

СОВМЕСТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МОРЯ СИЛАМИ МАГАТЭ И ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА СРЕДИЗЕМНОМОРСКОЕ ПАРТНЕРСТВО

СКОТТ ФАУЛЕР, ХУАН-КАРЛОС МИКЕЛЬ И ФЛОРЕНС БУАССОН

Средиземное море является уникальнейшим водоемом как с культурной, так и с социально-экономической точки зрения. Являясь колыбелью западной цивилизации, а точнее, одним из ее истоков, оно издавна играет роль системы жизнеобеспечения людей, давая им пропитание и служа средством общения в целях коммерции и торговли. Сегодня его побережье служит постоянным местом обитания для миллионов людей, а еще миллионы людей круглый год заполняют его берега, наслаждаясь отдыхом.

Такая активная деятельность человека и создаваемая им нагрузка на природную среду неизбежно привели к ее загрязнению и экологическому стрессу, которые в принципе могут повлиять на функционирование этой важной морской экосистемы.

Некоторые океанографические и географические особенности Средиземного моря делают его особенно уязвимым перед потенциальным воздействием антропогенных загрязнителей. Море является относительно мелководным, практически замкнутым, с весьма ограниченным водообменом в районах Гибралтара и Босфора. Через Гибралтарский пролив в него поступают менее соленые поверхностные воды Атлантики и медленно циркулируют по его акватории в направлении против часовой стрелки. Здесь под воздействием солнца они постепенно прогреваются и становятся более солеными вследствие интенсивного процесса испарения. Сочетание слабых прибрежных течений и почти полного отсутствия приливов препятствует рассеиванию загрязнителей, поступаю-

щих в прибрежные воды. Кроме того, недавнее строительство плотин на некоторых крупных реках привело к существенному уменьшению паводкового стока, который каждую весну очищал акваторию шельфа от осевших на нем загрязнителей.

Помимо этих уникальных физических особенностей следует отметить, что воды Средиземного моря крайне бедны питательными веществами и жизненными формами (см. карту). Поэтому сколько-нибудь значительное нарушение его и без того ограниченной потенциальной продуктивности может нанести долговременный ущерб экосистеме бассейна.

Поскольку географическое положение Средиземного моря является в высшей степени специфическим, а его потенциальная чувствительность к деятельности человека — весьма высокой, не приходится удивляться, что за последнее десятилетие было приложено много усилий для изучения его биогеохимических характеристик и функций. Кроме того, относительно ограниченные размеры моря позволяют ученым-океанологам исследовать — в уменьшенном масштабе — те процессы, которые типичны для океанов мира. Последние достижения в области океанографии показывают, что степень нашего понимания этих процессов значительно возрастает, если поставленные проблемы рассматриваются на междисциплинарном уровне.

Признавая это обстоятельство, Европейский союз (ЕС) начал осуществление различных крупномасштабных междисциплинарных программ по изучению морской среды, и некото-

рые из них посвящены Средиземному морю. Имея богатый опыт коллективной работы в районе Средиземноморья, Лаборатория морской среды МАГАТЭ (ЛМС) в Монако получила приглашение от нескольких партнерских организаций ЕС принять участие в этих программах, как правило, в области применения ядерных методов исследования основных океанических процессов. Эти программы ЕС существенно способствовали расширению базы внебюджетного финансирования ЛМС, в котором она нередко нуждается для выполнения принятых МАГАТЭ регулярных программ по исследованию морской среды.

В 90-х гг. ЛМС, в частности, активно участвовала в изучении происходящих в Средиземном море океанических процессов, которые исключительно важны для понимания переноса и поведения радионуклидов и других загрязняющих веществ. В настоящей статье освещаются основные мероприятия, осуществленные ЛМС.

ПРОСЛЕЖИВАЯ ИСТОРИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Профессиональные знания и мастерство исследователей из ЛМС потребовались для участия в программе ЭЛНА (Эвтрофические границы Северной Адриатики), осуществляемой при поддержке ЕС. Одна из задач ЛМС

Г-н Фаулер — руководитель Радиозоологической лаборатории, которая входит в Лабораторию морской среды МАГАТЭ в Монако; г-н Микель и г-жа Буассон — сотрудники ЛМС.

