

Глубоководные обитаемые аппараты «Мир» на Байкале

А.М.Сагалеви́ч,
доктор технических наук, Герой России
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН
Москва



В 2008—2010 гг. на оз. Байкал проводились научные экспедиции с использованием глубоководных обитаемых аппаратов (ГООА) «Мир-1 и -2». Я был бессменным руководителем этих работ. Финансировались исследования Фондом содействия сохранению озера Байкал и велись в основном сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Лимнологического института СО РАН (ЛИН СО РАН).

Первые исследования Байкала относятся к началу XIX в., когда там открыли водомерные посты. Научные наблюдения были обусловлены потребностями человека в использовании природных ресурсов и не отличались систематичностью. Измерения проводились попутно с географическими работами, а озераведение в основном развивалось в связи с запросами рыболовства. Но со временем лимнология оформилась как самостоятельная область науки и исследования Байкала приобрели комплексный характер, особенно после создания Лимнологического института [1]. Вскоре появился и научный флот, была организована водолазная группа, которая проводила непосредственные визуальные наблюдения на небольших глубинах. Активное участие в изучении Байкала принимали и другие учреждения Сибирского отделения Академии наук: Институт земной коры, Институт геохимии, а также ученые и студенты Иркутского университета и других организаций. Благодаря этим многолетним исследованиям накопился большой объем данных о природе озера, его геологическом строении, биологической активности и др.

Настоящим прорывом в изучении Байкала стала экспедиция 1977 г. с применением подводных обитаемых аппаратов «Пайсис VII» и «Пайсис XI» (с рабочей глубиной до 2000 м), организованная ИО РАН и ЛИН СО РАН



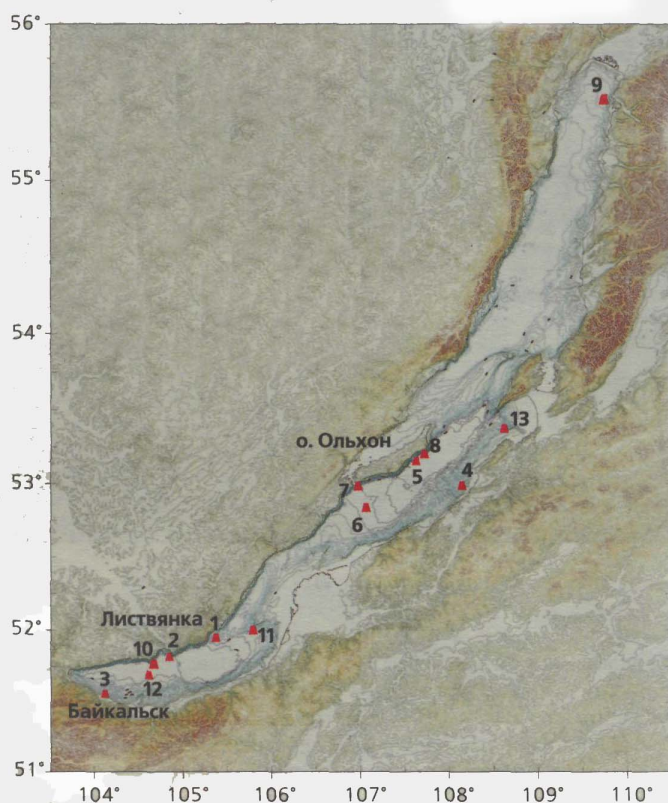
Подводный обитаемый аппарат «Пайсис VII» на Байкале. 1977 г.

[2]. Исследования на «Пайсисах» продолжились и в международной экспедиции 1990—1991 гг., в которой участвовала большая группа американских ученых. Применение подводных обитаемых аппаратов позволило новому взглянуть на природу озера, проследить развитие этого мощного посреди континента тектонического разлома, постоянно находящегося в движении и медленно раздвигающегося в поперечном направлении. Ученые впервые смогли сами взглянуть на обнажения горных пород на дне, провести прямые палеолимнологические исследования с прицельным отбором геологических и биологических образцов, с видео- и фотосъемкой, с гидрофизическими, гидрохимическими измерениями и т.д.

И вот спустя 17 лет в изучении подводного мира Байкала приняли участие глубоководные обитаемые аппараты нового поколения «Мир-1 и -2». И де-



Глубоководные обитаемые аппараты «Мир» на Байкале.



