

# ВЛИЯНИЕ УЧЕТА ПРОНИКАЮЩЕЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СИБИРСКИХ ШЕЛЬФОВЫХ МОРЕЙ

**Градов В.С., Якшина Д.Ф.**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск  
gradov.v.s@gmail.com*

Регион Арктического Сибирского шельфа является стратегически значимым регионом в силу наличия значительных запасов природных ресурсов (нефть, природный газ и т.д.), но при этом малоизученным из-за сложных климатических условий. Исследование состояния сибирских шельфовых морей, в частности Лаптевых, Карского и Восточно-Сибирского, изучение физических механизмов, отвечающих за формирование их состояния, выявление причинно-следственных связей при их взаимодействии с климатической системой являются на сегодня одними из наиболее актуальных проблем для данного региона.

Помимо анализа данных наблюдений, что является достаточно ограниченным методом исследования, эффективными являются методы трехмерного численного моделирования, позволяющие воспроизводить пространственно-временную изменчивость различных климатических характеристик в прошлом, настоящем и будущем.

В данной работе проводится исследование температурного режима сибирских шельфовых морей в зависимости от способа учета проникающей в толщу воды солнечной радиации. Вода в различных регионах земного шара обладает различными оптическими характеристиками, и от этого зависит количество проникающей на глубину радиации. Это может повлечь за собой изменения в циркуляции вследствие изменения температуры и прочих характеристик на разных глубинах.

Один из способов параметризации проникающей радиации предполагает, что воду можно отнести к одному из пяти типов воды по классификации (далее классификация JRL), предложенной в работе [1]: от более прозрачной (I тип) в глубоководных частях океана до менее прозрачной (III тип) ближе к береговой линии. При этом доля радиации  $Q_{down}(z)$ , проникающей на глубину  $z \geq 0$  описывается суммой двух затухающих экспонент:

$$Q_{down}(z) = Q_{sw}(r \exp(-\mu_1 z) + (1 - r) \exp(-\mu_2 z)),$$

первая из которых описывает затухание доли радиации, соответствующей инфракрасной области спектра солнечного излучения ( $\lambda > 700$  нм), в поверхностном пятиметровом слое из-за практически полного поглощения им волн данной длины, а вторая – затухание видимой части спектра на глубинах ниже 10 м вследствие поглощения водой волн меньших длин ( $400 \text{ нм} < \lambda < 700 \text{ нм}$ ). Здесь  $Q_{sw}$  – суммарное количество солнечной радиации у поверхности океана, величины  $r$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  зависят от типа воды. Они описывают долю инфракрасного излучения, коэффициент поглощения инфракрасной части спектра и коэффициент поглощения видимой части спектра соответственно.

Другой способ параметризации проникающей коротковолновой радиации опирается на использование данных концентрации хлорофилла в толще воды: чем больше концентрация, тем менее прозрачной является вода. При этом  $Q_{down}(z)$  описывается аналогично предыдущему случаю с разбиением видимого излучения на красный, зеленый и синий диапазоны:

$$Q_{down}(z) = Q_{sw} \left( r \exp(-\mu_1 z) + \frac{(1-r)}{3} \sum_{k=r,g,b} \exp(-\mu_k z) \right),$$

где  $r = 0.58$ ,  $\mu_1 = 2.8571$ , что соответствует I типу воды по классификации JRL, а  $\mu_r$ ,  $\mu_g$ ,  $\mu_b$  – коэффициенты поглощения для красной, зеленой и синей частей видимого спектра, которые зависят от концентрации хлорофилла на поверхности [2-4]. Отметим, что по сравнению с предыдущей параметризацией, здесь можно выделить более пяти типов воды. Например, в данной работе используется 61 тип воды. Так же данная параметризация является более корректной с физической точки зрения, поскольку в реальности прозрачность воды не является однородной характеристикой и является величиной переменной.

Для моделирования использовалась региональная трехмерная численная совместная модель океана и морского льда SibCIOM [5, 6]. Данная модель состоит из четырех взаимодействующих между собой компонент атмосферы, океана, льда и суши. При этом океаническая и ледовая компоненты являются интерактивными, в то время как компоненты атмосферы и суши передают данные реанализа NCEP/NCAR [7].

В качестве данных концентрации хлорофилла использовались осредненные ежемесячные данные спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках AQUA и TERRA [8, 9]. Пространственное разрешение данных составляет  $9 \times 9$  км по широте и долготе.

Было проведено два численных эксперимента для периода с 2010 по 2022 год: базовый с использованием классификации JRL, другой с использованием спутниковых данных хлорофилла на поверхности (далее

СНЛ). Начальные данные за 2010 год соответствуют результатам численного эксперимента, описанного в работах [10, 11]. В эксперименте JRL тип прозрачности воды для конкретного региона оставался фиксированным на протяжении всего эксперимента и выбирался по глубине, исходя из соображений, что на более мелких участках вода более мутная. На глубинах более 2500 метров прозрачность воды соответствовала III типу, на глубинах от 250 до 2500 метров — II типу, на глубинах от 50 до 250 метров — типу Ib. Большая часть Восточно-Сибирского моря, примерно половина территории моря Лаптевых и прибрежные области Карского моря имеют глубину менее 50 метров. Вода на таких глубинах наиболее мутная, и усвоение солнечной радиации здесь осуществлялось только верхним 2,5 метровым слоем воды.