состояла в отслеживании истории загрязнения различными веществами района Северной Адриатики, для которого характерен высокий уровень содержания поллютантов.

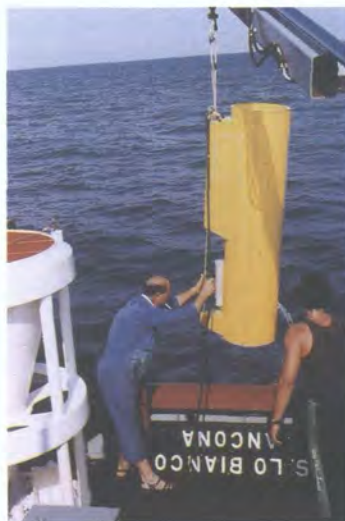
Выбранный учеными способ состоял в датировании кернов донных отложений ядерным методом и в последующем соотношении темпов седиментации с уровнями загрязнения, измеренными в разных осадочных слоях, отложившихся с течением времени. Ядерный метод, чаще всего применяемый для такого хронологического атрибутирования, основан на скорости распада свинца-210 после перехода его из атмосферы в донные отложения. При этом исходят из основополагающего предположения, что лишь благодаря радиоактивному распаду концентрация содержащегося в отложениях свинца-210 (физический период полураспада составляет 25 лет) с глубиной снижается. На практике содержание свинца-210 в отложениях определяется путем непосредственного измерения количества его радиоактивного вторичного производного — по-

лония-210. По скорости аккумулярования сухой массы, зная пористость и плотность отложений, можно затем рассчитать темпы осаждения в сантиметрах за год.

Ртуть и ПХД-загрязнители.

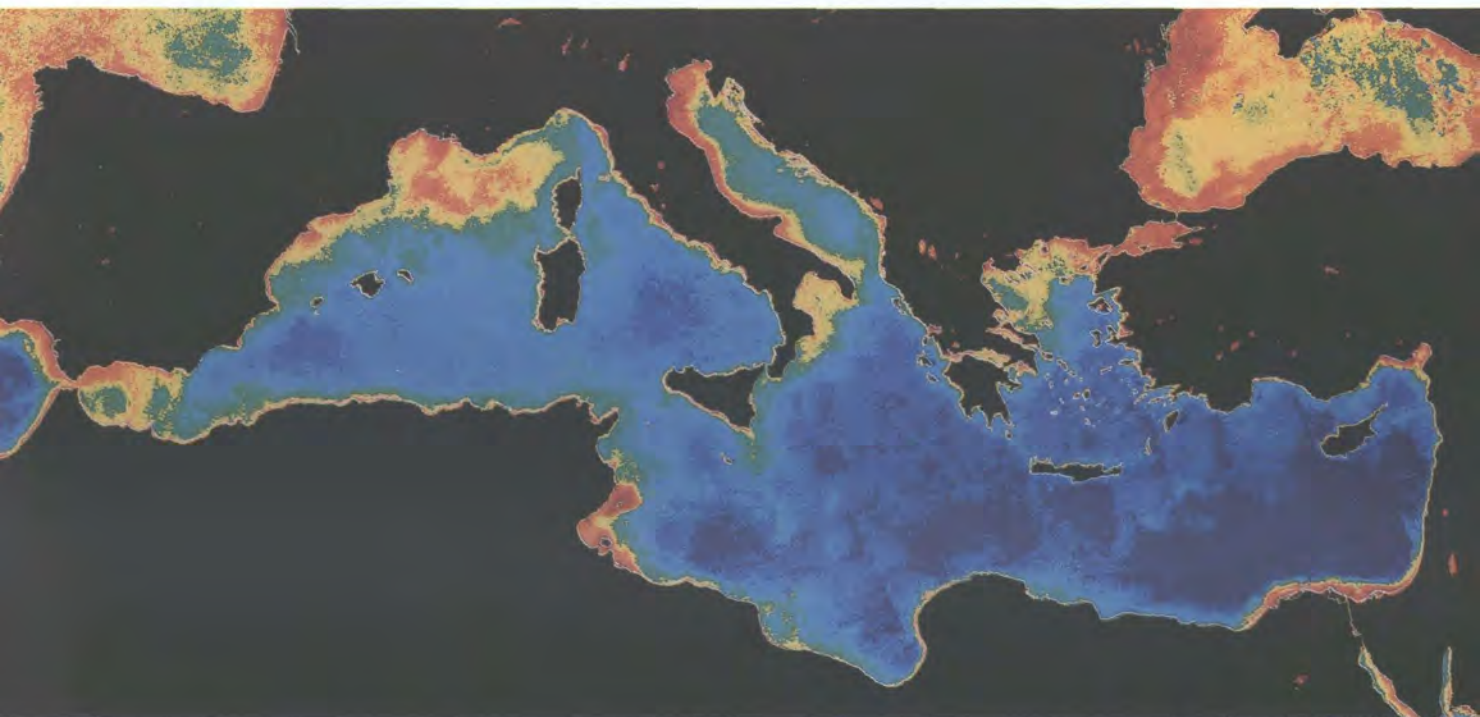
Неподалеку от устья реки По в Италии были отмечены сравнительно высокие скорости седиментации, что характерно для этого прибрежного района. Поскольку известно, что устье реки По является основным источником выноса в Северную Адриатику загрязняющих веществ берегового происхождения, были сделаны анализы отобранных недалеко от устья кернов донных отложений на наличие двух основных загрязнителей Средиземного моря — ртути и ПХД.

