

## Методика проведения геологических исследований океана с применением глубоководных обитаемых аппаратов

В настоящей работе рассматриваются методы геологических исследований океана с использованием глубоководных обитаемых аппаратов. Обсуждаются вопросы принципов организации детальных исследований на локальных участках дна океана. Рассмотрено пилотирование подводных аппаратов вблизи дна с использованием научного и навигационного оборудования.

*Ключевые слова:* глубоководные обитаемые аппараты, методики, пилотирование, навигационная привязка, научное оборудование.

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

## Methods of the conducting of geological studies of the ocean with the use of deep manned submersibles

A. M. SAGALEVICH

Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow

The methods of geological research of the ocean with deep manned submersibles use are considered in present paper. The questions of principle organization of detail research in the local areas of ocean bottom are introduced. The piloting of the submersibles near bottom with the use of scientific and navigation equipment of the submersibles are considered.

*Key words:* deep-sea habitable vehicles, techniques, piloting, navigation binding, scientific equipment.

**Организация работ с ГОА в океане.** Эра глубоководных обитаемых аппаратов (ГОА) в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН насчитывает более 40 лет. Она началась в 1970-е гг., когда Институтом были приобретены в Канаде обитаемые аппараты «Пайсис VII» и «Пайсис XI» (рабочая глубина 2000 м). Исследования озера Байкал в 1977 г., а затем комплекс исследований в различных районах Мирового океана показали высокую эффективность проведения исследований с помощью ГОА с целью детального изучения глубин океана. На основе анализа результатов первых исследований был сделан вывод, что ни один другой метод не может дать таких детализации и достоверности научных изысканий, какие обеспечивает применение ГОА [2]. Это связано и с непосредственным участием человека в процессе исследований, и с тем, что современные ГОА представляют собой совершенную автономную глубоководную лабораторию, оборудованную всеми необходимыми средствами на-

учных наблюдений: иллюминаторами, видео- и фотосистемами высокого разрешения, инструментами пробоотбора (манипуляторами, батометрами и др.), набором измерительных датчиков и др. (рис. 1).

Весь комплекс наблюдений с помощью ГОА обеспечивается высокоточной навигационной привязкой с применением систем гидроакустической навигации с длинной и короткой базой, инерциальных систем и др. Учитывая ограниченные возможности ГОА в плане энергообеспечения и покрытия больших расстояний под водой, их применение должно предваряться проведением исследований с борта научно-исследовательского судна (НИС) с применением средств пробоотбора, буксируемых аппаратов, оборудованных локаторами бокового обзора и акустическими профилографами, измерительных зондов и др.

Такой подход даёт возможность получить максимальный объём информации, необходимой для планирования подводных маршрутов аппаратов

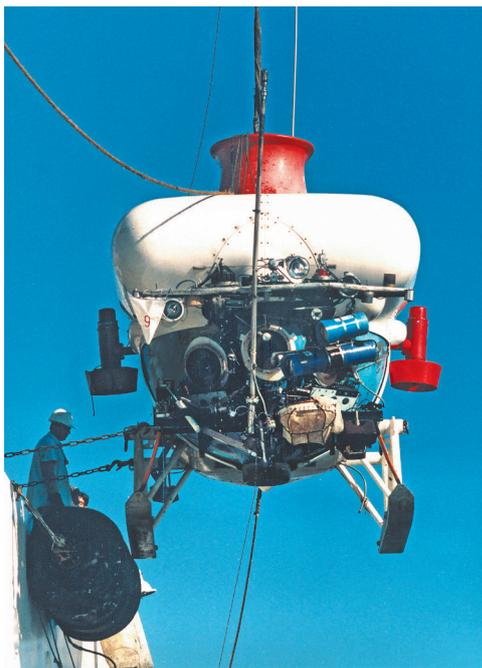


Рис. 1. ГОА «Пайсис» со штатным оборудованием

таким образом, чтобы во время погружений они тратили минимум времени для поиска объектов исследований и концентрировались на самих исследованиях. Очень важно рациональное использование тех приборов и инструментов, которыми оборудованы ГОА. Это в значительной степени зависит от профессионализма и опыта пилотов ГОА, их знаний геологической обстановки, в которой они работают при каждом конкретном погружении. Конечно, научное руководство погружением осуществляется подводным наблюдателем-геологом, но именно в связке ученый-пилот отрабатываются основные вопросы методики исследований, которые в результате становятся стандартными. Нельзя также забывать, что при разработке методик и отработке основных приёмов исследований с помощью ГОА главным вопросом является безопасность, куда входят и спуско-подъёмные операции с ГОА, и операции на воде до ухода под воду и после всплытия, и непосредственная работа аппарата под водой. Первые экспедиции с ГОА «Пайсис» на Чёрном море, на Байкале, а затем в океане в значительной мере были посвящены отработке методик, описанных выше операций.

