

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Дальневосточное отделение
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Национальный
научный центр морской биологии (ННЦМБ ДВО РАН)

УДК 551.46/574.5//595.132
№ Госрегистрации
Инв.№

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ННЦМБ ДВО РАН

_____ В.С. Одинцов

« ____ » _____ 2018 г.

ОТЧЕТ
О результатах экспедиционных исследований
В рейсе №82 НИС «Академик М.А. Лаврентьев»
(2 июня-16 июля 2018 г.)

Руководитель экспедиции

подпись, дата

В.А. Денисов

Владивосток 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<i>Руководитель экспедиции</i>		В.А. Денисов
<i>Исполнители НИР:</i>		
к.б.н.		О.Г. Борзых
		И.О. Букин
д.б.н.		С.В. Галкин
		А.А. Зинов
		Н.В. Кашенко
		А.В. Колтунов
		С.В. Кондрашов
к.т.н.		А.Ю. Коноплин
		Н.Ю. Коноплин
		Н.В. Кравченко
к.б.н.		Е.М. Крылова
к.б.н.		М.В. Крючков
		А.Л. Кузнецов
к.б.н.		А.Н. Малютин
к.г.н.		П.Е. Михайлик
к.б.н.		В.В. Мордухович
		А.А. Параскив
к.х.н.		Н.С. Полоник
к.б.н.		А.А. Пономарева
к.б.н.		Н.П. Санамян
		Т.Х. Сафин
		В.С. Тарасов
		Э.А. Токарь
		А.А. Толстой
		В.А. Шилов

Реферат

Отчет 65 с., 8 табл., 43 рис., 53 источника.

Ключевые слова: морские горы, морские котловины, донные сообщества, пространственное распределение организмов, глубоководные гидротермы, глубоководные высачивания, Берингово море

Цель работы - комплексное исследование экосистем глубоководных гидротермальных выходов и холодных высачиваний в Беринговом море с применением как стандартных методов, так и с использованием научно-исследовательского оборудования комплекса ТНПА "Comanche 18" (SUB-Atlantic, Великобритания).

Представленные предварительные результаты комплексных экспедиционных исследований в Беринговом море на двух полигонах: 1 – массив Вулканологов и подводный вулкан Пийпа; 2 – Берингоморский шельф и континентальный склон Чукотки от мыса Олюторский до мыса Наварин. Показаны геологические и газохимические особенности исследованных акваторий. Описана вертикальная зональность и основные черты донных сообществ. Продемонстрированы результаты разработки системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА

Оглавление

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Заявитель	5
1.2 Участники, не являющиеся заявителями	5
1.3. Судно	5
1.4 Капитан НИС	5
1.5 Начальник экспедиции	5
1.6 Состав и структура экспедиции	5
1.7 Районы работ.....	6
1.8 Режим рейса.....	7
1.9 Порты заходов.....	7
1.10 Сроки проведения.....	7
1.11 Цель и задачи экспедиции	7
2. ВВЕДЕНИЕ	9
3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	10
3.1 Объем выполненных работ.....	10
3.2 Орудия сбора и методы полевых работ	10
3.2.1 Бентосные организмы и донные осадки	10
3.2.2 Зоопланктон.....	14
3.2.3 Пробы воды и СТД-зондирование.....	15
3.2.4 Радиохемозкологический мониторинг.....	15
3.2.5 Газохимические исследования.....	17
4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	18
4.1 Геологические, геохимические и газохимические исследования	18
4.1.1 Полигон 1	18
4.1.2 Полигон 2.....	24
4.2 Гидробиологические исследования	31
4.2.1 Полигон 1.....	31
4.2.2 Полигон 2.....	41
4.3 Разработка системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА.....	56
4.3.1 Управление согласованными перемещениями ТНПА и блока-заглубителя.....	57
4.3.2 Программная реализация системы поддержки деятельности операторов.....	59
4.3.3 Исследование системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	64

1. Общие сведения

1.1 Заявитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Национальный научный центр морской биологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17; телефон: (423) 231-09-05; факс: (423) 231-09-00;

1.2 Участники, не являющиеся заявителями

- Дальневосточный геологический институт ДВО РАН;
- Дальневосточный федеральный университет;
- Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского;
- Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН;
- Институт проблем морских технологий ДВО РАН;
- Камчатский филиал ФГБУН Тихоокеанского института географии ДВО РАН;
- Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН;
- Университет Лозанны (Швейцария).

1.3. Судно

Научно-исследовательское судно «Академик М.А. Лаврентьев»:

- Классификация: Специального назначения КМ (*) L1[1] Aut2
- Длина 75,5 м.
- Осадка 4,5 м.
- Мощность главного двигателя: 2576 кВт
- Максимальная скорость: 12 узлов
- Водоизмещение: 2712 т
- Экипаж/пассажиры: 32/42

1.4 Капитан НИС

Птушкин Виктор Борисович

1.5 Начальник экспедиции

Денисов Виталий Андреевич

1.6 Состав и структура экспедиции

В экспедиции приняли участие 26 научных сотрудников, среди них 11 с учеными степенями доктора наук и кандидата наук

Начальник экспедиции – Денисов Виталий Андреевич

Научный руководитель экспедиции – Мордухович Владимир Владимирович

Таблица 1. Состав экспедиции

№ пп	ФИО	Уч. степень		Организация
1.	БОРЗЫХ Олег Геннадьевич	к.б.н.	Ученый секретарь	ННЦМБ ДВО РАН
2.	БУКИН Илья Олегович		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
3.	ГАЛКИН Сергей Владимирович	д.б.н.	Научный сотрудник	ИО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
4.	ДЕНИСОВ Виталий Андреевич		Нач. экспедиции	ННЦМБ ДВО РАН
5.	ЗИНОВ Антон Андреевич		Научный	ННЦМБ ДВО РАН

			сотрудник	
6.	КАШЕНКО Николай Викторович		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
7.	КОЛТУНОВ Алексей Михайлович		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
8.	КОНДРАШОВ Сергей Владимирович		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
9.	КОНОПЛИН Александр Юрьевич	к.т.н.	Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН, ИПМТ ДВО РАН
10.	КОНОПЛИН Никита Юрьевич		Научный сотрудник.	ННЦМБ ДВО РАН, ИПМТ ДВО РАН
11.	КРАВЧЕНКО Наталья Витальевна		Научный сотрудник	ИМБИ РАН, ННЦМБ ДВО РАН
12.	КРЫЛОВА Елена Михайловна	к.б.н.	Научный сотрудник	ИО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
13.	КРЮЧКОВ Михаил Васильевич	к.б.н.	Научный сотрудник	Университет Лозанны, ННЦМБ ДВО РАН
14.	КУЗНЕЦОВ Андрей Леонидович		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
15.	МАЛЮТИН Андрей Николаевич	к.б.н.	Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
16.	МИХАЙЛИК Павел Евгеньевич	к.г.-м.н.	Научный сотрудник	ДВГИ ДВО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
17.	МОРДУХОВИЧ Владимир Владимирович	к.б.н.	Научный руководитель	ДВФУ, ННЦМБ ДВО РАН
18.	ПАРАСКИВ Артем Алексеевич		Научный сотрудник	ИМБИ РАН, ННЦМБ ДВО РАН
19.	ПОЛОНИК Никита Сергеевич	к.х.н.	Научный сотрудник	ТОИ ДВО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
20.	ПОНОМАРЕВА Анна Андреевна	к.б.н.	Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
21.	САНАМЯН Надежда Павловна	к.б.н.	Научный сотрудник	КФ ТИГ ДВО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
22.	САФИН Тимур Хусяинович		Научный сотрудник	ИО РАН, ННЦМБ ДВО РАН
23.	ТАРАСОВ Валентин Сергеевич		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН
24.	ТОКАРЬ Эдуард Анатольевич		Научный сотрудник	ДВФУ, ННЦМБ ДВО РАН
25.	ТОЛСТОЙ Андрей Александрович		Научный сотрудник	ДВФУ, ННЦМБ ДВО РАН
26.	ШИЛОВ Владимир Анатольевич		Научный сотрудник	ННЦМБ ДВО РАН

1.7 Районы работ

Маршрут экспедиции показан на рисунке 1, в главе Материалы и методы представлены карты-схемы треков погружений ТНПА и отбора проб, географические координаты полигонов представлены в таблице 2, географические координаты всех спусков орудий лова и отбора проб приведены в Приложении 1.

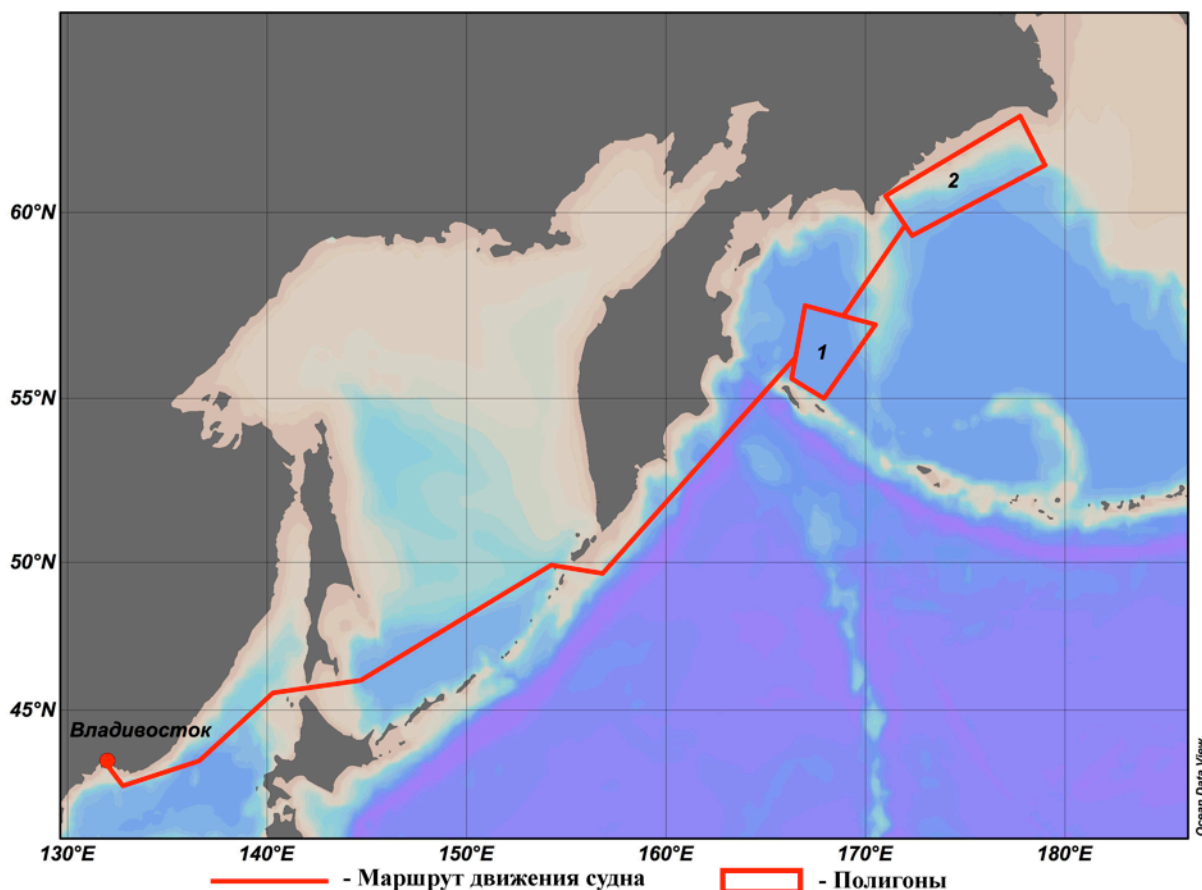


Рисунок 1 – Карта-схема движения судна и районов работ

Таблица 2. Координаты полигонов работ

№ полигона	Географическая широта	Географическая долгота
1	57° 35' 00.00"С	166° 58' 00.00"В
	57° 04' 00.00"С	170° 30' 00.00"В
	55° 33' 50.00"С	166° 17' 38.00"В
	55° 00' 00.00"С	167° 55' 00.00"В
2	60° 25' 00.00"С	171° 00' 00.00"В
	62° 20' 00.00"С	177° 45' 00.00"В
	59° 25' 00.00"С	172° 20' 00.00"В
	61° 10' 00.00"С	179° 00' 00.00"В

1.8 Режим рейса

Каботажное плавание

1.9 Порты заходов

Без заходов

1.10 Сроки проведения

С 2 июня по 16 июля 2018 года

1.11 Цель и задачи экспедиции

Цель: комплексное исследование экосистем глубоководных гидротермальных выходов и холодных высачиваний в Беринговом море.

Основные задачи:

- Получение детальных представлений о характере распространения гидротермальных выходов и холодных просачиваний в Беринговом море, их типах и структурных планах, их визуальное наблюдение и локализация с использованием ТНПА;

- Изучение химического состава донных осадков в районах работ, литолого-фациальные исследования, отбор образцов гидротермальных построек;
- Геохимические исследования углеводородов в водной среде, анализ состава флюидов, придонных вод;
- Определение состава, структуры и особенностей распределения донных сообществ в районах исследования, картирование основных биогеоценотических комплексов;
- Исследование разнообразия фито- и зоопланктона дальневосточных морей РФ;
- Исследование трофических связей и пищевых стратегий массовых видов гидробионтов, оценка вклада хемосинтеза и метанотрофии в общий баланс органического вещества с использованием биомаркерного анализа;
- Отбор гидробионтов для скрининговых исследований биоактивных веществ из глубоководных организмов на противоопухолевую активность;
- Формирование коллекций Музея и ЦКП “Морской биобанк” ННЦМБ ДВО РАН;
- Проведение радиохемозкологического мониторинга дальневосточных морей РФ;
- Экспериментальное исследование новых систем поддержки деятельности операторов ТНПА, оптимизации систем управления и навигации ТНПА.

2. Введение

С момента открытия глубоководных экосистем гидротермальных выходов и холодных высачиваний (сипов), в 1976 и 1983 годах соответственно (Corliss et al., 1979; Paull et al., 1984), активно ведется их изучение в различных акваториях Мирового океана. В настоящее время показано, что гидротермы и сипы довольно широко распространены, их исследование позволяет расширить представления о формировании, составе, структуре, особенностях функционирования морских экосистем, в частности, в экстремальных условиях обитания (Dodd et al., 2017; Donovano et al., 2017; German et al., 2011; Levin et al., 2016; Nisbet, Sleep, 2001). Районы гидротермальных выходов и холодных высачиваний представляют значительный интерес и с точки зрения добычи полезных ископаемых. В российских территориальных водах глубоководная гидротермальная активность обнаружена в Беринговом море (Богданова и др., 1989; Сагалевич и др., 1992). Кроме того, здесь же, в российских водах Берингова моря, были обнаружены представители фауны, характерной для холодных высачиваний (Данилин, 2013 г.).

Впервые глубоководная гидротермальная деятельность в Беринговом море выявлена в 1986 г., в 26-м рейсе НИС «Вулканолог», на южной вершине подводного вулкана Пийпа (Богданова и др., 1989). В 1990 г. в ходе 22-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» с применением глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО) «Мир» (Сагалевич и др., 1992) здесь был обнаружен ряд гидротермальных выходов. Данный район является одним из наиболее мелководных гидротермальных полей Мирового океана, где зарегистрирована специализированная хемофильная фауна. Это единственный известный район такого рода, расположенный в российских территориальных водах.

В 2016 г. Национальным научным центром морской биологии ДВО РАН в ходе комплексной морской экспедиции с использованием ТНПА *Comanche* (75-й рейс НИС "Академик М.А. Лаврентьев") продолжено изучение глубоководных сообществ массива Вулканологов, в том числе, в районах современной гидротермальной активности. В ходе экспедиции проведены исследования от ложа Командорской котловины до вершин вулкана, на глубинах от 4278 м до 349 м. Однако, несмотря на проведенные работы, экосистемы вулкана Пийпа по-прежнему изучены довольно слабо. При этом, богатое донное население вулкана дает уникальную возможность изучения вертикальной биологической зональности и влияния гидротермальных проявлений на состав и распределение фауны. Анализ состава гидротермальных растворов и условий седиментации в районах активных гидротермальных источников может позволить выявить эволюционные тренды гидротермального синтеза углеводородных соединений в масштабах геологической истории Земли. Изучение углеводородных соединений в составе подводных гидротермальных источников может пролить свет и на механизмы происхождения жизни на Земле. Значительный интерес представляет и потенциальное наличие на массиве Вулканологов полезных ископаемых, в частности, сульфидов различных металлов.

Как уже отмечалось, в Беринговом море была выявлена и фауны холодных высачиваний (Данилин, 2013). В районе Корякского шельфа и верхней части континентального склона (на глубинах от 160 до 520 м, от мыса Олюторского до мыса Наварин) в приловах тралений были обнаружены свежие створки моллюсков, характерных для холодных высачиваний – представители родов *Caliptogena* (Vesicomidae) и *Acharax* (Solemyidae). Подобные находки могут свидетельствовать о наличии еще не открытых сиповых экосистем на склоне Берингова моря, самых северных из известных для Тихого океана. В ряде случаев, проявления метановых высачиваний связаны с близким к поверхности донных осадков залеганием нефте- и газоносных пластов и обнаруженные организмы могут служить своего рода маркерами, указывающими на наличие в недрах месторождений углеводородов.

Важно отметить, что незаменимым средством для выполнения работ, связанных с исследованием гидротермальной деятельности и высачиваний, картированием донных ландшафтов, сканированием морских осадков, поиском минерального сырья и т.п. являются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), способные обеспечить в режиме реального времени выполнение широкого спектра задач. При этом объем и качество выполненных работ напрямую связаны с оптимизацией систем управления и навигации ТНПА.

3. Материалы и методы

3.1 Объем выполненных работ

В ходе экспедиции выполнено 21 погружение ТНПА «Команч-18» в диапазоне глубин от 388 м до 3931 м. Общая продолжительность погружений составила 160 часов 36 минут, из которых 114 часов 32 минут проведены на дне (табл. 2). В результате работы ТНПА исследовано около 55 км глубоководных бентосных сообществ, выполнено 128 станций для отбора бентосных организмов и донных осадков, 7 станций для отбора воды. Получено 4735 фотографий и более 32 часов видеозаписей глубоководных экосистем. Продолжено формирование коллекции гидробионтов дальневосточных морей: подготовлено более 500 единиц хранения; начато создание банка материалов для проведения метагеномного, геномного и транскриптомного анализов глубоководных организмов, в том числе сообществ гидротерм и холодных просачиваний. Приготовлены экстракты из 148 проб глубоководных гидробионтов для высокопроизводительного скрининга специфической противоопухолевой активности.

В рамках программы по изучению планктонных сообществ северных окраинных морей России было выполнено 12 станций для отбора проб зоопланктона, 21 станция для отбора проб фитопланктона и 28 станций для отбора микропланктона.

С целью изучения особенностей состава вод в районах разгрузки глубоководных гидротерм и холодных высачиваний выполнена 51 станция для отбора воды в различных горизонтах глубин. Отобраны 321 проба для установления содержания метана и 434 пробы на определение гидрогеохимических параметров морской воды из разных гидрологических и физико-химических обстановок.

Для проведения радиохемозекологического мониторинга акваторий Японского, Охотского и Берингова морей проведены отборы 49 проб воды и 15 проб донных осадков для дальнейшего определения содержания изотопов $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr .

3.2 Орудия сбора и методы полевых работ

3.2.1 Бентосные организмы и донные осадки

Видео-фото-профилирование донных ландшафтов и отбор проб выполнены с помощью ТНПА «Команч-18» с рабочей глубиной до 6000 м, производства компании Sub-Atlantic, Великобритания (рис. 2). ТНПА оборудован комплексом научно-исследовательского и навигационного оборудования в составе: гидравлические манипуляторы Schilling Orion, батометры Нискина для отбора придонной воды, пробоотборники для сбора образцов глубоководной фауны; гидроакустическая система позиционирования Sonardyne, сопряженная с системой GPS-навигации; трехмерный многолучевой гидролокатор Tritech Eclipse и параметрический профилограф поддонных слоев Tritech PSBP; флюориметр Seapoint UV; датчики температуры, глубины, солености SBE 19 plus, растворенного кислорода SBE 43 и метана Hydro C; фото- и видеооборудование высокой четкости и чувствительности Kongsberg. Треки погружений представлены на рисунке 3.

Макро- и мегабентос. Прямые визуальные наблюдения через камеру высокого разрешения ТНПА осуществлялись во всех погружениях непрерывно. В ходе погружений все результаты наблюдений фиксировались в журнале. Эти данные дополнялись последующим анализом фотографий и видеозаписей, сделанных в ходе погружений. Такой метод позволяет получить адекватную информацию о распределении и поведении животных макро- и мегабентоса. Для измерения размеров животных и оценки плотности их распределения использовалась лазерная шкала 10 см (погружение 1) и 4,5 см (погружения 2-21). Мелкие организмы и зарывающиеся формы были недоступны для прямых наблюдений. Для выделения сообществ и анализа их пространственного распределения использовали ландшафтообразующие/ландшафтоопределяющие виды (Преображенский, 1980; Арзамасцев, Преображенский, 1990), отличающиеся крупными размерами, высокой численностью и легко опознаваемые при подводных наблюдениях, на видеозаписи и фотографиях.