Профили распространенных смесей ПХД свидетельствуют, что их максимальные объемы отложились приблизительно 20—27 лет назад. Эти хроноло-



гические рамки точно соответствуют периоду максимальных продаж ПХД, который пришелся на 1969—1970 гг. Кроме того, производство ПХД в коммерческих масштабах было начато лишь в 1929 г. Полученные про-

Вверху: специалисты устанавливают в Адриатическом море автоматический уловитель осаждающихся частиц. Внизу: цветное изображение сканирования Средиземного моря. Участки высокой продуктивности в весеннее время года окрашены оранжевым и желтым цветами, а низкой — синим. (Фото: Miquel/MEL; NASA Goddard Space Flight Center)



фили также указывают на резкое уменьшение содержания ПХД вблизи слоев горизонта 18—20 см. Это довольно точно корреспондирует с тем периодом, когда, как можно было ожидать, эти соединения впервые поступили в окружающую среду.

Что касается ртути, то ее абсолютная концентрация зачастую соотносится с содержанием органики в отложениях. На основе того же керна, взятого в районе устья реки По, был получен профиль концентрации метилртути, нормализованной относительно содержания макрочастиц органического углерода. Такие профили сложны и с трудом поддаются интерпретации, однако на глубинах 8—10 см и 20—22 см отчетливо наблюдаются максимальные концентрации этих соединений.

Информация о метилртути в Адриатическом море в принципе отсутствует. На основании измерений ЛМС следует отметить, что концентрации ртути и метилртути достигают пиковых величин в горизонтах на глубине 20—22 см; это соответствует примерно 77—85 годам, предшествующим взятию керна. Такая взаимосвязь позволяет предположить, что эти максимальные значения четко корреспондируют с годом максимального производства ртути (1913 г.). Именно тогда на руднике Идриа, расположенном возле протекающей неподалеку реки Изонцо, было добыто вдвое больше ртути, чем в среднем добывалось в любой другой год.

Такие междисциплинарные исследования с использованием донных отложений, естественное состояние которых, как предполагается, в основном не было нарушено, свидетельствуют о том, что использование физического таймера в виде природного радионуклида, осевшего в отложениях морского дна, может служить эффективным инструментом для прослеживания истории загрязнителей морской среды антропогенного происхождения.

ПОНИМАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Начиная с 1996 г. ЛМС сотрудничает с проектом ЕС-МАСТ (Океанографическая наука и техника), который осуществляется в восточной части Средиземноморского бассейна и известен под названием "Гидротермальные потоки и биологическая продуктивность Эгейского моря".