В первых океанических экспедициях мы были поставлены в жёсткие рамки использования

«Пайсисов» с борта уже готовых судов, не приспособленных для проведения специальных операций с ГОА. Мы были вынуждены установить «Пайсис VII» на научно-исследовательском судне «Дмитрий Менделеев», а «Пайсис XI» – на НИС «Академик Курчатов» на одной из верхних палуб. Поэтому при спуске с высокого борта и обратном подъёме на него возможны были раскачивания аппаратов с довольно большой амплитудой (рис. 2).

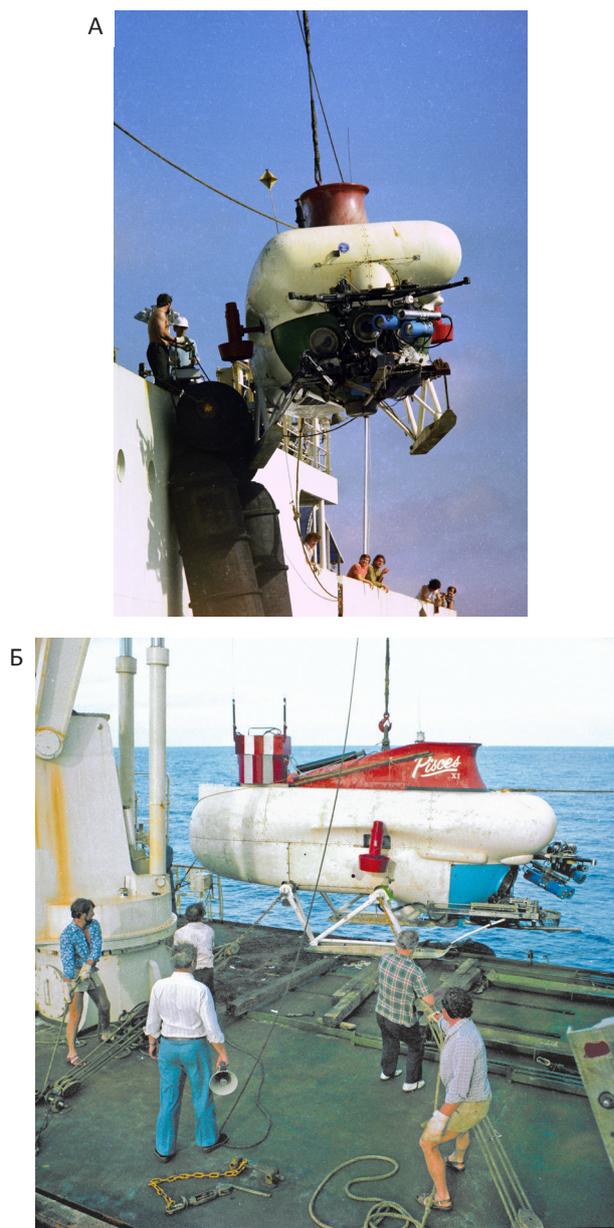


Рис. 2. Спуско-подъёмные операции с ПОА «Пайсис» на борту научно-исследовательских судов: А – «Дмитрий Менделеев», Б – «Академик Мстислав Келдыш»

Для смягчения раскачиваний и предотвращения ударов ГОА о борт судна, изготавливались специальные оттяжки и крупногабаритные кранцы. Причём операции спуска и подъёма осуществлялись не с помощью специальных кранов, а с применением кран-балок, установленных на верфи в Югославии. При проведении этих операций возникало много трудностей, которые впоследствии были учтены при проектировании комплекса обслуживания ГОА «Мир» на НИС «Академик Мстислав Келдыш» [1].

Во-первых, аппараты «Мир» были установлены на главной палубе судна гораздо ниже, чем «Пайсисы», а во-вторых, в Финляндии был спроектирован специальный кран, который опускал аппарат на коротком шкентеле практически до воды, что исключало раскачивание аппарата при спуске и подъёме (рис. 3).