Таблица 2. Погружения ТНПА «Команч-18» в 82 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев»

№	Дата	Время погружения			Время на дне			Глубины, м	Пройдено, м	Район
		Начало	Конец	Общее	Начало	Конец	Общее			
1	13.06.18	08:55	14:10	5,15	09:22	13:33	4,11	406-388	1500	Полигон 1. Северная вершина в. Пийпа
2	13.06.18	16:50	20:05	3,15	17:11	19:09	1,58	401-388	815	Полигон 1. Северная вершина в. Пийпа
3	14.06.18	08:27	12:31	4,04	09:07	11:49	2,42	499-470	800	Полигон 1. Южная вершина в. Пийпа
4	14.06.18	16:55	21:15	4,20	17:25	20:14	2,49	472-457	790	Полигон 1. Южная вершина в. Пийпа
5	15.06.18	07:12	21:30	14,18	11:23	18:26	7,03	3931-3334	1877	Полигон 1. Южный склон в. Пийпа
6	16.06.18	08:30	21:33	13,03	12:01	18:32	6,31	3906-3391	2751	Полигон 1. массив Вулканологов
7	17.06.18	08:35	14:30	5,55	09:40	13:39	3,59	1010-764	856	Полигон 1. Южный склон в. Пийпа
8	17.06.18	16:01	20:48	4,47	16:44	20:01	3,17	755-458	1141	Полигон 1. Южный склон и вершина в. Пийпа
9	18.06.18	08:35	17:47	9,12	10:16	16:25	6,09	1992-1258	2250	Полигон 1. Южный склон в. Пийпа
10	19.06.18	07:15	19:39	12,24	10:40	17:19	6,39	2824-2591	3332	Полигон 1. Южный склон в. Пийпа
11	23.06.18	09:25	20:39	11,14	10:09	19:40	9,31	871-551	6158	Полигон 2. Трансекта 3
12	24.06.18	08:30	19:59	11,39	09:05	19:11	10,06	551-431	5220	Полигон 2. Трансекта 3
13	25.06.18	08:50	16:00	7,10	09:33	15:25	5,08	677-609	1800	Полигон 2. Трансекта 3
14	27.06.18	08:25	20:00	11,35	09:13	19:01	9,48	906-542	6521	Полигон 2. Трансекта 4
15	28.06.18	08:24	19:03	10,39	09:03	18:12	9,09	547-417	6401	Полигон 2. Трансекта 4
16	29.06.18	08:35	12:33	3,58	08:50	12:02	3,12	416-356	2200	Полигон 2. Трансекта 4
17	29.06.18	14:24	17:36	3,12	14:43	17:00	2,17	402-400	910	Полигон 2. Трансекта 4
18	30.06.18	08:45	15:06	6,21	9:23	14:59	5,36	682-644	1800	Полигон 2. Трансекта 4
19	01.07.18	08:30	16:25	7,55	9:08	15:39	6,31	694-685	3400	Полигон 2. Трансекта 5
20	02.07.18	08:25	12:11	3,46	8:53	11:27	2,34	430-427	1610	Полигон 2. Трансекта 4
21	03.07.18	08:25	14:59	6,34	9:01	14:23	5,22	680-662	1550	Полигон 2. Трансекта 3
Всего				160,32			114,32	3931-388	53862	

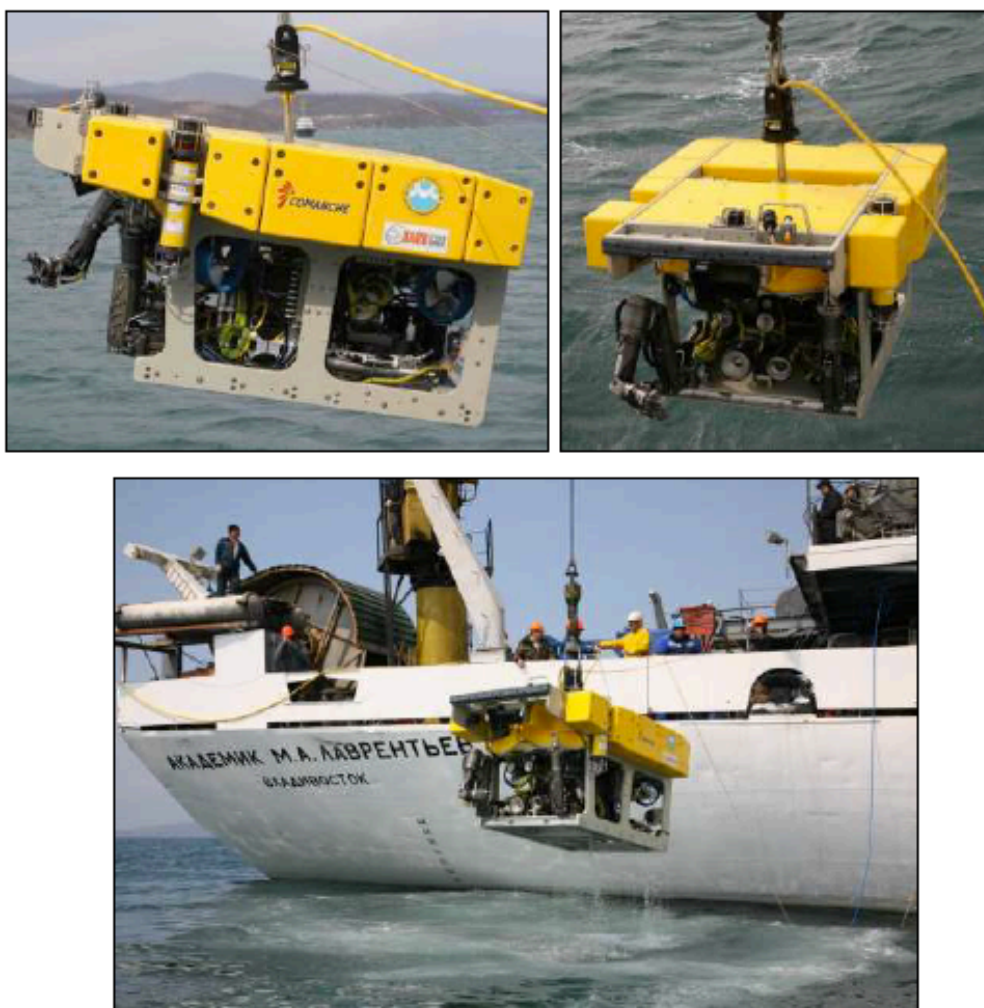


Рисунок 2 - Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Команч-18» (Sub-Antlantic, Великобритания)

Для проведения количественного учета объектов в ходе погружений делались видеорезрезы – проходы ТНПА в течение 10 мин при прямолинейном движении аппарата на минимальном расстоянии от дна с постоянной скоростью 0,5 узла, при стандартных настройках камеры, без использования опции «зум». Поскольку точное определение таксонов по имеющимся визуальным признакам, как правило, невозможно, в каждом погружении отбирались образцы животных для дальнейших исследований (морфологических, биохимических, генетических и т.д.).

Отдельные крупные объекты и организмы собирали манипулятором и помещали в пластиковый накопительный контейнер (НК), имеющий сквозное дно, закрытое решеткой. Хрупкие или мягкие объекты, организмы небольших размеров засасывали в отдельный пластиковый контейнер. Для получения данных о составе населения разных экологических зон в пределах гидротермальных и сиповых полей, применялись сачки с металлической рамкой, оснащенные двойным мешком: наружный из безузловой капроновой дели с ячейей 4 мм, внутренний из мельничного сита с ячейей 250 мкм. На борту судна содержимое сачков промывалось на сите 500 мкм, при необходимости проводили дополнительную промывку методом последовательного взмучивания и последующей промывки на сите 500 мкм. Материал с сита сортировали под биноклем и фиксировали 96% этиловым спиртом или 4% забуференным (тетраборатом натрия до рН ~8) формальдегидом. Образцы, предназначенные для молекулярно-биологических, гистологических, биохимических и других исследований подготавливались и фиксировались по соответствующим методикам. Если после сортировки остатки грунта содержали макрофауну, грунт фиксировали для дальнейшей обработки в лабораторных условиях.

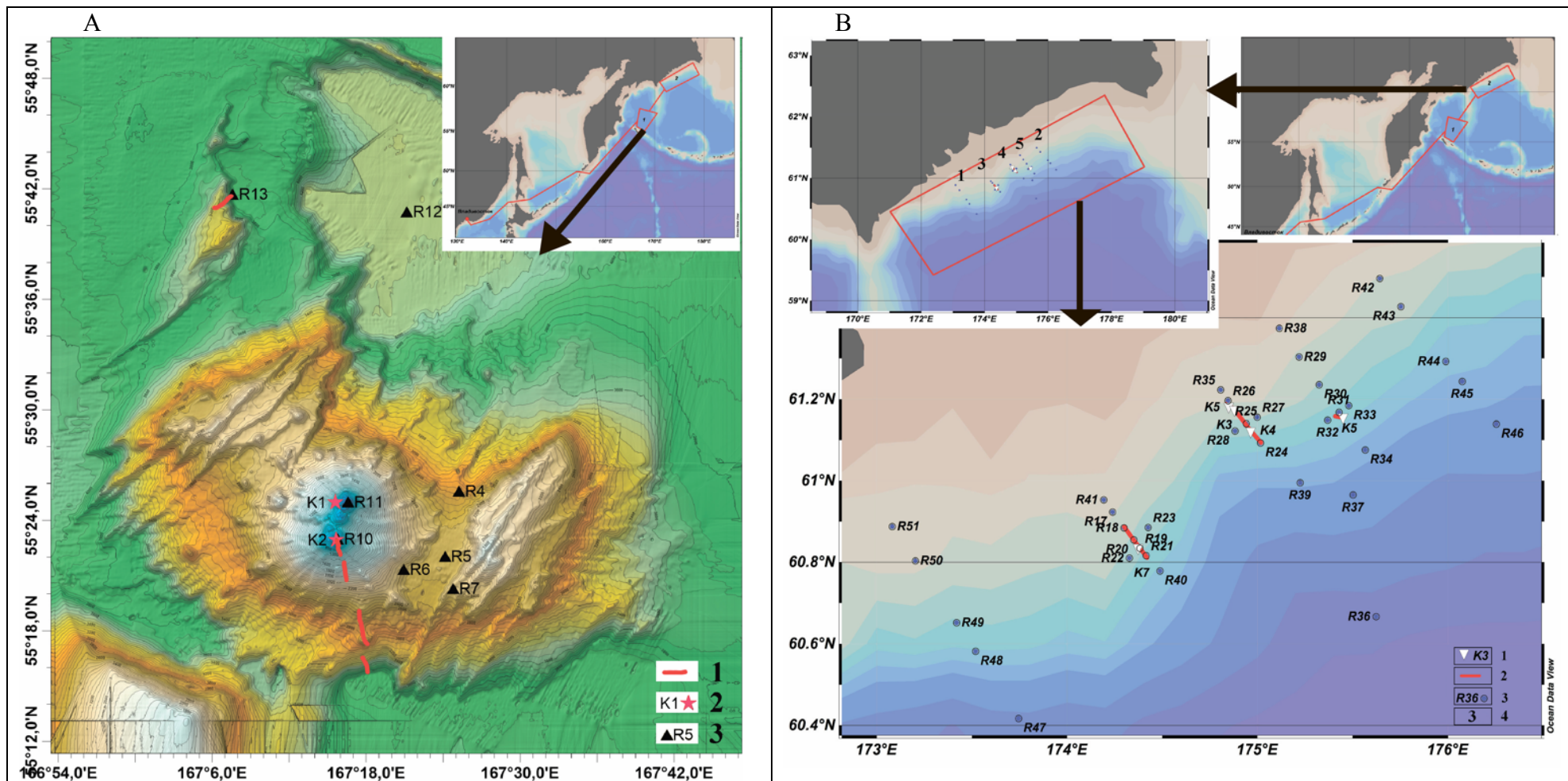


Рисунок 3 - Карта схема погружений ТПА «Команч» и отбора проб воды: А - Полигон 1 (1 – треки погружений; 2 – станции отбор воды с помощью ТПА; 3 – станции отбора воды с помощью комплекса батометрической кассеты и СТД зонда); В – Полигон 2 (1 – станции отбор воды с помощью ТПА; 2 - треки погружений; 3 – станции отбора воды с помощью комплекса батометрической кассеты и СТД зонда; 4 – номера трансект)

Прицельный пробоотбор проводился также с целью определения трофической специализации животных и выявления возможной роли бактериальной продукции в питании разных групп животных, обитающих в фоновом ландшафте, а также на разном удалении от гидротерм и холодных высачиваний. Отобранные для трофоэкологических исследований материалы замораживали при -32°C .

Мейобентос. В ходе 19 погружений (погружения 1-3 и 5-10 в пределах массива Вулканологов, погружения 12-21 на Чукотском склоне) отобраны материалы для изучения мейобентоса: 1) отдельные крупные образцы пород/бентосных организмов собирали манипулятором и помещали в пластиковый накопительный контейнер (НК), имеющий сквозное дно закрытое решеткой; 2) грунт отбирали сачком (входное отверстие 15×15 см, глубина 40 см), оснащенный двойным мешком: наружный из безузловой капроновой дели с ячейей 4 мм, внутренний из мельничного сита с ячейей 250 мкм; 3) мягкие донные осадки собирали трубкой (внутренний диаметр 4,8 см, высота 30 см), снабженной верхним клапаном. С крупных образцов пород аккуратно снимали/смывали щеткой и фильтрованной морской водой бактериальные маты/наилок и промывали через сито с размером ячеей 40 мкм. Губок помещали в емкости с морской водой и отстаивали при комнатной температуре не менее 5 часов, после чего промывали, воду после отстаивания и промывки сливали на сито с размером ячеей 40 мкм. Грунт из сачка помещали в большую емкость, заливали морской водой, взмучивали и промывали через сито с размером ячеей 40 мкм, процедуру повторяли пятикратно. Смывы фиксировали 4% забуференным формальдегидом для таксономических и экологических исследований мейобентосных организмов; для проведения молекулярно-генетических исследований использовали DESS (раствор 20% диметилсульфоксида, 0,25 М ЭДТА динатриевой соли и хлорида натрия, pH 8,0); для изучения соотношения стабильных изотопов углерода и азота образцы замораживали при -32°C . Из трубки с отобранным грунтом предварительно сливали воду, процеживая ее через сито с размером ячеей 40 мкм. Осадок с сита смывали небольшим объемом отфильтрованной морской воды в контейнер. После этого из трубки выдавливали колонку грунта, отбирали верхние 5 см и помещали их в тот же контейнер. Грунт фиксировали 4% формальдегидом/DESS/замораживали при -32°C . Всего было отобрано 85 качественных (30 зафиксированы в DESS, 40 в 4% формальдегиде, 15 заморожены при -32°C) и 33 количественных (5 в DESS, 27 в 4% формальдегиде и 1 заморожена при -32°C) пробы мейобентоса.

3.2.2 Зоопланктон

Для отбора зоопланктона использовали сети "Джеди" (диаметр верхнего кольца 370 мм, размер ячеей 150 мкм) для вертикальных ловов мезозоопланктона размером и «Конус» (диаметр верхнего кольца 800 мм, размер ячеей 500 мкм), для вертикальных ловов макрозоопланктона. Работы выполнены на 12 станциях (табл. 3). Материал, отобранный сетью, фиксировали на метагеномный анализ. Проба с планктонными организмами обезвоживалась, затем полученный материал фиксировали 96% EtOH. Образцы хранились при температуре -20°C . Всего на метагеномный анализ было отобрано и зафиксировано 9 тотальных проб планктонных организмов.

Фиксация материала на транскриптомный и геномный анализ проводилась по нескольким протоколам.

На транскриптом часть организма или целый организм фиксировали в: (a) 100% EtOH, (b) RNAlater; (c) Lysisbuffer. После фиксации образцы хранились при температуре -20°C . Всего на транскриптомный анализ было зафиксировано 73 пробы планктонных организмов.

На геномный анализ образцы фиксировали: (a) прямая заморозка в жидком азоте; (b) 1% параформальдегид и глицин. Образцы хранились в жидком азоте. Итого на геномный анализ было зафиксировано 53 пробы планктонных организмов.

3.2.3 Пробы воды и CTD-зондирование

На 44 станциях (рис. 3) работа осуществлялась с помощью комплекса батометрической кассеты SBE 32 (производства фирмы Seabird Electronics, США) и CTD зонда SBE 19+ V2 (производства фирмы Seabird Electronics, США), позволяющего проводить отбор проб воды в режиме реального времени одновременно с CTD-зондированием. Кассета включает 8 батометров системы Нискина (объёмом 12 л – 7 шт, объёмом 5 л – 1 шт), предельно возможная глубина погружения - 6800 м. CTD-зонд SBE 19+ V2 оснащен стандартными датчиками температуры, солёности, давления, а также имеет набор дополнительных, позволяющих проводить измерения концентрации растворенного кислорода (SBE43, производства фирмы Seabird Electronics, США), флюоресценции хлорофилла «А» и мутности (оба производства фирмы SEAPOINT, США). Управление пробоотборным комплексом и первичная обработка полученных данных производилась при помощи программного обеспечения Seasoft, фирмы Seabird Electronics., поставляемого с оборудованием.

На 7 станциях (рис. 3) для отбора проб непосредственно из гидротермальных флюидов и придонной воды в зоне высачиваний использовали ТНПА, оснащенный батометром системы Нискин.

Таблица 3. Станции отбора зоопланктона

Дата	станция	Широта, С	Долгота, В	Глубина, м	Сеть	Время	Горизонт, м
03.06.2018	П1	43°34.420'	136°03.374'	3200	"Джеди"	14:10	150
					"Конус"	14:27	150
04.06.2018	П2	45°43.496'	141°47.751'	63	"Конус"	15:06	40
05.06.2018	П3 3	47°26.168'	147°30.283'	3365	"Джеди"	14:05	300
		47°26.144'	147°30.442'	3365	"Конус"	14:25	150
06.06.2018	П4	49°40.922'	153°22.876'	1700	"Джеди"	14:26	300
					"Конус"	15:02	150
17.06.2018	П5	55°41,181'	167°21,527'	4309	"Джеди"	3:35	300
					"Конус"	3:57	150
24.06.2018	П6	60°53,230'	174°05,465'	650	"Джеди"	23:07	100
28.06.2018	П7	61°10,199'	175°25,728'	655,2	"Джеди"	1:32	100
29.06.2018	П8	61°04,440'	175°33.964'	900	"Джеди"	2:05	100
02.07.2018	П9	60°46,710'	174°29,273'	1519	"Джеди"	19:05	100
02.07.2018	П10	60°47,953'	174°30,118'	1410	"Джеди"	21:30	100
05.07.2018	П11	61°29,700'	175°38,311'	157	"Джеди"	19:40	100
06.07.2018	П12	61°14,441'	176°03,693'	883,3	"Джеди"	2:15	100

3.2.4 Радиохемозкологический мониторинг

Отбор проб поверхностной воды осуществляли с помощью судовой проточной системы (карта точек отбора приведена на рис. 4) для дальнейшего определения радионуклидов $^{239,240}\text{Pu}$ (6 проб), ^{137}Cs (10 проб), ^{90}Sr (10 проб).

В пробах поверхностной воды для анализа $^{239,240}\text{Pu}$ отдельно концентрировали взвешенную и растворённую форму радионуклидов, для этого воду пропускали через последовательно соединённые предфильтр-картридж с номинальным диаметром пор 0,5 мкм (для взвешенной формы) и два картриджа-сорбента с номинальным диаметром пор 10 мкм, импрегнированных диоксидом марганца. Параллельно с предобработкой проб для определения $^{239,240}\text{Pu}$ производили фильтрацию воды через предварительно взвешенные мембранные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм для последующего определения концентрации и количества собранного взвешенного вещества весовым методом.

Пробы для определения ^{137}Cs отделяли от взвешенного вещества фильтрацией через фильтр-картридж с номинальным диаметром пор 0,5 мкм и пропускали через два

последовательно соединённых адсорбера с порошковым сорбентом импрегнированным феррецианидом меди (II).

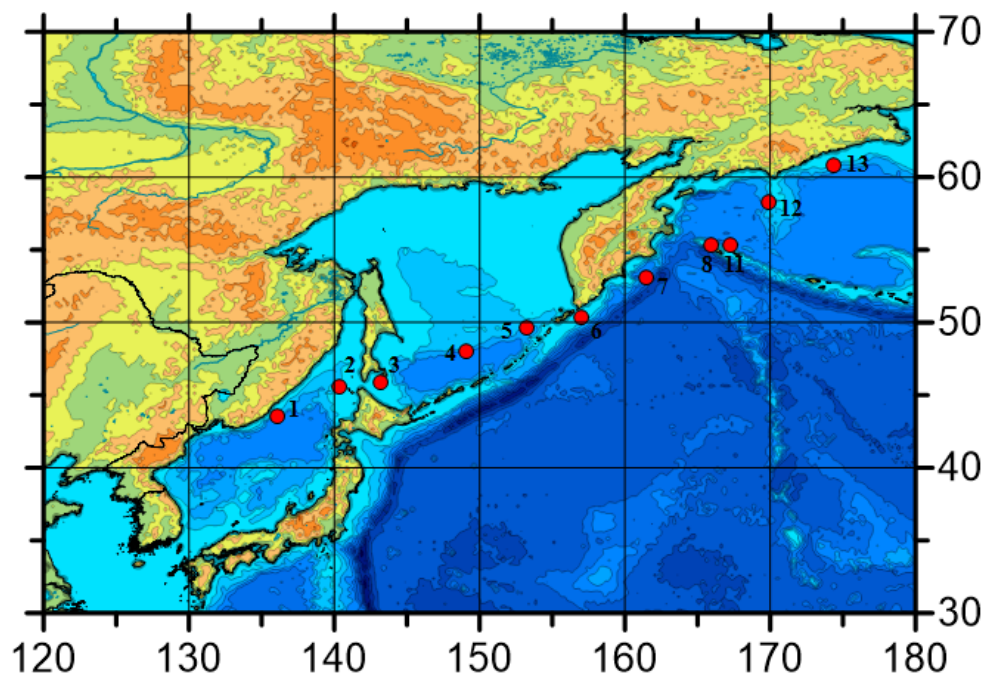


Рисунок 4 – Точки отбора проб поверхностной воды радиохемэкологического мониторинга

Пробы для определения ^{90}Sr подвергались предварительной обработке, заключающейся в осаждении в них карбонатов стронция (SrCO_3). Для этого пробы воды подкислялась добавлением концентрированной HCl (1 мл HCl на 1 л отобранной воды), в нее вносился раствор стабильных носителей Sr^{+2} (1000 мг на пробу) и Fe^{+3} (500 мг на пробу). После 2-х часовой выдержки с периодическим перемешиванием в пробу воды добавляли 120 г NH_4Cl . После 3–4 часов периодического перемешивания в раствор добавляли осадитель: 200 мл 1,5М раствора карбоната натрия. Проба тщательно перемешивалась и после 12–24 часового отстаивания осадка карбонатов стронция осветленную часть декантировали, суспензию отфильтровывали при помощи вакуумного насоса через бумажный фильтр «синяя лента».

Отбор проб донных осадков проводился ТНПА. Поверхностный слой грунта отбирался сачком аппарата, а колонки осадков – с помощью пластиковых трубок диаметром 48 мм, с последующей нарезкой на слои по 5 и 2 см. Всего отобрано 9 проб (табл. 4).

Таблица 4 – Станции отбора проб донных осадков для радиохемэкологического мониторинга

Координаты	Дата	Глубина, м
55.4164 N 167.2765 E	13.06.18	380
55.4164 N 167.276 E	13.06.18	382
55.3822 N 167.2615 E	14.06.18	463
55.3810 N 167.2610	14.06.18	464
55.1903 N 167.2907 E	19.06.18	2508
60.8901 N 174.2919 E	24.06.18	433
61.1196 N 174.9649 E	27.06.18	666
61.1725 N 174.8793 E	28.06.18	432
61.1729 N 174.8783 E	02.07.18	429

3.2.5 Газохимические исследования

Для анализа метана в образцах воды использовался метод равновесных концентраций. Вода из батометров отбиралась в медицинские стеклянные бутылки объемом 68 мл, которые немедленно герметично закрывались резиновыми пробками без доступа воздуха. Для удаления излишков воды применялись иглы от медицинского шприца. Бутылки заполнялись 12 мл гелия при помощи пластикового мешка «Tedlar Bag Dual Valve» (США) с двумя клапанами: через первый клапан производилось заполнение мешка гелием, через второй клапан с помощью иглы производилось заполнение бутылки с образцом гелием через пробку. В качестве газовой фазы использовался чистый гелий марки «А». Образцы воды интенсивно перемешивались течение 3,5 часов перед проведением анализа с помощью шейкера LOIP LS-110 (Россия). Для анализа газового состава использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» с пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности. В общей сложности произведено 321 измерение.

4. Предварительные результаты

4.1 Геологические, геохимические и газохимические исследования

4.1.1 Полигон 1

Работы на Полигоне 1 являются продолжением исследований, начатых в 75-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2016 г. В настоящей экспедиции предполагались исследования в районах гидротермальных построек в пределах вершин вулкана, а также вдоль трансекты на его южном склоне на глубинах от 3931 м до 457 м.

Вертикальная геологическая зональность южного склона вулкана Пийпа в целом близка строению его северного склона, детально изученного в 2016 г. На абиссальной части отмечены интенсивно биотурбированные терригенно-биогенные, гемипелагические пелитовые осадки, характерные для глубоководных котловин окраинных морей (рис. 5). По мере уменьшения глубины доля тонкого осадка также уменьшается вследствие усиления нисходящих придонных течений. С глубины около 1600 м визуализируются обломки карбонатных глыб (рис. 6) свалившиеся с вершинной области. Строение Южной и Северной вершин значительно различается, что было показано ранее (Сагалевиц и др., 1992).