Карта районов погружений аппаратов «Мир-1 и -2» в экспедициях 2008—2010 гг. Треугольниками показаны полигоны: 1 — Большой Голоустный; 2 — Листвянка; 3 — Байкальский ЦБК; 4 — Турка; 5, 8 — мыс Ижмией; 6 — вулкан Санкт-Петербург; 7 — Ольхонские ворота; 9 — бухта Фролиха; 10 — мыс Бакланний; 11 — Посольская банка; 12 — мыс Толстый; 13 — мыс Горевой Утес.

до не только в их глубине погружения (6000 м), но и в том, что благодаря своему хорошему техническому оснащению они давали возможность проводить научные работы на качественно другом уровне, позволяющем обнаруживать и изучать аномальные явления на дне с обеспечением точной навигационной привязки [3]. Кроме того, и ученые, и пилоты аппаратов прошли уже большую школу комплексных глубоководных исследований в пучинах океана.

Основным направлением работ на Байкале стал поиск областей разгрузки углеводородов на дне, мест сочтения метана и возможных гидротермальных излияний, вокруг которых часто

образуются бактериальные маты и поселяются специфические животные, существующие за счет метанотрофии и хемосинтеза. Во время экспедиций 2008—2010 гг. было совершено 178 погружений на «Мирах», главным образом в средней и южной частях озера. В 2010 г. несколько погружений сделали и в северной части Байкала — в бухте Фролиха.

В первой экспедиции (2008) мы работали на 14 полигонах, погружались 53 раза и провели под водой более 300 ч, 192 из которых — на грунте. Одни из важнейших результатов того периода — локализация зон глубинных нефте- и газосодержащих флюидов на дне озера и оп-

ределение интенсивности их разгрузки.

Мыс Горевой Утес. В 2005 г. в этом районе, примерно в 10 км от берега, ученые Лимнологического института зафиксировали большие пятна нефтяных пленок, распространяющиеся на поверхности в радиусе до 1 км.

Во время работ на «Мирах» мы также нашли локальные места разгрузки нефтесодержащих флюидов, отобрали пробы для определения фоновых концентраций углеводородов, пробы планктона, ихтиопланктона и донных животных.

В фоновой области, непосредственно прилегающей к району высачивания нефти и газа, а также в самой зоне нефтепроявлений отмечено большое количество «морского снега» (скопления планктона) во всей толще воды от глубины 100—150 м до самого дна.

В диапазоне глубин 863—877 м донные осадки представлены современными светло-коричневыми илами и глинистыми бело-голубыми и оливково-серыми ледниковыми отложениями, обнажившимися в результате схода со склона оползня. Рельеф дна неровный, холмистый, с перепадами высот до 100 м. Здесь мы увидели отдельные холмы высотой до 1 м и диаметром до 3 м, покрытые темно-коричневыми и черными корками, а также стенку высотой около 1 м и длиной до 5 м, образованную более мелкими холмами с тонкими коническими постройками, похожими на потухшие «курительщики». Они были плотно заселены амфиподами, планариями и моллюсками.

На глубине 869 м обнаружили темно-коричневую трубку высотой ~1.5 м и диаметром 2 м (напоминающую гидротермальную) из битума, асфальтенов и парафинов. Из ее верхней части каждые 24—28 с высачивались капли (диаметром 0.5—1 см) коричневой нефти, которые быстро поднимались к поверхности. Из этой же построй-

ки с периодичностью 20–30 с выделялись пузырьки газа.

Нефть сочилась также из небольших битумных построек на глубине 899 и 906 м. Во время погружений экипажи «Миров» измеряли температуру в местах сочения нефти и маркировали постройки для последующих наблюдений. Иногда, если нарушалась целостность поверхности осадка манипулятором или касались илистого слоя лыжи аппаратов, происходили выбросы нефти и газа. Разгрузка газо- и нефтесодержащих флюидов наблюдалась и из многочисленных воронок диаметром 5–40 см.

В районах высачивания нефти и газа из иллюминаторов аппаратов проводились визуальные наблюдения за обитателями подводного мира. Исследовались вертикальное распределение планктона и ихтиопланктона, поведение и ориентация в пространстве массовых эндемичных видов рачков *Macrobrachium branickii* и *Epishura baicalensis*, а также рыбки голомянки рода *Cottophorus*. Все они входят в состав единой пищевой цепи в сообществах склоновых и центральных областях Байкала.

