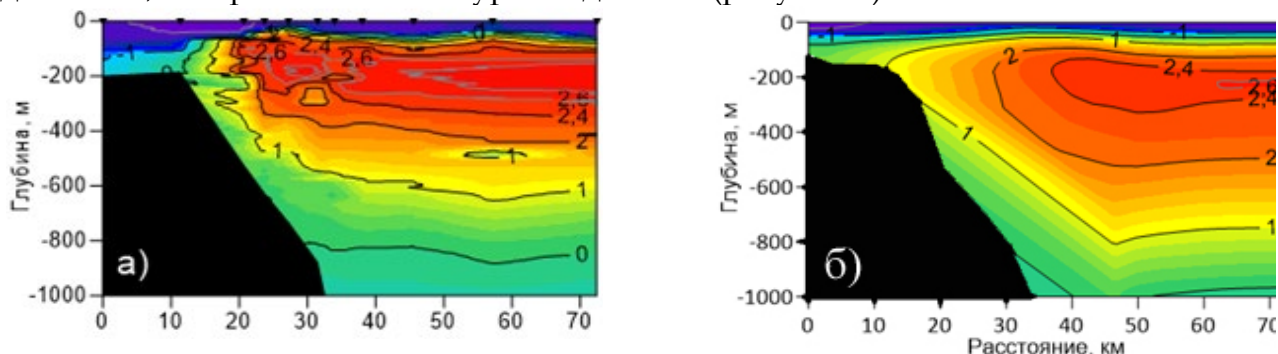


Рисунок 5. Распределение температуры морской воды ($^{\circ}\text{C}$) на разрезе в районе желоба Франц Виктория по данным контактных измерений (а) и численных расчетов на региональной модели NEMO (б)

Что касается оценки качества воспроизведения скоростей течений и льда, то стоит отметить, что модель достаточно реалистично описывает их распределения. Тем не менее, особенно в зимний период в СЛО занижается концентрация льда в районе кромки. Модуль

и направление течений также может отличаться от измеренного, что хорошо показывают статистические оценки, сделанные в процессе валидации модели по данным с ПАБС. Расхождение по модулю скорости в среднем составило до 17 %.

Заключение

В процессе проведения валидации региональной конфигурации модели NEMO было установлено, что горизонтальные и вертикальные распределения океанографических параметров с суточным осреднением, реконструированные по данным модельных расчетов соответствуют аналогичным распределениям, построенным по данным контактных наблюдений и данным океанского реанализа продукта GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 сервиса CMEMS. Проведенные ретроспективные расчеты позволили выделить известные из наблюдений и характерные для рассмотренного региона Арктического бассейна, где проводились экспедиционные исследования, структурные слои. Анализ полученных статистических ошибок также подтверждает, что качество модельных данных достаточно удовлетворительно для воспроизведения полей океанографических параметров.

Таким образом, можно сказать, что с помощью данной региональной модели NEMO можно реконструировать поля океанографических параметров, осуществлять мониторинг, ставить эксперименты и проводить исследования климатической изменчивости структуры вод Северного Ледовитого океана.

Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по теме 5.1.4 плана НИТР Росгидромета.

Список литературы:

1. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика, No2 (6), 2012. С.66-79.
2. Хлебникова Е.И, Катцов В.М., Пикалева А.А., Школьник И.М. Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории Российской Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология, 2018, №6. С. 5-19.
3. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [Электронный ресурс]: Президент России. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972/page/1> (дата обращения 12.08.2022).
4. About NEMO [Электронный ресурс]: NEMO.URL: <https://www.nemo-ocean.eu> (дата обращения: 25.07.2022).
5. Explore the test cases [Электронный ресурс]: NEMO User Guide.URL: <https://sites.nemo-ocean.io/user-guide/tests.html> (дата обращения: 25.07.2022).
6. Vancoppenolle M., Bouillon S, Fichet T., Goosse H., Lecomte O., Maqueda M.A.M., Madec G. LIM. The Louvain-la-Neuve sea Ice Model // Note du Pôle de modélisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace, № 31, 2012. 85pp.
7. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable // Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, № 27, 2016. 396 pp.
8. Даньшина А.В. Влияние теплозапаса деятельного слоя Восточно-Сибирского моря на эволюцию ледяного покрова // Оригинальные исследования, Т.8, № 5, 2018. С. 4-15.