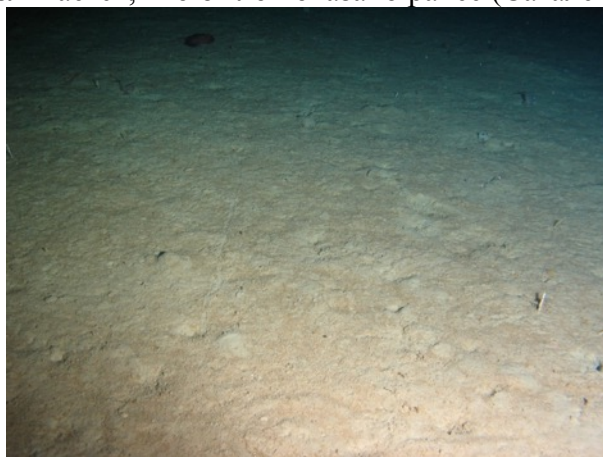


Рисунок 5 - Биотурбированный осадок глубоководной части массива Вулканологов



Рисунок 6 - Обломки карбонатов на южном склоне вулкана Пийпа

Для отбора гидротермального флюида, измерения его температуры, а также мониторинга формирования активной гидротермальной постройки выполнено специальное погружение к обнаруженному в 2016 г. «белому курильщику» на Северной вершине. Однако по имеющимся координатам объект отсутствовал. Поисковые мероприятия позволили выявить иную постройку столбообразной формы высотой около одного метра и толщиной в основании около 40 см (рис. 7). Из устья изливался интенсивный поток гидротермального флюида, напоминающий факел газовой горелки, по всей видимости, аналогичный тому, что был зафиксирован с помощью ГОА «Мир» (Сагалевиц и др., 1992). Впервые проведенное измерение температуры флюида в месте его выхода показало значение равное 132.79°C. Это значение укладывается в интервал экспериментальных температур и соответствует температуре образования гидротермального ангидрита, слагающего гидротермальную постройку.

Отбор образцов активной ангидритовой трубки не производился. Следует отметить, что в предыдущей экспедиции в 2016 г. северная возвышенность была исследована с помощью ТНПА «Команч-18» с высокой степенью детализации, однако, постройки подобного типа не были зафиксированы. В непосредственной близости (около 5-7 м) были обнаружены обломки трубообразной постройки (рис. 8). Фрагменты разрушившихся построек также были отмечены при погружениях ГОА «Мир» (Сагалевиц и др., 1992). Отобранные образцы характеризуются слоистой структурой и сложены высокопористым ангидритом (рис. 9). По всей видимости, формирование гидротермальных «курильщиков» определяется стадийностью, обусловленной гидрологической

и/или тектонической активностью: в определенные периоды происходит разрушение построек и формирование на месте разгрузки гидротермы новых. Вопрос о скорости роста таких образований остается открытым.

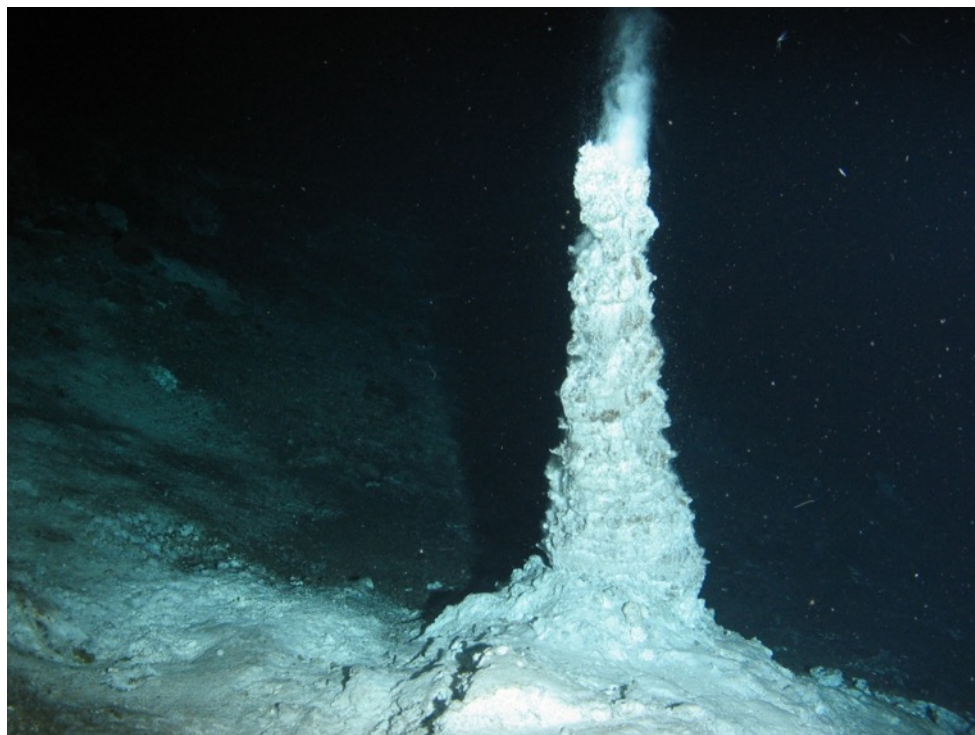


Рисунок 7 - Ангидритовая постройка Северной вершины вулкана Пийпа

Второе измерение температуры было проведено на Южной вершине вулкана Пийпа, где развиты более низкотемпературные карбонатные постройки. Здесь её максимальное значение для изливающихся хрустальных вод составило $10,59^{\circ}\text{C}$. Фоновая температура морской воды на обеих вершинах варьирует от $3,54$ до $3,71^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 8 - Трубообразные реликты гидротермальных построек



Рисунок 9 - Слоистая структура ангидрита

В пробах осадка с Южной вершине, из районов обитания характерной для гидротермальных полей фауны, отмечается большое количество продуктов ледового разноса разной размерности и степени окатонности. Из аутигенных минералов диагностируются опал, а также низкотемпературные силикаты железа (нонтронит (?)), а также обломки инситных карбонатных корок, распространенных на Южной вершине повсеместно. Следует отметить, что при первичном изучении осадка под бинокляром пирит, выявленный в предыдущей экспедиции в пробах из аналогичной обстановки, не установлен.

Так же на Южной вершине поднят обломок пористой породы, представленный смесью аутигенных минералов, цементирующих инситные обломки карбонатов и материнских магматических пород (рис. 10). В роли цемента выступает железистый алюмосиликат грязно-зеленого цвета, представленный, по-видимому, нонтронитом. Особенностью строения этого гидротермалита толщиной 5-6 см является то, что галька ледового разноса находится только в подошвенном слое образца. Верхняя часть образца осложнена арагонитовыми кораллоподобными наростами.

В зоне гидротермальной активности на Южной вершине отобрана активная постройка цилиндрической формы (длина по оси 18 см) с овальным основанием (6x3 см) (рис. 11). Вещество трубки плотное, строение концентрически-слоистое. По отражательной способности выделяется три слоя. Наружный беловато-серый с светло-зеленоватым оттенком с коричневыми, рыжими и грязно-зелеными выделениями. Окраска неравномерная, пятнистая. Следом идет прослой белого хрупкого минерала. Самый мощный внутренний слой. Его толщина по периметру не однородная, от 1,5-1,7 см до первых мм. Стенки канала в данном случае не инкрустированы более высокотемпературными минералами, как это было установлено для постройки аналогичного строения и состава, отобранной в 2016 г.

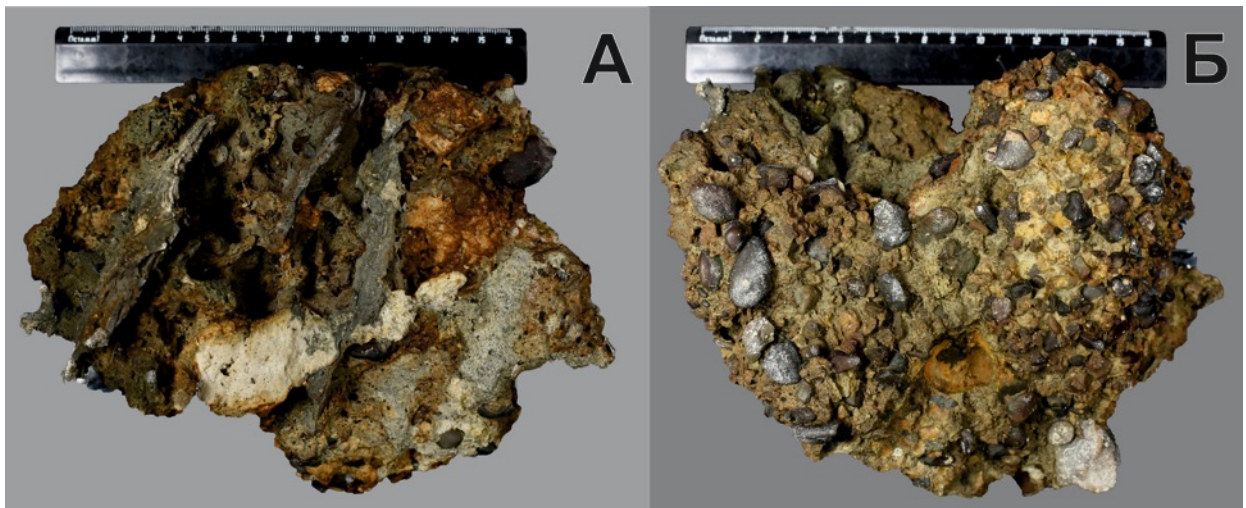


Рисунок 10 - Гидротермалит с Южной вершины вулкана Пийпа: А – поверхность образца; Б – нижняя часть образца.

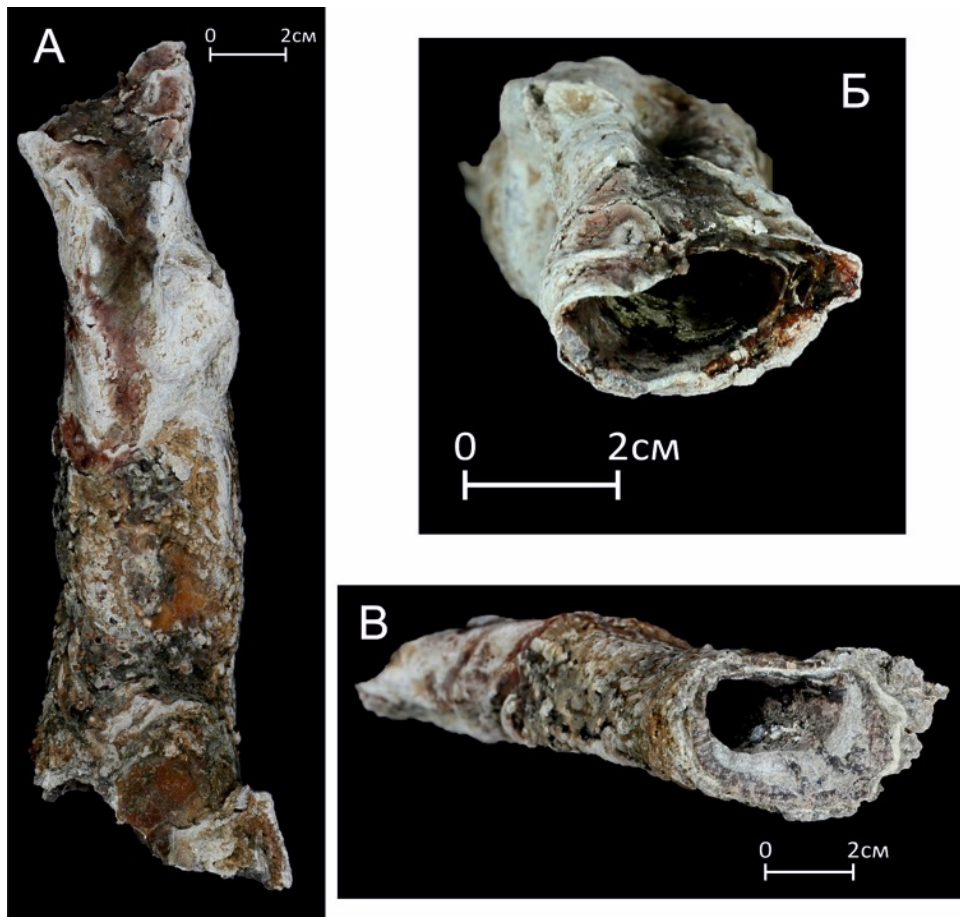


Рисунок 11 - Гидротермальная постройка с Южной вершины вулкана Пийпа: А – вид с боку; Б – верхняя часть флюидовыводящего канала; В – основание гидротермальной постройки.

В 249-м рейсе НИС «Зонне» драгированием в интервале глубин 3879-3460 м была опробована возвышенность, располагающаяся примерно в 34 км к северо-западу от вулкана Пийпа (станция SO249-DR124) (рис. 12). В результате были подняты подушечные лавы типа MORB, а также гидротермальные железомарганцевые корки, являющиеся маркерами проявления гидротермальной активности в этом районе. Эти геологические предпосылки явились основой для определения второй задачи работ на Полигоне 1 – поиск районов высокотемпературной

гидротермальной минерализации. Для этого ТНПА была выполнена трансекта от начала станции драгирования SO249-DR124 на привершинное плато возвышенности (рис. 12). Теле- и фотопрофилерование не выявило следов гидротермальной активности, а также не удалось зафиксировать области развития железомарганцевых корок. Однако отобранные образцы отмершего губочника на этом разрезе интенсивно пропитаны оксигидроксидами железа и марганца с образованием ботроидального налета (рис. 13), что можно рассматривать как еще одно свидетельство наличия в этом районе гидротермальной минерализации, поиск которой требует более детальных исследовательских работ.

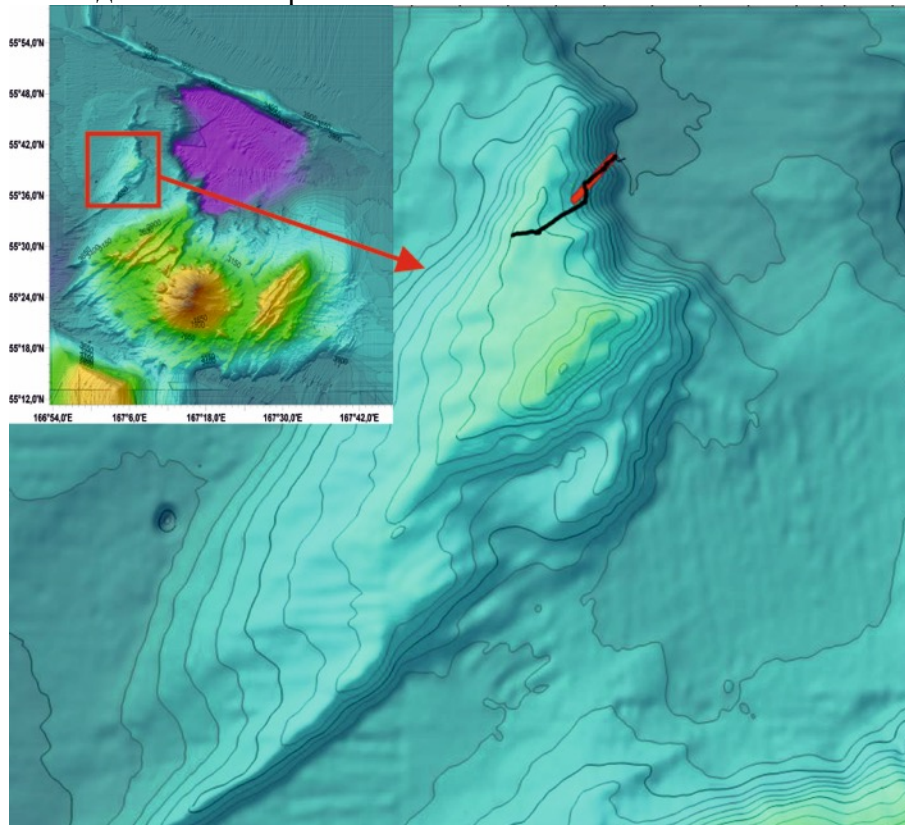


Рисунок 12 – Трек (черная кривая) ТНПА «Команч-18» в ходе погружения 6 к северо-западу от вулкана Пийпа (красная линия – трек драги SO249-DR124)

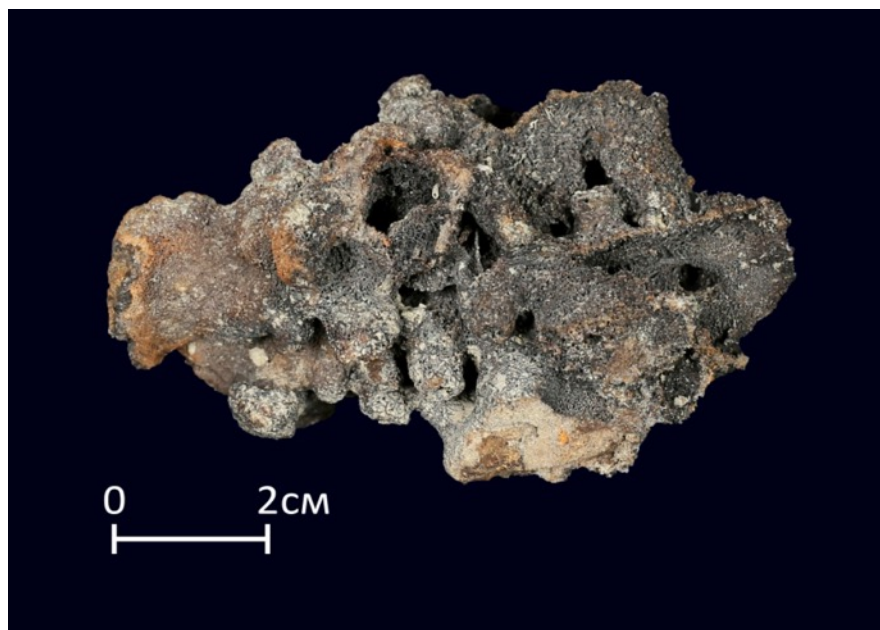


Рис. 13. Губочник пропитанный железомарганцевыми оксигидроксидами

На CTD-станциях, выполненных в районе восточного склона вулкана (St4, St5, St6, St7, St12, St13) концентрации метана не превышали фоновых значений, характерных для этого района работ (43-118 нл/л). На этих станциях наблюдался типичный паттерн распределения метана в водных колонках: наличие подповерхностного максимума концентрации метана в области термоклина и незначительное повышение концентрации метана в придонном слое (рис. 14).

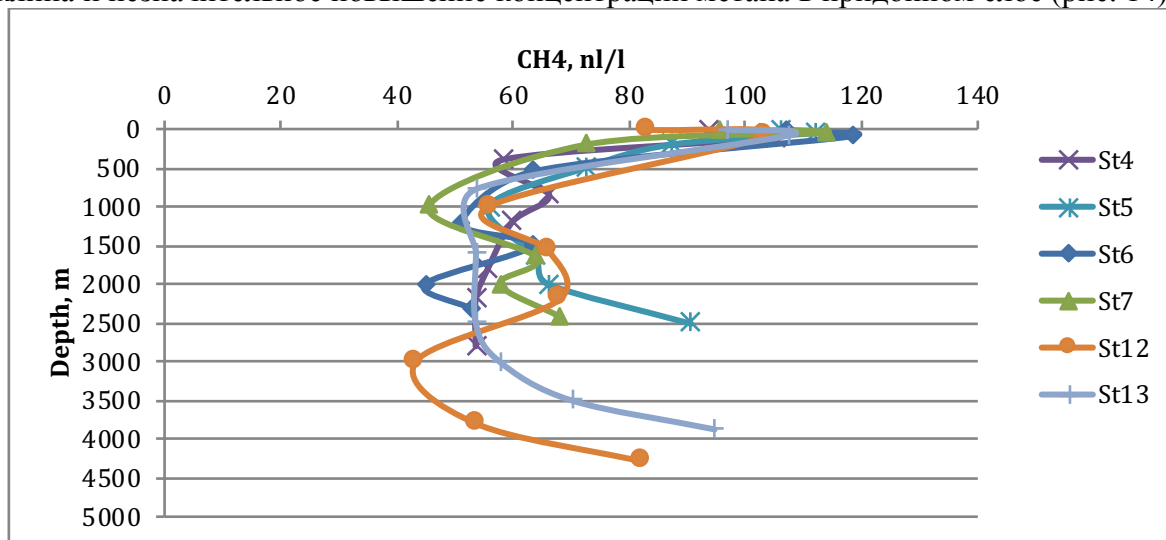


Рисунок 14 - Распределение метана в водных колонках на станциях с фоновыми концентрациями метана в морской воде в районе массива Вулканологов и вулкана Пийпа (St4, St5, St6, St7, St12, St13)

Наибольшее содержание метана (2364 нл/л) в районе вулкана зафиксировано в придонном слое на станции St11, выполненной над Северной вершиной (рис. 15). Повышенные концентрации метана (387 нл/л) и (549 нл/л) отмечались также в подповерхностном слое воды (50 м) на станции St10, выполненной над Южной вершиной, и в поверхностном слое воды на станции St11, соответственно. Эти аномалии, вероятно, вызваны переносом насыщенной метаном воды с более глубоких горизонтов под действием течений.

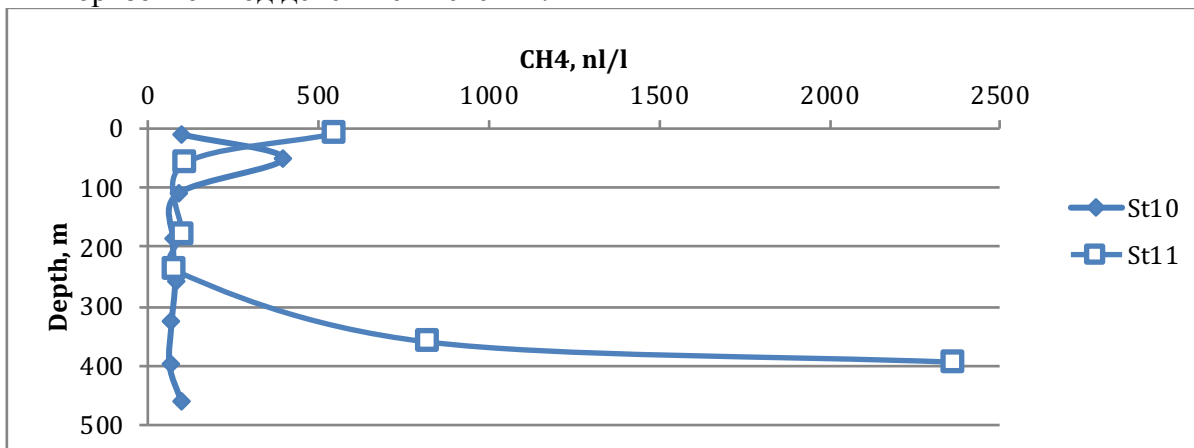


Рисунок 15 - Распределение метана в водных колонках на станциях, выполненных над южной (St10) и северной (St11) вершинами вулкана Пийпа

Фоновые значения концентраций метана в придонном слое воды на станции St10 можно объяснить сложностью точного отбора придонной воды непосредственно над районами гидротермальных выходов в условиях дрейфа судна. В целом, по результатам анализа распределения метана в морской воде на станциях St4, St5, St6, St7, St12, St13, полученные ранее в экспедиции LV-75 (2016 г) данные о наличии на восточном склоне вулкана Пийпа слоев воды с высокими содержаниями метана (3680 нл/л) не получили подтверждения.