Рис. 3. Спуско-подъёмные операции с ГОА «Мир»

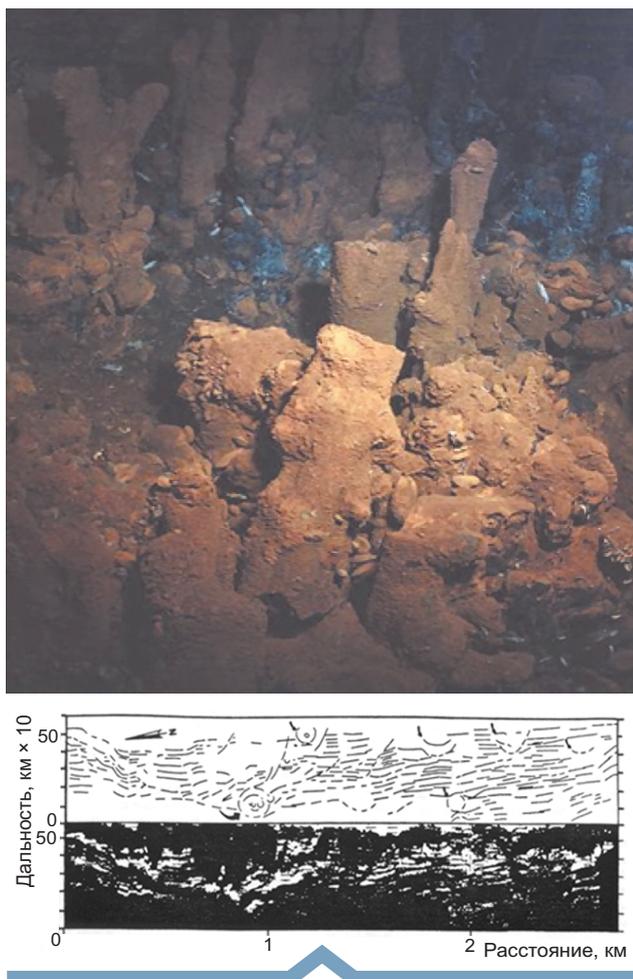
Кроме того, нами была принята методика проведения спуска и подъёма аппаратов с борта судна, а не с кормы. При определённой постановке судна по отношению к волне создаётся практически штилевая зона около борта, что создаёт комфортные условия для спуско-подъёмных операций в отличие от операций с кормы, которая перемещается вертикально с довольно большой амплитудой в условиях сильного волнения. Такая методика спуска и подъёма аппаратов позволила нам проводить погружения аппаратов «Мир» при большом волнении – до 5–6 баллов.



Рис. 4. Глубоководный буксируемый аппарат «Звук»

**Полигонный метод исследований.** Как уже отмечалось, основной задачей применения ГОА является детализация исследований на наиболее интересных с научной точки зрения участках дна. Выбор полигона осуществляется, как правило, на основании данных поисковых исследований [2]. Наиболее эффективным методом таких исследований является применение глубоководных буксируемых аппаратов с комплексом гидроакустического и видеооборудования. В первых экспедициях с ГОА «Мир» мы работали с буксируемым вблизи дна аппаратом «Звук» (рис. 4), оборудованным локатором бокового обзора и акустическим профилографом. «Звук» проводил гидролокационную съёмку поверхности дна перед погружениями ГОА. И это был весьма эффективный метод подготовки полигона, позволявший обозначить детали рельефа, которые были важны для погружений. На рис. 5 приведена запись локатора бокового обзора аппарата «Звук» с обозначенной на ней сульфидной постройкой Мир. Эта постройка была детально обследована с помощью ГОА «Мир» (глубина 3600 м). Измерения, выполненные с помощью ГОА «Мир», показали, что это самое крупное гидротермальное тело на дне из известных в настоящее время. Оно содержит около 10 млн т сульфидных руд. Пробоотбор с борта судна, а также зондирование водной толщи с помощью гидрофизических зондов дают возможность находить аномальные точки на дне, соответствующие активным гидротермальным излияниям, метановым сипам и др.

На основании результатов этих поисковых исследований намечается полигон для проведения