Эгейское море представляет собой район высокой сейсмической и геотермальной активности. Остров Милос известен тем, что около 35 км² его морского дна в районе прилегающих мелководий являются геотермически активными, где имеются выходы значительных объемов свободного газа, а также фосфата и марганца.

Геохимическая цикличность и биологическая продуктивность, основанные на хемосинтезе в этих выходах на небольших глубинах, продолжают оставаться в значительной степени неизученными. Это особенно относится к роли данных выходов в формировании и выделении макрочастиц органического материала.

Одна из основных целей участия ЛМС в вышеупомянутой программе состояла в том, чтобы охарактеризовать и установить количественные параметры выделения частиц органического углерода из эвфотической зоны вблизи выходов геотермальных источников. Это было осуществлено путем длительного исследования материала, состоящего из оседающих частиц, измерения параметров водной толщи и анализа донных отложений.

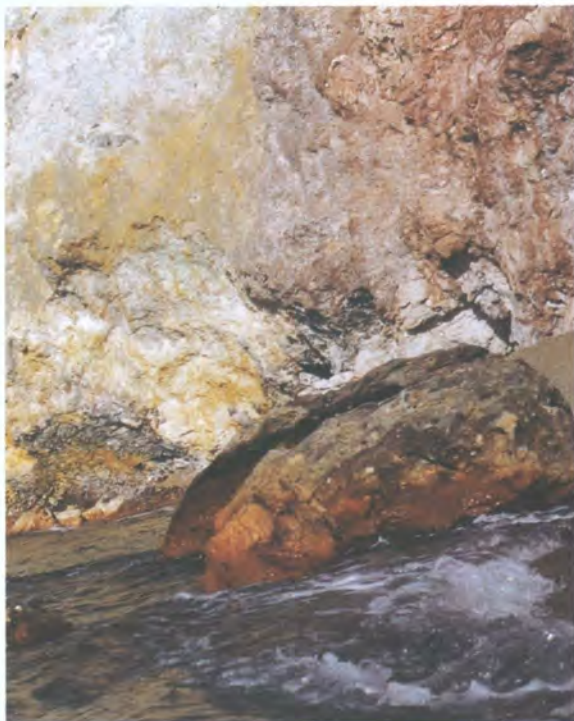
Полевые исследования в районе острова Милос. На протяжении 1996—1997 гг. было совершено три выезда в поле у южного побережья Милоса и прилегающих к нему островов для взятия проб оседающих частиц и донных отложений, а также для развешивания и снятия поставленных на якорь установок, состоя-

щих из ловителей оседающих веществ и счетчиков скорости течения. Эти ловушки, работающие с определенным временным интервалом, улавливали в летнее время частицы, проходившие сквозь толщу воды с глубины 60 м, в трех точках вдоль поперечной линии, соединяющей зону геотермальных выделений с районом, полностью свободным от их влияния.

В этих трех точках восемь чашек пробоотборников последовательно улавливали частицы, причем продолжительность работы каждого составляла 12 суток. Потоки частиц на некотором удалении от источников существенно отличались от потоков, близких к ним. На протяжении почти всего времени измерений количество появляющихся и переносимых частиц возле этих источников на один или два порядка превышало количество частиц в контрольных и промежуточных точках. Лишь на протяжении непродолжительного периода в середине лета потоки были примерно сравнимы во всех точках. В периоды наибольшего осаждения превышение органического материала в районе источников доходило до 30—100 раз.

Летом 1996 г. ловушки устанавливались на линии длиной всего лишь 3,5 морских миль. И тем не менее в разных точках оседающие частицы отличались не только по своему количеству, но и по составу.

Большинство взятых проб состояли главным образом из остатков зоопланктона (остатки скелетов животных, внешние скелеты и самые разнообразные фекалии). Однако сентябрьские пробы из районов гидротермальных источников резко отличались от всех других проб и состояли главным образом из крошечных удлиненных темно-коричневых фекалий, весьма однородных по размеру и форме. Последняя полученная проба почти целиком состояла из это-



го фекального материала. Повсеместно присутствовали также морские бактерии, однако больше всего их встречалось в частицах непосредственно из источников. Их участие в потоке углеродных соединений было незначительным (менее 1%), за исключением середины лета, когда масса потоков значительно снижалась.

