

## ТЕНДЕНЦИЯ ПОДКИСЛЕНИЯ ВОД АРКТИКИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ И ОЦЕНКА ЕЁ ДИНАМИКИ НА КОНЕЦ 21-ГО СТОЛЕТИЯ

Малышева А.С.<sup>1,2</sup>, Радченко Ю.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

st068388@student.spbu.ru, aleksa.malyshewa@yandex.ru

*Ключевые слова:* рН, подкисление океана, сценарии и модели климата, СМIP6, Северный Ледовитый океан, Арктика.

Мировой океан – один из крупнейших мировых резервуаров углерода и основной поглотитель антропогенных выбросов CO<sub>2</sub>. Процесс повышения кислотности или понижения рН морской воды является следствием растворения повышенного содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, и называется подкислением океана (ПО). Среднее значение рН поверхностных вод в Мировом океане колеблется от 7.9 до 8.3 – морская вода является слабощелочным раствором [2]. Считая с доиндустриальной эпохи (с 1750 по 1994 г.) воды Мирового океана поглотили примерно 30 % антропогенных выбросов углерода, что привело к глобальному снижению рН поверхностных вод примерно на 0.1 (от 8.25 до 8.14) [5]. В высоких широтах ПО происходит быстрее, чем в тропиках и субтропиках, поскольку в высоких широтах буферная емкость – способность раствора поддерживать постоянный рН, несколько ниже [2]. В Арктике ПО усиливается также из-за низких температур вод, увеличения запасов пресной воды (речной сток и таяние льдов) и притока тихоокеанских вод с низким рН [1].

В данном исследовании была определена динамика подкисления Северного Ледовитого океана за период 1993-2021 гг. и проведен анализ будущих тенденций ПО в свете проекций климата Арктики на 21-е столетие. Оценка тренда ПО производилась по *in situ* данным с базы данных GLODAPv2.2021 (Global Ocean Data Analysis Project, <https://www.glodap.info/>) по численным оценкам водородного показателя рН с 1993 по 2019 год на 4970 станциях в поверхностном горизонте (0-20 м). Также, были использованы оценки рН по данным реанализа Global Ocean Biogeochemistry Hindcast (GLOBAL\_MULTIYEAR\_BGC\_001\_029, <https://resources.marine.copernicus.eu/>). В данной базе пространственное разрешение – 0.25°×0.25°, временное разрешение – 1 месяц. Рассматривались данные для поверхностного слоя (0.5 м) за период с 1993 по 2021 год. Данные реанализа описывают 62% от *in situ* данных GLODAP ( $r^2 = 0.62$ ,  $p < 0.01$ ,  $N = 56$ ), сравнение проводилось по станциям, совпадающим по дате, а по координатам в пределах 1 км.

Тенденция подкисления вод Арктики по *in situ* данным (GLODAP) показала, что за 26 лет (с 1993 по 2019 год) среднее значение рН снизилось на 0.9%: с 8.18 до 8.11. Общий тренд указывает на увеличение ПО. По данным реанализа среднегодовое значение рН снизилось с 8.096 до 8.048 (с 1993 по 2021 год). За рассматриваемый период тренд подкисления составил -0.7%. Скорость подкисления, как и в случае с *in situ* данными GLODAP, равнялась -0.03% в год.

Для расчета будущих тенденций ПО для Арктического региона (60-90° с.ш.) использовались модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) международного проекта

CMIP6 (6-я фаза международного проекта сравнения объединенных моделей). Оценка ПО проводилась по изменчивости рН. В проекте CMIP6 данный параметр рассчитывается в 12 моделях. Для выполнения задачи были взяты среднемесячные значения рН с портала платформы Earth System Grid Federation (<https://esgf.llnl.gov/>). В качестве данных наблюдений рН были использованы данные реанализа. Для расчета проекций будущего ПО Арктики по данным глобальных климатических моделей CMIP6 использовались 4 сценария возможного будущего SSP (Shared Socioeconomic Pathways), в которых представлены разные уровни социально-экономического развития, эмиссии парниковых газов в атмосферу, развития землепользования и радиационного воздействия: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5. Оценка исторических сценариев (сравнение с данными наблюдения за 1993-2014 г.) проводилась с помощью метода перцентилей [3] для всего Арктического региона. После были отобраны лучшие модели – топ-25 моделей от общего числа моделей. В подансамбль моделей вошли следующие 4 модели: MPI-ESM1-2-LR, NorESM2-MM, NorESM2-LM, CMCC-ESM2. По прогнозу моделей CMIP6 рН к концу 21-го столетия по сценарию SSP1-2.6 составил 7.98, тенденция ПО по сравнению со средним значением *in situ* рН по базе GLODAP за 2019 год: -1.4%. По сценарию SSP2-4.5 значение рН к 2100 году – 7.86 (тренд -2.9%), по SSP3-7.0 – 7.71 (-4.9%), по SSP5-8.5 – 7.59 (-6.2%). При использовании в ансамбле всех доступных моделей по каждому из сценариев увеличивается размах неопределенности, а при состыковке временных рядов в 2015 году наблюдается явное несовпадение средних значений модельных рН, что указывает на правильность метода выбора лучших моделей.

Проекция изменения ПО Арктики к концу 21 века, полученные с применением тщательно отобранных моделей CMIP6, свидетельствуют о продолжающейся тенденции подкисления Арктики. Наиболее высокие скорости подкисления (-4.9 % и -6.2%) предсказываются моделями SSP3-7.0 и SSP5-8.5, согласно которым средняя температура воздуха в 2100 г. повысится, соответственно, на 3.6 °C и 4.4°C [4]. Сравнение полученных результатов с ранее сделанными оценками [4] показывает, что ПО в условиях Арктики будет значительнее, чем в среднем по Мировому океану: разница по каждому из сценариев SSP составляет -0.1.

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

### Список литературы

- 1) AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2018.
- 2) Bindoff N.L., Willebrand J., Artale V., Cazenave A., Gregory J.M., Gulev S., Hanawa K., Le Quere C., Levitus S., Nojiri Y., Shum C.K., Talley L.D., Unnikrishnan A.S., Josey S.A., Tamisiea M., Tsimplis M., Woodworth P. Observations: oceanic climate change and sea level, in Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I, edited by: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., Cambridge University Press, Cambridge. 2007. P. 385–428.
- 3) Gnatiuk N., Radchenko I., Davy R., Morozov E., Bobylev L. Simulation of factors affecting *Emiliania huxleyi* blooms in Arctic and sub-Arctic seas by CMIP5 climate models: model validation and selection // Biogeosciences. V. 17(4). 2020. P. 1199–1212.
- 4) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- 5) Royal Society: Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide, The Royal society, London. 2005. 223 pp.