Содержание метана в пробах гидротермального флюида, отобранных с помощью ТНПА из источников на Северной и Южной вершинах составляло 90,53 и 13,42 %, соответственно (табл. 5). Содержание метана во флюиде из постройки на северной вершине соответствует данным, полученным в ходе рейса LV-75 (2016 г). Образец с южной вершины содержит значительно меньшее количество метана, по сравнению с ранее полученными данными (2016 г). Высокое содержание азота в пробе (71,35 %) свидетельствует о возможной разгерметизации батометра в ходе всплытия. Также вероятно и разбавление пробы флюида морской водой в ходе пробоотбора из-за трудностей, возникших при правильном позиционировании манипулятора над гидротермой (трещина в карбонатной корке) на южной вершине.

Таблица 5. Результаты анализа проб воды, отобранных ТНПА «Команч-18» из гидротерм на южной и северной вершинах вулкана Пийпа

Номер пробы	Место отбора	Широта (северная)	Долгота (восточная)	CH ₄ % об	C ₂ H ₆ % об	O ₂ % об	CO ₂ % об	N ₂ % об
225	Северная вершина	55.4166	167.2763	90,53	0,1643	0,56	2,19	6,55
228	Южная вершина	55.38218	167.26094	13,42	0,0587	13,3	1,84	71,35

4.1.2 Полигон 2

Работы на Полигоне 2 выполнялись в пределах подводной акватории Корякского нагорья (от мыса Олюторский до мыса Наварин), являющегося структурной единицей Камчатско-Корякской подводной континентальной окраины, склоны которой протягиваются на ширину до 280 км. Шельфовые области здесь ограничены изобатой в 165 м (Дальневосточные моря..., 2007). На южном крыле мегантиклинория Корякского нагорья, на сочленении складчатого сооружения континента и шельфа Берингова моря расположен Хатырский осадочный бассейн, приуроченный к одноименному прогибу. Это область длительного интенсивного прогибания, выполненная мощной толщей пород, среди которых выделяются нефтематеринские свиты, а также пачки с хорошими коллекторскими свойствами. Бассейн располагается основной частью под водами Берингова моря с узкой краевой частью на суше. Геологическая съемка и тематические работы в наземной части бассейна проводятся с 1955 г. (Нефтегазоносные бассейны Дальнего..., 1971). В наземной части Хатырского прогиба выявлено около 40 локальных купольных поднятий, которые можно рассматривать в качестве ловушек для углеводородов (Миловский и др., 2015). Нефтепоисковые работы и бурение осуществлялись на пяти площадях. На трех из них получены притоки нефти и газа, а на Янракоимской и Угловой выявлены промышленные залежи. На Угловой площади в интервале 1636-1658 м получен приток нефти, перешедший в фонтанный нефтегазовый выброс. Последующие исследования показали, что наличие нефтяной залежи на Угловой площади, а также и на соседних структурах, подтверждают перспективы миоценовых отложений в Хатырской впадине как на суше, так и на континентальной окраине Берингова моря (Забанбарк, 2009). По материалам сейсмических исследований на склоне Берингова моря, проведенных ОАО «Дальморнефтегеофизика» в 1988 и 2007 гг., в Хатырском осадочном бассейне выявлены перспективные в отношении газогидратности зоны площадью 1650 и 1100 км² на глубинах 300-900 м (Грецкая, Петровская, 2010). Обнаружение здесь раковин везикомиид и солимиид (Данилин, 2013) дало основания для предположения о наличии в пределах указанной акватории метановых высачиваний и возможном развитии характерных «сиповых» сообществ.

Одним из ключевых факторов определяющих состав и структуру бентосных сообществ является тип донных осадков. Видеомониторинг и поднятые с помощью ТПА пробы поверхностного осадка показали, что распределение каменного материала в пределах изучаемой акватории соответствует выявленным ранее закономерностям (Лисицин, 1994). Большинство изученной территории Хатырского прогиба покрыта тонким пелитовым биогенно-терригенным осадком (рис. 16), преимущественно бледного оливкового цвета, указывающего на обедненность поровых вод кислородом. Это в свою очередь влияет на отсутствие типичных для

высокоширотных областей окраинных морей оксигидроксидных железомарганцевых образований, формирующихся на поверхности каменного материала в виде колец.

На глубинах около 650-690 м выявленные локальные, но, по-видимому, имеющие довольно широкое распространение, метановые выходы приурочены к областям с минимальным количеством тонкого пелитового материала (рис. 17). Скорее всего, отсутствие пелитового материала в местах газовой разгрузки связано с незначительными локальными поднятиями, обусловленными особенностями тектонического режима. Приуроченность сиповых ареалов к разломным зонам требует геофизической заверки.

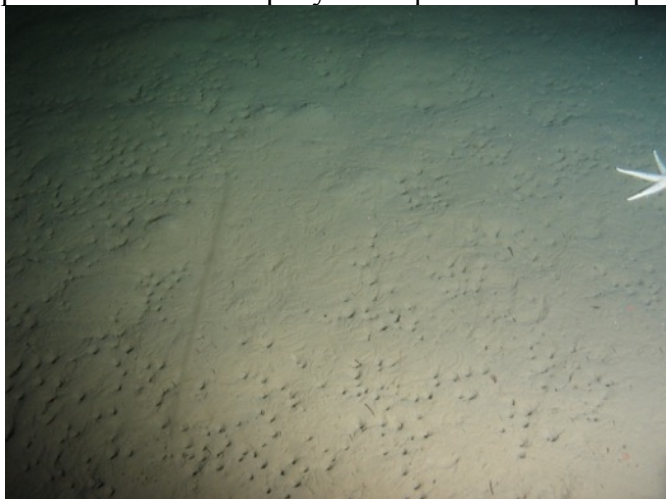


Рисунок 16 - Пелитовый биогенно-терригенный осадок Хатырского прогиба



Рисунок 17 Гравийно-галечные отложения в местах метановой разгрузки

В местах холодной газовой-флюидальной разгрузки были обнаружены карбонатные образования различной формы от корок до трубок (рис. 18). Карбонатные корки имеют значительное площадное распространение. В целом, с увеличением высоты локальных поднятий рельефа дна наблюдалось более интенсивное развитие карбонатной минерализации, вплоть до формирования карбонатных построек различной причудливой формы, достигающих 1 м в высоту (рис. 19), названных «карбонатные холмы». Такие постройки вытянутой формы были зафиксированы на пятой трансекте полигона, их протяженность в юго-западном направлении составляет около 100 метров.

При незначительных удалениях от зон газовой-флюидных эманацй на поверхности осадка практически не визуализируются гравийно-галечные отложения. Каменный материал просто тонет в довольно мощном слое хлопьевидных биогенных илов. При изучении колонок осадков, отобранных с помощью ТНПА в местах развития «кисельных» осадков, галька ледового разноса диагностировалась глубже 50 мм от границы вода-осадок.

В районе развития белых бактериальных матов был произведен отбор поверхностного осадка трубкой. Керн длиной приблизительно 20 см осадка представлен алеврито-песчаными отложениями черного цвета. Такая окраска осадка, предположительно, обусловлена значительной примесью гидротроилита. Ощущался резкий запах сероводорода. При деструкции верхнего слоя после отбора осадка трубкой из зоны метановой разгрузки, отмечено высвобождение газа. Свободное газовыделение в районе сиповых проявлений за все время изучения не зафиксировано.

Бактериальное метанокисление в районе метановых сипов приводит к образованию изотопно-легких карбонатов (Гальченко, 2001). Вследствие интенсивного окисления просачивающегося через бактериальный мат метана и образования уголекислоты карбонатное равновесие сдвигается в сторону осадки карбоната, что приводит к выпадению арагонита (Иванов и др., 1991). Формирование карбонатной минерализации зависит от скорости поднимающегося флюидного потока и количественных соотношений его компонентов, образование массивных карбонатных корок в близповерхностных горизонтах осадков указывает на скорость флюидного потока около 100 см/год. Постепенно в некоторых участках матов складываются условия более

благоприятные для вышеописанного процесса и количество арагонитовых включений увеличивается до состояния взаимного контакта постоянно увеличивающихся в размере карбонатных частиц. По прошествии времени включения сливаются, образуя карбонатную корку, разрастающуюся в толщину вплоть до образования мощной плиты. Наиболее благоприятные условия для метанотрофов и, следовательно, бактериального мата складываются уже в непосредственной близости от канала. В этом месте происходит уже вертикальное нарастание мата, в котором процессы выпадения арагонита продолжаются. В итоге формируются постройки причудливой формы. Формирование мощных карбонатных плит на морском дне может свидетельствовать о распространении газогидратов на незначительных глубинах толщи осадка и их дестабилизации. Такой процесс охарактеризован, например, для районов газовых эманаций северо-восточного склона о-ва Сахалин (Дальневосточные моря..., 2007) и Гидратного хребта аккреционной призмы Каскадия (западное побережье США, штат Орегон) (Дальневосточные моря..., 2007).



Рис. 18. Карбонатные образования Хатырского прогиба: А - образец Lv82-13-6; Б - образец Lv82-18-3/1; В - образец Lv82-18-3/2; Г - образец Lv82-18-3/3



Рисунок 19 - Карбонатные холмы

На чукотском склоне были проанализированы на содержание метана 236 проб морской воды, отобранных на 35 STD-станциях в диапазоне глубин от 126 до 3132 метров. Также были проанализированы пять проб, отобранных ТНПА в местах предполагаемого нахождения холодных метановых сипов.

Глубоководная станция (St36, глубина 3132 м) была выполнена на значительном удалении от места работ для определения фоновых значений концентраций метана. Тем не менее, даже на этой станции было обнаружено неожиданное повышение концентрации метана (281 нл/л) на горизонте 2500 м по сравнению с найденными фоновыми величинами (46-113 нл/л).

На глубинах от 126 до 1509 метров на всех выполненных на полигоне станциях наблюдалось значительное превышение средних концентраций метана по сравнению со значениями на St36. Максимальные концентрации зафиксированы на станциях: St29 (12473 нл/л), St27 (2780 нл/л), St28 (1616 нл/л), St26 (5198 нл/л), St30 (2315 нл/л), St31 (4145 нл/л), St29 (2506 нл/л), St44 (2183 нл/л) и St45 (2174 нл/л). Практически на всех остальных станциях зафиксированы высокие концентрации (281-1351 нл/л), причем распределение метана в водных колонках имеет различный характер.

Для метана в водных колонках выявлены три специфических паттерна распределения: 1) с постепенным нарастанием содержания метана в воде от поверхности к дну, либо с резко выраженным максимумом в придонном слое (St18, St25, St26, St29, St30, St31, St32, St33, St35, St38, St42, St43, St44, St49, St50) – всего 15 станций (рис.20); 2) с максимальным содержанием метана в промежуточных водных слоях (St17, St20, St21, St23, St27, St28, St37, St39, St40, St41, St45, St46, St47, St48, St51) – всего 15 станций (рис. 21); 3) с бимодальным распределением метана – максимальные концентрации обнаруживаются в придонном и промежуточных слоях (St19, St22, St24, St25, St34) – всего 5 станций (рис. 22).

Первый тип распределения характерен для станций с самыми высокими концентрациями метана в морской воде. Тем не менее, эта группа отличается наибольшей вариабельностью максимумов метана – от 406 до 12473 нл/л. Все эти станции выполнены на небольших глубинах – от 126 до 708 м. Здесь также наблюдаются два подтипа распределения: с постепенным увеличением концентрации (St25, St38, St42, St49, St50), либо с резким нарастанием в придонных слоях (St18, St26, St29, St30, St31, St32, St33, St35, St43, St44). К первому подтипу относятся станции с относительно невысоким содержанием метана в придонных слоях – от 406 до 813 нл/л, на глубинах от 126 до 638 м. Вероятнее всего, повышенные концентрации на этих станциях вызваны действием придонных течений. Станции второго подтипа (здесь концентрацией метана от 1030 до 12473 нл/л) очевидно были выполнены над зонами с холодными метановыми сипами, либо в непосредственной близости от них. Полученные данные позволяют установить диапазон глубин (от 332 до 708 м), в котором вероятнее всего располагаются участки газовой разгрузки на чукотском склоне Берингова моря, и выделить основной геохимический критерий для поиска таких участков (концентрация метана составляет более 1000 нл/л в придонном слое).

Второй тип распределения, с максимальным содержанием метана в промежуточных водных слоях, объединил станции с широкими диапазонами глубин (от 146 до 1509 м) и максимумов концентраций (от 127 до 2780 нл/л). Лишь на четырех станциях (St17, St27, St28, St45) были установлены аномально высокие концентрации (1351-2780 нл/л). На всех остальных станциях концентрации не превышали 1000 нл/л (среднее значение 560 нл/л), а максимальное содержание метана на станции St40 (127 нл/л) лишь незначительно превышает фоновые значения (46-113 нл/л). В эту группу включены все глубоководные станции полигона (St37, St39, St40, St46, St47), здесь концентрации метана не превышали 877 нл/л. В то же время, станции с аномально высокими концентрациями метана (1351-2780 нл/л) располагались на глубинах меньше 860 метров, при этом сами аномалии приурочены к горизонтам от 200 до 700 метров. Эти данные еще раз подтверждают предположение о том, что сипы на Полигоне II располагаются в диапазоне глубин от 300 до 700 метров, а все метановые аномалии на больших и меньших глубинах вызваны перемещением водных масс и явлениями апвеллинга.

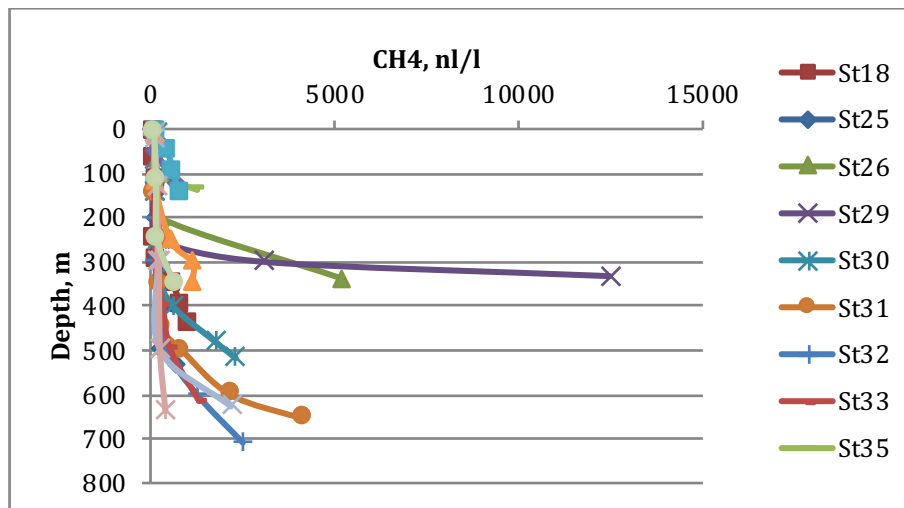


Рисунок 20 - Распределение метана в водных колонках на станциях с постепенным нарастанием содержания в воде от поверхности к дну, либо с резко выраженным максимумом в придонном слое.

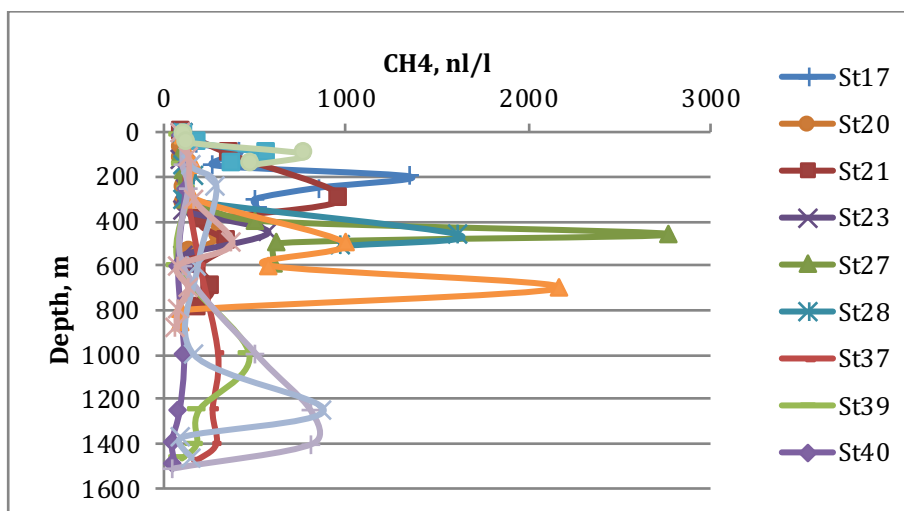


Рисунок 21 - Распределение метана в водных колонках на станциях с максимальным содержанием метана в промежуточных водных слоях.

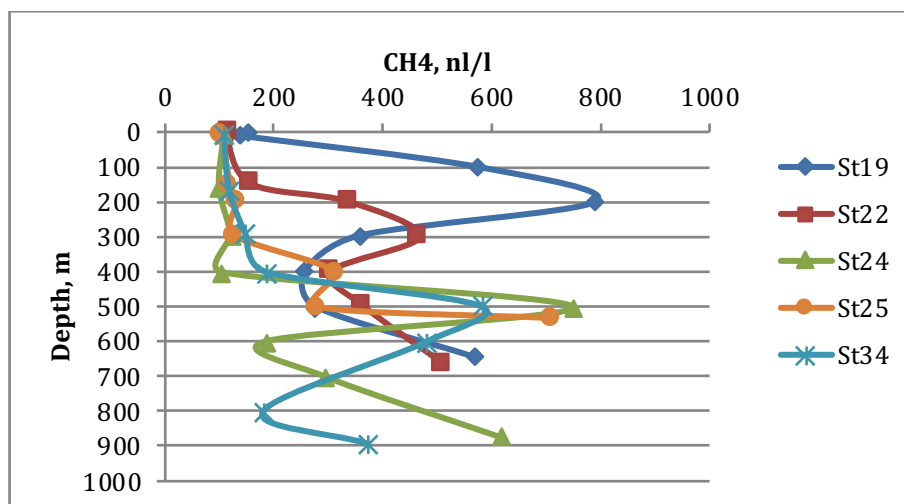


Рисунок 22 - Распределение метана в водных колонках на станциях с бимодальным распределением метана в водных слоях.

Третий тип распределения, с максимумами в придонном слое и промежуточных слоях, характерен для небольшой группы станций и обусловлен, по всей видимости, как переносом водных масс под действием течений (максимум концентраций на промежуточных горизонтах), так и незначительным поступлением метана из сипов (придонный максимум).

Для более наглядного представления о распределениях метана в водной толще были построены профили вдоль трансект в программе Ocean Data View (рис. 23). На профиле 1 концентрации метана на промежуточных горизонтах станций превышают концентрации метана в придонном слое и в, целом, снижение максимальных и средних концентраций метана в морской воде на всех горизонтах.

В ходе проведения работ в данном районе также были отобраны батометрами пять проб придонной воды при помощи ТНПА в местах предполагаемых выходов метана: на участках с наличием карбонатных корок и образований, трещин в донных отложениях, прослоек гидротроилита, бактериальных матов, скоплений облигатных симбиотрофных видов морских организмов (*Calyptogena pacifica*) (Таблица 6).

Пробы, отобранные с помощью ТНПА содержали метан в широком диапазоне концентраций (396–11052 нл/л). На всех погружениях отмечалось наличие бактериальных матов, скоплений или единичных образцов *Calyptogena pacifica*. В одном случае на метановом сипе наблюдалось присутствие большого количества морских ежей. Примечательно, что глубины, на которых в ходе погружений ТНПА были визуальными идентифицированы метановые сипы и отобраны пробы воды (401-693 м), четко укладываются в ранее установленный на основе анализа распределения метана в водных колонках оптимум для поиска метановых сипов (330-708 м).

Таблица 6. Результаты анализа проб воды, отобранных ТНПА «Команч-18» на участках с идентифицированными метановыми сипами.

Номер пробы	Широта (северная)	Долгота (восточная)	Глубина отбора, м	СН ₄ , нл/л	Примечание
225	61.180	174.849	401	11052	Бактериальные маты, единично <i>Calyptogena pacifica</i>
228	61.112	174.965	659	396	Карбонатные корки, трещина со скоплением <i>Calyptogena pacifica</i>
239	61.154	175.449	693	2167	Трещина, карбонатные корки, бактериальные маты, скопления <i>Calyptogena pacifica</i>
253	61.172	174.879	428	5070	Бактериальные маты, морские ежи, единично <i>Calyptogena pacifica</i>
275	60.833	174.374	660	791	Трещина, обрамленная скоплением <i>Calyptogena pacifica</i> , бактериальные маты, карбонатные корки

Таким образом, в пределах материкового склона Корякского нагорья в интервале глубин 330-700 метров были зафиксированы газовые метановые эманации на обширной площади протяженностью около 170 км. Наличие мощных карбонатных плит в этом районе свидетельствует о распространении газогидратов на незначительных глубинах толщи осадка и их дестабилизации. Действие морских течений в данном районе способствует активному переносу метана из зон газовой разгрузки как на мелководные станции, так и на глубоководные участки, находящиеся на значительном удалении от мест выхода метана.