Анализ ДНК позволил определить наличие термофильных бактерий, связанных с гидротермальными источниками, но лишь в образцах, взятых непосредственно из источников. Таким образом, выработка углерода и последующий перенос его к отложениям в местах источников осуществлялись значительно интенсивнее, чем в более отдаленных от источников обследованных районах. В своем большинстве частицы были пелагического и, судя по бактериальному показателю, геотермального происхождения.

Процессы переноса частиц. В ходе тех же полевых экспериментов в Эгейском море были использованы разные свойства природной радионуклидной

пары — полония-210 и свинца-210 — для изучения процессов переноса частиц в мелководной зоне гидротермальных источников. Полоний присутствует в морской среде главным образом как продукт распада свинца-210 после его перехода в воду из атмосферы и вследствие дегазации радона из осадочных горизонтов и подводных формаций, в которых имеются источники. Если источники выделяют гидротермальные воды, обогащенные полонием-210 и его прародителем свинцом-210, то следует ожидать, что частицы в районе источника также будут обогащены этими радионуклидами. Поэтому летом 1996 г. отбор частиц проводился четыре раза на небольшой глубине (60 м).

Полученные в результате отбора данные не свидетельствуют о том, что насыщенная серой среда в районе источников влияла на концентрацию полония-210 в оседающих частицах. Содержание полония-210 было того же порядка, что и в районе реки По, зарегистрированное ранее в материале, собранном уловителями осаждающихся частиц дон-

ных отложений летом в прибрежной зоне Северо-Западного Средиземноморья, которая значительно удалена от какого-либо геотермального воздействия.

Аналогичным образом не было отмечено повышение содержания свинца-210 в частицах, генерированных в районе источников. Фактически частицы в так называемой "контрольной точке" содержали больше свинца-210, чем в районе источников.

Поведение полония-210 в океанической среде отличается от поведения свинца-210, в особенности из-за более высокого сродства полония с органическим веществом. Так, характер и коле-

В одном из районов геотермальной активности (прибрежные воды о. Милос) наличествуют следы отложений железа (коричневый цвет) и серы (желтый цвет). В мелководных геотермальных районах Эгейского моря подводная фотокамера запечатлела круги осевших химических веществ и бактериальных пленок, а на нижнем снимке видно выделение газа (преимущественно CO_2) из донных отложений. (Фото: Miquel/MEL)

бания относительного соотношения органической и неорганической фракций оседающих частиц могут оказать большее влияние на содержание полония-210 и свинца-210, чем динамика функционирования самих источников.

Было проведено также сравнение вертикальных потоков полония-210 и свинца-210 в двух точках. Из него следует, что распространение вертикальных потоков частиц, содержащих эти два радионуклида, в среднем принимает более широкие масштабы в районе геотермальных выходов. Это объясняется не высоким содержанием радионуклидов в оседающих частицах возле источников, а, скорее, более интенсивным потоком частиц в зоне их выходов. Отсюда явствует, что продуктивность и, как следствие, выпадение биогенных частиц оказываются более интенсивными у выходных отверстий, что, в свою очередь, увеличивает движущийся вниз радионуклидный поток. Таким образом, эти выходы способны опосредованно регулировать такой поток, воздействуя на типы и количество локально генерируемых частиц, например в районе гидротермальных выходов.

В этой уникальной экосистеме острова Милос активно действующие процессы восстановления серы и ее окисления связаны с геотермальными выходами. Учитывая схожесть химических характеристик серы и полония, можно предположить, что такие насыщенные серой выходы источников содержат значительные концентрации полония. А отсюда следует, что биота, чья кормовая база находится в прилежащих районах, также может обладать повышенным содержанием полония.