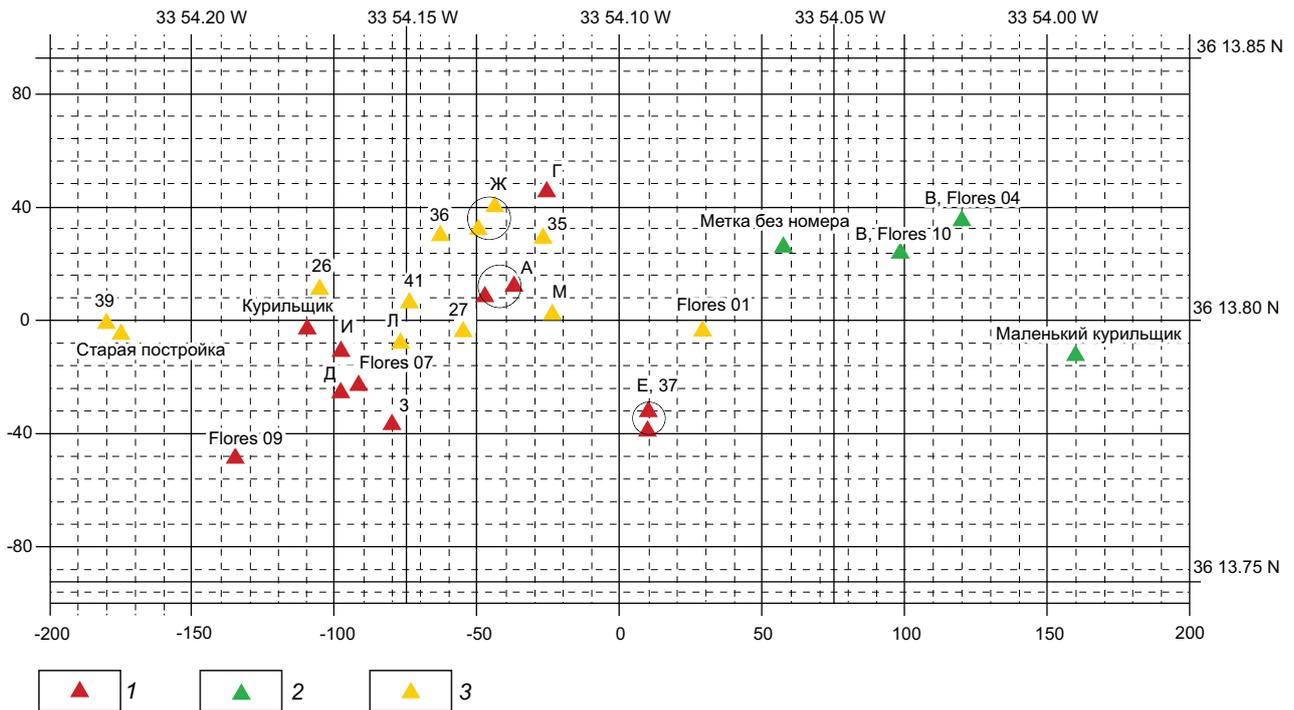
**Рис. 5.** Запись локатора бокового обзора аппарата «Звук» с обозначенной на ней сульфидной постройкой Мир

детального изучения данного участка дна с помощью ГОА. Как правило, это квадрат со стороной от 2 до 4 миль либо прямоугольник с подобными длинами сторон. Во время поисковых исследований обычно строится батиметрическая карта, на которую наносятся точки постановки донных гидроакустических маяков. Причём маяки ставятся на наиболее высокие места рельефа для того, чтобы обеспечить связь с ними из любого места полигона. Опыт наших исследований показывает, что установки трёх или четырёх маяков на полигоне со стороной квадрата 3 мили и расстояниями между маяками 2–3 мили вполне достаточно для обеспечения точной навигационной привязки аппарата на всей площади полигона. Система сбора данных ГОА «Мир» работает постоянно в течение всего времени работы аппара-

та под водой. Она непрерывно записывает данные измерений гидрофизических и гидрохимических датчиков, а также данные гидроакустической системы навигации, то есть все операции, проводимые пилотом на дне, точно привязаны к данным навигации. На рис. 6 приведена карта гидротермального поля Рейнбоу с нанесёнными на неё гидротермальными активными и реликтовыми постройками. Эта карта сделана по данным навигации, полученным при работе ГОА «Мир» на дне. Точно также на карте фиксируются точки отбора проб, специально проводимых измерений и другие операции ГОА.

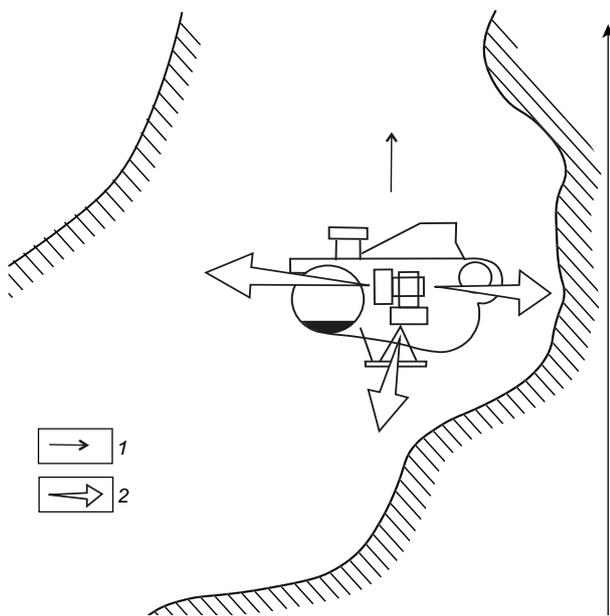
**Пилотирование ГОА при проведении геологических исследований.** При пилотировании аппарата вблизи дна следует помнить о трёх важнейших факторах: 1) обеспечении безопасности движения аппарата; 2) экономичном режиме расходования энергии; 3) эффективном выполнении научной программы с использованием научного оборудования, имеющегося на аппарате.