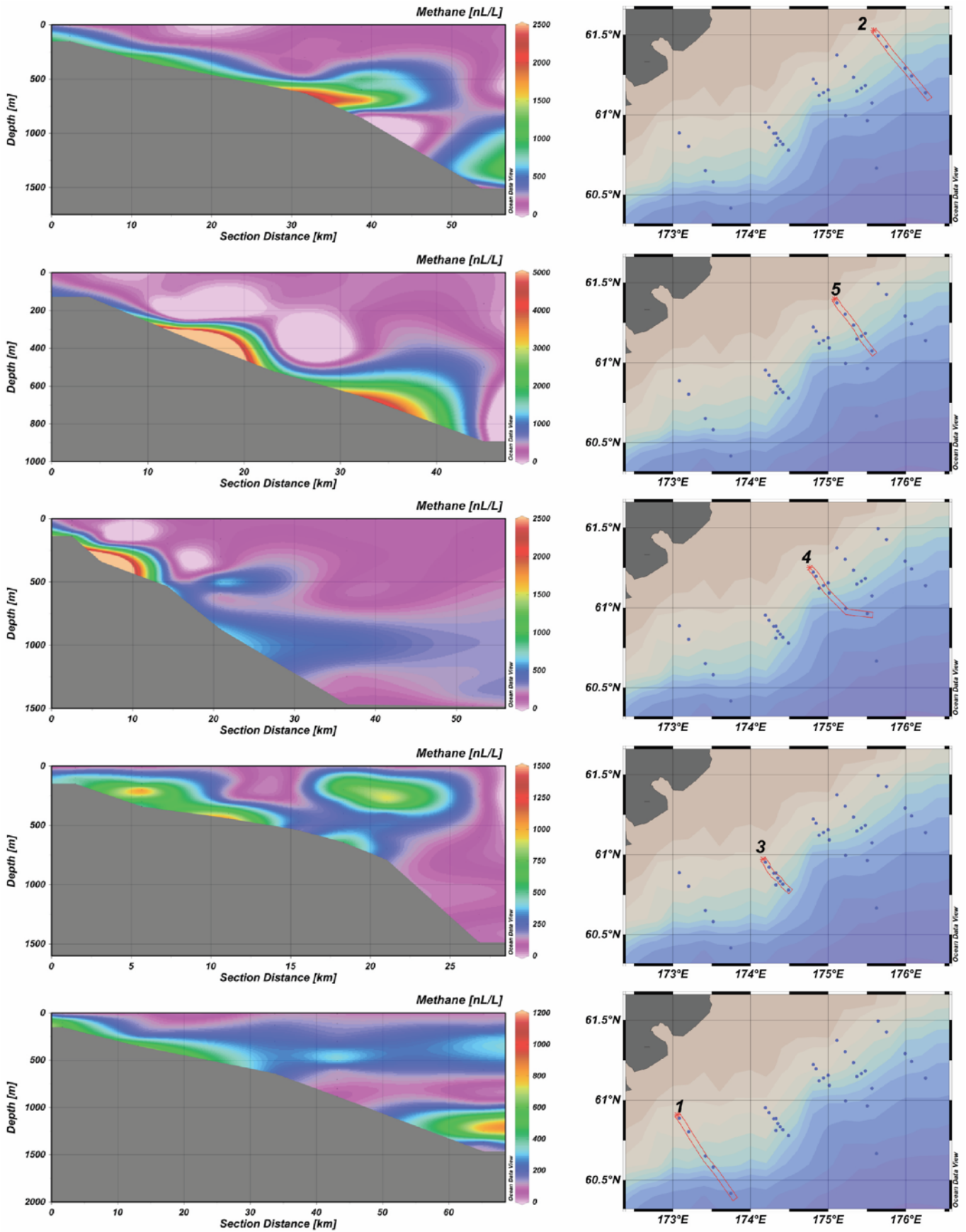


Рисунок 23 - Распределение метана вдоль трансект

4.2 Гидробиологические исследования

4.2.1 Полигон 1

4.2.1.1 Вертикальное распределение фауны на склоне массива Вулканологов

С целью изучения вертикального распределения донной фауны на южном склоне вулкана Пийпа было осуществлено 5 погружений и одно погружение (№6) на глубинах 3906-3391 м было предпринято в пределах массива Вулканологов к северо-западу от вулкана Пийпа. Погружения были осуществлены в диапазоне глубин 3931-475 м примерно с 1000-метровым интервалом по глубине (табл. 2). По техническим соображениям, маршруты аппарата были проложены с большей глубины на меньшую (рис. 3А).

Краткие результаты. На максимальных исследованных глубинах (3931-3334 м) южного разреза доминирование в сообществе как по численности, так и по биомассе явно принадлежит голотуриям, из которых наиболее многочисленны *Scotoplanes* sp. Помимо них отмечено еще не менее четырех видов голотурий. С глубин около 3660 м осадочные фации чередуются с выходами скальных пород. Доминирующие обитатели твердого субстрата – гидрокораллы *Stylasteriidae*, акинии *Actinernus michaelsarsi* и мелкие шаровидные губки. На максимальной глубине единично встречаются энтеропнеуст, оставляющий спиральный след и мягкий коралл *Anthomastus robustus* (рис. 24).

На сходных глубинах (3906-3391 м) северо-западнее вулкана преобладает твердый субстрат, представленный коренными породами, материалом ледового разноса и старыми губками. Это обуславливает доминирование прикрепленных форм: гидрокораллы (в начале) и губок (в конце разреза). Сопутствующая фауна твердого субстрата весьма разнообразна. По сравнению с ней, осадочные фации выглядят безжизненно. Примечательно присутствие единичных *Enteropneusta* как на осадке, так и на каменистых фациях, которые, начиная с глубин 3880 м, становятся обычными. Полученная в рейсе информация, дополненная данными предыдущего рейса в район массива Вулканологов, свидетельствует о широком распространении этой группы в Беринговом море.

Южный разрез был продолжен с глубины 2824 до 2643 м, где маршрут ТПА проходил по каменистому склону. Руководящие формы этой зоны на всем протяжении - брахиоподы, губки, серпулиды, изидиды, веерные горгонии *Narella* sp. (рис. 25). После спуска в осадочную долину (глубина 2818 м), маршрут вышел на сообщество голотурий-креветок-офиур (явное доминирование голотурий синаллактид началось с глубины 2817 м). Это на 150 м глубже, чем нижняя граница того же сообщества на северном склоне массива Вулканологов. В конце маршрута (около 2600 м) отмечены бентопелагические *Trachimedusae*. На северном склоне их присутствие стало заметным на глубине 2470 м.

По проведенным наблюдениям, верхняя граница сообщества с доминированием синаллактид проходит на глубинах около 1990 м (рис. 26). После их выпадения (уже на глубине 1911 м) доминирующую роль в сообществе играют голотурии *Pannychia*, *Enteropneusta*, офиуры и креветки. С глубины 1877 м в число руководящих форм входят морские перья *Anthoptylum grandiflora* (рис. 27) (такое сообщество не наблюдалось на северном склоне). *Enteropneusta* продолжают играть заметную роль до глубин около 1730 м, после чего встречаются единично. Убывание числа перьев отмечено на глубине 1434 м.

Основу сообщества в зоне 1010-764 м составляют живые и мертвые губки, главным образом *Farrea* и *Rossellidae*, которые заселяются богатой фауной, в том числе, явно специализированными формами (как, например, розовые офиуры) (рис. 28). Последняя часть маршрута проходила в пределах типичного губочного сообщества, развивающегося на верхнем склоне вулкана и простирающегося до глубин порядка 750 м.

В верхней части Южной вершины вулкана в горизонте от 645 м до 470 м наблюдается смена сообщества губочного рифа сообществом антомастусов, в котором, начиная примерно с 500 м, начинают играть значительную роль кораллиморфрии (рис. 29). Вблизи вершины, особенно в зонах гидротермальных проявлений, *Corallimorphus* sp. становится доминирующей формой. Зона массового развития зоантарий, выделявшаяся на Северной вершине, на Южной вершине не

выражена. Наблюдаемая картина вполне соответствует ранее описанной зональности вулкана Пийпа.



Рисунок 24 - Мягкий коралл *Anthomastus robustus*, глубина 3931 м

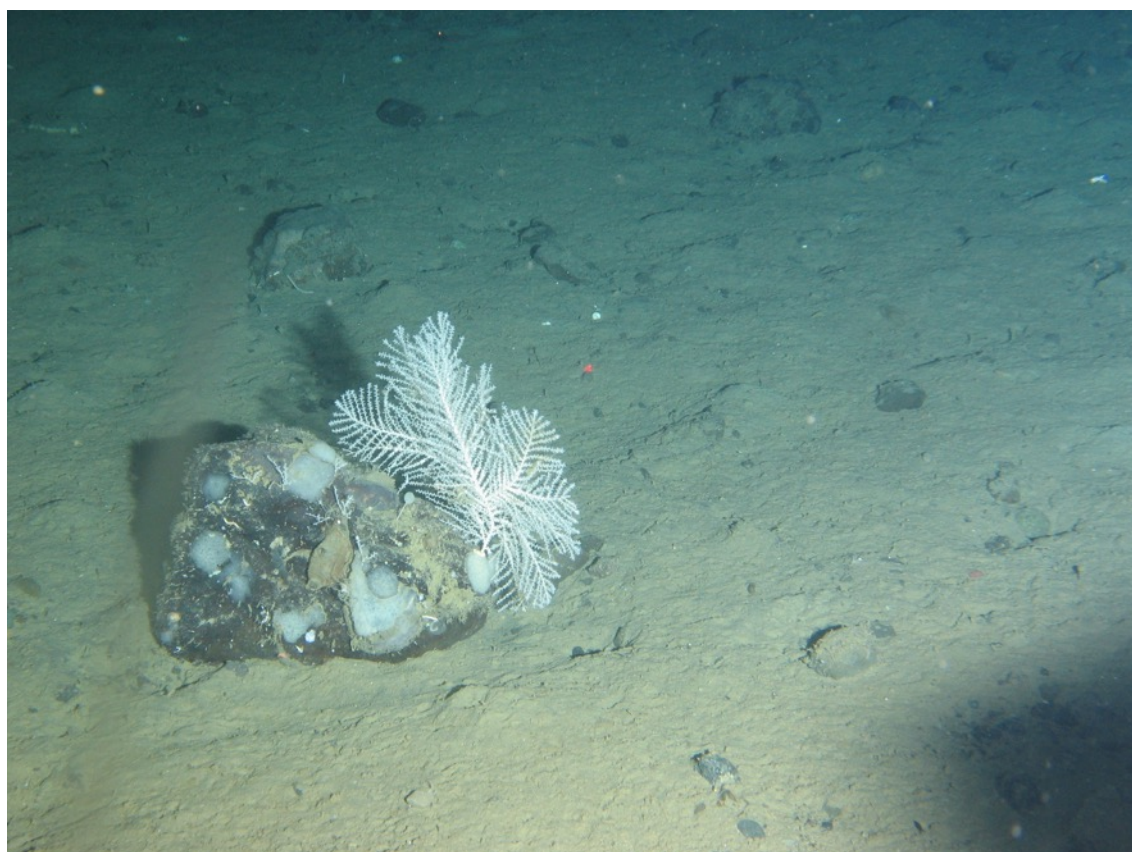


Рисунок 25 - Горгонария *Narella* sp., глубина 2641 м

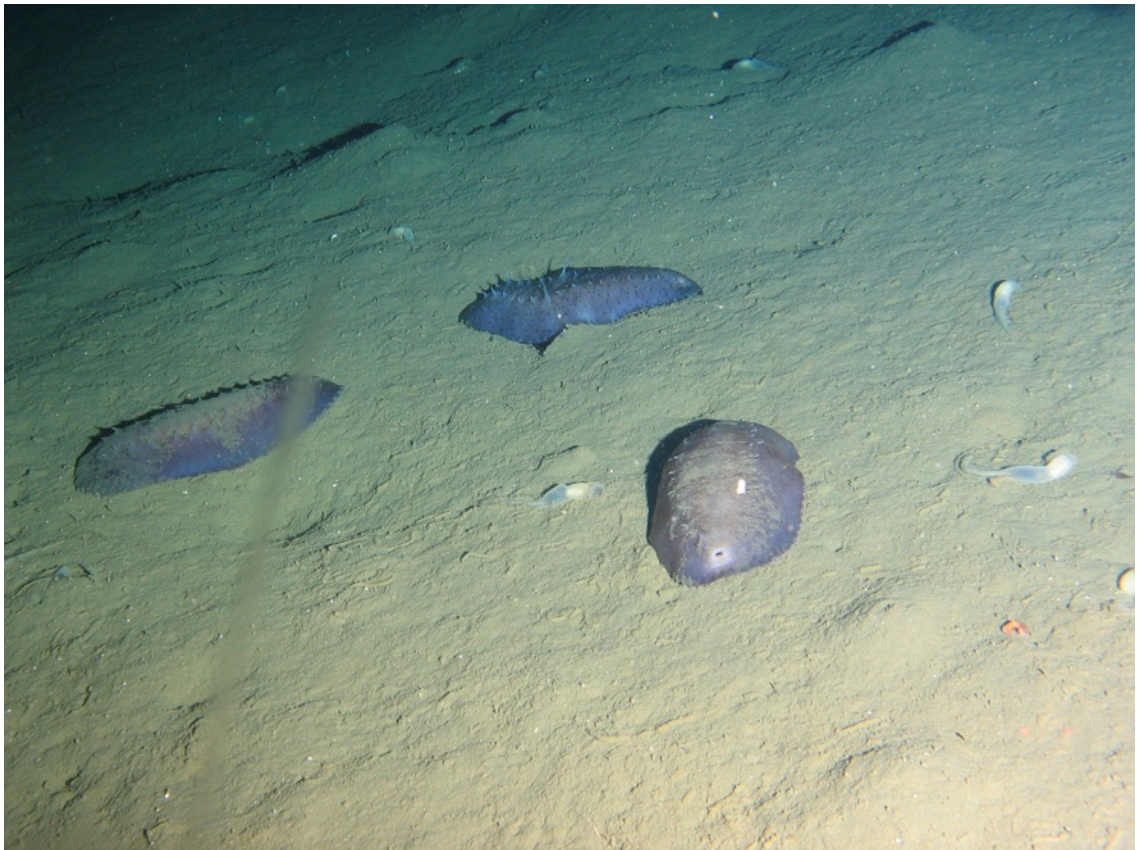


Рисунок 26 - Голотурии *Synallactidae* и *Enteropneusta*, глубина 1960 м

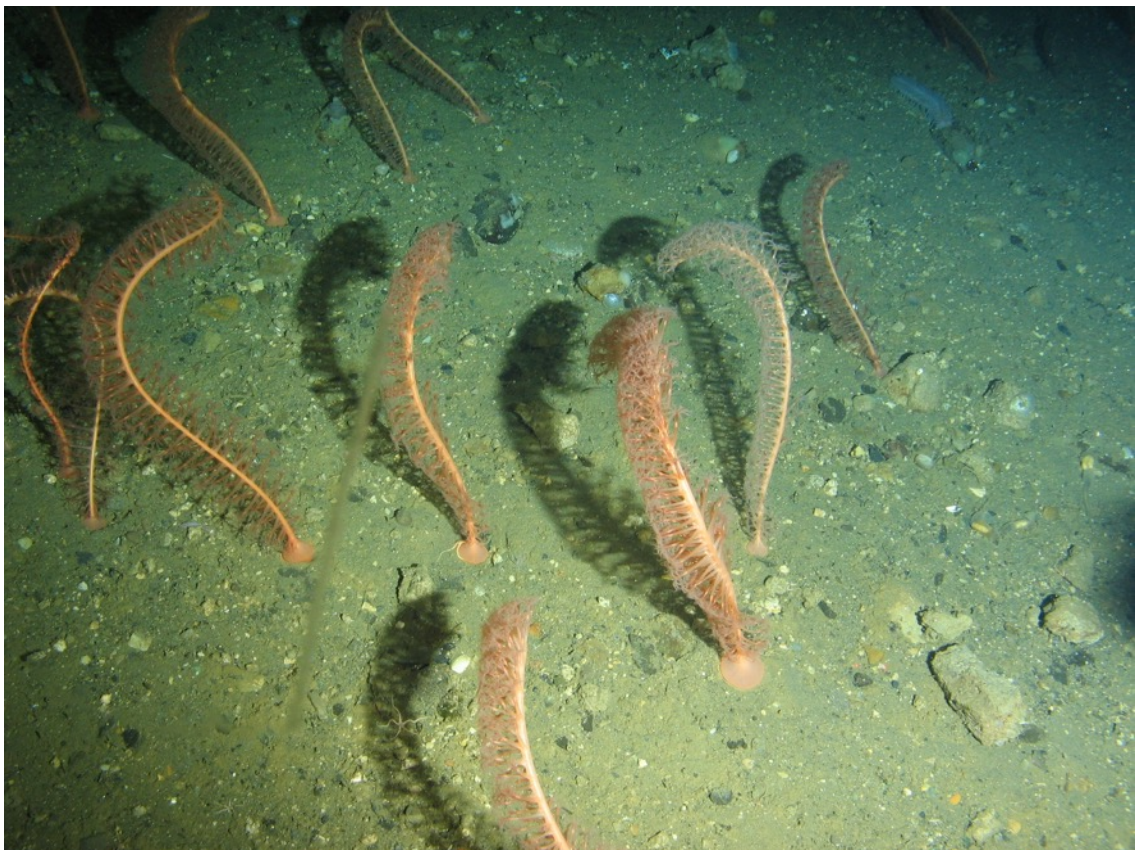


Рисунок 27 - Морские перья *Anthoptilum grandiflora*, глубина 1687 м

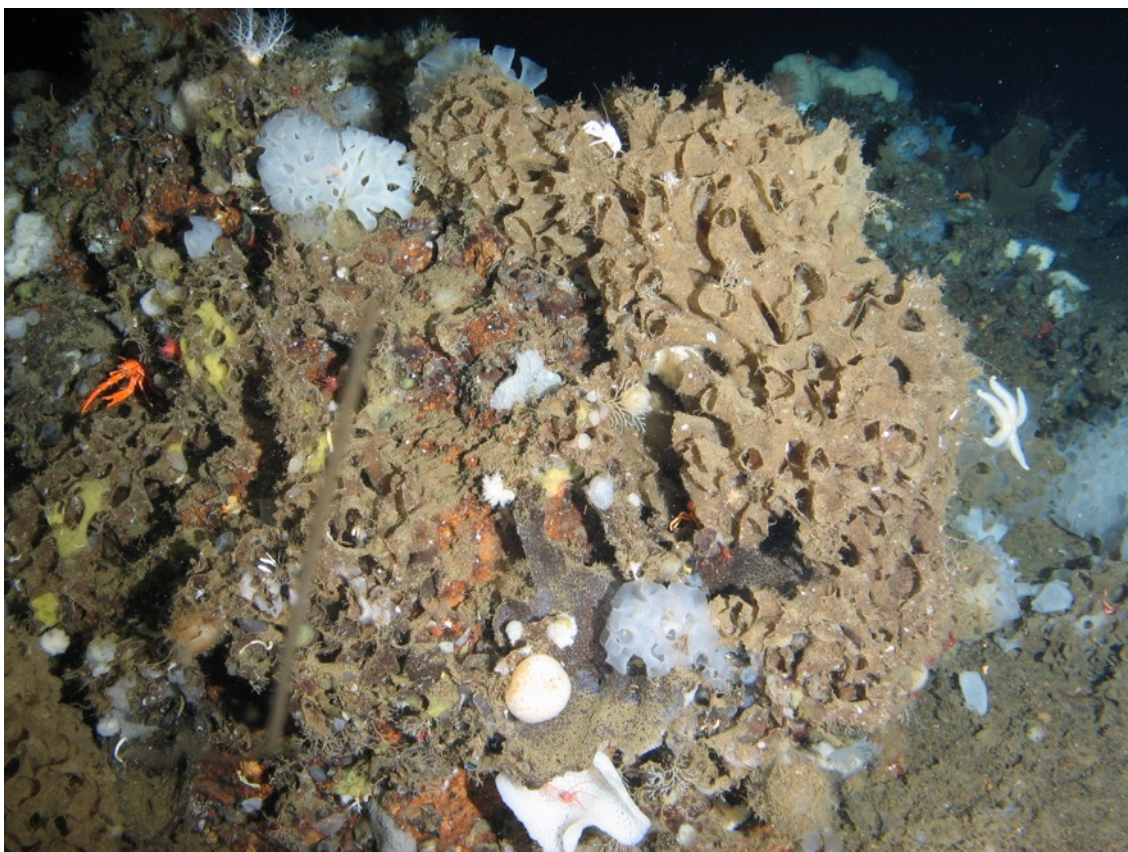


Рисунок 28 - Губочный риф, глубина 978 м

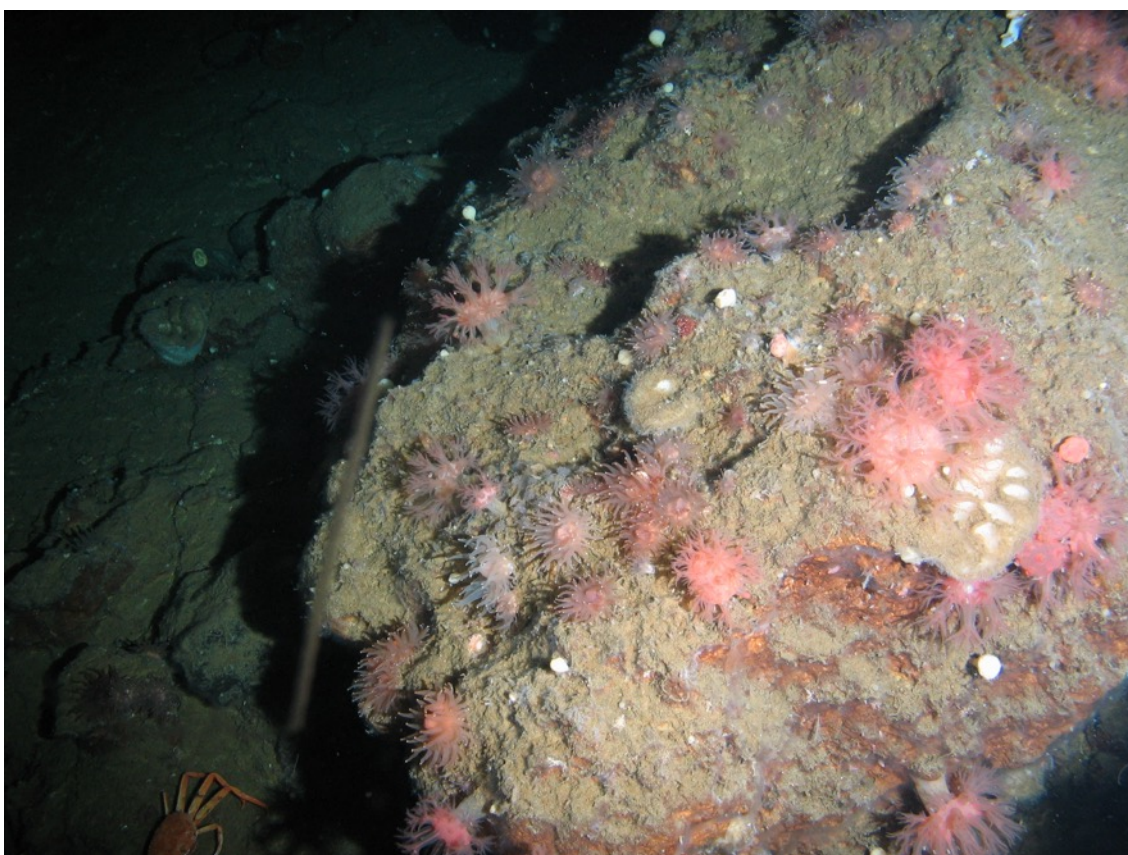


Рисунок 29 - Альционарии *Anthomastus ritteri*, кораллиморфарии *Corallimorphus* sp. и губки *Demospongia*, глубина 460 м

Восьмилучевые кораллы (Octocorallia) и гидрокораллы Stylasteridae. Основными структурообразующими группами беспозвоночных на подводных горах являются склерактинии, восьмилучевые кораллы (горгонации и альционации), губки, гидрокораллы-стиластериды и антипатарии, которые обеспечивают условия для обитания многих сотен видов беспозвоночных и рыб, включая промысловых, создавая трехмерные пространственные местообитания (Roberts et al., 2006).

Из всего огромного количества известных в настоящее время подводных гор (по разным оценкам их насчитывается 30-40 тыс.) в некоторой степени исследованы в фаунистическом отношении не многим более 400 и лишь около 100 – относительно детально (Crist et al., 2009). Теперь в этот короткий ряд попадает и вулкан Пийпа, исследования на котором с использованием ГОА и ТНПА проводились уже трижды (включая настоящую экспедицию).

