

Факторы, снижающие эффективность работы систем оперативных океанографических прогнозов в Арктическом бассейне

© 2017 В.Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: v.belokopytov@gmail.com

Поступила в редакцию 22.12.2016 г.

Степень достоверности прогнозируемых полей в Арктическом бассейне ограничена рядом проблем, в первую очередь связанных с недостатком оперативной информации. Из-за наличия ледяного покрова спутниковая информация об уровне океана и температуре поверхности моря либо полностью недоступна, либо доступна на части акватории в летний сезон. Количество *CTD* измерительных систем, работающих в оперативном режиме (3 – 5 зондов), недостаточно. Количество работающих буев-термопрофилемеров, глубина зондирования которых ограничена 60 м, в Арктике также невелико. Недостаточность пространственного разрешения доступной альтиметрической информации (14 км) по сравнению с радиусом Россби в Северном Ледовитом океане (2 – 12 км) требует тщательного анализа конкретных целей работы оперативной системы. Основным фактором, способствующим повышению достоверности прогнозирования, является то, что ключевые океанографические районы – восточная часть Норвежского и Гренландского морей, Баренцево море, Чукотское море с Беринговым проливом, где происходит поступление и трансформация атлантических и тихоокеанских вод, а также формирование структуры галоклина, – частично или полностью свободны от льда и значительно лучше обеспечены оперативной информацией.

Ключевые слова: Арктика, оперативная океанология, мониторинг океана, термохалинная структура.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-21-27

Введение. Отечественная практика морских прогнозов в Арктике имеет длительную историю, связанную с освоением и обслуживанием Северного морского пути. В первую очередь это касается ледовых прогнозов, которыми традиционно занимается Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ). В настоящее время стали широко доступны оперативные краткосрочные прогнозы циркуляции вод и гидрологических полей Мирового океана, в том числе в Арктическом бассейне. Из зарубежных примеров можно привести Службу мониторинга морской среды *Copernicus*, которая включает арктический блок на базе модели *HYCOM*, ежедневно осуществляющий 10-дневный цикл прогноза с пространственным разрешением 12,5 км, и глобальный блок на базе модели *NEMO* с разрешением 1/12°. В России для этих целей разработан и функционирует оперативный модуль ЕСИМО «Анализ гидрофизических полей в океане» Росгидромета. Возможность применения полных моделей циркуляции океана в оперативной практике стала реальностью благодаря развитию региональных моделей Северного Ледовитого океана [1 – 5]. По сравнению с другими районами Мирового океана повышение достоверности прогнозируемых полей в Арктическом бассейне ограничено рядом проблем различной степени сложности, в первую очередь связанных с недостатком оперативной информации.

Оперативная океанографическая информация. Широко используемая в оперативных моделях спутниковая океанографическая информация об уровне океана и температуре поверхности моря на большей части акватории Арктического бассейна либо полностью недоступна из-за наличия ледяного покрова, либо доступна только в летний сезон. Информация о температуре воды, даже при отсутствии льда, очень часто ограничена в связи с наличием облачности.

Отсутствие регулярной информации о речном стоке в арктические моря при использовании диагностических моделей обычно компенсируется климатическими среднегодовыми или сезонными значениями. Но для оперативного прогноза, в особенности для шельфа и континентального склона, этого явно недостаточно, учитывая очень большой сток рек (сравнимый с самыми увлажненными экваториальными районами) и его значительную временную изменчивость.

Ассимиляция текущей гидрологической информации в системах оперативного прогноза океана во многом основана на работе буев *Argo* [6]. В Норвежском и Гренландском морях плотность покрытия системой *Argo* сопоставима с другими районами океана, но в Арктический бассейн – в Баренцево море или к северному побережью о. Шпицберген из-за особенностей циркуляции вод проникают только отдельные буи. Аналогичная ситуация складывается в Американо-Азиатском бассейне, где движение буев *Argo* обычно ограничено глубоководной частью Берингова моря.

Запуск стандартных буев *Argo* непосредственно в Арктическом бассейне неминуемо приведет к быстрой потере связи с ними, поэтому на данный момент наиболее доступна информация от поверхностных дрейфтеров типа *SVP*, *DB*, *PAW*, *IABP*, *ICEBALL*, *AXIB* и др. [7] о значениях температуры поверхностного слоя воды и координатах буя.