Очевидно, обеспечение безопасности предполагает пилотирование аппарата на некотором расстоянии от дна или от обследуемого объекта (обычно 3–4 метра) так, чтобы видеть все встречающиеся препятствия или посторонние предметы. Кроме того, такая методика при небольшой скорости движения аппарата даёт возможность приблизиться к донной поверхности или объекту, лежащему на дне, с целью проведения детального осмотра участка дна или объекта, отбора образцов, видеозаписи наиболее интересных деталей или для проведения измерений в аномальных точках (выходах термальных вод, чёрных курильщиках, метановых сипах и др.). Аппарат вблизи дна, как правило, работает в нейтральной плавучести, поэтому перемещение по вертикали на единицы метров не требует большого расхода энергии. Однако, при движении вверх по склону или вблизи вертикальных стенок наиболее рационально придавать аппарату положительную плавучесть и, медленно всплывая, удерживаться вблизи поверхности дна, подрабатывая движителями вперёд или назад (рис. 7). При работе ГОА на затонувших судах аппарату придаётся нейтральная плавучесть и его движение вперёд или вверх регулируется движительным комплексом. При работе с ГОА «Пайсис» движение вверх-вниз и вперёд-назад обеспечивается с помощью боковых движителей, которые разворачиваются либо вертикально, либо горизонтально соответственно.



**Рис. 6. Карта-схема гидротермального поля Рейнбоу с нанесёнными на неё гидротермальными активными и реликтовыми постройками:**

курильщики: 1 – большие активные, 2 – небольшие активные; 3 – реликтовые постройки



**Рис. 7. Методика обследования вертикальных стенок при положительной плавучести ПОА:**

1–2 – направления: 1 – движения ПОА, 2 – обработка движителями

Аналогичные движения при работе с ГОА «Мир» выполняются проще: горизонтальные – с помощью мощного кормового движителя, вертикальные – с помощью боковых движителей. Такая методика применима и при отборе образцов с вертикальных стенок и взятии проб флюида из гидротермальных источников, в этом случае аппарат должен иметь нейтральную плавучесть (рис. 8).

В ряде случаев при отборе образцов необходимо утяжеление аппарата, в особенности при работе в условиях сильных течений вблизи дна. Однако этот метод требует дополнительных расходов энергии, необходимой для откачки водяного балласта после взятия образца и придания аппарату нейтральной плавучести. Эти тонкости пилотирования знают все опытные пилоты ГОА.

Методика пилотирования неразрывно связана с методами пробоотбора. Основным инструментом пробоотбора является манипулятор. Отбор твёрдых образцов (коренных пород, сульфидов и др.) осуществляется непосредственно кистью манипулятора. Для отбора осадочного материала в кисти манипулятора зажимается геологическая трубка длиной 40–50 см, которая втыкается

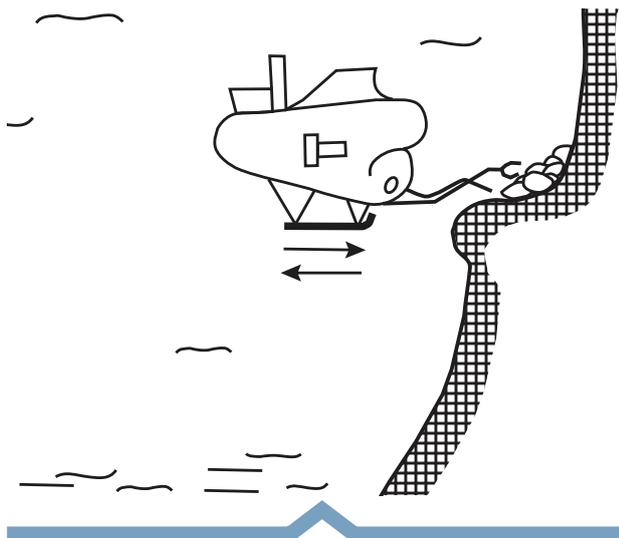


Рис. 8. Методика взятия образца с вертикальной стенки. Стрелки показывают направление подработки двигателями

в осадок при вертикальном движении манипулятора. Образцы хрупких пород отбираются с помощью сачков, зажимаемых также в кисти манипулятора. Кроме того, в арсенале инструментов, также зажимаемых в кисти манипуляторов, имеются специальные пробоотборники, захлопывающиеся либо автоматически, либо при нажатии кнопки вторым манипулятором. Для отбора мелких образцов, главным образом животных, используются всасывающие пробоотборники, обычно имеющие пять автоматически смещающихся стаканов объёмом 1,5–2 литра, в которые через гибкую трубку длиной около трёх метров и диаметром 10 см засасываются животные либо мелкие геологические образования. В течение одного погружения путём всасывания могут быть отобраны 5 различных проб (по числу стаканов) (рис. 9).