Фактически, районы выходов источников изобилуют флокулятами бактерий, а на белесых бактериальных хлопьях, образующихся на небольших глубинах, зачастую кормятся морские улитки-липарисы. Было замечено содержание полония-210 и свинца-210 в мягких тканях

этих организмов, с тем чтобы определить, не является ли оно повышенным, и установить характер передачи этих важных природных радионуклидов по пищевой цепи.

Интересно отметить, что содержание полония-210 и свинца-210 было аналогично медианным величинам, рассчитанным на основе нескольких сот опубликованных данных по организмам, обитающим далеко за пределами геотермальных выходов. Более конкретно: уровень такого содержания оказался даже более низким, чем у глубоководных червей, обитающих в гидротермальных выходах и поглощающих сульфидосодержащие минеральные частицы, обогащенные полонием-210. Таким образом, поедание липарисами бактерий, обитающих на минеральных пленках близ острова Милос, похоже, не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на содержание полония-210 и свинца-210 в организме этих брюхоногих моллюсков.

Описанные здесь исследования ЛМС представляют собой первые попытки количественно определить вертикальные потоки и цикличность материалов, а также природные радионуклиды, связанные с мелководными участками выхода гидротермальных источников в Средиземном море.

ОЦЕНИВАЯ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

ЛМС также активно участвовала в программе "Европейская система река — океан" (ЭРОС-2000), которая осуществлялась при поддержке проекта МАСТ Европейского союза. Ее цель — дать оценку воздействия речных и наземных источников загрязнения экосистем шельфа Европы.

Французское судно "Марион Дюфрен" совершило научное плавание для взятия образцов донных отложений между центральной акваторией северо-западной части Средиземноморского бассейна и районом, приле-

гающим к устью реки Эбро (Испания). Цель экспедиции, в частности, состояла в том, чтобы определить темпы осаждения биогенных (углерод, азот, фекальные выделения, неповрежденные организмы) и небигенных материалов (радионуклиды, редкоземельные и другие элементы), используя как поставленные на якорь, так и дрейфующие ловители оседающих на дно частиц. Также были произведены различные замеры в водной толще, в том числе для определения количества детрита взвешенного фито- и зоопланктона. Цель таких измерений состояла в том, чтобы соотнести полученные с помощью ловушек данные с процессами, происходящими в открытом океане, которые регулируют вертикальный поток и состав макрочастиц.

С помощью четырех автоматических ловителей осадочного материала, поставленных на якорь в открытом море северо-западной акватории Средиземноморского бассейна на глубинах от 200 до 2000 м (содержимое ловушек извлекалось каждые две недели), было обнаружено, что в течение мая на дно глубоководных районов происходило оседание материала, образовавшегося вследствие цветения фитопланктона. В этот период в ловители попадали преимущественно два вида фитопланктона. Вероятнее всего, массовое развитие последнего было вызвано тем, что сильные ветры в середине апреля подняли на поверхность массы воды, содержащие питательные вещества, а когда они истощились, фитопланктон начал погибать и оседать на дно. Судя по извлеченным из ловушек образцам, во всей водной толще — от поверхности до морского дна — происходило быстрое оседание (более 140 м в сутки) материала, состоящего из макрочастиц с высоким содержанием углерода. Во время такого "импульсного оседания" в мае поток частиц на глубине 200 м был в 3—4 раза интенсивнее, чем в предшествую-

щие и последующие периоды. С глубиной этот импульс проявлялся даже сильнее, интенсивность потока частиц превышала пиковые периоды осаждения в 6—10 раз, а для потока углерода соответствующие показатели возрастали в 10—30 раз.

С помощью анализа компьютерного изображения были исследованы содержащиеся в тех же образцах фекальные выделения зоопланктона, которые также являются важным средством переноса веществ. В период максимального роста фитопланктона в водной толще общее количество оседающих фекалий начало возрастать, но наивысшего показателя достигло спустя две недели, когда биомасса зоопланктона поднялась до пиковых величин. Было обнаружено, что на протяжении этого периода фекалии зоопланктона составляли от 25 до 40% всего отложившегося на дне углерода. Разрыв между максимальным ростом фитопланктона и пиковым количеством оседающих фекалий объясняется жизненным циклом планктонных животных (мельчайших ракообразных, червеобразных и рыб), а также их взаимодействием в пищевой сети, характерной для открытого моря.

