

Исследование озера Байкал с применением глубоководных обитаемых аппаратов

В статье рассматриваются результаты изучения озера Байкал с применением глубоководных обитаемых аппаратов (ГОА) «МИР-1» и «МИР-2», которые проводились в течение 2008–2010 гг. Приводятся данные по геологическому строению Байкала и его биологической активности, основанные на визуальных наблюдениях учёных и результатах измерений и анализов образцов.

Ключевые слова: глубоководные обитаемые аппараты, научные исследования озера Байкал, газогидраты.

САГАЛЕВИЧ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, sagalev1@yandex.ru

ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

Lake Baikal exploration using deep manned submersibles

A. M. SAGALEVICH

Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Science, Moscow

The article considers results of studying Lake Baikal using the Deep manned submersibles (DMV) "MIR-1" and "MIR-2", which were carried out during 2008–2010. Data on the geological structure of Baikal and its biological activity are presented, that are based on the visual observations of scientists and on results of the measurements and analyzes of samples.

Key words: deep manned submersibles, scientific research of Lake Baikal, gas hydrates.

В России 2024 г. объявлен годом Байкала. Существенный вклад в исследования Байкала внесли глубоководные обитаемые аппараты (ГОА) «Пайсис VII» и «Пайсис XI» (рабочая глубина 2000 м), а также «МИР-1» и «МИР-2» (6000 м), принадлежавшие Институту океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН). Оба «Пайсиса» были построены канадской фирмой «International Hydrodynamics» (ИУСО) в 1975 и 1976 гг. при непосредственном участии Игоря Евгеньевича Михальцева и Анатолия Михайловича Сагалевича, которые наблюдали за созданием не только этих аппаратов, но и первых научно-исследовательских ГОА такого типа. В 1976 г. оба «Пайсиса» были поставлены в ангар Южного отделения ИО АН СССР, вблизи Геленджика на Чёрном море, где вновь созданная подводная команда и учёные Южного отделения начали проводить первые научные подводные исследования. В связи с тем, что в ИО РАН не было судов, оборудованных для работы с ГОА, первые глубоководные исследования решено было (по указанию Андрея Сергеевича Моница, директора

ИО РАН тех лет) проводить на оз. Байкал. Первая экспедиция на озеро Байкал с применением «Пайсисов» была проведена летом 1977 г. [1].

Для обеспечения погружений на Байкале была оборудована баржа, на которую поставили шестнадцатитонный автокран (рис. 1). Поскольку баржа была ограничена в передвижении, работы проводились в южной части озера с базированием сначала в Листвянке, а затем в Больших Котах. В экспедиции осуществили 43 погружения ГОА «Пайсис», в одном из которых была достигнута максимальная глубина озера в южной его части – 1412 м (рис. 2). Учёные впервые увидели Байкал «изнутри», изучили строение склонов, террас, сбросовых уступов, пересекающих западные склоны тектонических трещин и др. На основании проведённых наблюдений был сделан вывод, о том что Байкал по своему строению близок к строению рифтовых зон океана и назван внутриконтинентальным рифтом. В экспедиции участвовали учёные ИО РАН и научных организаций СО РАН: Лимнологического института, Института



Рис. 1. Спуск ГОА «Пайсис» на воду с баржи в 1977 г.

Земной коры, Института геохимии, Иркутского государственного университета. По результатам исследований был издан сборник статей, а так же опубликованы статьи в центральных академических изданиях [2].

Следующая экспедиция на озеро Байкал состоялась в 1990–1991 гг. также с применением ГОА «Пайсис VII» и «Пайсис XI». Для обеспечения погружений было оборудовано небольшое судно «Балхаш», которое могло брать на борт один «Пайсис». В процессе проведения погружений аппараты меняли, так что в погружениях были задействованы оба аппарата. Так как судно имело большую свободу передвижения по озеру, то исследованиями было охвачено практически всё озеро. В результате обнаружены некоторые аномальные районы гидротермальной деятельности,