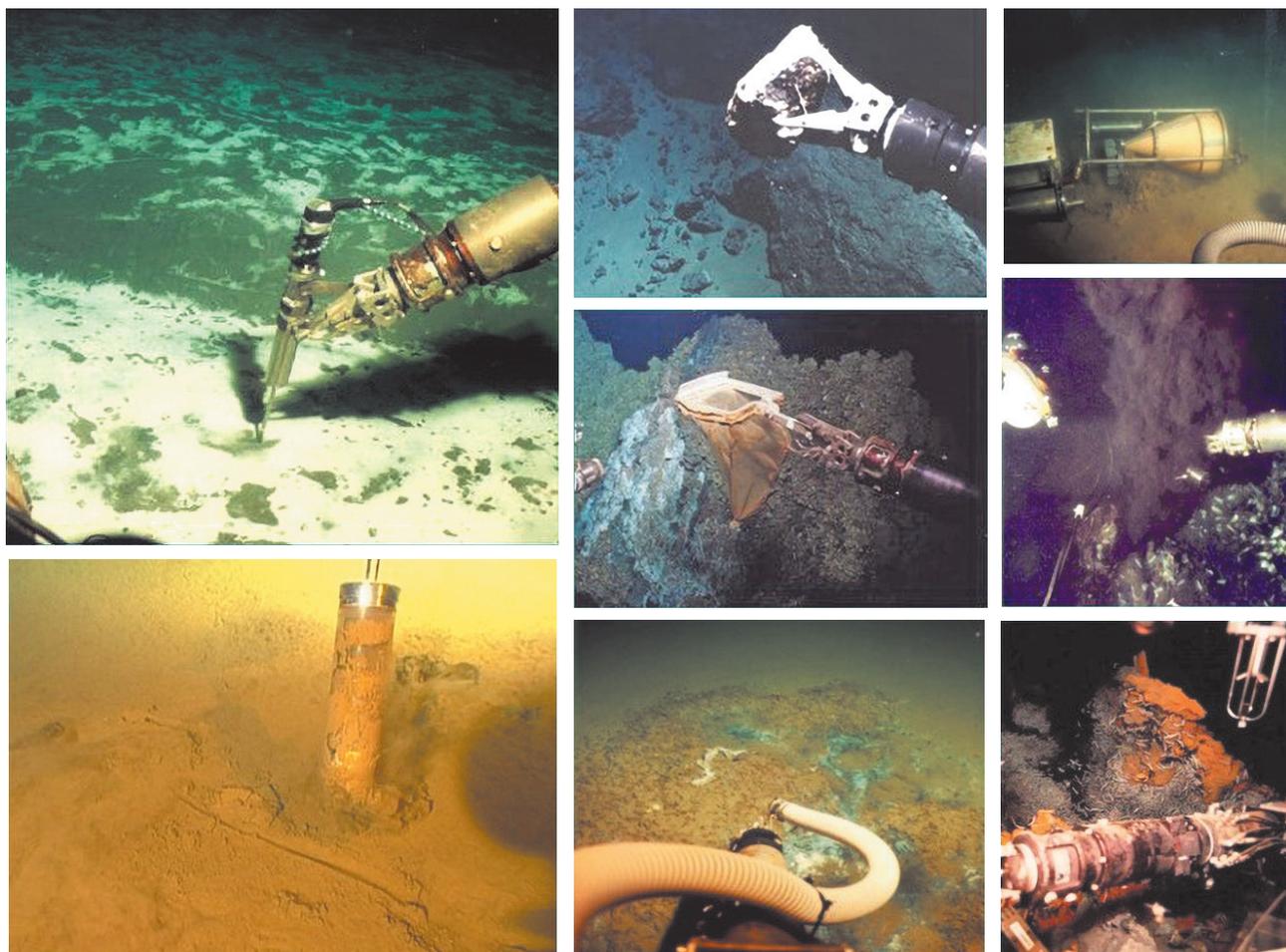


Рис. 9. Средства пробоотбора с борта ГОА

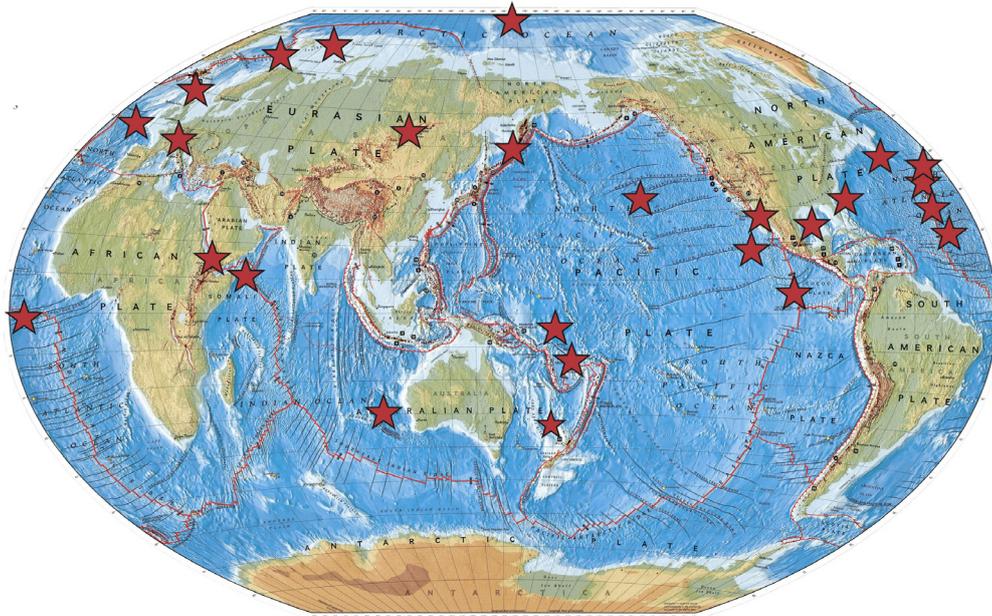


Рис. 10. Карта-схема исследований, проведённых на двадцати трёх гидротермальных полях Мирового океана с помощью ГОА «Пайсис» и «Мир»