Первые версии модифицированных буев *Argo*, которые жестко фиксировались во льду (*Salargos Buoy*, *Polar Ocean Profile Buoy*), появились в 1985 – 1994 гг. В рамках различных международных программ, таких как *International Arctic Buoy Programme*, были разработаны новые системы: *Polar Ocean Profiling System (POPS)* с зондированием до 1000 м, *Ice-Tethered Profiler (ITP)*, работающая до 500 – 800 м, *Ice-Atmosphere-Arctic Ocean Observing System (IAOOS)*, применявшаяся на российской дрейфующей станции «Барнео». Однако количество подобных измерительных систем, работающих в оперативном режиме, очень мало – одновременно в Арктике находится не более 3 – 5 зондов. К примеру, в Черном море, которое по площади в 20 – 30 раз меньше Арктического бассейна, работают 7 – 10 буев *Argo*.

Определенный вклад в увеличение объема оперативной информации о вертикальных профилях могут внести термопрофилирующие дрейфтеры, эксплуатация которых поддерживается в рамках международной программы *UpTempO* [8], в том числе буи, изготавливаемые в Морском гидрофизическом институте Российской академии наук. Их достоинства заключаются в мень-

шей стоимости изготовления по сравнению с буями типа *Argo* и в повышенной временной дискретности измерений. К недостаткам следует отнести то, что длина термокосы ограничена 60 м, а добавление датчика электропроводности (солености) пока еще не реализовано. Количество одновременно работающих буев-термопрофилемеров в Арктике так же невелико, как и количество *CTD*-буев.

Определенный потенциал заложен в дальнейшем развитии международной программы попутных судовых наблюдений (*VOS*) [9] с использованием обрывных зондов *XBT* и *XCTD* и проточных систем типа *FerryBox* (программа *GOSUD* [10]). В настоящее время информация из Арктического бассейна в рамках этой программы поступает только из моря Бофорта и Чукотского моря во время навигации в водах Аляски. Есть потенциальная перспектива увеличить этот поток данных, используя морской транспорт на трассах Севморпути, а также в туристических круизах.

Следует также отметить, что кроме недостатка океанографической информации дополнительные сложности для прогнозирования в Арктике создаст необходимость выбора ледового блока для общей модели. От реализации термодинамической модели морского ледяного покрова, учитывающей снежный покров, термодинамику и реологию льда, зависят оценки многих физических процессов: ледообразование/таяние, модифицированное льдом тангенциальное напряжение трения ветра, интенсивность халинной конвекции и др. Отсутствие информации о всех необходимых параметрах льда, при всем прогрессе спутниковых методов мониторинга ледяного покрова, увеличивает неопределенность результатов расчетов общей совместной модели.

Учет особенностей гидрологической структуры Арктики. С учетом сложностей развертывания широкой системы мониторинга в Арктическом бассейне возникает вопрос о самой возможности достоверных оперативных прогнозов в условиях недостатка информации. Поэтому имеет смысл рассмотреть потенциальную обеспеченность информацией в ключевых районах, важных для формирования термохалинной структуры в целом по бассейну.

Представления об океанографии Арктики, ведущие начало с работ Ф. Нансена, были развиты советской школой арктических исследований и постоянно уточняются в современный период в рамках различных международных проектов [2, 3, 11 – 19]. Из внешних факторов, формирующих океанографические характеристики бассейна, наиболее известный – поступление атлантических (теплых и соленых) и тихоокеанских (распресненных) вод в виде хорошо выраженных струйных потоков. Другой отличительной особенностью гидрологии Арктики является решающая роль солености в вертикальной стратификации вод, что связано с большим притоком пресных вод за счет речного стока и сезонного таяния льда, а также с преобладающим влиянием изменений солености на плотность при низких температурах воды.

Сложная система галоклина в разных частях бассейна во многом связана с адвекцией опресненных вод из определенных географических районов.

Непосредственные измерения расходов двух ветвей входящих атлантических вод, которые регулярно проводятся в проливе Фрама и в юго-западной части Баренцева моря, пока не стали общедоступной частью системы оперативного мониторинга. К тому же оценки объемов притока этих вод в литературе имеют достаточно широкий разброс, что обусловлено сложностью учета рециркуляции и синоптической изменчивости. Граничные условия водообмена для оперативных моделей могут быть заданы из расчетов по глобальным или региональным моделям Норвежского моря, которые хорошо обеспечены альтиметрической и гидрологической информацией. Узость и мелководность Берингова пролива дает возможность оценивать поток тихоокеанских вод по перепаду уровня моря между океанами, но только в период отсутствия льда в Чукотском и Беринговом морях.