9. ERA5.Datasets. [Электронный ресурс] ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения: 28.04.2022).
10. NEMO Sea Ice Working Group. **Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI3) – The NEMO sea ice engine**//*Scientific Notes of Climate Modelling Center*. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) №31, 2018.Р.69 – ISSN 1288-1619.
11. About CICE [Электронный ресурс] CICE Documentation. URL: <https://cice-consortium-cice.readthedocs.io/en/main/intro/about.html> (дата обращения: 28.09.2022).
12. GELATO (Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean model) [Электронный ресурс] OpenGMS. URL: <https://geomodeling.njnu.edu.cn/modellItem/f19d2f3b-6ee2-4ec3-bc38-731eaeaa85e0#4> (дата обращения: 28.09.2022).
13. NABOS/CABOS DATA [Электронный ресурс] Nansen and Amundsen Basins Observational System. URL: <https://nabos.iarc.uaf.edu/NABOS2/data/registered/main.php> (дата обращения: 25.05.2022).
14. Ice-Tethered Profiler.Data. [Электронный ресурс] Woods Hole Oceanographic Institution. URL: <https://www2.whoi.edu/site/itp/data/> (дата обращения: 11.05.2022).
15. German Ministry of Economic Affairs and Energy (grant: 50EE1008) [Электронный ресурс] ice thickness data from 20101107 to 20220501 obtained URL: <https://www.meereisportal.de> (grant: REKLIM-2013-04) (дата обращения: 12.05.2022).
16. MASAM2: Daily 4 km Arctic Sea Ice Concentration, Version 1 (G10005)) [Электронный ресурс] National Snow and Ice Data Center URL:<https://nsidc.org/data/g10005/versions/1>(дата обращения: 12.05.2022).
17. Access data [Электронный ресурс] Copernicus Marine environment monitoring service (CMEMS) URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&task=results (дата обращения: 22.01.2022).
18. Solano M., Canals M., Leonard S. Development and validation of a coastal ocean forecasting system for Puerto Rico and the U.S. virgin islands// *Journal of Ocean Engineering and Science* , V.3, 2018. P. 223–236.
19. Quality Information Document (CMEMS-GLO-QUID-001-030). [Электронный ресурс] URL: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf> (дата обращения: 05.02.2022).
20. Иванов В.В., Даньшина А.В., Смирнов А.В. Разработка объединенных схем пространственного распределения гидрофизических характеристик на основе данных наблюдений, моделирования и реанализа // Сборник материалов XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований», 2021. P.23-24.
21. Даньшина А. В. Результаты валидации региональной конфигурации модели NEMO для исследований климатических изменений в структуре вод Северного Ледовитого океана // *Моря России: вызовы отечественной науки тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 26–30 сентября 2022 г.* – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. С.74-75.

22. Иванов В. В., Данышина А. В., Смирнов А. В. Сезонная изменчивость гидрофизической структуры вод к северу от архипелага Северная Земля по данным наблюдений реанализа и моделирования // *Моря России: вызовы отечественной науки тезисы докладов Всероссийской научной конференции*, Севастополь, 26–30 сентября 2022 г., 2022. С.202-204.

References:

