ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОШЛЫЕ ЭПОХИ ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНЫХ ОТНОШЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ Ar, Kr, Xe С N₂ В СЛОЯХ ЛЬДА И ОКЕАНЕ

Дергачев В.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

ESTIMATION OF TEMPERATURE CHANGES DURING THE LAST EPOCHS ACCORDING TO ISOTOPE RELATIONS OF NOBLE GASES Ar, Kr, Xe WITH N₂ IN ICE LAYERS AND OCEAN

Dergachev V.A.

Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

The ocean temperature is one of the major characteristics affecting global climate. New methods of surveys are developed to obtain a wide picture of temperature change throughout the world ocean. In work the main attention is given to estimations of change of a) the content of heat and ocean temperatures, proceeding from the available modern and historical data; the given buoys of disposable use dropped from planes and helicopters (bathytermographic buoys); b) the data of the global project of the international scientific community of oceanologists ARGO c) the data comed of the use of elemental and isotopic relations of inert (noble) gases Kr/N₂, Xe/N₂ and Xe/Kr, containing in ice cores in the bubbls of air trapped from the atmosphere. Reconstruction of temperatures and the coordination with other estimations during various time intervals are presented.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-135-140

1. Введение

Сторонники антропогенного изменения климата прогнозируют катастрофическую картину, связанную с глобальным потеплением в ближайшем будущем за счёт сжигания топлива, содержащего углерод (напр., [1]). Встаёт вопрос: насколько обоснована такая картина изменения климата и что показывают данные естественного хода температуры на интервале времени до наступления потепления и в период (Голоцен), в котором живёт человечество уже более 11 тыс. лет?

Климат и погода зависят от многих факторов. Важнейшее влияние на климат оказывают процессы, происходящие в океане, которые требуют их детального изучения. Мировой Океан покрывает 71–72% поверхности Земли и является самым большим резервуаром тепла в глобальной климатической системе. Океан перераспределяет энергию, поступающую на Землю от Солнца, и разносит тепло своими течениями. Масса океана в триста раз превышает массу атмосферы, а теплоемкость – в тысячу раз больше. В результате небольшие изменения в океане очень сильно влияют на состояние атмосферы.

Чтобы восстановить изменения температуры океана в прошлом по всей глубине, ниже основные результаты будут основаны на новых методиках: 1) глобальный проект международного научного сообщества океанологов по организации всемирной сети океанографических станций (проект АРГО) [2]; 2) методика восстановления средних температур океана, используя элементные и изотопные отношения аргона и тяжелых инертных (благородных) газов: криптона и ксенона, вместе с азотом, содержащихся в ядрах льда в захваченных из атмосферы пузырьках воздуха [3]. Будут представлены реконструкции температур и согласование их с другими оценками в течение различных временных интервалов.

2. Методические аспекты получения температурных данных по Мировому океану

Изменение температуры Мирового Океана может быть описано слоистой структурой (напр., [4]). Можно выделить три главных температурных слоя (рис. 1а): верхний теплый и нижний холодный слой океана, которые имеют соответственно теплую и холодную температуры на всём протяжении слоя, и слой температурного скачка (термоклин), в котором градиент температуры резко отличается: теплее вверху, чем у основания слоя (рис. 1б). Тёплый слой и термоклин отсутствуют в регионах Арктики и Антарктики.

Рис. 1. Графическое изображение характеристик глубинных вод океана.

- а).** Схематическое поперечное сечение север-юг Мирового Океана: теплый слой, термоклин, холодный слой. Теплый слой поверхностной воды исчезает в арктических и антарктических широтах, где очень холодная вода находится на поверхности.
- б).** Профиль уменьшения температуры океана с увеличением глубины. В термоклине имеет место быстрое изменение температуры с глубиной.

Кратко рассмотрим существующие методы измерения температур по всему Мировому океану.

1. Для измерения температуры океанической поверхности из космоса применяют инфракрасные радиометры, работающие на метеорологических и океанологических спутниках. Тепловые поля в океанах и морях теперь изучаются из космоса с помощью специальной аппаратуры, работающей в инфракрасной и микроволновой зонах спектра.

2. Для получения широкой картины изменения температуры по всему Мировому Океану двадцать лет назад была создана постоянно действующая глобальная сеть океанографических станций на основе дрейфующих (ныряющих) буев-измерителей (глобальный проект международного научного сообщества океанологов АРГО). Используется большое количество датчиков (тысячи), чтобы отследить региональные изменения температуры и получить глобальные тенденции. На полную мощность проект вышел в 2007 г. [2]. Главное назначение буев АРГО – измерение вертикальных профилей температуры и солёности воды при подъёме от стандартной глубины 2000 м (в открытом океане) до поверхности. Таким образом, проект АРГО с использованием спутников направлен на сбор информации по океанической толще – уникальная возможность непрерывного мониторинга состояния Мирового Океана.