Оказалось, что в верхних слоях воды (0–350 м) нет крупных пелагических животных. Лишь на глубине около 400 м появляются единичные экземпляры довольно большого (25–35 мм) рачка *M. branickii*, ориентированного головой вниз, и с увеличением глубины его численность возрастает. На расстоянии около 100 м от дна наблюдалась разноразмерная популяция рачков, при этом более мелкие особи были также ориентированы головой вниз.

В придонном слое (несколько метров от дна) голомянки ныряли в ил, взмучивая его хвостовым плавником и оставляя на поверхности осадка специфические следы, а иногда прятались в норки. Одновременно на дне в поле нашего зрения присутствовало пять-шесть особей разной величины. Подобное



Нефтяные пятна естественного происхождения на поверхности озера вблизи мыса Горевого Утес (вверху) и битумная постройка с высачиванием нефтяных капель.

распределение и поведение голомянок в придонном слое на довольно большой площади отмечалось впервые. Биологи пришли к выводу, что эти рыбы не принадлежат к чисто пелагическим обитателям Байкала.

При визуальных наблюдениях с аппаратов определяли и видовой, и размерный состав массовых эндемичных видов в придонной области и на поверхности осадков, а также поведенческие реакции различных ракообразных, коттоидных рыб (бычков-подкаменщиков) и рес-

ничных червей (турбеллярий). Мелкие разноногие рачки (амфиподы) зарывались в ил и находились в нем достаточно длительное время. Некоторые особи были белого цвета, что характерно для представителей абиссальной фауны. Крупные же амфиподы различались по окраске и поведению: некоторые рачки сидели на небольших холмиках, другие активно передвигались по поверхности дна. По приблизительной оценке, концентрация амфипод (четырёх видов) и турбеллярий (двух



Монолитный газогидратный холм под слоем осадка (вверху) и кусок твердого газогидрата в манипуляторе аппарата «Мир».

видов) достигала 10–12 особей на 1 м² грунта.

Подводный грязевой вулкан Санкт-Петербург. Важнейшим фундаментальным открытием, сделанным во время работ в 2009 г., стало обнаружение в этом районе большого поля холмов, состоящих из твердых ледоподобных газогидратов, слегка припорошенных осадками [4]. Грязевой вулкан нашли ученые из Лимнологического института в 2002 г. Однако в течение семи лет никто и не подо-

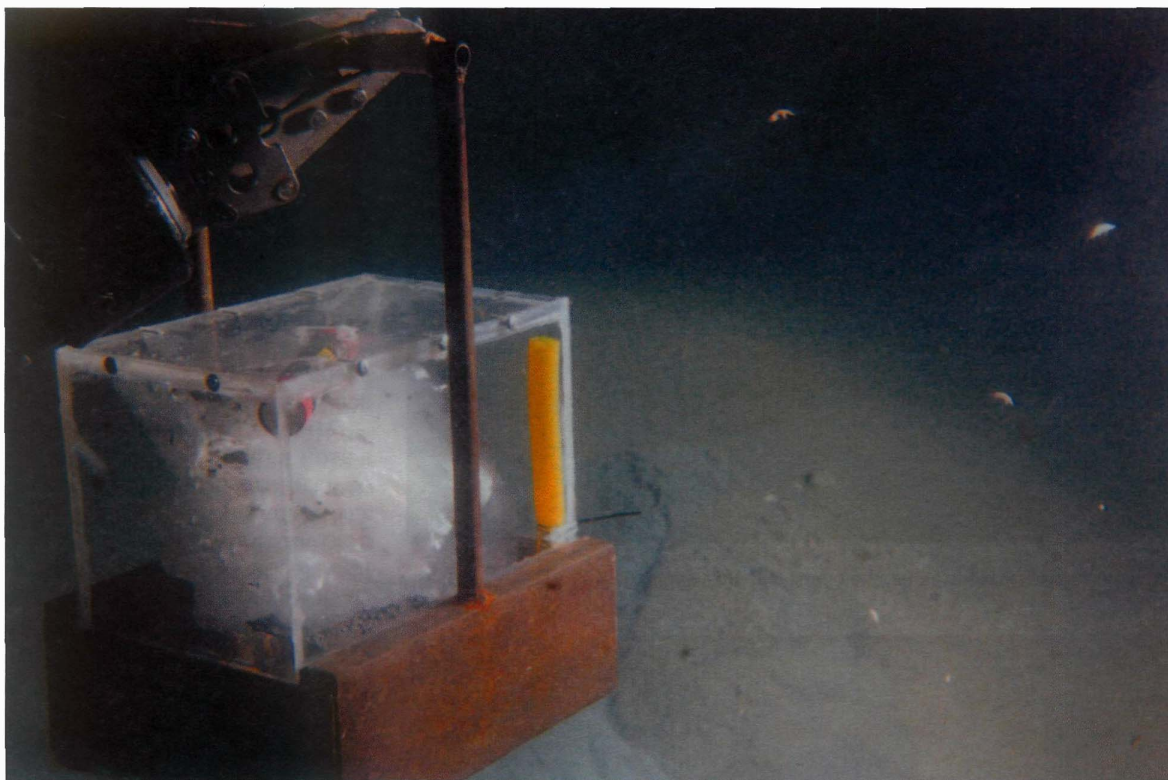
зревал о существовании там монолитных газогидратов. Это открытие выходит далеко за рамки исследования собственно Байкала. Газовые гидраты — кристаллические соединения метана с водой — емкий резервуар энергетического сырья. В одном кубометре гидрата содержится до 162 м³ газа. По современным оценкам, ресурсы метана в природных газовых гидратах Мирового океана могут превышать ресурсы всех горючих полезных ископаемых на суше.