1. Kattsov V. M., Porfir'ev B. N. Climate Changes in the Arctic: Impact on Environment and Economy // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*, No. 2 (6), 2012. P.66-79.
2. Khlebnikova E.I., Kattsov V.M., Pikaleva A.A., Shkolnik I.M. Assessment of climate change impacts on the economic development of the Russian Arctic in the 21st century. *Russian Meteorology and Hydrology*, T. 43, № 6, 2018. С. 347-356.
3. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 26.10.2020 № 645 «O Strategii razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2035 goda» [Electronic resource]: President of Russia. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972/page/1> (date of reference: 12.08.2022).
4. About NEMO. [Electronic resource] NEMO.URL: <https://www.nemo-ocean.eu> (date of reference: 1.07.2022).
5. Explore the test cases [Electronic resource]: NEMO User Guide.URL: <https://sites.nemo-ocean.io/user-guide/tests.html> (date of reference: 25.07.2022).
6. Vancoppenolle M., Bouillon S, Fichet T., Goosse H., Lecomte O., Maqueda M.A.M., Madec G. LIM. The Louvain-la-Neuve sea Ice Model // *Note du P^ole de mod^elisation de l'Institut Pierre-Simon Laplace*, № 31, 2012. 85pp.
7. Madec G. NEMO ocean engine, Version 3.6 stable // *Note du P^ole de mod^elisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*, № 27, 2016. 396 pp.
8. Danshina A.V. Heat content effect of the active layer on the ice cover evolution in the East Siberian // *Original Research*, V.8, № 5, 2018. P. 4–15.
9. ERA5.Datasets. [Electronic resource] ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (date of reference: 28.04.2022).
10. NEMO Sea Ice Working Group. **Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI3) – The NEMO sea ice engine**//*Scientific Notes of Climate Modelling Center*. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) №31, 2018.P.69 – ISSN 1288-1619.
11. About CICE [Electronic resource] CICE Documentation. URL: <https://cice-consortium-cice.readthedocs.io/en/main/intro/about.html> (date of reference: 28.09.2022).
12. GELATO (Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean model) [Electronic resource] OpenGMS. URL: <https://geomodeling.njnu.edu.cn/modelItem/f19d2f3b-6ee2-4ec3-bc38-731eaeaa85e0#4> (date of reference: 28.09.2022).
13. NABOS/CABOS DATA [Electronic resource] Nansen and Amundsen Basins Observational System. URL: <https://nabos.iarc.uaf.edu/NABOS2/data/registered/main.php> (date of reference: 25.05.2022).

14. Ice-Tethered Profiler.Data. [Electronic resource] /itp/data/ (date of reference: 11.05.2022).
15. German Ministry of Economic Affairs and Energy (grant: 50EE1008) [Электронный ресурс] ice thickness data from 20101107 to 20220501 obtained URL: <https://www.meereisportal.de> (grant: REKLIM-2013-04). (date of reference: 12.05.2022). (date of reference: 12.05.2022).
16. MASAM2: Daily 4 km Arctic Sea Ice Concentration, Version 1 (G10005) [Electronic resource] National Snow and Ice Data Center URL:<https://nsidc.org/data/g10005/versions/1>(date of reference: 12.05.2022).
17. Access data [Electronic resource] Copernicus Marine environment monitoring service (CMEMS) URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&task=results (date of reference: 22.01.2022).
18. Solano M., Canals M., Leonard S. Development and validation of a coastal ocean forecasting system for Puerto Rico and the U.S. virgin islands// Journal of Ocean Engineering and Science , V.3, 2018. P. 223–236.
19. Quality Information Document (CMEMS-GLO-QUID-001-030). [Electronic resource] URL: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf> (date of reference: 05.02.2022).
20. Ivanov V.V., Danshina A.V., Smirnov A.V. Development of joint schemes of spatial distribution of hydrophysical characteristics based on observation data, modeling and reanalysis // Modern methods and means of oceanological research”. Proceedings of the XVII International Conference MSOI-2021, Vol. II. – Moscow: Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 2021. P.23-24.
21. Danshina A. V. Results of validation of the NEMO-based regional configuration for studying climate changes in theArctic Ocean water structure //All-russian scientific conference the seas of Russia: challenges of the national science (Sevastopol, 26–30 september 2022) .Proceedings, 2022. C.74-75.
22. Ivanov V. V., Danshina A. V., Smirnov A. V. Seasonal variability in the hydrophysical structure of waters to the northof Severnaya Zemlya Archipelago based on observations, reanalysis and modeling //All-russian scientific conference the seas of Russia: challenges of the national science (Sevastopol, 26–30 september 2022) .Proceedings, 2022. P. 202-204.