Особенностью биоты вулкана Пийпа по сравнению с таковой, описанной на других подводных возвышенностях, следует считать относительную редкость (число колоний) горгониевых кораллов и практически полное отсутствие антипатарий, которые обычно доминируют в таких экосистемах, особенно на вершинах подводных гор. Здесь же на главные роли выходят зоантарии *Epizoanthus sp.* (на вершине вулкана), ниже их – мягкие кораллы *Anthomastus ritteri* и кораллиморфарии *Corallimorphus pillatus*, которые образуют сплошной пояс (зону), где мягкие кораллы либо доминируют, либо разделяют эту роль с кораллиморфариями. Ближе к мягким грунтам становятся весьма заметными поливидовое поселение стеклянных губок с доминированием *Farrea occa*. На мягких грунтах встречаются морские перья *Protoptilum spp.* (2 вида, довольно обычны), значительно реже – *Umbellula lindahli* и *Pennatulula phosphorea*, а *Anthoptilum grandiflorum* может образовывать поселения со значительной плотностью колоний – примерно 8-10 колоний на м². Из остальных октокораллов на мягких грунтах единично отмечен лишь *Anthomastus robustus* с одними из самых крупных среди колониальных восьмилучевых кораллов полипами (наблюдали 3 экз. в ходе погружения 5), длинная ножка которого позволяет ему закрепляться на мягких грунтах.

Всего в рейсе собрано и наблюдалось 27 видов восьмилучевых кораллов предположительно 17-ти родов, причем лишь 9 видов – *A. ritteri*, *U. lindahli*, *P. phosphorea*, *P. arborea*, *Lepidisis sp.*, *R. aff. verrilli*, 2 вида *Narella* и *Alcyonacea inserta sedis* отмечены ранее в рейсе 2016 г. на северном склоне вулкана Пийпа и в Командорской котловине, где было зафиксировано лишь 12-13 видов. Заметим при этом, что в этом рейсе общее время на дне пребывания ТНПА на дне составило 45 часов 18 минут (диапазон глубин – 350-3933), тогда как в рейсе 2016 г. – заметно больше, 67 часа 44 мин. (диапазон глубин от 349 до 4278 м). Столь заметная разница в числе видов объясняется, скорее всего, большей гетерогенностью местообитаний (биотопов) на южном склоне и их мозаичным распределением, что справедливо и в отношении сообществ. Это не редкое явление, отмеченное на подводных горах (Landsten et al., 2009).

Хорошо заметная вертикальная зональность на северном склоне вулкана Пийпа здесь не так выражена. В целом, плотность поселений колоний (и не только кораллов) здесь ощутимо меньше, чем на северном склоне, а видовое разнообразие более чем в два раза выше. Надо отметить, что указанное видовое разнообразие *Octocorallia* (около 31-32 видов на обоих исследованных склонах) является довольно высоким по сравнению с другими подводными возвышенностями и даже коралловыми садами у расположенных относительно недалеко Курильских островов, где на подводных склонах и шельфе всех островов (глубины 30-1000 м) зафиксировано около 50 видов этих животных (Малютин, 2015).

Обращают на себя внимание две станции, отличающиеся высоким видовым богатством октокораллов. В погружении 5 зафиксировано семь видов и все они приспособлены к жизни на мягких грунтах (за исключением инкрустирующих (корковых) колоний *Clavularia sp.*, которые поселяются на редких здесь набольших камнях. Больше всего октокораллов найдено в погружении 7, где отмечено 12 видов, причем и в количественном отношении они весьма заметны, являясь привычным и важным компонентом донных сообществ.

Отметим также, что согласно литературным данным (Check-list of species..., 2013) лишь 8 из найденных на вулкане Пийпа видов были ранее известны в морях России, тогда как 22-23

отмечены впервые. Объясняется это тем, что батиметральные глубины, а также подводные возвышенности по разным причинам ранее были в значительной степени обойдены вниманием специалистов-биологов. Дополнительные возможности добавились с использованием подводных аппаратов, прежде всего, телеуправляемых, особенно там, где практически невозможно применять традиционные орудия лова, а именно на подводных возвышенностях.

Необходимо отметить, что несколько видов являются новыми для науки и требуют детального исследования с использованием современных методов и, прежде всего, сканирующего микроскопа.

В ходе работ были отмечены 2 вида гидрокораллов из сем. Stylasteridae. В погружениях 5-7 и 10 – *Stylaster* sp. – обычно небольшие веерообразные колонии с тонкими, изящными ветвями. Особенно часто они отмечались в погружении 6. В погружении 8 – представитель другого рода из этого семейства – *Distichopora* sp. (?), ветвление у которого в одной плоскости, ветви широкие, тупые на концах. В погружениях 1-4 и 9 гидрокораллов обнаружено не было. Оба рода были определены только по форме колоний. Дактилопоры и гастропоры не рассматривались, т.к. материал не был собран. Заметим также, что на северном склоне гидрокораллов заметно меньше и здесь был отмечен лишь *Stylaster* sp.

Список восьмилучевых кораллов зарегистрированных в ходе экспедиции:

Отряд Alcyonacea

Subordinal Group Alcyoniinae

1. *Anthomastus ritteri*
2. *Anthomastus robustus*
3. *Anthomastus* sp.
4. Alcyonacea gen. sp.

Subordinal Group Stolonifera

5. *Clavularia* sp.

Suborder Calcaxonia

6. *Radicipes* aff. *verrilli*
7. ? *Chrisogorgia* sp.
8. ? *Distichogorgia* sp.
9. *Lepidisis* sp.
10. *Isidella* sp.
11. *Isididae* gen. sp.
12. *Arthrogorgia* aff. *ijimai*
13. *Arthrogorgia* sp. nov
14. *Narella* sp. 1
15. *Narella* sp. 2

Suborder Holaxonia

16. ? *Gorgoniidae* gen. sp.

Subordinal Group Scleraxonia

17. *Paragorgia arborea*
18. *Paragorgia* sp.1
19. *Paragorgia* sp.2
20. *Paragorgia* sp.3
21. Группа Scleraxonia. (Скорее всего, относится к семейству Paragorgiidae)
22. *Gorgonacea* gen. sp.

Order Pennatulacea

23. *Protoptilum* sp. 1
24. ? *Protoptilum* sp. 2
25. *Umbellula lindahli*
26. *Pennatula phosphorea*
27. *Anthoptilum grandiflorum*

Описание наблюдений. Глубина 3931-3334 м (южный разрез). В погружении 5 наблюдения были начаты на глубине 3931 м. Дно в этом районе имеет 100% осадочное покрытие, осадок очень рыхлый, легко взмучивающийся. Многочисленные холмики выбросов говорят об активной биотурбации. Наблюдаются редкие трубки фораминифер *Bathysiphon*. Почти в месте посадки были обнаружены мягкие кораллы *Anthomastus robustus* и энтеропнеуст, оставляющий спиральный след. Из крупных форм отмечаются голотурии *Scotoplanes*, горгонарии *Isididae*, звезды *Brisingidae*, на редких камнях ледового разноса – мелкие губки, гидроиды и мшанки. На глубине 3900 м встречена голотурия семейства *Synallactidae*. На глубине 3888 м отмечен язык крупной эхиуры. Помимо *Scotoplanes* и синаллактид, отмечены голотурии еще по меньшей мере трех видов. На глубине 3875 м отмечено одиночное морское перо *Umbellula* (*Pennatulacea*). С глубин около 3860 м становятся обычны следы гастропод на осадке. На глубине 3833 м отмечены выходы коренных пород. Из прикрепленных форм на них наиболее многочисленны гидрокораллы *Stylasteridae* и мелкие губки. Встречаются актинии *Actinernus cf. michaelsarsi* (*Actinernidae*) и *Ophiodiscus* sp. (*Actinostolidae*). На глубинах порядка 3700 м языки эхиур становятся обычным явлением. С глубины 3666 м начинаются крутые каменные уступы с террасами, засыпанными осадком. Почти отвесный склон с кораллами и губками прослеживался до глубины 3600 м. За ним следует пологий склон, на котором довольно много голотурий *Scotoplanes*. Отдельные выступы твердых пород населены разнообразной эпифауной, среди которых наиболее многочисленны гидрокораллы стиластериды, горгонарии сем. *Isididae* и губки. Встречаются желтые морские лилии сем. *Huocrinidae*. Особенно часто они встречались на глубине около 3550 м. Далее на маршруте каменные уступы сменяются осадочными террасами. На глубине 3515 м встречена губка *Hyalonema seaboldi*, с осевыми спикулами, обросшими зоантариями *Palythoa fatua*. С глубины 3440 м такие губки и их мертвые стебли (осевые спикулы) отмечаются часто. С глубин около 3500 м регулярно встречаются крупные пантоподы *Colossendeis*. На глубине 3365 м отмечен крупный одиночный гидроид. На глубине 3355 м встречаемость голотурий несколько уменьшается. Из обычных форм присутствуют пантоподы, креветки, звезды-бризингиды и *Bathysiphon*. В ходе погружения было выполнено 7 видеоразрезов на глубинах 3924-3887 м, 3867-3842 м, 3833-3783 м, 3782-3765 м, 3497-3488 м, 3450-3443 м и 3355-3336 м.

Глубина 3906-3391 м. Подножие западного склона массива Вулканологов было исследовано в ходе погружения 6. На глубине 3906 м на дне наблюдаются выходы коренных пород, обломочные осыпи и материал ледового разноса. Основные формы – прикрепленные к массивным выходам гидрокораллы *Stylasteridae* и мелкие губки. Отмечены морские звезды нескольких видов, пелагические полихеты, мелкие белые офиуры на камнях. На осадочных фациях встречаются языки эхиур, довольно обычны креветки и крупные актинии с фиолетовыми щупальцами *Actinernus cf. michaelsarsi*. В целом песчаные фации выглядят безжизненными, население сосредоточено на камнях, особенно на массивных выступах. Отмечены одиночные голотурии *Synallactidae*, крупная актиния *Relicanthus daphneae* (*Relicanthidae*) и актиния *Exocoelactis* sp. (*Exocoelactidae*), также *Enteropneusta*, не образующие спиралей. Последние встречаются как на осадке, так и на твердом субстрате. В рельефе периодически встречаются почти вертикальные стенки, на которых губки растут «перевернутыми», устьем вниз. Начиная с глубин 3880 м *Enteropneusta* представляют обычную, регулярно отмечаемую форму. По встречаемости явно доминируют *Stylasteridae*, предпочитающие селиться на боковой поверхности каменных выступов или на поверхностях с отрицательным уклоном. Помимо мелких губок, регулярно отмечаются крупные губки *Rossellidae*, изредка – *Aphrocallistes* sp., и хищные губки *Cladorhizidae* (*Demospondia*, *Poecilosclerida*), из морских звезд обычны *Solaster* sp., иногда наблюдаются скопления мелких горгонаций *Isididae*. На глубине 3798 м наблюдался осьминог, возможно, *Moosoctopus profundorum*. С глубины 3800 м губки представляют доминирующую форму. Начиная с глубин 3750 м основу твердого субстрата составляет мертвый губочник – цементированные остатки старых губок. Довольно регулярно продолжают встречаться *Enteropneusta*, не образующие, однако больших скоплений. На глубине 3653 м отмечен одиночный гидроид *Candellabrum* sp. С глубины 3650 м маршрут вышел на пологое плато, засыпанное осадком, с отдельными камнями. Осадочные фации внешне безжизненны, на них встречаются

креветки, редкие актинии (*Actinernus michaelsarsi*, *Phelliactis* sp., некрупная Normathiidae gen. sp., а также небольшие белые актинии, бесстебельчатые лилии, звезды-бризингиды. Отмечены также голотурии *Scotoplanes*. На камнях довольно много полихет Sabellidae. С глубины 3640 м *Stylaster* на камнях встречается редко, полностью уступая доминирование губкам разных размеров. С глубины 3640 м вновь идет склон, покрытый губочником. Наиболее многочисленная форма здесь – горгонарии Isididae. На глубине 3540 м увеличилось количество губок, напоминающих *Farrea*. На глубине 3470 м склон выхолаживается. Количество жизни явно снижается, большинство животных приурочено к камням ледового разноса. Наиболее многочисленны горгонарии Isididae. На осадке встречаются голотурии *Scotoplanes*. На глубине 3394 м наблюдался язык эхиуры зеленого цвета и иной формы, чем отмечалось ранее. В ходе погружения было выполнено 5 видеоразрезов на глубинах 3907-3863 м, 3755-3702 м, 3646-3625 м, 3580-3570 м, 3530-3450 м.

Глубина 2824-2591м (погружение 10). В месте посадки ТПА на дне наблюдается обилие обломков вулканических пород, куски пемзы, дациты и материал ледового разноса. Преобладают прикрепленные формы твердого субстрата. Многочисленны горгонарии изидиды, веерные формы, изредка – гидрокораллы Stylasteridae, а также белые прозрачные актинии и колониальные асцидии сем. Polyclinidae. На камнях многочисленны корковые губки и трубки Serpulidae. Встречены горгонарии сем. Primnoidae. На глубине 2784 м отмечено значительное количество брахиопод и бентопелагических изопод. Доминирующие формы – белые ветвистые горгонарии *Narella* sp. и гидрокоралл Stylasteridae (2778 м). На камнях отмечаются белые офиуры и мелкие шарообразные губки. На глубине 2777 м отмечена голотурия Synallactidae. Обычной формой являются изидиды, не достигающие больших размеров. С глубины 2773 до 2756 м наблюдалась осадочная терраса, заполненная плотным глинистым материалом. С глубины 2750 м начинается каменистый склон, сложенный крупнообломочными породами. Доминирующие формы - брахиоподы (до десятка на небольшом камне), мелкие шаровидные губки, белые офиуры и Isididae. На глубине 2712 м отмечена большая желтая лилия. С глубины 2712 м идет крутой крупноглыбовый склон. Руководящие формы – брахиоподы, губки, серпулиды, изидиды. Встречаются полупрозрачные асцидии *Ciona pomponiae*. На вертикальном участке склона обнаружен необычный представитель книдарий *Dactylanthys* sp. (отр. Ptychodactiaria), ранее известный только из Антарктики. На глубине 2686 м брахиоподы занимают абсолютно доминирующее по численности положение. Они распределены неравномерно, в скоплениях. С глубины 2652 м маршрут пересекал осадочное плато, засыпанное плотными крупнозернистыми отложениями. На осадке – обилие следов животных при отсутствии нор. Здесь многочисленны крабы и раки-отшельники, часто несущие на себе актиний (*Allantactis parasitica*, Normathiidae). В целом, осадок выглядит довольно безжизненно. Встречаются мелкие гастроподы, на отдельных камнях – брахиоподы и веерные горгонарии. К числу обычных форм относятся бесстебельчатые лилии, по облику – несколько видов. На глубине 2646-2645 м отмечено появление камней и многочисленных одинаково ориентированных веерных горгонарий (сад). Маршрут аппарата прошел через гребень и спустился в долину, заполненную осадком. Глубина увеличилась до 2812 м. Осадок биотурбирован, наблюдаются трубки *Bathysiphon*, обычны гастроподы. По численности преобладают мелкие придонные изоподы. Присутствует множество офиур, но они плохо различимы, т.к. целиком погружены в осадок. Встречаются крупные бризингиды. Обычны языки эхиурид и их следы на осадке. С глубины 2820 м увеличилась встречаемость креветок и крупных голотурий. По-прежнему многочисленны зарытые офиуры и гастроподы. На глубине 2736 м наблюдается типично креветочно-голотурное сообщество как на северном склоне массива. На глубине 2695 м отмечен энтеропнеуст. Большие скопления голотурий. На глубине 2605 м – первая бентопелагическая медуза Trachymedusae, Rhopalonematidae. На этой же глубине встречена крупная актиния *Phelliactis* sp. (Normathiidae). В ходе погружения сделаны видеоразрезы на глубинах 2786-2673 м и 2818-2740 м.

Глубина 1992-1258 (погружение 9). На старте движения ТПА отмечен сплошной осадочный покров со следами биотурбации. Доминирующие группы: голотурии Synallactidae, голотурии Laetmogonidae, энтеропнеусты, офиуры, креветки. На камнях встречаются склерактинии *Caryophyllia* sp., актинии (Normathiidae gen. sp.), гидрокораллы Stylasteridae, асцидии

и многочисленные губки. С глубины 1911 м встречаемость синаллактид становится меньше. Enteropneusta продолжают доминировать, достигая на некоторых участках высокой плотности. На глубине 1877 м начинают встречаться морские перья *Anthoptilum grandiflora*. На глубинах 1799-1780 м встречено много гальки ледового разноса. Эпифауна небогатая. Часто встречаются раки-отшельники. С глубины 1765 м наблюдаются крупные выступы карбонатных пород. При этом перья встречаются регулярно, иногда в больших скоплениях. В осадке – многочисленные мелкие актинии сем. Edwardsiidae, есть цериантарии. Enteropneusta образуют значительные скопления, выше 1730 м их встречаемость уменьшается, но они сохраняют заметную роль в сообществе. В небольших количествах они наблюдались на глубинах до 1612 м, на 1530 м уже почти не заметны. Это примерно совпадает с верхней границей их доминирования на северном склоне. С глубин 1671 м на камнях появляется довольно много эпифауны. При этом основной группой остаются морские перья, создающие местами подобие леса. На глубине 1650 м они полностью определяют внешний вид сообщества. На мелких камнях встречаются пленчатые губки, офиуры, раки-отшельники. На глубине 1515 м отмечено множество брахиопод. На камне встречена колония белых альционарий. На глубине 1511 м возрастает количество офиур, единично встречаются Enteropneusta. С глубины 1480 м увеличивается количество мертвых губок с населяющей их фауной. С глубины 1450 м начинается крутой, местами отвесный, подъем. На стенке появляются губки *Farrea*, кораллы *Paragorgia*, губки Rosselidae, брахиоподы. Крутой подъем продолжается до 1258 м. В погружении сделано два видеоразреза на глубинах 1957 – 1923 и 1854 – 1383 м.

Глубина 1010-764 м (погружение 7). На глубинах 1010-985 м отмечено преобладание твердого субстрата в виде губочника и камней ледового разноса. Рыхлый субстрат представлен крупнозернистым песком и гравием, состоящим из обломков пемзы. В грунте изредка встречается актиния *Cribrinopsis* sp. (Actiniidae) с погруженной в осадок нижней частью тела. В осадке очень много мелких офиур. Наиболее часто встречающаяся форма макрофауны – голотурии *Psolus* sp. На остатках старых губок развиваются консорции обрастателей – молодых губок, гидрокораллов *Stylasteridae*, горгонарий *Swiftia pacifica*, горгонарии Isididae, альционарий *Clavularia* sp. и др. На стеблях горгонарий встречаются мелкие актинии *Amphianthus* sp. (Normathiidae). На мертвых и живых губках много креветок, офиур, встречаются крабы Munidae. На камнях - мелкие офиуры, много Brachiopoda, губки, есть мертвые *Farrea* с обильной эпифауной, актинии Actinostolidae gen. sp. и Actinostola spp., одиночные кораллы *Caryophyllina* sp., голожаберные моллюски *Tritonia* sp., крупные одиночные асцидии сем Styelidae, а также мелкие колониальные асцидии отр. Aplousobranchia. В грунте замечена актиния *Cribrinopsis* sp. (Actiniidae). Часто встречаются небольшие шаровидные Demospongiae. Встречаются также губки *Aphrocallistes*. На глубине 966 м обнаружили первого темного *Corallimorphus* sp. На глубине 950 м отмечены кораллы *Paragorgia* sp. С глубины 883 м появляются единичные *Anthomastus*. С глубины 774 м *Farrea* становятся полностью доминирующей формой. Сделано 2 видеоразреза на глубинах 960 – 925 и 833 – 764 м.

Глубина 755-458 м (погружение 8). Характерный элемент ландшафта – губочные рифы, основу которых составляют мертвые и живые губки *Farrea*. Эти рифы являются местообитанием множества животных, включая как седентарные (Bryozoa, Hydroidea, Brachiopoda, Serpulidae) так и подвижные формы (Decapoda: Macrura Natantia, Munidae). Старые губки охотно используются для поселения и молодыми колониями тех же или иных видов. В понижениях рельефа скапливаются обломки мертвых губок, образуя своеобразные «маты», так же охотно колонизируемые фауной. Особенно много на этих матах офиур. Из-за того, что большинство животных приурочено к мертвым губкам и отдельным камням и выступам породы, данная зона представляет своеобразный «клумбовый ландшафт», в котором густые скопления организмов чередуются с относительно безжизненными участками рыхлого осадка. На этом осадке многочисленны лишь креветки, хорошо заметные по светящимся глазам. Встречаются звезды Brisingidae, бесстебельчатые лилии, которые иногда сидят на живых *Farrea*, чаще – на мертвых. На губочных матах обычны офиуры. На твердых породах встречаются голожаберники и особенно обычны голотурии Psolidae с характерными белыми ветвящимися жабрами. Единично встречаются альционарии *Anthomastus ritteri*. На глубине 645 м отмечены первые белые Corallimorpharia, Corallimorphidae gen. sp. Одновременно наблюдается резкое снижение численности губок. Бактериальные маты отмечаются

с глубины 591 м. На глубинах выше 600 м и до примерно до 480 м на фоне сохранения прежней структуры сообщества наблюдалось общее снижение количества жизни. На глубине 470 м антомастусы составляют уже резко преобладающую форму макробентоса. На камнях часто встречаются хитоны (по меньшей мере, двух видов). Обычные обитатели этой зоны – красные морские окуни (*Sebastes* sp.), которые ведут здесь малоподвижный образ жизни. На глубине 465 м среди антомастусов начинают регулярно встречаться и вскоре достигают высокой численности прозрачно-белые *Corallimorpharia* и *Corallimorphus* sp. На выступах карбонатных пород многочисленны мелкие губки *Demospongia*. В привершинной части эпизодически встречались небольшие колонии *Zoantharia*.

4.2.1.2 Донная фауна в районе гидротермальных проявлений вулкана Пийпа

Первые данные о донных сообществах района гидротермальных проявлений вулкана Пийпа и условиях их развития были получены с помощью подводного аппарата «Мир» во время 22 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 1990 году (Сагалевиц и др., 1992) через шесть лет после открытия вулкана (Селиверстов и др., 1986). Было отмечено, что помимо нескольких активных ангидритовых и карбонатных гидротермальных построек на обеих вершинах вулкана, Северной и Южной, существуют большие площади "тихий" высачиваний. На Северной вершине эти высачивания расположены под каменистыми осыпями и валунами дацитов, а на Южной, в основном, приурочены к трещинам в карбонатах.

В результате первых исследований были отмечены две фаунистические особенности, связанные с гидротермальной активностью вулкана. Первая - наличие интенсивно развитых бактериальных матов, маркирующих места высачиваний. Особенно обильно маты были развиты на Северной вершине, где площадь покрытия ими достигала 100 % на участках до 100 м³ (Сагалевиц и др., 1992). Вторая особенность заключалась в обнаружении популяции тиотрофных двустворчатых моллюсков рода *Calyptogena* (*Vesicomysidae*, *Pliocardiinae*), облигатных для восстановительных условий. Калиптогены были обнаружены исключительно на Южной вершине. Впоследствии этот вид на основании морфологических признаков был определен как *Calyptogena pacifica* Dall, 1891 (Krylova, Sahling, 2006).

Изучение донной фауны вулкана было продолжено в 75 рейсе НИС "Академик М.А. Лаврентьев" (2016 г.), как на Северной, так и на Южной вершинах. На Северной вершине большинство обнаруженных бактериальных матов было приурочено к седловине между западным и восточным её куполами в пределах изобаты 400 м. Однако при проведении вертикального разреза по северному склону вулкана было отмечено, что отдельные маты попадались и на 600-метровых глубинах, а самое глубоководное бактериальное пятно располагалось в точке с координатами 55.445°N 167.263°E на глубине 1835 м. В результате исследований, проведенных в 75 рейсе, было подтверждено наличие калиптоген на Южной вершине, а также была обнаружена единичная створка на Северной вершине. Кроме этого, были обнаружены и собраны организмы, являющиеся специфическими, а, возможно, и облигатными обитателями гидротермальных биотопов, впервые отмеченные для фауны вулкана. По визуальным наблюдениям, два вида организмов были однозначно ассоциированы с бактериальными матами в ближайшем окружении источника, это мелкие гастроподы сем. *Provannidae* и амфиподы сем. *Lysianassidae*. Плотность прованнид на камнях в местах активных высачиваний, прилегающих к матам, на Северной вершине достигала 20 экз/дм², и падала при удалении от источников. У нескольких экземпляров на раковинах были отмечены нитчатые хемоавтотрофные бактерии. Амфиподы были встречены на обеих вершинах исключительно в бактериальных матах, где их плотность достигала 50 экз/дм².