В 2010 г. мы продолжили работу вблизи грязевого вулкана Санкт-Петербург. Был обозначен газогидратный район размером ~100×100 м, на территории которого располагались три больших и множество мелких газогидратных холмов [5]. Кроме того, под небольшим слоем осадка там практически везде залегают монолитные газогидраты, в том числе и на относительно ровном дне у подножия холмов. Наблюдались и струйные высачивания метана из осадка. Именно они формировали на экране эхолота специфический газовый факел. При многочисленных погружениях «Мир» были отобраны пробы грунта, воды и бентосных животных. Во многих местах разгрузки глубинных флюидов встречались пленочные бактериальные маты, покрывающие газогидраты.

Здесь же были обнаружены желеподобные органические образования, представляющие собой небольшие комочки размером 1–3 см. Изотопный анализ, сделанный в ЛИНе, показал, что и бактериальные маты, и желеподобные комочки существуют здесь за счет метанотрофии.

Геотермическими исследованиями установлено лишь небольшое превышение геотермического градиента над фоном, что нетипично для активного грязевого вулканизма. Это очень важная информация, которая позволяет сделать вывод о преимущественной роли фазового состояния метана, формирующего газогидраты. На полигоне получены данные о высоком потоке метана непосредственно из осадка в воду и незначительном потоке кислорода в осадок.

В экспедициях 2008–2009 гг. под руководством А.Н.Рожкова (Физический институт РАН) разрабатывалась методика поиска газогидратов по аномалиям метана в воде с помощью датчика, установленного на ГОА «Мир». Так был обнаружен первый газогидратный холм. При погруже-



Манипулятор ГОА «Мир» переносит контейнер с газогидратом.

ниях провели ряд экспериментов по формированию и разложению газогидратов из пойманной ловушкой пузыря метана по методике, разработанной А.В.Егоровым (ИО РАН). Впервые наблюдалось формирование твердой газогидратной пены из пойманных пузырей и ее разрушительное действие при подъеме аппарата — несколько ловушек разрушились на глубине 700 м (существенно ниже положения фазовой границы устойчивости газогидратов). Мы также обнаружили, что газогидратно-ледяные пробки образуются выше положения фазовой границы. Эти результаты очень важны для разработки будущих технологий доставки и транспортировки метана с больших глубин.

Район Большой Голоустный. Здесь мы тоже встретились с газогидратами. Это поле, расположенное на глубине 420 м, — самое мелководное газогидратное поле в мире. Оно характери-

зуется исключительно мощным потоком метана из осадков, достигающим поверхности воды. Нам удалось проследить за газовыми пузырями до самого дна, где была обнаружена геологиче-

ская структура в виде каньона с вертикальными стенками, связанная, по-видимому, с интенсивным выбросом газа из осадка. Борта этого каньона образованы рыхлыми отложениями.