Один из районов формирования галоклина промежуточного слоя находится в бассейне Нансена, где в процессе зимней конвекции из модифицированных атлантических вод ветви пролива Фрама образуется перемешанный слой. Для периода термической стадии конвекции есть возможность использования спутниковой информации о температуре поверхности моря вплоть до начала ледообразования. Полную картину развития конвекции можно получить только с помощью *CTD*-буев, так как толщина перемешанного слоя достигает 100 м, а термофилирующие дрейфтеры имеют ограничения по глубине зондирования.

Другой район формирования галоклина промежуточного слоя – северная часть Баренцева моря, где образуются более холодные и пресные воды, распространяющиеся с Арктическим циркумполярным течением далеко на восток, вплоть до Канадского бассейна. В центральной и восточной части Баренцева моря происходит трансформация атлантических вод, поступающих с баренцевоморской ветвью из Норвежского моря. Вынос через глубоководный желоб Св. Анны этих вод, более холодных, пресных и стратифицированных, чем воды из ветви пролива Фрама, рассматривается в литературе как существенный вклад в термохалинную структуру и общую завихренность циклонической циркуляции Арктического бассейна. Значительная акватория моря, свободная от льда, позволяет круглогодично использовать для расчетов оперативную спутниковую информацию.

Поступающие в Чукотское море из Берингова пролива двумя потоками тихоокеанские воды формируют верхнюю часть галоклина промежуточного слоя в Амеразийском бассейне. Здесь образуется наиболее сложная структура галоклина в виде комбинации атлантических и тихоокеанских вод, разделенных между собой по вертикали халосядом. Если различия характеристик галоклина в атлантических водах обусловлены отличиями океанографических условий в Баренцевом море и в открытых водах бассейна Нансена, то особенности тихоокеанского галоклина – зимняя и летняя модификации бе-

ринговоморских вод – вызваны сезонной изменчивостью в Чукотском море. Процессы формирования летней модификации данной водной массы благодаря отсутствию ледяного покрова можно отслеживать спутниковыми средствами. Данные о распределении основных водных масс Канадского бассейна можно получить только с помощью *CTD*-буев. Термопрофилирующие дрейфтеры могут отслеживать лишь летнюю модификацию беринговоморских вод, так как ее нижняя граница залегает на глубине 50 – 60 м. Как и в Баренцевом море, поступление тихоокеанских вод через Чукотское море рассматривается как существенный вклад в термохалинную структуру и общую завихренность циркуляции бассейна.

Еще один важный процесс, влияющий на термохалинную структуру вод бассейна, – вынос распресненных вод шельфа окраинных морей в океан. Наиболее сильно он выражен в море Лаптевых, куда, кроме стока Лены, из Карского моря через пролив Вилькицкого поступает основная часть объема вод Оби, Енисея, Таза и других рек. Отсутствие оперативной информации о солености значительно осложняет не только воспроизведение характеристик поверхностного галоклина и кросс-шельфового обмена, но и оценку формирования собственных глубинных вод бассейна, которое связано с процессом погружения плотных вод по материковому склону. В перспективе основным источником информации о поверхностной солености могут стать дрейфтеры с датчиками электропроводности или новые спутниковые сканеры типа *Aquaris*, которые пока имеют невысокую точность и пространственное разрешение 100 км.

Пространственный масштаб синоптических движений в Мировом океане резко уменьшается от низких широт к высоким [20]. Для Арктического региона радиус Россби в Евразийском и Амеразийском бассейнах составляет 8 – 12 км, для окраинных морей — 2 – 3 км [21], что подтверждается и инструментальными наблюдениями вихрей [22]. В связи с этим встает вопрос о недостаточности пространственного разрешения доступной альтиметрической информации (14 км) в морях Северного Ледовитого океана, что требует тщательного анализа конкретных практических целей работы оперативной системы прогноза и определения оптимальных пространственно-временных масштабов.

Заключение. Прогнозирование океанографических характеристик в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана представляет собой чрезвычайно сложную задачу, требующую учета значительно большего по сравнению с другими районами Мирового океана числа физических процессов в условиях крайнего недостатка оперативной информации.

Определенный оптимизм в достижении приемлемых результатов работы прогностических систем внушает то, что ключевые океанографические районы, оказывающие влияние на весь бассейн – восточная часть Норвежского и Гренландского морей, Баренцево море, Чукотское море с Беринговым проли-

вом, – частично или полностью свободны от льда и значительно лучше обеспечены оперативной информацией.

