

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОКРАИННЫХ МОРЕЙ ЮЖНОГО ОКЕАНА ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

В конце XX века в науках о Земле произошел значительный рывок, связанный с появлением и массовым распространением автономных средств наблюдений. Так, в 1999 году была представлена международная программа Argo по организации сети наблюдений при помощи дрейфующих-ныряющих буев-измерителей, передающих данные по спутниковой связи практически в режиме реального времени. В настоящее время система Argo состоит из около четырех тысяч буев и охватывает почти весь Мировой океан. Однако в Южном океане, к югу от области Антарктического циркумполярного течения, преградой для дрейфующих буев становится морской лед. Поэтому до недавнего времени все доступные наблюдения в прибрежных морях Южного океана ограничивались лишь небольшим количеством судовых станций, выполненных в летнее время. Сказывается то, что в этих районах морские работы сопряжены со многими трудностями, такими как тяжелые погодные и ледовые условия. Благоприятная обстановка для судовых наблюдений представляется лишь в ограниченный период в течение года.

В отличие от дрейфующих буев, морские млекопитающие способны проникать в труднодоступные мелководные районы антарктического шельфа. Таким образом, если их оснастить специальными измерительными приборами, появляется возможность получать уникальную информацию об окраинных морях Антарктики в течение всего года.

Программа МЕОР

В 2002 году шотландским подразделением по исследованию морских млекопитающих Sea Mammal Research Unit (SMRU) при Сент-Эндрюсском университете был сконструирован небольшого размера прибор, снабженный CTD-датчиками, который можно было бы закрепить на животное. Изначально основной целью данного проекта было расширение знаний о поведенческих особенностях морских млекопитающих, однако практически сразу стало ясно, что полученные данные могут быть использованы и для океанографических исследований.

Стоит отметить, что идея маркирования морских млекопитающих специальными механическими приборами не нова. Так, еще в 1940-х годах шведско-американский физиолог Пер Шоландер устанавливал на тюленей Уэдделла механические измерители глубины.

Изначально одновременно несколько стран развивали свои собственные программы, наиболее заметной из которых была Southern Elephant seals as Oceanographic Samplers — SEaOS (Южные морские слоны как океанографические измерители). В 2008 году, в рамках Международного полярного года, был создан международный проект Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole — MEOP (Морские млекопитающие, исследующие океаны от полюса до полюса) по установке регистрирующих датчиков CTD SRDL (Conductivity-Temperature-Depth Satellite Relay Data Logge — записывающее устройство для CTD-измерений с возможностью передачи данных по спутниковой связи) на глубоко ныряющие и проплывающие большие расстояния виды морских млекопитающих. В настоящее время в нем принимают участие 11 стран, 9 из которых работают в Южном океане: Австралия, Бразилия, Великобритания, Германия, Китай, Норвегия, США, Франция, ЮАР.

Основной задачей MEOP является создание единой открытой базы данных, прошедших контроль качества, и поддержка ее в актуальном состоянии. Таким образом, эта программа является мостиком между научными командами, маркирующими морских млекопитающих, и конечными потребителями данных.

Методы и данные

В Южном полушарии в основном маркируются южные морские слоны (*Mirounga leonina*), тюлени Уэдделла (*Leptonychotes weddellii*) и тюлени-крабеды (*Lobodon carcinophagus*). Приборы устанавливаются на животных в феврале–марте, в местах их лежбищ, после линьки. Основные районы — это острова Южная Георгия и Кергелен. Вся процедура маркировки одного животного занимает меньше часа. Прибор не наносит никакого вреда здоровью млекопитающего и держится на его теле не больше года. При следующей линьке или даже раньше он отваливается.

Устройство работает в автоматическом режиме. Установленные сенсоры позволяют получать сведения о температуре и электропроводности морской воды. Также по программе MEOP осуществляется постановка датчиков уровня освещенности. Кроме того, существуют планы по измерению концентрации хлорофилла а и содержанию растворенного кислорода.

CTD-SRDL записывает профили температуры и солености во время квазивертикального подъема животного с частотой 1 Гц (раз в секунду). За каждый 6-часовой промежуток времени прибор сохраняет в памяти только самое глубокое погружение и передает данные в сжатой форме через систему Argos (Advanced Research and Global Observation Satellite — спутниковая система для сбора, обработки и распространения данных об окружающей среде со стационарных и самоходных платформ по всему миру; не путать с Argo). В среднем один профиль содержит измерения на 17 горизонтах. Помимо 8 стандартных, специальный алгоритм определяет точки перегиба и экстремумы. Таким образом, по сравнению с судовыми данными, полученными при помощи современных CTD-зондов, вертикальная дискретность MEOP оказывается меньше. При этом глубина погружения морских животных не превышает 2 км, а средняя — составляет всего 400–500 метров. Кроме того, поскольку прибор CTD-SRDL не оборудован альтиметром, невозможно определить, был ли совершен нырок до дна. Приближенная информация о глубине места может быть получена путем ассимиляции топографических данных какой-либо из существующих цифровых моделей рельефа дна.

Южный морской слон с установленным датчиком CTD-SRDL.
Фото Кристоф Гине (Christophe Guinet)



Недавно появившаяся модификация приборов позволяет записывать данные в непрерывном режиме и получать весь CTD-архив за последние несколько месяцев с частотой дискретизации 0,5 Гц (раз в две секунды).