В 82 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» район гидротермальных проявлений вулкана Пийпа исследовался в ходе 4 погружений. На Северной и на Южной вершинах было проведено по два погружения (табл. 2).

В общей сложности в зонах непосредственного воздействия гидротерм было прицельно отобрано 23 образца. Некоторые образцы были собраны в фоновом ландшафте. Особый интерес представляют комплексные пробы, отобранные в разных экологических зонах гидротермального поля и пробы мелких животных, отобранные при помощи всасывающего устройства. В данном рейсе это устройство использовалось впервые. Из-за отсутствия такого устройства в предыдущих

экспедициях, многие важные группы гидротермальной фауны до сих пор оставались практически не исследованными.

Бактериальные маты на южном склоне вулкана появляются на глубине 572 м, начиная с глубины 555 м, маты получают широкое распространение (погружение 8). По предварительным результатам, список облигатных к восстановительным условиям таксонов пополнился представителем класса Pogonophora (предположительно, подкласса Monilifera, *Archeolinium* sp.) и гастроподами семейства Peltospiridae (?) (табл. 7). Обе эти группы ранее не были отмечены в районе вулкана Пийпа. Если последующие исследования подтвердят наши находки, это будет один из важных результатов фаунистических исследований на вулкане. Кроме того, были собраны различные образцы бактериального мата. Один из них включал значительную часть фитодетрита, в котором были обнаружены живые Protozoa, раковинные амебы и, возможно, фораминиферы. Большое число этих организмов в непосредственной близости с тиотрофными бактериями предполагает их возможную ассоциированность с гидротермальными условиями. Образцы бактериального мата, содержащие простозоа, были зафиксированы для последующего изучения с помощью ТЭМ, молекулярно-генетических исследований и выявления трофических особенностей. Новые данные, полученные в нашем рейсе, подтвердили предположение о том, что *Corallimorphus* sp., обитающий на Южной вершине, может быть связан с гидротермальными проявлениями. Кроме того, в результате рейса было увеличено число организмов, известных из «фона» и подтверждено нахождение специализированных животных, сделанные ранее.

Таблица 7. Специализированная фауна в районе гидротермальных проявлений вулкана Пийпа (+++ - вид обычен, ++ - встречается изредка, + - встречается единично) (по данным рейса LV82).

	Северная вершина		Южная вершина	
	Фото	Собрано	Фото	Собрано
Pogonophora, Monilifera, cf. <i>Archeolinium</i>	++	-	++	-
Bivalvia, Vesicomidae (Pliocardiinae), <i>Calypdogena pacifica</i>	-	-	+++	+++
Gastropoda, Peltospiridae? gen.sp.	+++	+++	+++	+++
Gastropoda, Provannidae, gen.sp.	+++	+++	+++	+++
Amphipoda, Lysianassidae, gen.sp.	+++	+++	+++	+++
Corallimorpharia, <i>Corallimorphus</i> sp. (темный)	+	-	+++	+++

Следует отметить, что состояние изученности фауны вулкана Пийпа далеко от удовлетворительного. На многих фотографиях, сделанных во время погружений на вулкане, имеются изображения животных, которые отсутствуют в коллекции отобранных образцов, а некоторые из организмов пока невозможно однозначно определить даже до высокого таксономического ранга. Кроме того, после каждого рейса список встречающихся на вулкане таксонов, включая специализированные к обитанию в восстановительных сообществах, увеличивается. Для более глубокого понимания механизмов функционирования уникального сообщества вулкана Пийпа, несомненно, требуются дополнительные усилия по изучению фауны этого района.

4.2.2 Полигон 2

4.2.2.1 Вертикальное распределение донной фауны на Чукотском склоне

Краткие результаты. Вертикальное распределение макрофауны на чукотском склоне было исследовано на двух разрезах в диапазоне от 906 до 356 м. На глубинах от 906 до примерно 830 м наиболее массовой группой являются офиуры, ведущие зарывающийся образ жизни и заметные по белым лучам, торчащим из осадка. Осадок в этой зоне испещрен отверстиями, представляющими собой следы жизнедеятельности офиур. Из макрофауны в этой зоне отмечены красные креветки (с глубины 870 м их численность увеличивается), звезды *Muxoderma* sp., актинии *Liponema brevicorne*, раки-отшельники, крабы *Chionoecetes* (часто в ассоциации с *Liponema*) (рис. 30). Довольно часто встречаются рыбы Macrouridae и мелкие придонные угревидные рыбы (Licodae?). На осадке изредка видны венчики полихет.

На глубине около 850 м количество отверстий в осадке несколько уменьшается. На глубине 834 м на поверхности осадка появляются крупные (10 см в размахе лучей) оранжевые офиуры, *Ophiopthalmus normani*, которые очень быстро (уже на глубине 831-830 м) становятся абсолютно доминирующей формой сообщества (рис. 31). На некоторых участках офиуры сидят с поднятыми лучами. С глубины около 800 м возрастает количество креветок, которые становятся руководящей формой наряду с офиурами. Регулярно встречаются крупные *Lyponema brevicorne*, около которых скапливаются креветки или сидят крабы. Отмеченная ассоциация ракообразных со свободноживущими актиниями – распространенное явление в исследованном районе. Помимо офиур и креветок, относительно многочисленны морские звезды, крабы, актинии, гастроподы *Vaccinidae* (проведены прямые подсчеты встречаемости). Начиная примерно с 700 м на твердых субстратах (галька, раковины) изредка встречаются актинии *Hormathiidae* gen. sp. На глубинах 616-600 м (разрез 4) офиуры зарываются в осадок, оставляя на поверхности лучи. При этом их численность остается на высоком уровне. На разрезе 3 это же явление наблюдалось на 100 м выше (511-495 м). Возможно, такое изменение образа жизни офиур связано с локальными особенностями гидрологии и (или) структуры осадка.

На глубинах 484 м разреза 4 и начиная уже с глубины 525 м 3-го разреза численность офиур падает. На этих же глубинах появляются отдельные морские перья *Protoptilum* sp.. По мере уменьшения глубины их встречаемость возрастает, параллельно снижается численность крупных офиур. Довольно обычным компонентом становятся белые панцири ежей. Уже на глубине 496 м крупные офиуры не являются подавляющей по численности группой, а на глубине 484 м их практически нет, в то время как морские перья находятся постоянно в поле зрения. На глубине около 480 м ландшафт представляет собой «редколесье» морских перьев. Начиная с глубины 465 м морские перья с сидящими на них офиурами *Asteronix* sp. образуют довольно густой «лес», полностью определяя облик ландшафта. По визуальным оценкам, заселенность перьев офиурами составляет 70-80%. Наклон всех перьев постоянен и составляет около 280-290°, что примерно соответствует направлению преобладающего придонного течения в этом районе (270°). В этой зоне крупные офиуры на осадке практически отсутствуют. Креветки продолжают играть заметную роль, их численность остается на прежнем уровне, в то время как численность актиний *Hormathiidae* gen. sp. («*Monactis*») возрастает по сравнению с нижележащим горизонтом. Вероятно, это объясняется более частой встречаемостью твердого субстрата. Весьма примечательной формой являются не встреченные глубже белые офиуры с маленьким диском и очень длинными руками. Они встречаются единично, но регулярно. На глубине 440 м отмечены первые небольшие *Gorgonocephalus* sp., которые постепенно становятся обычны в сообществе морских перьев. В перьевом «лесу» любят отдыхать крупные рыбы *Mastougiidae*, ведущие здесь малоподвижный образ жизни.

На глубине 451 м разреза 4 и 455 м разреза 4 отмечено появление живых морских ежей *Brisaster latifrons*. Вслед за этим их численность резко возрастает, и на глубине 435 м ежи становятся доминирующей по численности (и очевидно, по биомассе) группой (рис. 32). Они встречаются практически непрерывно, и на некоторых участках их плотность достигает и превышает 10 экз. на м². Помимо ежей, морских перьев и офиур *Asteronix* здесь представлены креветки, офиуры с длинными лучами, небольшие звезды, мелкие актинии *Hormathiidae* gen. sp. («*Monactis*»), однако в целом сообщество имеет довольно олигомиксный облик.

На глубине 420 м наблюдается увеличение численности актиний *Hormathiidae* gen. Sp. («*Monactis*»). С глубины 413 м численность морских перьев снижается, а на глубине 409 м они становятся единичны, доминирующими группами остаются ежи и «*Monactis*», примерно в равных количествах. На глубине 407 метров численность ежей резко снижается, а на глубине 405 м они практически исчезают. Доминирующей по численности группой остаются актинии «*Monactis*» (рис. 33). В качестве обычных форм присутствуют креветки, отшельники, гастроподы букциниды. Это сообщество характеризуется абсолютным доминированием «*Monactis*». Встречаются актинии других видов, в частности, *Liponema* и крупные актиностолидные формы. Из подвижных форм сохраняют обилие креветки (явно тяготеющие к актиниям), гастроподы и отшельники. Местами наблюдались скопления мелких офиур.



Рисунок 30 - Глубина 840 м, слева лучи офиуры, торчащие из осадка, справа – актиния *Liponeta* и ассоциированные с ней креветки



Рисунок 31 - Крупные офиуры *Ophiophthalmus normani*, доминирующие на значительной части склона, глубина 824 м



Рисунок 32 Морские перья *Protophilum* sp. с сидящими на них офиурами *Asteronyx lovenyi* и морские ежи *Bryaster latifrons*, глубина 435 м



Рисунок 33 - Актинии “*Monactis*” на глубине 398м

Описание наблюдений. В ходе рейса погружения ТНПА на Полигоне 2 были осуществлены на трех вертикальных разрезах (рис. 3). Вертикальное распределение фауны и проявления высачиваний на разрезах исследовались в ходе 4 погружений (табл. 2). Наблюдения на разрезе были начаты с глубины 871 м в погружении 11. Склон в данном месте пологий, осадочное покрытие 100%. Осадок несет на себе следы весьма активной биотурбации. Из макрофауны по численности резко доминируют крупные офиуры. Довольно много мелких рыб. Обычны креветки, звезды не менее 3 видов (*Muxoderma*, Pterasteridae и др.). Обычны крупные гастроподы. На глубинах 779 и 771 м отмечена створка *Acharax johnsoni*, которые в дальнейшем встречаются редко, но регулярно. Часто встречаются панцири ежей и их обломки. Течение довольно сильное с 30-45°. С гл. 719 м попадают крупные фиолетовые актинии. Среди креветок иногда встречаются крупные (10 см) крабониды. На глубине 707 м отмечено изменение (шероховатость) осадка и некоторое скопление фитодетрита, на глубине 698 м – легкая холмистость, видимо, результат локальных течений. Обычны гастроподы Buccinidae, регулярно встречаются их кладки (процесс ее построения наблюдался на глубине 696 м). Обычны крупные звезды *Muxoderma*. С 683 м участились крупные актинии, в основном, Actinostolidae. На глубине 663 м встречена актиния *Liponema brevicorne*. Обычны отшельники (Paguridae). С глубины 648 м встречаются звезды *Crossaster* sp... Офиур местами немного меньше. С глубины 638 м появилось много мелких актиний сем. Hormothiidae gen. sp ('Monactis'). В диапазоне 602-568 м отмечено 5 обломков двустворок (Hiatellidae). В течение этого погружения регулярно встречались зарывающиеся в грунт актинии (Athenaria, по старой системе; "Armaetinia", семейство не определено) (собрано 2 экз.).

С глубины 551 м наблюдения продолжены в погружении 12. Отмечаются отдельные створки *Acharax johnsoni* и следы ледового разноса. С глубины 534 м офиуры стали чуть разрозненнее. Мелкие актинии с фиолетовыми щупальцами и белым телом (Athenaria, по старой системе; "Armaetinia") по-прежнему обычны. Белые длинноручевые звезды *Muxoderma* sp. встречаются часто. На глубине 525 м отмечено первое морское перо. Офиур заметно меньше, 'Monactis' почти постоянно в поле зрения. Фиолетовые голотурии и звезды по-прежнему встречаются. Гастроподы обычны, звезды Pterasteridae встречаются регулярно. На глубине 523 м встречено второе перо *Protoptilum* sp. с офиурой. Отшельники обычны, разных размеров. Встречаются актинии *Liponema brevicorne*. С глубины 521 м перья с сидящими на них офиурами становятся регулярны. На глубине 511 м офиур становится меньше, в определенной мере это связано с тем, что они начинают здесь вести зарывающийся образ жизни, выставляя на поверхность только лучи. На глубине 508 м торчащие лучи офиур придают своеобразие ландшафту. Иногда торчит лишь 1 – 2 луча. С этих глубин обычны звезды *Solaster* sp. На глубине 504 м открытых офиур мало, но лучи торчат. На глубине 502 м наблюдался "луг", поросший щупальцами офиур. На глубине 493 м офиур на поверхности почти нет, все закопаны. В этом районе просто россыпь солемиид (встречено штук 5). Перья (возможно двух видов) с офиурами регулярны. На глубине 487 м офиур на поверхности нет совсем, лучей мало. Фиолетовые голотурии не встречаются. На глубине 474 м нет ни офиур, ни лучей. Т.о., граница этого сообщества проходит примерно на 470-480 м. Далее доминируют букциниды, большие белые длинноручевые звезды *Muxoderma*, 'Monactis', есть звезды птерастериды. На глубине 463 м встречено множество панцирей ежей – почти по 1 на м². С глубины 461 м панцири ежей составляют почти постоянный компонент ландшафта, они постоянно в поле зрения. Маленькие фиолетовые актинии ('Monactis') встречаются по-прежнему часто. С глубины 456 м резко увеличивается количество перьев с сидящими на них офиурами. Здесь они образуют настоящий лес. Осадок в «лесу» не биотурбирован, офиур на осадке нет, есть креветки, панцири ежей и живые ежи, редкие крупные звезды, есть птерастериды, часты актинии 'Monactis' и совсем мелкие зарывающиеся актинии сем. Edwardsiidae, мелкие белые *Gorgonocephalus*, обычны крупные гастроподы Buccinidae, есть актинии *Liponema*. Плотность перьев не менее 10-15 на м². Не менее 1/3 из них – с офиурами. Все перья наклонены примерно на 260°. Видеоразрез через сообщество осуществлен до глубины 433 м, где отобраны доминирующие виды. Курс в основном оставался 315°.

В погружении 13 наблюдения были начаты на глубине 677 м в 500 метрах юго-западнее от трека погружения 11. На осадке довольно много гальки ледового разноса. Начало маршрута проходило в сообществе с явным численным доминированием офиур, как и на соответствующих глубинах погружения 11. Обычны полихеты, зарытые в песок (местами 2-3 экз/м²). Часто встречаются морские звезды *Muxoderma* и мелкие фиолетовые актинии с белым телом (*Athenaria*, по старой системе; “*Armaetinia*”). Довольно много мелких рыб и маленьких крабов. Весьма обычны хитоны на осадке и на мелких камнях. С глубины 673 до 666 м сделан видеоразрез (курс 315° протяженность 250 м). На протяжении разреза 4 раза отмечены створки *Acharax johnsoni*. Гальки ледового разноса заметно больше, чем на разрезе погружения 11. На глубине 663 м отмечено одиночное перо *Protoptilum* sp. На глубинах менее 665 м обращает на себя внимание большое число брахиопод (не отмечавшиеся ранее в таких количествах). На глубине 661 м численность офиур резко падает (вплоть до полного отсутствия). По численности на первое место выходят брахиоподы. Из подвижных форм заметны крупные букциниды, раки-отшельники, звезды *Muxoderma*, встречаются Pterasteridae. Весьма многочисленны мелкие креветки (тигровой расцветки). С 660 м наблюдаются проявления высачиваний - бактериальные маты, рядом поселения Vesicomidae. Преимущественная форма субстрата в пределах поля высачивания – карбонатная корка, местами перекрытая тонким слоем осадка. Осадок скапливается в трещинах и провалах карбонатной корки. Местами корка рассечена трещинами до нескольких сантиметров шириной и первых метров длиной. Большинство трещин имеет субмеридиональное простирание (около 315°). На отдельных участках трещины маркируются бактериальными матами. К ним же, как и к «провалам» в корке часто приурочены поселения везикомиид. Моллюски в данном районе многочисленны, но не образуют больших скоплений. Они селятся в одиночку или небольшими группами из 3-5 экз. Моллюски сидят несколько в стороне от густых матов, по всей видимости избегая мест наиболее интенсивных высачиваний. Из крупных животных в пределах поля отмечены актинии (оранжевые Actiniaria; вероятно, семейство Hormathiidae), звезды *Muxoderma*, раки-отшельники, креветки. Многочисленные выходы твердых пород несут обильные обрастания (гидроиды, полихеты, одиночные склерактинии). Обращает на себя внимание необыкновенно высокая численность брахиопод, которые отмечены как вблизи активных высачиваний, так и на дальней периферии. Здесь, в отсутствие офиур, они составляют абсолютно доминирующую группу бентоса. Из крупных сестонофагов отмечены морское перо *Protoptilum* sp. и розовая горгонария *Swiftia pacifica*. Карбонатные корки, местами имеющие ячеистую структуру, представляют собой удобный субстрат для мелких животных. В частности, в пробах отмечено большое обилие и разнообразие полихет. Под «карнизам» корок часто селятся и *Calypptogena pacifica*. При взятии образцов из таких мест взмучивается абсолютно черный мелкозернистый осадок.

В ходе погружения 13 в пределах поля и на его периферии сделано два видеоразреза. Первый из них проходил от точки 60.8331N 174.3721E (659 м) курсом около 90° до точки 60.8328N 174.3746E (663 м) (общая длина около 125 м). Разрез захватил южную периферию поля. Появление матов отмечено в точке 60.8337N 174.3720E, гл. 660 м. Здесь же отмечены полихеты в осадке и отдельные калиптогены, карбонатные корки. Начиная с 60.8325N 174.3724E ландшафт близок к фоновому, встречаются крупные офиуры (663 м). Второй разрез проходил в субмеридиональном направлении (около 350°) от точки 60.8328N 174.3743E, гл. 663 м до точки 60.8378N 174.3695E (глубина 625 м). Продолжительность разреза 55 мин, протяженность около 675 м. Профилирование начато в пределах фонового сообщества с доминированием офиур при большом количестве креветок и звезд *Muxoderma*. На глубине 662 м (60.8330N 174.3741E) офиуры становятся редки и вскоре полностью исчезают (60.8331N 174.3740E, 660 м). По нашим наблюдениям, эта граница очень резка. При отсутствии офиур, доминирующей по численности группой становятся креветки, которые в равной степени отмечались и за пределами, и в пределах поля. Явные визуальные проявления высачиваний в виде нарушений поверхности осадка, появления карбонатных корок, разреженных матов наблюдались с 60.8331N 174.3740E, 660 м. В этой зоне наблюдается увеличение численности брахиопод. Заметны венчики полихет, погруженных в осадок. В районе 60.8332N 174.3737E отмечено протяженное поле гальки ледового

разноса. Наиболее многочисленная форма – брахиоподы, прикрепленные как к камням, так и к карбонатным коркам. На глубине 659 м (60.8339N 174.3728E) весьма многочисленны раки-отшельники. На глубине 655 м (60.8344N 174.3719E) продолжают встречаться разрозненные маты, корки и отдельные калиптогены (в основном, створки). *Brachiopoda* – по прежнему ведущая по численности группа. Некоторое изменение сообщества отмечено в районе 60.8359N 174.3711E на глубине 635 м. Здесь численность брахиопод несколько снижается, появляются отдельные офиуры (в том числе, мелкие розовые, не встреченные ранее). Очень заметны в этой зоне хитоны, обитающие как на осадке, так и на отдельных камнях. Крупные офиуры в массе появляются уже на глубине 641 м (60.8352N 174.3716E) однако их распределение здесь явно агрегировано. На глубинах около 630 м (60.8362N 174.3706E) ландшафт становится практически фоновым. Осадок более ровный, здесь доминируют крупные офиуры, многочисленны мелкие актинии (“*Monactis*”), креветки, встречаются голотурии и звезды *Mухoderma*. Из отличий от наблюдавшегося ранее следует назвать большее количество створок и их обломков, а также продолжающееся заметное присутствие брахиопод. Большую роль в этом сообществе (едва ли не доминирующую по численности) играют хитоны. В целом, северная граница «сипового поля» в области нашего разреза достаточно размыта. «Фоновые» участки чередуются с местами высачиваний, створки калиптоген также отмечаются часто. Отдельные небольшие (несколько см) бактериальные маты и светлые пятна на осадке продолжали эпизодически встречаться почти до конца видеопрофиля (60.8378N 174.3695E глубина 620 м). Видимой реакции макрофауны на эти локальные проявления не наблюдается.

Погружение 21 было посвящено наблюдениям и отбору биологических проб с поля сипов, обнаруженного в погружении 13. Наблюдения были начаты на глубине 672 м в пределах фонового сообщества крупных офиур. Помимо офиур, креветок и миксодерм, отмечено значительное количество теребеллидных полихет (фиолетовые венчики и очень длинные нитевидные щупальца), количество которых возрастает по мере приближения к сипу. На маршруте, начиная с глубин 665 м, отмечается значительное количество детрита при изучении обнаружены массовые консорции гидроидов, на которых помимо собственно растительных остатков, обитает богатая фауна, представленная простейшими, полихетами, мшанками, мелкими губками, бактериальными нитями. В том числе на них встречаются белые трубки погонофор. Такие «гидроидные буши» являются распространенным объектом сиповых полей и одним из их индикаторов. Они появляются на камнях ледового разноса и карбонатных корках уже на дальней периферии и встречаются на самих сипах в зоне развития бактериальных матов и в поселениях калиптоген. На глубине 662-661 м происходит резкое уменьшение количества, а затем исчезновение крупных офиур, возрастает численность креветок (точка 60.8331N 174.3742E). На глубине 660 м при подходе к полю с юго-востока (курс 322°) в точке 60.8331N 174.3743E отмечены первые карбонатные корки. В точке 60.8332N 174.3740E на глубине 660 м были отмечены первые высачивания, маркируемые бактериальными матами. Помимо белых матов, наблюдаются розовые и желтоватые. Изредка встречаются одиночные морские перья. Доминирующая по численности группа макрофауны в пределах поля - брахиоподы, густо заселяющие выступы карбонатных корок, и многочисленные здесь камни ледового разноса. На этом субстрате также многочисленны кораллы *Caryophyllia*. Довольно часто встречаются белые извитые трубки погонофор. В точке 60.8343N 174.3721E (глубина 660 м) отмечена узкая трещина, заполненная калиптогенами. Трещина имеет вид борозды в осадке шириной до 15-20 см при длине более трех метров. Слегка извитая, генеральное простирание около 20°. На поселении моллюсков в трещине развиваются бактериальные маты. Прямо на моллюсках и в непосредственной близости отмечены крупные гастроподы букциниды, погонофоры, теребеллиды. Невдалеке на поле – крупные рыжие актинии (вероятно, *Normathiidae*). По-видимому, все поле сипов расположено на карбонатном фундаменте, на большей части перекрытым осадком разной мощности. На осадке часто наблюдаются точечные маты, иногда образующие полосы, вытянутые, подобно трещинам, субмеридионально. Локальные высачивания происходят через провалы и трещины в карбонатных плитах, такие места маркируются густыми матами и поселениями калиптоген. В точке 60.8341N 174.3724E (глубина 660 м) обнаружен бактериальный мат, в отличие от большинства матов поля окрашенный в яркий

желто-оранжевый цвет. Смежно с матом расположено небольшое поселение калиптоген (около десятка видимых особей). На поверхности мата наблюдались передвигающиеся мелкие офиуры и маленький краб, питающийся бактериями. Рядом с матом развешаются теребеллидные щупальца. В точке (660 м) наблюдался край карбонатной корки, образующий карниз. Здесь концентрируются многочисленные креветки, заднежаберные моллюски, на корке много брахиопод, гидроидов, усоногий рак. На поверхности корок довольно часто встречаются голотурии, которые обычно не наблюдаются в непосредственной близости от матов. Весьма примечательно выявленное в погружении обилие мелких офиур, скрытых осадком. Возможно, эта группа составляет преобладающую по абсолютной численности форму сообщества.