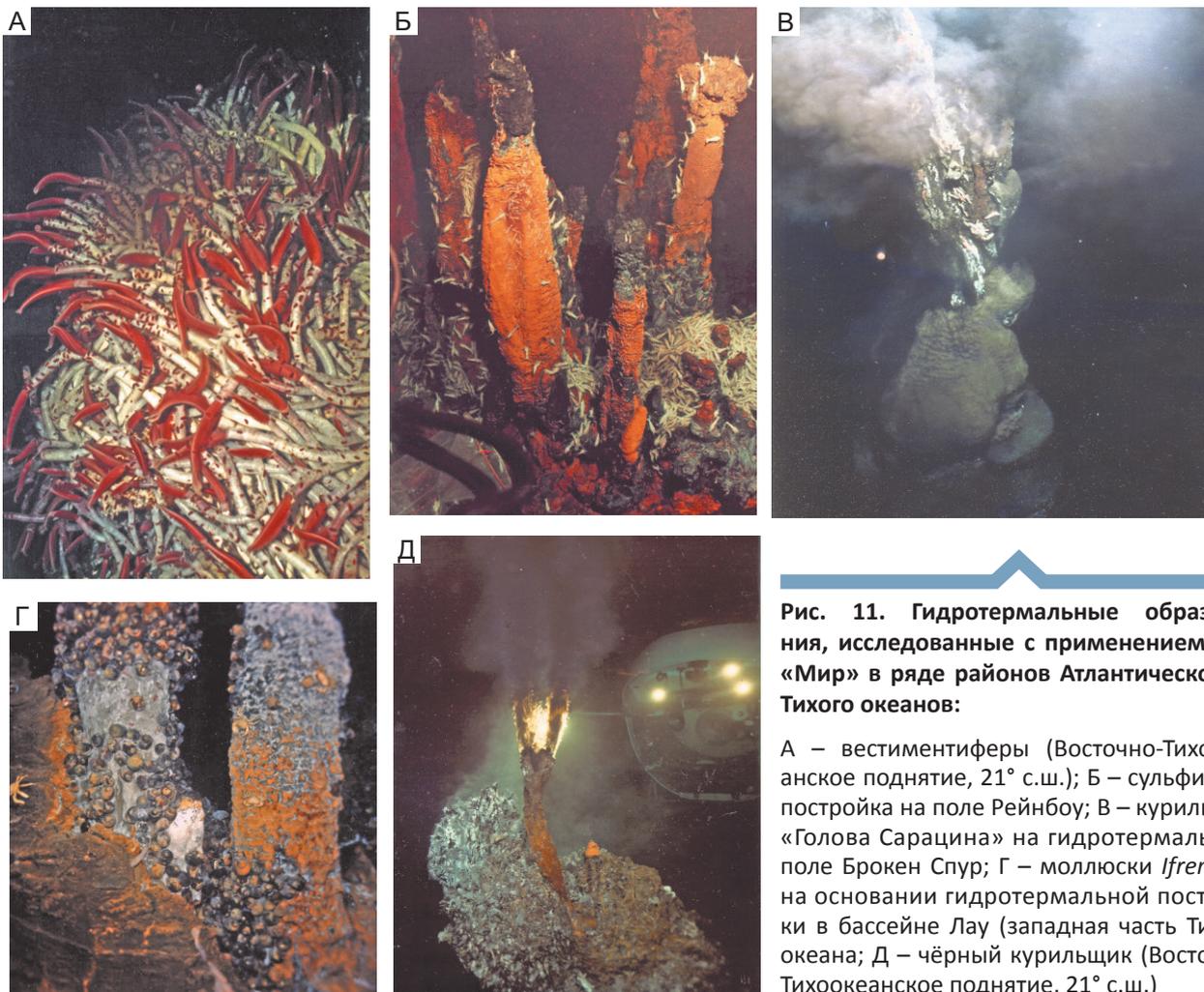


Рис. 11. Гидротермальные образования, исследованные с применением ГОА «Мир» в ряде районов Атлантического и Тихого океанов:

А – вестиментиферы (Восточно-Тихоокеанское поднятие, 21° с.ш.); Б – сульфидная постройка на поле Рейнбоу; В – курильщик «Голова Сарацина» на гидротермальном поле Брокен Спур; Г – моллюски *Ifremeria* на основании гидротермальной постройки в бассейне Лау (западная часть Тихого океана; Д – чёрный курильщик (Восточно-Тихоокеанское поднятие, 21° с.ш.)

**Роль подводных наблюдателей.** Важным вопросом методики исследований является комплектование команды научных наблюдателей ГОА. Многолетний опыт научных исследований с применением глубоководных обитаемых аппаратов «Пайсис» и «Мир» показывает, что круг подводных наблюдателей должен быть ограничен. Наиболее желательной является организация постоянной группы наблюдателей, поскольку такой подход обеспечивает наиболее полную отдачу в научном плане от каждого погружения. После нескольких погружений учёный приобретает профессиональный навык работы в ГОА. Эта концепция подтверждена геологическими исследованиями с ГОА «Пайсис» и «Мир» в первых экспедициях, когда группа наблюдателей состояла из крупных учёных-геологов: Л. П. Зоненшайна, Ю. А. Богданова, М. И. Кузьмина и А. П. Лисицына. Погружения с их участием происходили с высокой научной эффективностью [2].

Описанные выше операции легли в основу методики, которая принята как стандартная при проведении геологических исследований океана с применением глубоководных обитаемых аппаратов. По такой методике были проведены исследования на двадцати трёх гидротермальных полях Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов, на подводных горах и поднятиях, в абиссали в различных районах Мирового океана (рис. 10).