Рис. 2. Экипаж, совершивший глубоководное погружение в ГОА «Пайсис» на 1412 м (Байкал, 1977 г.) справа налево: Александр Подражанский, Анатолий Сагалевиц, Николай Резинков



Рис. 3. Прибытие ГОА «МИР» в Улан-Удэ

выходы газа, поверхности дна, покрытые бактериальными матами. Экспедиция дала возможность учёным значительно продвинуться в познаниях озера Байкал. Однако более углублённые исследования ждали учёных впереди – в 2008–2010 гг., когда на Байкале проводились исследования с помощью ГОА «МИР-1» и «МИР-2» – самых современных и лучших в мире в техническом плане ГОА (по свидетельству Центра развития технологий США, 1994). Это были наиболее результативные экспедиции с применением ГОА на Байкале. И здесь дело не только в том, что работали лучшие аппараты в мире, но и в том, что подводной командой был накоплен неоценимый опыт исследований с помощью «МИРов» в океане. Поэтому основным направлением этих работ явились определение и изучение аномальных явлений на дне озера, похожих на те, которые наблюдались на дне океана.

Некоторые результаты научных исследований озера Байкал с применением ГОА «Мир».

Оба аппарата «МИР», буксировочный катер «Кореш» и другое оборудование были доставлены в г. Иркутск самолётом «Руслан» (рис. 3), а потом на автотрейлерах в г. Улан-Удэ, откуда «МИРЫ» перевезли в Листвянку, где в 2008 г. начиналась экспедиция.

Основным направлением наших 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 счёт метанотрофии и хемосинтеза. Во время экспедиций 2008–2010 гг. были совершены 178 погружений на «МИРах», главным образом в средней и южной частях озера [4]. В 2010 г. несколько погружений сделали и в северной части Байкала в бухте Фролиха. В первой экспедиции (2008 г.) мы работали на 14 полигонах, погружались 53 раза и провели под водой более 300 часов, 192 из которых – на грунте. Одни из важнейших

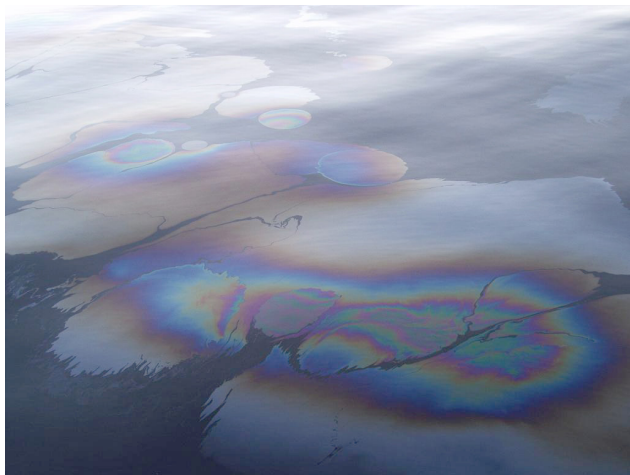


Рис. 4. Нефтяные пятна на поверхности Байкала

результатов того периода – локализация зон глубинных нефте- и газосодержащих флюидов на дне озера и определение интенсивности их разгрузки.

Мыс Горевой Утес. В 2005 г. в этом районе, примерно в 10 км от берега, учёные Лимнологического института зафиксировали большие пятна нефтяных плёнок, распространяющиеся на поверхности в радиусе до 1 км (рис. 4). 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 тёмно-коричневыми и чёрными корками, а также стенку высотой около 1 м и длиной до 5 м, образованную более мелкими холмами с тонкими коническими постройками, похожими на потухшие «курильщики». Они были плотно заселены амфиподами, планариями и моллюсками. На глу-

бине 869 м обнаружили тёмно-коричневую трубку высотой 1,5 м и диаметром 2 м (напоминающую гидротермальную) из битума, асфальтенов и парафинов. Из её верхней части каждые 24–28 сек. высачивались капли (диаметром 0,5–1 см) коричневой нефти, которые быстро поднимались к поверхности. Из этой же постройки с периодичностью 20–30 сек. выделялись пузырьки газа (рис. 5). Нефть сочилась также из небольших битумных построек на глубине 899 и 906 м. Во время погружений экипажи «МИРов» измеряли температуру в местах сочтения нефти и маркировали постройки для последующих наблюдений. Иногда, если нарушалась целостность поверхности осадка (или манипулятором, или касанием лыж аппаратов илистого слоя), происходили выбросы