3. К сожалению, определение изменений средней температуры всего Мирового Океана оказывается трудной задачей вследствие имеющегося распределения различных водных масс, где каждый слой воды может иметь резко отличающиеся температуры. Возникают спорные вопросы, в особенности касающиеся абсолютной точности соответствующей температурной шкалы. Неопределённость в абсолютной шкале составляет $\pm 1^\circ\text{C}$ (напр., [5]).

Авторы [6, 7] предложили принципиально новый способ определения изменений средней температуры в океане, основанный на использовании элементных и изотопных отношений аргона и азота и тяжелых инертных (благородных) газов: криптона и ксенона, вместе с азотом, содержащихся в ядрах льда в захваченных из атмосферы пузырьках воздуха. Указанные газы высвобождаются из ядер в атмосферу в известных количествах. Первичные изотопные отношения – величины $\delta^{40}\text{Ar}$, $\delta^{86}\text{Kr}$, $\delta^{132}\text{Xe}$ и $\delta^{15}\text{N}$. Используемые значения элементных отношений: Kr/N_2 , Xe/N_2 и Xe/Kr в образцах ледяных ядер позволяют рассчитывать прошлую среднюю глобальную температуру океана [8] с высокой точностью, благодаря следующим особенностям системы океан–атмосфера: любой обмен тепла и газа имеют место на границе раздела океан–атмосфера; нет никаких существенных внутренних источников тепла или стоков в океан; нет никаких существенных источников или стоков измеряемых газов в связанной системе океан–атмосфера; и каждый вид газа имеет уникальную и хорошо определенную температурно-зависимую растворимость.

В работе [3] описан аналитический метод анализа изотопных отношений инертных газов Ar, Kr, Xe к N_2 в ядрах льда и представлены резуль-

таты анализа в 21 образцах керна льда со станции WAIS Divide (Антарктида). Показано также, что точности всех трёх определённых элементных отношений $\delta\text{Kr}/\text{N}_2$, $\delta\text{Xe}/\text{N}_2$ и $\delta\text{Xe}/\text{Kr}$, содержащих информацию о средней температуре океана, имеют гораздо меньшую неопределённость для реконструированных температур океана, всего $\pm 0.3\text{--}0.1^\circ\text{C}$, чем было достигнуто в предыдущих исследованиях.

Чтобы восстановить изменения средней температуры океана из палеоатмосферных отношений Kr/N_2 , Xe/N_2 и Xe/Kr , авторы [8] использовали четырёх-резервуарную модель обмена исследуемых газов: атмосфера, Антарктические донные воды, Северо-Атлантические глубинные воды, остаточный океан и картину меридиональной циркуляции глубинных водных масс и масс-спектрометрию высокого разрешения.

3. Изменение содержания тепла и температуры в океане по глубине и во времени

Ниже основное внимание будет уделено оценке изменения содержания тепла и температуры океана, исходя из имеющихся прямых и прокси данных; данных глобального проекта международного научного сообщества океанологов АРГО; данных, получаемых из использования элементных и изотопных отношений инертных (благородных) газов.

Почти до конца 20-го столетия большинство измерений температур океана не превышало 700 м глубины, что не позволяло точно оценить изменение содержания тепла Мирового Океана вследствие потепления, наблюдаемого с 19-го столетия. Авторы [9] представили реконструкцию изменения содержания тепла океана с 1871 г. с глобальным охватом полной океанской глубины, включая данные проекта АРГО (рис. 2), которые согласуются с другими оценками в течение хорошо наблюдаемого периода. Авторы оценили потепление океана с 1871 г. величиной 436×10^{21} Дж с большими декадными колебаниями $436 \pm 91 \times 10^{21}$ Дж.

Результаты показывают, что для периода между 1971 и 2010 гг. океан поглотил больше, чем 90% тепла, полученного Землёй, т.е. примерно 290×10^{21} Дж, содержавшегося в верхнем 2000-м слое. При этом скорость поглощения тепла во время интервала с 1955 по 1971 гг. в верхних 2000 м составляла 0.30 ± 0.06 Вт/м² и 0.028 ± 0.026 Вт/м² ниже 2000 м.