Сбор газа в ловушку на глубине 404 м.



Поле бактериальных матов на дне бухты Фролиха (глубина 409 м).

Среди них отмечен полупрозрачный горизонтальный пропласток мощностью до 20 см и длиной до 5–6 м, похожий на газогидрат. Здесь отобраны пробы газа, выходящего со дна, осадки и образцы бентосных организмов. Изотопный состав последних показал, что они так же, как и на поле Санкт-Петербурга, существуют за счет метанотрофии.

Посольская банка. В этом районе, расположенном вблизи

мощного осадочного образования — Селенгинской авандельты, в 2009–2010 гг. проводились интересные исследования разгрузки газа. Посольская банка представляет собой потенциально нефтегазоносный район, что подтверждается ранее выявленными аномалиями в содержании углеводородных газов и в воде, и в осадках. Все аномалии при этом имели общую черту — высокий уровень этана по отношению к метану. Здесь в на-



Горизонтальная поверхность террасы, заканчивающаяся сбросовым уступом.

ших экспедициях впервые на Байкале были обнаружены необычные цветные бактериальные маты. Судя по анализам, проведенным биологами ЛИНа, сообщества бактерий из этих образцов существовали как за счет метанотрофии, так и за счет хемосинтеза. Под слоем осадка мы нашли газогидрат. Его небольшие фрагменты, отломанные манипулятором, мелькали перед иллюминатором, устремляясь вверх и обгоняя аппарат при всплытии.

Мыс Толстый. Работая в этом районе, мы получили неожиданные результаты. Первые же погружения ГОА «Мир» не подтвердили сделанных ранее прогнозов о наличии там разгрузок газа и нефти. Местное подводное поднятие рассматривалось как грязевой вулкан. А так как здесь не удавалось поднять осадки геологическими трубками, которые ударялись о твердое дно и приходили пустыми, предполагалось, что на дне находятся такие же массивные газогидраты, как и на грязевом вулкане Санкт-Петербурга.

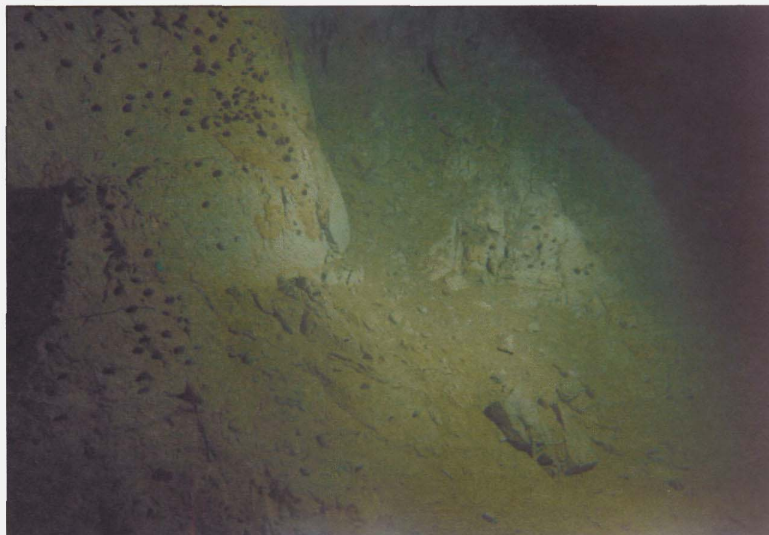
Визуальные наблюдения из «Миров» показали, что на дне отсутствуют мелкомасштабные морфологические признаки выноса глубинных флюидов, типичных для грязевых вулканов. Желтоватый цвет верхнего слоя осадка свидетельствовал о его окисленности. Под тонким слоем залегали древние породы. Содержание газа в воде и осадках и геотермический градиент оказались близкими к фоновому. Таким образом, осмотр, проведенные инструментальные измерения и анализ отобранных образцов позволили однозначно утверждать, что данное поднятие не грязевулканическое образование, а небольшая подводная банка. Подобные структуры весьма характерны для восточного борта Байкала.