Рис. 5. Высачивание нефтяных капель из вершины битумного холма в районе мыса Горевой Утес

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 *Macrohectopus branickii* и *Epishura baicalensis* (рис. 6), а также рыбки голомянки



Рис. 6. Ракообразные, поднятые со дна Байкала

рода *Comephorus* (рис. 7). Все они входят в состав единой пищевой цепи в сообществах склоновых и центральных областей Байкала. Оказалось, что в верхних слоях воды (0–350 м) нет крупных пелагических (живущих в верхних слоях вод) животных. Лишь на глубине около 400 м появляются единичные экземпляры довольно большого (25–35 мм) рачка *Mbranickii*, 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 присутствовали пять-шесть особей разной величины. Подобное 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 составы массовых эндемичных видов в придонной области и на поверхности осадков, а также поведенческие реакции различных ракообразных, коттоидных рыб (бычков-подкаменщиков) и ресничных червей (турбеллярий). Мелкие разноногие рачки (амфиподы) зарывались в ил и находились в нём достаточно длительное время. Неко-

торые 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.

Грязевой вулкан Санкт-Петербург. Важнейшим фундаментальным открытием, сделанным во время работ в 2009 г., стало обнаружение в этом районе большого поля холмов, состоящих из твёрдых ледоподобных газогидратов, слегка припорошенных осадками. Грязевой вулкан нашли учёные из Лимнологического института в 2002 г. Однако в течение семи лет никто и не подозревал о существовании там монолитных газогидратов. Это открытие выходит далеко за рамки исследова-



Рис. 7. Рыбы голомянки, отобранные на дне с помощью всасывающего пробоотборника

ния собственно Байкала. Газовые гидраты – кристаллические соединения метана с водой – ёмкий резервуар энергетического сырья (рис. 8). В одном кубометре гидрата содержатся 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. Кроме того, под небольшим слоем

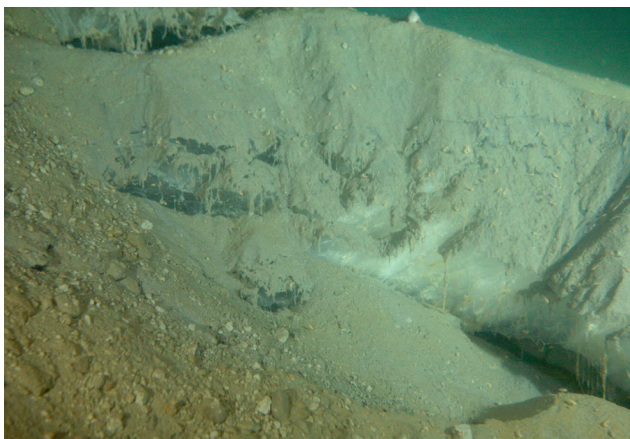


Рис. 8. Холм, сложенный твёрдыми газогидратами, покрытый слоем осадка

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 «Миров» были отобраны пробы грунта, воды и бентосных животных. Во многих местах разгрузки глубинных флюидов встречались плёночные 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 счёт 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-

ниях провели ряд экспериментов по формированию и разложению газогидратов из пойманных ловушкой пузырьки метана по методике, разработанной А. В. Егоровым (ИО РАН). Впервые наблюдалось формирование твёрдой газогидратной пены из пойманных пузырьков и её разрушительное действие при подъёме аппарата – несколько ловушек разрушились на глубине 700 м (существенно ниже положения фазовой границы устойчивости газогидратов) (рис. 9). 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 характеризуется исключительно мощным потоком метана из осадков, достигающим поверхности воды. Нам удалось проследить за газовыми пузырьками до самого дна, где была обнаружена геологическая структура в виде каньона с вертикальными стенками, связанная, по-видимому, с интенсивным выбросом газа из осадка. Борта этого каньона образованы рыхлыми отложениями. 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-Петербург, существуют за счёт метанотрофии.