Используя базу данных Мирового Океана 2009 г. [10], данные проекта АРГО и батиметрических буёв, авторы [11] оценили изменение содержания тепла Мирового океана по глубине: слои 0–700 м и 0–2000 м для временного интервала 1955–2010 гг. За изученный период содержание тепла в Мировом Океане в слое 0–700 м увеличилось на $16.7 \pm 1.6 \times 10^{22}$ Дж ($\pm 2\sigma$), а в слоях 0–2000 м – на $24.0 \pm 1.9 \times 10^{22}$ Дж ($\pm 2\sigma$), соответствуя скорости потепления соответственно 0.27 Вт м⁻² и 0.39 Вт м⁻² (на единицу площади Мирового Океана). Таким образом, среднее потепление объема Мирового Океана для слоя 0–700 м соответствует 0.18°C и 0.09°C для слоя 0–2000 м.

Рис. 2. Реконструкции содержания тепла в Мировом Океане по глубине **а), б), в)** с 1871 г. по 2015 г., используя тенденции для функции Грина (которые связывают поверхностные свойства со свойствами во внутренних частях океана) и прямые измерения (начало отмечено стрелками) относительно 2006–2015 гг. (по данным в работе [9]). Серые полосы указывают на неопределённость оценок.

Рис. 3. а). Сравнение изменений в глобальной температуре (резкое потепление) во время отступления последнего ледникового периода между климатической моделью [13] - 1 и данными по реконструкции палеоклимата ([14], [15]) - 2. Серой линией 3 представлен модельный ряд, сдвинутый на величину Δt во времени, чтобы оптимально соответствовать восстановленному ряду (горизонтальные стрелки отмечают изменение времени Δt). Вертикальная стрелка указывает на интервал наибольших отклонений температуры ΔT между рядами.

б). Изменение средней глобальной температуры океана Σ во время отступления последнего ледникового периода по данным атмосферных отношений благородных газов (Kr/N_2 , Xe/N_2 and Xe/Kr) в кернах льда. Погрешность данных 1σ , среднее временное разрешение 250 лет. Промежуток данных от 4000 до 7500 лет (штриховая линия) назад отбракован из-за несогласованности исследуемых образцов. Вертикальными линиями отмечены изменения температур в различные климатические интервалы времени: LGM – максимум последнего оледенения, HS1 – тенденция изменения климата с 17690 по 14580 лет назад, B/A – Бёллинг-Алерёд похолодание, YD – Younger Dryas потепление, Holocene - тёплый период (Голоцен).

Рассмотрим изменение температуры в атмосфере и в океане после отступления последнего оледенения. Изучению изменений климата по данным природных архивов с момента окончания последнего оледенения уделяется большое внимание исследователей (см., напр., [12]). Изучение восстановленной из природных архивов изменений температуры на этом временном интервале позволило выделить ряд осцилляций (повышения и понижения) температуры. На рис. 3а, б приведено сравнение тенденций изменения в глобальной температуре во время отступления последнего ледникового периода, полученных по экспериментальным прокси данным, климатическим моделям и изменение средней глобальной температуры по данным атмосферных отношений благородных газов в кернах льда.

Выводы

Анализ результатов, полученных из экспериментальных данных и модельных тенденций, указывает на их существенное различие временного хода. Что касается тенденции изменения температуры в океане, полученная по данным атмосферных отношений благородных газов, она следует временному ходу прокси данных, а не модельной тенденции.

Литература

1. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г. Обобщающий доклад. Женева, 163 с.
2. Лебедев К.В. // Океанология, т. 56. №2. С.186–196. 2016.
3. Bereiter B. et al. // Rapid Commun Mass Spectrom. V. 32. P. 801–814. 2018a.
4. Huddart D. and Stott T. Earth Environments: Past, Present and Future, by John Willey and Sons, LTD. 912 p. 2013. ISBN 0470749601, 9780479609.
5. Elderfield H. et al. // Science. 2012. V. 337. P. 704–709.
6. Severinghaus J.P. et al. // Geochim Cosmochim Acta. 2003. V. 3. P. 325–343.
7. Headly M.A., Severinghaus J.P. // J Geophys Res. 2007. V. 112. D19105.
8. Bereiter B. et al. // Nature. V.553. P. 39–44. doi:10.1038/nature25152. 2018b.
9. Zanna L. et al. // PNAS. V. 116. No. 4. P.1126–1131. 2019.
10. Boyer T.P. et al. // World Ocean Database 2009, vol. 1. NOAA, Silver Spring, Md., 2009.
11. Levitus S. et al. // Geophys. Res. Lett., V. 39. L10603. P. 1–5. 2012.
12. Дергачев В.А. // Солнечная и солнечно-земная физика – 2018. Труды. СПб, ГАО РАН. С. 139–144. 2018. ISSN: 0552-5829.
13. Smith R.S. and Gregory J. // Climate dynamics. V. 38. Issue 7–8. P. 1545–1559. 2012.
14. Marcott S. A. et al. // Science. V. 339(6124). P. 1198–1201. 2013.
15. Shakun J.D. et al. // Nature. V. 484 (7392). P. 49–55. 2012.