Бухта Фролиха. Довольно обширные покровы бактериальных матов мы встретили и в северной части озера. На одном из маршрутов «Миров», на глубине

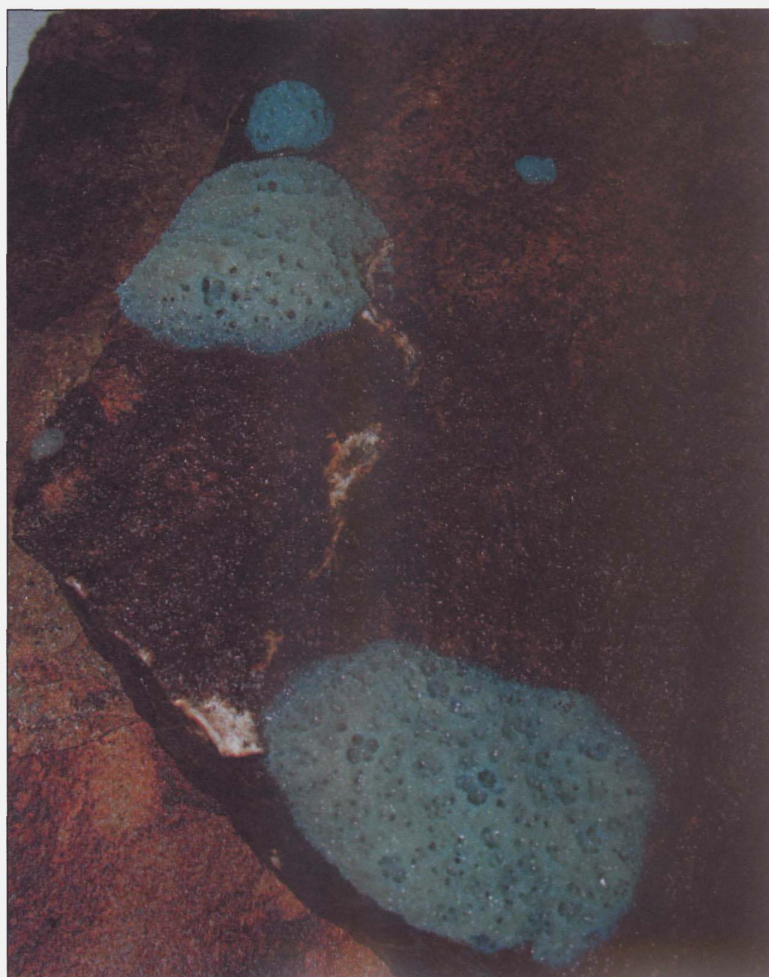
около 400 м, нам удалось выйти на большое гидротермальное поле, которое тянулось вверх по склону более чем на 2 км. Здесь впервые были проведены масштабные геотермические исследования. Внутри поля при измерениях получены высокие значения геотермического градиента — в среднем для данного полигона они достигали 2—4°C/м, что приблизительно в 100 раз выше средних величин для Байкала.

Мы установили связь термической активности с плотностью поселений бентосных организмов. Обширные белые пятна бактериальных матов маркировали максимальный тепловой поток. По изотопному анализу установлено, что бактерии существуют здесь и за счет хемосинтеза, и за счет метанотрофии. Характерная черта этого гидротермального поля — многочисленные и разнообразные скопления губок и полосы амфипод. В области максимальных значений теплового потока на границе вода—осадок зафиксирован и высокий поток метана из осадка в воду. Анализ многочисленных проб придонной воды, взятых с помощью специально изготовленных пробоотборников, показал высокое содержание метана в придонном слое.

Средний и западный Байкал. Наши исследования районов разгрузок нефти и газа, наличие твердых газогидратов и гидротермальных проявлений, характеризующихся эндемизмом фауны, подтверждают, что Байкал представляет собой водоем, близкий к океанической экосистеме. Об этом свидетельствует и геологическая структура озера, для которой характерны основные признаки океанических рифтовых зон. Байкальская котловина образовалась в результате изгибовых деформаций земной коры, сопровождающихся разломами. Перемещения по ним отдельных блоков имело основное рельефообразующее значение. По западному



Перистые глины на восточном склоне озера.



Представители древнейшей байкальской фауны — голубые губки.

борту Байкальской котловины мы наблюдали ступенчатые террасы, а в районе Ольхонских Ворот — развитие разрывных нарушений сбросового типа, которые наиболее четко прослеживаются в подводной глубоководной части острова. Горизонтальные поверхности террас чередуются с обрывистыми стенками высотой до 160 м, образуя мощные ступени. На глубине около 1400 м дно выполаживается. В этой глубоководной части Байкальского рифта накапливается толща тонких илистых осадков.