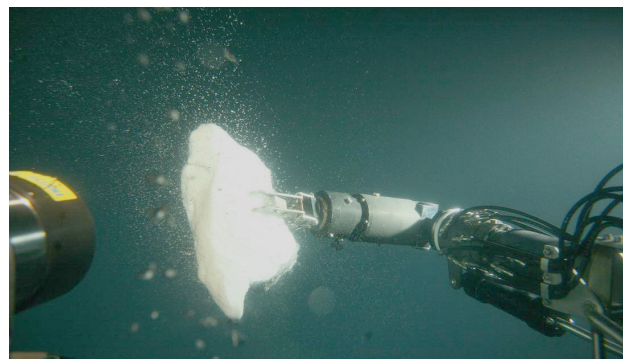


Рис. 9. Кусок твёрдого газогидрата в манипуляторе ГОА «Мир»



Рис. 10. Бактериальные маты, покрывающие поверхность дна в районе бухты Фролиха (глубина 409 м)

Посольская банка. В этом районе, расположенном вблизи мощного осадочного образования (Селенгинская авандельта), 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 наших экспедициях впервые на Байкале были обнаружены необычные цветные бактериальные маты. Судя по анализам, проведённым биологами ЛИНа, сообщества бактерий из этих образцов существовали за счёт как метанотрофии, так и 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 твёрдое дно и приходили пустыми, то предположили, что на дне находятся такие же массивные газогидраты, как и на грязевом вулкане Санкт-Петербург. Визуальные наблюдения из «Миров» показали, что на дне от-

сутствуют мелкомасштабные морфологические признаки выноса глубинных флюидов, типичных для грязевых вулканов. Желтоватый цвет верхнего слоя осадка свидетельствовал о его окисленности. Под тонким слоем залежали древние породы. Содержание газа в воде и осадках и геотермический градиент оказались близкими к фоновому. Таким образом, осмотр, проведённые 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 °С/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 (рис. 10). По изотопному анализу установлено, что бактерии существуют здесь за счёт и хемосинтеза, и метанотрофии.

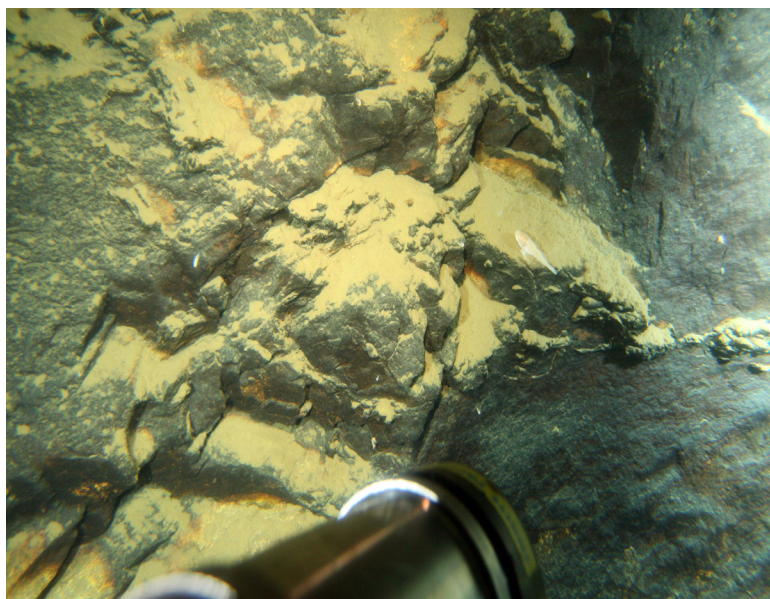


Рис. 11. Сбросовые уступы в западной части Байкала в районе острова Ольхон

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 твёрдых газогидратов и гидротермальных проявлений, характеризующихся эндемизмом фауны, подтверждают, что Байкал представляет собой водоём, 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. Перемещение по ним отдельных блоков имело основное рельефообразующее значение. По западному борту Байкальской котловины мы наблюдали ступенчатые террасы, а в районе Ольхонских Ворот – развитие разрывных нарушений сбросового типа, которые наиболее чётко прослеживались в подводной глубоководной части острова (рис. 11). 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 плёнкой 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 формируют на склонах «потоки» корок мощностью 3–40 см. Мы исследовали зону контакта Западного борта Байкальского рифта с днищем 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 позволил получить новые данные о возрасте последних подвижек в земной коре и дал 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.