При достаточно высокой заявленной точности датчиков реальные погрешности отличаются в худшую сторону. Например, на измерения оказывает влияние внешнее поле самого животного, которое невозможно учесть до установки прибора и которое устраняется лишь при постобработке. Погрешности устраняются при постобработке. Существуют различные оценки качества данных МЕОР. Например, в работе Ф. Роке (Roquet F. et al. Delayed-Mode Calibration of Hydrographic Data Obtained from Animal-Borne Satellite Relay Data Loggers // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2011. V. 28 (6). P. 787–801) для района 50–55° ю.ш. оценивается точность данных температуры после введения поправок как $\pm 0,01$ °C, солёности — $\pm 0,02$ psu. Ж.-Б. Шариссан и др. (Charrassin J.-B. et al. Southern Ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals // Proc. Nat. Acad. Sci USA. 2008. V. 105 (33). P. 11634–11639) отмечают, что на 65° ю.ш. точность исправленных данных температуры составляет $\pm 0,02$ – $0,03$ °C, солёности — $\pm 0,03$ – $0,05$ psu.

Положение млекопитающего определяется при помощи телеметрической информации Argos, с характерной точностью ± 5 км.

На портале проекта <http://www.meop.net> в свободном доступе представлены три вида баз данных:

- МЕОР-CTD — база данных вертикальных CTD-профилей температуры и солёности (с 2004 года);
- МЕОР-TDR — база данных температуры и уровня освещённости высокого пространственно-временного разрешения (с 2008 года);
- МЕОР-SMS — база данных непрерывной записи CTD-датчиков. Информацию можно получить как в виде временных рядов, так и отдельных профилей. Она была впервые опубликована в мае 2019 года.

Использование данных МЕОР для изучения окраинных морей Южного океана

Данные МЕОР успешно применяются для изучения процессов на шельфе и в верхней части материкового склона, где глубина в среднем варьирует от 200 до 500 метров.

Если сравнивать количество вертикальных профилей температуры и солёности, измеренных к югу от 30° ю.ш. судовыми и автономными средствами наблюдений, то очевидным становится доминирование последних. В международной базе World Ocean Database 2018 (WOD18) с 1962 года накоплено всего 66,5 тысяч станций. Количество профилей вертикального зондирования в базе МЕОР-CTD составляет более 350 тысяч (в 5,2 раза больше). Из рисунка видно, что, по сравнению с Argo, проект МЕОР обеспечивает более плотное покрытие данными к югу от 60° ю.ш., что особенно ценно при изучении окраинных морей Юж-

ного океана. Количество полученных по программе МЕОР профилей существенно возрастает в феврале-марте (напомним, именно в эти месяцы происходит маркировка животных) и уменьшается в последующие месяцы. В течение всего года, кроме января, количество точек зондирования МЕОР превышает число судовых CTD-станций.

Таким образом, данные МЕОР позволяют получить представление о структуре и характеристиках вод на шельфе в осенне-зимний период. В прибрежных полынях наиболее активно происходит образование плотной антарктической шельфовой воды (АШВ), а под шельфовыми ледниками — ее холодной модификации, получившей название вода шельфовых ледников (ВШЛ). Эти водные массы участвуют в формировании региональных типов донных вод, трансформирующихся в дальнейшем в классическую антарктическую донную воду (АДВ), которая является важным звеном глобального океанского конвейера. АДВ занимает абиссальное положение и распространяется в придонном слое на север, вплоть до умеренных широт Северного полушария. Скорость образования АДВ определяет изменчивость меридиональной циркуляции Мирового океана на временных масштабах 100–1000 лет и играет важную роль в климатической системе планеты.

В последнее десятилетие по данным, полученным при помощи приборов, установленных на морских млекопитающих, впервые были обнаружены новые области формирования АДВ. Так, в полынне мыса Дарнли, расположенной в море Содружества, и в полынне бухты Винсенс, море Мусона, международными командами впервые был выявлен факт образования плотных вод, которые впоследствии участвуют в формировании региональной донной воды.

Ежегодные морские работы в рамках Российских антарктических экспедиций, с 1997 по 2016 год, позволили сформировать представление о районе залива Прюдс, Восточная Антарктика. По судовым данным был установлен факт и исследованы некоторые закономерности формирования донной воды в этом регионе в летний период. Однако для исследования этого процесса в осенне-зимний период необходимо наличие дополнительных данных. Поэтому сотрудниками лаборатории Южного океана ААНИИ были привлечены результаты измерений при помощи датчиков, установленных на морских млекопитающих. Помимо этого, данные МЕОР применялись как вспомогательный инструмент в ходе плановых работ лаборатории при построении картосхем для электронно-справочных пособий по морям Южного океана.

Таким образом, полученные с помощью морских млекопитающих данные существенно сократили пробел в наблюдениях, и их вклад в мониторинг изменчивости термохалинной структуры окраинных морей Южного океана будет продолжать расти с увеличением пространственного покрытия и повышения точности данных.

И.А. Чистяков, М.С. Молчанов (ААНИИ)

Географическое положение станций, выполненных к югу от 30° ю.ш. из баз данных: а) WOD18 – 66 474 станции, б) Argo – 511 632 станции, в) МЕОР – 351 533 станции. Серой заливкой выделена область Антарктического циркумполярного течения