Коренные горные породы сверху покрыты пленкой трансформированных (гипергенных) образований, а в скальных обнажениях они хрупкие, выветрелые. Местами сохранились кварцевые жилы и прожилки причудливых форм.

На участке дна среднего Байкала локально распространены глинистые образования с пористой текстурой. Они формируются на склонах «потоки» корок мощностью от 3 до 40 см.

Мы исследовали зону контакта западного борта Байкальского рифта с дном средней котловины на глубинах 1450—1580 м. Здесь дно имеет довольно ровный рельеф и покрыто мощным слоем тонкодисперсных илистых осадков. Наши работы уточнили строение рифтообразующего (Обручевского) разлома на западном склоне центральной части Байкальской впадины. Комплексный анализ отобранных образцов позволит

получить новые данные о возрасте последних подвижек в земной коре и даст возможность достоверно оценить соотношение между их горизонтальной и вертикальной составляющими.

В районе о.Ольхон, Обручевского, Северобайкальского и других крупных северо-восточных разломов раскрытие рифта происходило при доминирующем влиянии сбросовых перемещений. На западном борту наблюдается довольно крутой склон, сложенный коренными породами с большим количеством слабоокатанного валунного и галечного материала. Гребни склона покрыты железистыми корками. На обследованных участках в диапазоне глубин 1313—1017 м крутизна склона изменяется от 40 до 15—20°. Дно микроканьонов покрыто пелитовым илом с небольшим количеством свалившегося с бортов обломочного материала. На малых глубинах (около 570 м) коренные породы пронизаны порами размером до 3 см.

Террасы склона населены глубоководными эндемичными беспозвоночными, принадлежащими к разным группам (несколько видам амфипод и губок), а также голомянками и коттоидными рыбами. С помощью манипулятора «Мир» собрано много животных, ранее отсутствовавших в коллекциях, полученных при глубоководных тралениях.

В этом районе впервые проводились визуальные глубоководные биологические наблюдения таксономического разно-

образия и вертикального распределения эндемичных видов животных, определялись диапазоны их обитания. На двух полуразрезах среднего Байкала в интервале глубин от 36—40 до 1450—1580 м наши биологи изучали распределение представителей древнейшей байкальской фауны — голубых губок. Были определены места их скопления, взято несколько видов для проведения морфологического и молекулярно-биологического анализов.

Впервые своими глазами можно было проследить за распределением абиссальных видов байкальских коттоидных рыб в присклоновой и склоновой зонах, а также донных глубоководных видов амфипод в придонном слое. Собрана обширная коллекция глубоководных планарий.

* * *

В данной статье изложены лишь отдельные результаты исследований оз.Байкал, основанные на визуальных наблюдениях из аппаратов «Мир», которые дают возможность представить масштабность проведенных работ, многоплановость постановки задач и их решения. Полученные данные подтверждают уникальность примененных методов изучения подводного мира, какую не могут обеспечить никакие другие исследования. Вспоминаются слова великого Ж.И.Кусто: «Ни один робот, ни один инструмент не заменит человека под водой». ■

Литература

1. Афанасьева Э., Бекман М. Путь познания Байкала. Новосибирск, 1987.
2. Мирлин Е.Г., Мотин А.С., Подражанский А.А., Сагалевич А.М. Строение западного склона Байкала по наблюдениям из подводных аппаратов // Докл. АН СССР. 1978. Т.239. №5. С.1178—1181.
3. Sagalovich A. Quarter century of the MIR-1 and MIR-2 submersibles. MIR submersibles provided wide spectrum of scientific and technical operations // Sea Technology Magazine. 2012. №12. P.45—48.
4. Егоров А.В., Рожков А.Н., Черняев Е.С., Римский-Корсаков Н.А. Первый опыт транспорта глубоководных гидратов метана в негерметичном контейнере // Океанология. 2010. Т.51. №2. С.376—382.
5. Егоров А.В. Открытие и изучение газогидратов на дне озера Байкал в ходе экспедиции «Миры» на Байкале» 2008—2010 гг. // Сборник докладов Конференции «Байкал — всемирное сокровище». Париж, 2012. С.130—139.