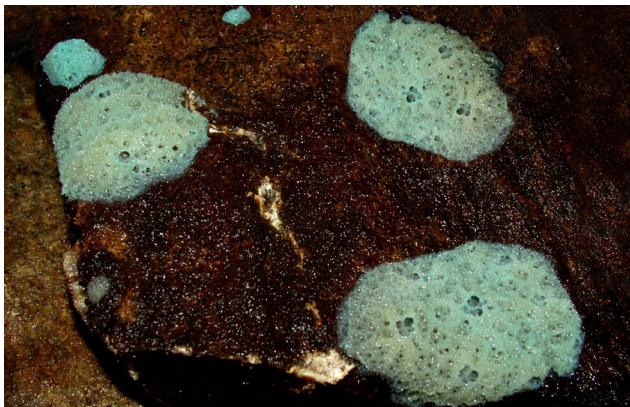


Рис. 12. Голубые губки на коренных породах на западном склоне озера

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 (нескольким видам амфипод и губок), а также голомянками и коттоидными рыбами. С помощью манипулятора «Миров» собрано много животных, ранее отсутствовавших в коллекциях, полученных при глубоководных тралениях. В этом районе впервые проводились визуальные глубоководные биологические наблюдения таксономического разнообразия 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 (рис. 12). 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. Закончилась трёхлетняя экспедиция на озеро Байкал, собрана обширная коллекция глубоководных планарий, получен большой объём научных данных [3].

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024–0026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Э. Л., Бекман М. Ю., Безрукова Е. В. [и др.] Путь познания Байкала / Отв. ред. Г. И. Галазий, К. К. Вотинцев. – Новосибирск : Наука, 1987. – 302 с.
2. Монин А. С., Мирлин Е. Г., Сагалевиц А. М. [и др.] Строение западного склона Байкала по наблюдениям из подводных аппаратов // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239, № 5. – С. 1178–1181.
3. Сагалевиц А. М. Романтическая океанология. – М. : Якорь, 2018. – 222 с.
4. Тулохонов А. К. Миры байкальских глубин : итоги и размышления / А. К. Тулохонов; Байкальский институт природопользования СО РАН, Фонд содействия сохранению оз. Байкал, Российский фонд фундаментальных исследований, Русское географическое общество. – Улан-Удэ : ЭКОС, 2010. – 80 с.

REFERENCES

1. Afanas'yeva E. L., Bekman M. YU., Bezrukova Ye. V. [et al.] Put' poznaniya Baykala [The path of knowledge of Baikal], ed. G. I. Galaziy, K. K. Votintsev, Novosibirsk, Nauka publ., 1987, 302 p. (In Russ.)
2. Monin A. S., Mirlin Ye. G., Sagalevich A. M. [et al.] Stroyeniye zapadnogo sklona Baykala po nablyudeni-yam iz podvodnykh apparatov [the structure of the western slope of Lake Baikal according to observations from underwater vehicles], Doklady AN SSSR, 1978, V. 239, No. 5, pp. 1178–1181. (In Russ.)
3. Sagalevich A. M. Romanticheskaya okeanologiya [Romantic oceanology], Moscow, Yakor publ., 2018, 222 p. (In Russ.)
4. Tulokhonov A. K. Miry baykal'skikh glubin: itogi i raz-myshleniya [Worlds of the Baikal depths: results and reflections], Ulan-Ude, EKOS publ., 2010, 80 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 25.03.24; одобрена после рецензирования 09.04.24; принята к публикации 09.04.24. The article was submitted 25.03.24; approved after reviewing 09.04.24; accepted for publication 09.04.24.