При анализе средней температуры на поверхности морей значимые отклонения наблюдаются, как правило, в летний период. В эксперименте СНЛ поверхность Восточно-Сибирского моря холоднее, чем в эксперименте JRL. Разница в средней температуре составляет 0,5–1° С. Эти различия обусловлены тем, что мутность воды в эксперименте СНЛ определяется через реальные значения концентрации хлорофилла и обладает сезонной изменчивостью в отличие от JRL, где практически для всего этого региона мутность воды была максимальна в течение всего расчетного периода. Поэтому именно здесь были выявлены максимальные различия в температуре поверхности между двумя экспериментами.

Для моря Лаптевых средняя температура поверхности оказалась выше в эксперименте СНЛ (до 0,3° С). В отличие от Восточно-Сибирского моря, где почти вся территория имеет глубину до 50 метров, около половины моря Лаптевых глубже 50 м и соответствовала типам воды Ib, II, III, для которых солнечная радиация не только усваивается поверхностью, но и проникает в более глубокие слои. Для этих территорий мутность воды, рассчитанная по хлорофиллу, оказалась больше, чем установленная по типу JRL. Интересно отметить, что в годы 2012, 2017, 2019, 2020 различия максимальны и превышают 0,2° С. Именно в 2012, а также последние годы произошло существенное сокращение ледового покрова в Арктике и увеличение площади открытой воды в море Лаптевых, что воспроизводится численной моделью, и это позволило увеличить поглощение солнечной радиации верхними слоями воды, насыщенными хлорофиллом.

Температура в Карском море показывает незначительные по отношению к другим морям отклонения, в основном ниже 0,1° С. При этом имеются как положительные, так и отрицательные аномалии. По-видимому, прозрачность воды, установленная по типу JRL, здесь менее всего отличается от прозрачности, рассчитанной по значениям концентрации хлорофилла, и поэтому изменения в температуре поверхности небольшие и не имеют постоянного знака. Возможно, что некоторые колебания

могут объясняться переносом течениями более теплых или холодных вод в отдельные участки морей.

На глубинах наблюдается иная картина. Так, например, на глубине 20 м для Восточно-Сибирского моря эксперимент CHL показывает большую среднюю температуру, чем JRL, но с гораздо меньшей, чем на поверхности, амплитудой (около 1,5° C). В Карском море и море Лаптевых тоже наблюдается преимущественно противоположная к поверхности ситуация. Разные знаки отличий на поверхности и глубинах 20 м объясняются тем, что если поверхность задерживает большую долю радиации, больше нагревается, то меньшая часть радиации достигнет 20 м слоя. И, напротив, если поверхность нагрелась меньше, то большая часть радиации проникла в нижележащие слои.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 20-11-20112.

### Литература

1. Paulson C.A., Simpson J.J. Irradiance Measurements in the Upper Ocean // *Cover Journal of Physical Oceanography Journal of Physical Oceanography*. 1977. V. 7. № 6. P. 952–956. DOI 10.1175/1520-0485(1977)007<0952:IMITUO>2.0.CO;2
2. Lengaigne M., Menkes C., Aumont O., Gorgues T., Bopp L., André J. M., Madec G. Influence of the oceanic biology on the tropical Pacific climate in a coupled general circulation model // *Climate Dynamics*. 2007. V. 28. P. 503-516. DOI 10.1007/s00382-006-0200-2
3. Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters). // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1988. V. 93. № C9. P. 10749-10768. DOI 10.1029/JC093iC09p10749
4. Morel A., Maritorea S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. V. 106. № C4. P. 7163-7180. DOI 10.1029/2000JC000319
5. Golubeva E.N., Platov G.A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. V. 112. № C4. P. C04S05. DOI 10.1029/2006JC003734
6. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*. 2008. Т. 13. № 5. С. 11-24
7. Kalnay E. et al. NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. V. 77. № 3. P. 437-472. DOI 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
8. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Level-3 Mapped Chlorophyll Data. 2022. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2022
9. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Level-3 Mapped Chlorophyll Data. 2022. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/TERRA/MODIS/L3M/CHL/2022
10. Голубева Е.Н., Платов Г.А., Якшина Д.Ф. Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 81-92. DOI 10.15356/2076-6734-2015-2-81-92
11. Platov G.A. Golubeva E.N., Kraineva M.V., Malakhova V.V. Modeling of climate tendencies in Arctic seas based on atmospheric forcing EOF decomposition // *Ocean Dynamics*. 2019. V. 69. № 1. P. 747-767. DOI 10.1007/s10236-019-01259-1