В оседающих частицах, извлеченных из четырех разных по глубине водных горизонтов и измеренных с помощью периодически проверяемых ловушек, был исследован состав редкоземельных элементов (РЗЭ) — некоторые из них являются стабильными элементами или аналогами основных искусственных радионуклидов.

Во время импульсной седиментации структура РЗЭ в частицах, извлеченных из наиболее глубоких ловушек, была аналогична той, что наблюдалась в образцах, поднятых с глубины до 200 м. Это указывает на то, что, оседая на дно, частицы не захватывают — или почти не захватывают — никаких дополнительных редкоземельных элементов. В противоположность этому анализ частиц

из глубоководных горизонтов после импульсной седиментации показывал, что они существенно насыщены легкими РЗЭ (ЛРЗЭ) по сравнению с тяжелыми и содержат больше церия.

Было проведено сравнение различий структур РЗЭ в частицах из верхней части толщи воды (200 м) и из более глубоких горизонтов (1000 и 2000 м) во время и после импульсной седиментации. Сравнение показало, что в определении объема захвата РЗЭ опускающимися частицами главную роль играет фактор времени. Это особенно видно на примере предпочтительного захвата церия, наиболее заметного в более мелких и медленно опускающихся частицах, которые предположительно образовались ранее других. Данные результаты соответствуют структурам РЗЭ, которые содержатся в морской воде северо-западной акватории Средиземного моря и для которых характерны сильная негативная цериевая аномалия и постепенное обогащение РЗЭ с возрастающим атомным числом. Обогащение ЛРЗЭ по сравнению с ТРЗЭ (тяжелые редкоземельные элементы), которое наблюдается у частиц в глубоководных горизонтах, приводит либо к преференциальному захвату легких РЗЭ частицами, как это происходит при их обогащении церием, либо к избирательному растворению ТРЗЭ в связи с процессами реминерализации частиц, либо к тому и другому вместе.

Полученные знания о поведении в морской среде церия, европия и других РЗЭ, которые реагируют на присутствие частиц, существенно помогли понять круговорот и перенос в океанических системах подобных им радионуклидов, таких как радиocerий и америций-241.

ВЫГОДЫ СОТРУДНИЧЕСТВА

Развитие сотрудничества между МАГАТЭ и Европейским союзом в сфере прикладных океа-

нографических исследований Средиземного моря в 90-е гг. приносит обоюдную выгоду.

Исследователи ЛМС извлекли большую пользу, поработав в тесном контакте с учеными других государств-членов над осуществлением крупных многодисциплинарных проектов. Такая работа сосредоточена на проблемах морской среды, представляющих общемировой интерес, и при ее выполнении применяются самый современный океанографический инструментарий и самые совершенные методологии, которыми сотрудники ЛМС, как правило, не располагают. Особенно важной для них является возможность систематически пользоваться океанографическими судами, аренда и эксплуатация которых обходятся весьма дорого. Бесплатный доступ к государственным научно-исследовательским судам и имеющемуся на борту оборудованию оказался жизненно важным для выполнения плановых программ МАГАТЭ по изучению морской среды при низких затратах.

Со своей стороны, ЛМС предоставила в распоряжение других участвующих в программах ученых набор своих сложнейших методов ядерных и изотопных исследований, которые позволяют лучше понимать процессы, управляющие биогеохимическими свойствами основных входящих в состав биоты Средиземного моря элементов.

Недавний переезд ЛМС в новые помещения в районе порта Монако позволит Лаборатории активнее помогать сотрудничающим с ней ученым в профессиональной подготовке лаборантов и в проведении анализа образцов. Поэтому есть все основания надеяться, что такие совместные мероприятия МАГАТЭ и Европейского союза будут проводиться и в XXI в. Тем самым будет облегчено достижение основной цели, стоящей перед обеими организациями, — обеспечение здоровья океанов планеты.