Перспективы улучшения возможностей системы мониторинга и прогноза в Арктике видятся в привлечении морского транспорта на трассах Севморпути к программе попутных судовых наблюдений, в быстром развитии спутниковых сенсоров определения солености и в увеличении количества зондирующих и профилирующих CTD-буев.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Proshutinsky A., Yang J., Krishfield R. et al.* Arctic Ocean Study: Synthesis of model results and observations // EOS Trans. Amer. Geophys. Union. – 2005. – 86, No. 40. – P. 368 – 371.
2. *Aksenov Y., Ivanov V.V., Nurser A.J.G. et al.* The Arctic Circumpolar Boundary Current // J. Geophys. Res. – 2011. – 116, No. C9. – C09017.
3. *Aksenov Y., Bacon S., Coward A.C. et al.* The North Atlantic inflow to the Arctic Ocean: High-resolution model study // J. Mar. Syst. – 2010. – 79, No. 1. – P. 1 – 22.
4. *Голубева Е.Н., Платов Г.А., Якишина Д.Ф.* Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана // Лед и снег. – 2015. – № 2 (130). – С. 81 – 92.
5. *Платов Г.А.* Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Ч. II. Результаты региональных и глобальных расчетов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – 47, № 3. – С. 409 – 425.
6. <http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection>.
7. http://iabp.apl.washington.edu/maps_daily_table.html.
8. <http://psc.apl.washington.edu/UpTempO/Data.php>.
9. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/vosclim/data-management-and-access>.
10. <http://www.gosud.org/Data-access/Web-access>.
11. *Nansen F.* Oceanography of the North Polar Basin. The Norwegian North Polar Expedition 1893 – 1896 // Scientific Results. Vol. 3 (9). – New York: Greenwood Press, 1902. – 427 p.
12. *Тимофеев В.Т.* Водные массы Арктического бассейна. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 191 с.
13. *Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 269 с.
14. *Rudels B., Jones E.P., Schauer U. et al.* Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters // Polar Res. – 2004. – 23. – P. 181 – 208.
15. *Rudels B.* Arctic Ocean circulation and variability – advection and external forcing encounter constraints and local processes // Ocean Sci. – 2012. – 8. – P. 261 – 286.
16. *Steele M., Morison J., Ermold W. et al.* Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. – 2004. – 109. – C02027.
17. *Swift J.H., Jones E.P., Aagaard K. et al.* Waters of the Makarov and Canada basins // Deep-Sea Res. II. – 1997. – 44, No. 8. – P. 1503 – 1529.

18. *Ivanov V.V., Polyakov I.V., Dmitrenko I.A. et al.* Seasonal variability in Atlantic Water off Spitsbergen // *Deep-Sea Res. I.* – 2009. – 56. – P. 1 – 14.
19. *Schauer U., Rudels B., Jones E.P. et al.* Confluence and redistribution of Atlantic water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins // *Ann. Geophys.* – 2002. – 20. – P. 257 – 273.
20. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. et al.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progr. Oceanogr.* – 2011. – 91, No. 2. – P. 167 – 216.
21. *Nurser A.J.G., Bacon S.* The Rossby radius in the Arctic Ocean // *Ocean Sci.* – 2014. – 10. – P. 967 – 975.
22. *Manley T.O., Hunkins K.* Mesoscale eddies of the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* – 1985. – 90, No. C3. – P. 4911 – 4930.

Factors reducing efficiency of the operational oceanographic forecast systems in the Arctic basin

V.N. Belokopytov

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: v.belokopytov@gmail.com*

Reliability of the forecasted fields in the Arctic basin is limited by a number of problems resulting, in the first turn, from lack of operational information. Due to the ice cover, satellite data on the sea level and the sea surface temperature is either completely not available or partially accessible in summer. The amount of *CTD* measuring systems functioning in the operational mode (3 – 5 probes) is not sufficient. The number of the temperature-profiling buoys the probing depth of which is limited to 60 m, is not enough for the Arctic as well. Lack of spatial resolution of the available altimetry information (14 km), as compared to the Rossby radius in the Arctic Ocean (2 – 12 km), requires a thorough analysis of the forecasting system practical goals. The basic factor enhancing reliability of the oceanographic forecast consists in the fact that the key oceanographic regions, namely the eastern parts of the Norwegian and Greenland seas, the Barents Sea and the Chukchi Sea including the Bering Strait (where the Atlantic and Pacific waters flow in and transform, and the halocline structure is formed) are partially or completely free of ice and significantly better provided with operational information.

Keywords: Arctic, operational oceanography, ocean monitoring, thermohaline structure.