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность разработанной методики. Её применение позволило сделать ряд важных открытий в геологических исследованиях океана [1]. На рис. 11 показаны отдельные гидротермальные образования, исследованные с применением ГОА «Мир» в ряде районов Атлантического и Тихого океанов.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0011.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sagalevich A. M.* Глубина. – М. : Научный Мир, 2002. – 318 с.
2. *Sagalevich A. M.* Значение визуальных наблюдений в глубоководных исследованиях океана // Природа. – 2018. – № 8. – С. 58–66. DOI: 10.31857/S0032874X0000489-6

### REFERENCES

1. *Sagalevich A. M.* Glubina [Depth], Moscow, Nauchnyy Mir publ., 2002, 318 p. (In Russ.)
2. *Sagalevich A. M.* Znachenie vizual'nykh nablyudeniye v glubokovodnykh issledovaniyakh okeana [The importance of visual observations in deep-sea ocean research]. Priroda, 2018, No. 8, pp. 58–66. DOI: 10.31857/S0032874X0000489-6 (In Russ.)

3. *Sagalevich A. M.* Океанология и подводные обитаемые аппараты. Методы исследований / Отв. ред. И. Е. Михальцев. – М. : Наука, 1987. – 256 с.
4. *Sagalevich A. M.* 30 years' experience of Mir submersibles for ocean operations // In Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography. – 2017. – V. 155, № 5. – P. 83–95. DOI: 10.1016/j.dsr2.2017.08.001

3. *Sagalevich A. M.* Okeanologiya i podvodnyye obitayemyye apparaty. Metody issledovaniy [Oceanology and underwater habitable vehicles. Research methods], Ed. I. Ye. Mikhal'tsev, Moscow, Nauka publ., 1987, 256 p. (In Russ.)
4. *Sagalevich A. M.* 30 years' experience of Mir submersibles for ocean operations // In Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography, 2017, V. 155, № 5, pp. 83–95. DOI: 10.1016/j.dsr2.2017.08.001 (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.08.23; одобрена после рецензирования 15.09.23; принята к публикации 15.09.23.  
The article was submitted 30.08.23; approved after reviewing 15.09.23; accepted for publication 15.09.23.