На разрезе 4 вертикальное распределение фауны и проявления высачиваний исследовались в ходе 6 погружений (табл. 2). Наблюдения были начаты на глубине 906 м (погружение 14). Дно здесь со сплошным осадочным покрытием, с редкими следами гастропод. На осадке наблюдается значительное количество мелких отверстий (более десятка на м²), иногда распложенных группами. Проведенные наблюдения позволили определить эти отверстия как следы жизнедеятельности крупных офиур. Белые концы рук офиур, торчащие из отверстий, многократно наблюдались в ходе погружения. На глубине 906 м отмечена крупная гастропода, оставляющая след. Из макрофауны изредка наблюдаются красные креветки, а с глубины 870 м они становятся обычны. Встречаются звезды *Mухoderma*, актинии *Liponema*, раки-отшельники, на глубине 888 м – звезда Pterasteridae. Регулярно встречаются крабы *Chionoecetes* (часто в ассоциации с актиниями), на глубине 877 м отмечен *Paralithodes kamchatica*. Довольно часто встречаются рыбы Macrouridae и мелкие придонные угревидные рыбы (Licodae?). На осадке изредка видны венчики полихет. В диапазоне глубин 850-815м проведен подсчет крупных форм. На дистанции около 600 м (ширина обзора около 1,3 м) отмечено: рыб – 44, гастропод - 22, звезд *Mухoderma* - 26 актиний *Liponema* – 7, крабов *Chionoecetes* – 3, раков-отшельников – 2 (офиуры и креветки не учитывались). На глубине около 850 м количество отверстий в осадке несколько уменьшается. На глубине 834 м на поверхности осадка появляются крупные (10 см) оранжевые офиуры, которые очень быстро (уже на глубине 831-830 м) становятся абсолютно доминирующей формой сообщества. На некоторых участках офиуры сидят с поднятыми лучами. С глубины около 800 м возрастает количество креветок, которые становятся руководящей формой наряду с офиурами. На глубине 794 м отмечена крупная актиния *Lyponema*, около которой скапливаются креветки. На этой же глубине отмечено увеличение численности раков-отшельников. Помимо офиур и креветок, относительно многочисленны морские звезды, крабы, актинии “Monactis”. По прямым подсчетам, численность руководящих форм в диапазоне глубин от 771 до 733 м составляет: *Mухoderma* – 37, *Chionoecetes* – 24, *Gastropoda* – 21, *Liponema* – 7 экз. на 800 м маршрута. На глубине 723 м отмечены неровности осадка и появление фитодетрита. Увеличивается количество гальки и крупных камней, появляются в заметных количествах хитоны и мелкие актинии “Monactis”. Крупные офиуры сохраняют численное доминирование. Выше 708 м склон вновь выхолаживается. Наиболее массовые формы по-прежнему офиуры, креветки, крабы, гастроподы, реже – отшельники. Примечательно, что с начала спуска не было встречено ни одной голотурии. На глубине 699-695 м отмечен крупный *Solasrer* и две звезды Pterastridae. На глубине 694 м отмечена створка, напоминающая *Vesicomidae*, на глубине 690 м – створки *Acharax* и *Vesicomidae*. С глубины 681 м створки солемиид и везикомиид встречаются регулярно. На глубине 679 м на грунте увеличивается количество гальки, ассоциированных с ней обрастаний (гидроидов) и фитодетрита. На глубине 671 м отмечен первый пятнистый мат на осадке (точка 61.1189N 174.9676E). Количество офиур резко снизилось, они попадают единично. На глубине 670 м отмечены фрагменты карбонатных корок, много гальки. Появились брахиоподы и хитоны. На глубине 663 м на осадке наблюдаются многочисленные пятна матов (до 5 см), створки ахараксов и везикомиид, много хитонов, участились гастроподы. На глубине 660 м (61.1195N 174.9651E) встречена трещина в осадке шириной около 10 см простираемая около 45°. Трещина заполнена живыми везикомиидами, местами покрыта бактериальным матом. Другая форма поселений – небольшие «гнезда»: скопления размеров до десяти см вмещающие до 15-20 раковин. Также в ходе погружения на глубине 656 м в точке 61.1209N 174.9643E были отмечены два пятна округлой

формы около полуметра и метра в поперечнике, заполненные калиптогенами. Во всех случаях поселения калиптоген имеют довольно резкие границы. Пространство между ними занято осадком с выступами карбонатных корок, однако по нашим наблюдениям, эти корки менее развиты, либо имеют более глубокое залегание, чем на участке разреза 3. Основная форма твердого субстрата в пределах поля – россыпи гальки ледового разноса. В таких местах наблюдаются скопления гидроидов и иных прикрепленных форм. На таких участках обычной формой являются серые голотурии, не встреченные на более глубоких горизонтах. В ходе погружения выполнена серия фоторазрезов с целью выяснения размеров и мезомасштабной структуры поля.

В погружении 18 наблюдения начаты на глубине 682 м в пределах сообщества крупных офиур, глубже поля калиптогенных сипов, исследованных в погружении 14. На умеренно биотурбированном осадке отмечаются креветки, звезды *Muxoderma*, редкие актинии «*Monactis*». На глубине 679 м на камне – столбообразная кладка гастроподы, хитоны. По мере продвижения вверх по склону увеличивается количество актиний, мертвой ракуши, створок *Acharax*. На глубине около 664 м численность офиур резко падает, численность креветок остается на прежнем уровне. Наблюдаются локальные нарушения поверхности осадка, обилие гальки, на которой развиваются «гидроидные буши». На глубине 663 м отмечено появление первых матов в виде точек на осадке. На гладком осадке при отсутствии офиур видны расправленные венчики полихет. Продолжают встречаться звезды *Muxoderma*. На некоторых участках видны лучи зарытых офиур, торчащие из осадка. На глубине 650-648 м встречено очень большое количество гидроидов и фитодетрита. Периодически встречаются поля «точечных сипов». На глубине 644 м встречено большое количество карбонатных корок (не отмечавшихся ранее в этом районе). На глубине 645 м (после разворота на курс 180°) встречено значительное число мертвых створок и карбонатных обломков. Отмечаются разреженные бактериальные маты. Фитодетрит распределен весьма неравномерно, что, видимо, определяется особенностями микрорельефа и структурой течений. На глубине 655 м встречены поселения живых калиптоген. Они имеют вид пятен округлой или неправильной формы, как правило, в пределах 1 м в поперечнике. Встречаются и совсем небольшие «гнезда» из нескольких моллюсков, очевидно приуроченные к провалам и трещинам в карбонатной корке. На дне местами множество гальки и камней ледового разноса, несущих на себе обрастания. На глубине 655 м маршрут пересек трещину с моллюсками, а на глубине 659 м встречены небольшие (15-30 см) «гнезда» с калиптогенами и черным осадком. Простирание трещин преимущественно северо-южное. На глубине 659 м (61.1194N 174.9647E) встречена узкая (5-10 см) трещина протяженностью около 1,5 м, заполненная живыми калиптогенами. Среди них выделяются две крупные *Phreagena soyoae*. Донное сообщество здесь располагается на карбонатных корках, перекрытых более или менее толстым слоем осадка. Примечательной особенностью, выявленной в погружении, является наличие огромного количества мелких офиур, обликом напоминающих *Ophioclinella acies*. Они плохо заметны, поскольку почти полностью погружены в осадок, однако легко обнаруживаются при взмучивании. Бактериальные маты здесь имеют широкое распространение не только в виде выраженных пятен, но и пронизывая осадок и придавая ему «волокистую» структуру. На глубине 662 м отмечено много серых мохнатых голотурий (помимо них встречено 2-3 вида). Эти голотурии – обычные обитатели периферии поля. Достигая здесь большой численности (как и рыжие заднежаберные моллюски), они обычно не встречаются на активных участках - в поселениях калиптоген и на бактериальных матах. Отмечено, что моллюски любят укрываться в кавернах карбонатных корок. Весьма обычны в пределах поля мелкие лилии *Comatulida* и ярко-рыжие актинии (*Harmothidiidae*?), не встречавшиеся в фоновом сообществе (по крайней мере, в таких количествах). На осадке часто наблюдаются венчики щупалец, которые не всегда удается надежно определить. Большей частью они, видимо, принадлежат полихетам, хотя не исключено, что здесь присутствуют церианты (надежно наблюдался однажды) или другие книдарии. Часто встречающиеся формы на поле – крупные гастроподы букциниды, раки-отшельники и креветки. На периферии участка были отмечены крупные крабы *Lithodidae*.

При движении в сторону меньших глубин визуальные проявления высачиваний в виде отдельных корок и небольших матов на осадке прослеживались до глубин 650-645 м (погружение 14). На глубине 647 м было отмечено появление крупных офиур, которые быстро занимают

лидирующее место по численности. Одновременно исчезают маты на осадке. Таким образом, массовые поселения офиур очень резко маркируют границу сипа. Сиповые проявления на разрезе 4 прослеживалось до глубины около 620 м на фоне сообщества офиур, креветок, звезд *Muxoderma* с присутствием крабов-стригунов. На этом участке отмечались синие голотурии и актинии *Liponema*. На глубинах 616-600 м было отмечено изменение поведения (образа жизни) доминирующих офиур: они стали зарываться в осадок и поднимать лучи, подобно тому, что наблюдалось на аналогичных глубинах разреза 3 (погружение 13). Абсолютное доминирование офиур прослеживалось и на глубинах менее 600 м. Помимо них важную роль в сообществе приобретают мелкие актинии «*Monactis*». Актинии *Liponema*, креветки и крабы встречаются по-прежнему. Весьма многочисленны хитоны, как на осадке, так и на камнях ледового разноса.

В погружении 15 наблюдения были начаты на глубине 547 м, в пределах сообщества крупных офиур и креветок. Осадок умеренно биотурбирован. В заметном количестве присутствуют мелкие актинии «*Monactis*». Представлены раки-отшельники, креветки, актинии *Liponema*, заднежаберные моллюски. Регулярно встречаются звезды *Muxoderma*, гастроподы и крупные актиностолидные актинии. Довольно часто отмечаются мертвые створки *Acharax*. Начиная с глубины 516 м в поле зрения часто попадают крупные звезды *Solaster* и Pterasteridae. На тех же глубинах отмечены крупные актинии актиниды (*Cribrinopsis* sp.). На глубине 504 м встречено первое морское перо *Protoptilum*. По мере уменьшения глубины их встречаемость возрастает, параллельно снижается численность крупных офиур. Довольно обычным компонентом становятся белые панцири ежей. На глубине 496 м офиуры уже не являются подавляющей по численности группой. Попадают крабы *Chionoecetes*, нередко ассоциированные с крупными актиниями. На глубине 484 м крупных офиур практически нет, в то время как морские перья находятся почти постоянно в поле зрения. На глубине около 480 м ландшафт представляет собой «редколесье» морских перьев. Весьма примечательной формой являются не встреченные глубже белые офиуры с маленьким диском и очень длинными руками. Они встречаются единично, но регулярно. На глубинах порядка 473 м звезды Pterasteridae становятся обычны, и встречаются чаще, чем *Muxoderma*. На первом месте по численности остаются перья *Protoptilum* и мелкие актинии «*Monactis*». На глубине 468 м было отмечено необычное явление: резко увеличилась численность мелких офиур на осадке. На сравнительно небольшом участке (до глубины примерно 456 м) они образуют подобия «ретикулюма» на грунте. Такого скопления на аналогичных глубинах разреза 3 не отмечалось. Начиная с глубины 465 м морские перья с сидящими на них офиурами *Asteronix* образуют довольно густой «лес», полностью определяя облик ландшафта. По визуальным оценкам, заселенность перьев офиурами составляет 70-80%. Наклон всех перьев постоянен и составляет около 280-290°, что примерно соответствует направлению преобладающего придонного течения в этом районе (270°). В этой зоне крупные офиуры на осадке практически отсутствуют. Креветки продолжают играть заметную роль, их численность остается на прежнем уровне, в то время как численность актиний «*Monactis*» возрастает по сравнению с нижележащим горизонтом. На глубине 454 м маршрут пересек след драги – борозда шириной менее полуметра, в которой наблюдалось скопление гастропод и креветок. На глубине 451 м было отмечено появление живых морских ежей *Brisaster latifrons*. На этих же глубинах появились крупные рыбы, сопровождающие аппарат, и ведущие себя весьма агрессивно. На глубине 440 м отмечены первые небольшие *Gorgonocephalus*, которые постепенно становятся обычны в сообществе морских перьев. Здесь регулярно отмечаются панцири мертвых ежей, а на глубине 436 м отмечено первое скопление живых ежей (несколько экз/м²). Вслед за этим их численность резко возрастает, и на глубине 435 м ежи становятся доминирующей по численности (и очевидно, по биомассе) группой. Они встречаются практически непрерывно, и на некоторых участках их плотность достигает и превышает 10 экз. на м². Мелкие офиуры в этой зоне практически отсутствуют. Помимо ежей, морских перьев и офиур *Asteronix* здесь представлены креветки, офиуры с длинными лучами, небольшие звезды, мелкие актинии «*Monactis*», однако в целом сообщество имеет довольно олигомиксный облик.

На глубине 429 м встречен первый «ежовый сип»: локальное высачивание, маркируемое бактериальным матом и темным (почти черным) осадком. В ходе погружения, в диапазоне глубин

от 429 до 417 м (точка всплытия) было отмечено не менее десятка таких проявлений. Средние размеры высачиваний не превышают метра в поперечнике, хотя встречаются участки протяженностью 2-3 и более м при ширине 1-1,5 м (была проведена видеозапись и фотографирование). Высачивания как правило имеют каждый свою зональность: более светлый (сероватый) край и почти черную середину, часто перекрытую белым бактериальным матом. Черный участок может иметь комковато-зернистую структуру. При отборе проб и даже при маневрировании аппарата вблизи участков сочтения наблюдались выходы свободного газа в виде пузырьков. Эти участки как правило изолированы, и разделяются пространствами «фонового» дна. Вместе с тем, реакция макрофауны на присутствие высачиваний выражена достаточно ярко. По предварительным наблюдениям, численность и, главное, разнообразие фауны в районе высачиваний увеличивается, в частности, здесь отмечены виды актиний, не встреченные ранее (например, с белым телом и темно-красным диском, *Actinostolidae* gen. sp.). Заметно возрастает количество раков-отшельников и гастропод (многие из которых тоже несут актиний монактисов). В пределах поля отмечены крабы, креветки, а также заднежаберные моллюски и голожаберник *Tritonia*. Непосредственно на сипах и матах отмечены (и собраны в коллекцию) рыжие актинии (*Normatiidae?*), крупные актинии сем. *Actinostolidae* и др. Морские перья на самих сипах никогда не селятся, хотя могут располагаться непосредственно по соседству довольно густо (такие сипы выглядят как «поляны» в лесу). Примечательно, что на участках самих локальных сипов плотность доминирующего вида - ежей *Brisaster latifrons* не падает, а резко увеличивается по сравнению с окружающим пространством. Их поселения на сипах нередко бывают почти сплошными, издавляя напоминая обликом и цветом поселения моллюсков батимодиол. На глубинах около 420 м было отмечено резкое возрастание численности актиний «*Monactis*». Они образуют здесь поселения до нескольких метров в поперечнике с плотностью, сравнимой с плотностью морских ежей. Однако такие скопления расположены на участках «фонового» осадка и судить об их связи с процессами высачиваний трудно. Актинии «*Monactis*» вообще широко распространены в изучаемом районе, они способны использовать практически любой твердый субстрат, и на наших разрезах регулярно встречались, начиная с глубин более 800 м, однако нигде не достигали столь высокой плотности. В конце погружения, с глубин 417 м на маршруте стали попадаться крупные губки.

С глубины 416 м начаты наблюдения в погружении 16. При погружении в толще воды наблюдался густой планктон и значительная мутность воды. Начало маршрута проходило в пределах сообщества ежей, морских перьев с офиурами и актиний «*Monactis*». Периодически фиксируются сипы, в том числе обширные, до 2-3 м в поперечнике. Обычный их размер меньше, в пределах метра. Сипы явно привлекают ежей. Участки высачиваний изолированы, расстояние между ними от метра до десятка метров. Попадают крупные актиностолиды и липонемы. Иногда отмечаются крупные губки на камнях. С глубины 413 м частота перьев постепенно снижается. Многочисленны креветки, гастроподы и раки-отшельники. Часто встречаются мелкие рыбы. На глубине 411 м отмечен *Gorgonocephalus*. На глубине 409 м перья единичны, актиний и ежей практически поровну. На глубине 407 метров численность ежей резко снижается, а на глубине 405 м они практически исчезают. Доминирующей по численности группой остаются актинии «*Monactis*». Из обычных форм присутствуют креветки, отшельники, гастроподы. Ежи встречаются единично, перьев нет. На глубине 402 м отмечена крупная немертина. На гл. 401 м встречены обширные сипы, более 2 м в поперечнике, с бактериальными матами и локальными темными пятнами. В отсутствие ежей сипы выглядят безжизненными, иногда на них отмечены актинии и креветки. Эти «безъежовые» сипы находятся в пределах сообщества с подавляющим доминированием «*Monactis*». Встречаются актинии других видов, в частности, *Liponema* и крупные актиностолидные формы. На глубине 378 м отмечено большое количество венчиков щупалец на осадке. Часть из них принадлежат полихетам, большая часть вероятно, книдарии. На глубине 365 м отмечена крупная (более 10 см) немертина.

В зоне «безъежовых» сипов на глубине 400-402 м проходило погружение 17, целью которого был отбор проб. Сипы здесь многочисленны и обширны, размеры их часто превышают 1 м. Визуально сипы менее локализованы, чем глубже в сообществе ежей, они могут перетекать

один в другой. Иногда сипы образуют неправильные полосы преимущественно субмеридиональной протяженности шириной до 0.5-1.0 м и длиной до нескольких метров. Видимой реакции макрофауны на такие сипы не наблюдается. Из крупных животных непосредственно в зоне матов отмечены доминирующие в сообществе актинии «*Monactis*», иногда встречаются отшельники и креветки. При изучении фотографий были обнаружены единичные особи калиптоген на периферии зон матов.

Наблюдениям и сбору материала на «ежовом» сипе было посвящено погружение 20, проходившее на глубинах 430-427 м. Высачивания расположены здесь в пределах сообщества ежей и перьев, с сидящими на них офиурами. Важным результатом погружения стало обнаружение живых везикомиид (*Calypotgena pacifica*), в том числе, мелких (молодых) экземпляров. Калиптогены приурочены непосредственно к местам высачиваний, следов их ползания на окружающем осадке не заметно. В данной зоне моллюски представлены в относительно небольшом количестве и не определяют здесь облик сообщества. В пробах, полученных в погружении из мест высачиваний, присутствовало большое количество мелких полихет и живые скафоподы. В желудке вскрытого морского ежа, собранного на сипе, обнаружены бактериальные нити.

На разрезе 5 было совершено одно погружение, в ходе которого было обнаружено и обследовано поле сипов на глубине около 695-690 м (наиболее глубоководное в районе). Наблюдения были начаты на глубине 693 м. Сразу при касании были замечены точечные бактериальные маты. На глубине 692 м встречены мощные выходы корок («карбонатные холмы») высотой до метра. Отмечено очень плотное скопление крабов *Chionoecetes*, креветок и морских окуней (напоминает периферию газогидратного источника у о-ва Парамушир, расположенного на сходной глубине). Среди выходов карбонатных пород встречаются поляны гладкого осадка с точечными матами. Кроме окуней много и других рыб. Среди карбонатных корок и главным образом на осадке расположены «гнезда» моллюсков. Как правило, размеры таких поселений не превышают полуметра. Часто они совсем небольшие, 5-15 см с 3-5 моллюсками. Осадок в таких местах заметно темнее окружающего. Осадок вокруг «гнезд» испещрен треками калиптоген. На карбонатных обломках очень много креветок. На корках также многочисленны *Caryophyllia*, есть брахиоподы и двустворчатые *Pectinoiidea*, в заметном количестве. Бактериальные белые точечные маты на осадке соседствуют с такими же оранжевого цвета. Есть рыжие «сиповые» актинии (*Нормотиidae*) (немного), обычны венчики щупалец теребеллид. В отличие от других исследованных районов, наиболее многочисленная группа прикрепленных животных здесь – кораллы *Caryophyllia*, а не актинии. Венчиков полихет заметно меньше, чем на поле разреза 3 на глубине 660 м. На подходе к полю с северо-запада (курсом 135°) на глубине 690 м после гладкого осадка периферия поля четко выделяется карбонатными обломками, обилием крабов, гастропод, «гидроидных бушей» и креветок. Потом начинаются обломки раковин и локальные сипы, а также массивные постройки высотой до полуметра. На карбонатных обломках многочисленны кораллы *Caryophyllia*, есть брахиоподы. На осадке – сипы с темными донными отложениями, иногда с калиптогенами, иногда – без. При удалении от поля сипов осадок быстро сменяется фоновым. Исчезает его ноздреватость и точечные маты. Здесь внешне безжизненно. Встречаются креветки, изредка миксодермы, соластеры. Из крупных форм наиболее часто встречаются актинии *Liponema*. Около липонем часто сидят крабы и креветки. Регулярно отмечаются также *Gastropoda*, реже – отшельники. При внешней безжизненности доминируют офиуры - на некоторых участках видны их белые лучи. Но самая массовая форма здесь – это мелкие зарывающиеся офиуры (2-3см), которые видны только при большом приближении. Их численность не поддается учету. Изредка встречаются актинии «*Monactis*». Встречаются миксодермы. Весьма много угревидных рыб (ликоды?). После ухода с поля сипов маршрут пролегал в восточном направлении (курс 270°) и проходил в основном вдоль изобат. За 1км 300 м маршрута перепад составил всего 5 м (с 693 до 688 м), затем вновь пошел спуск до 691 м. В конце маршрута несколько увеличилась численность креветок и актиний «*Monactis*».

4.2.2.2 Донная фауна в области холодных высачиваний Чукотского склона

Обнаруженные и исследованные на Чукотском склоне районы холодных высачиваний (сипов) различаются по своим биологическим проявлениям. Эти высачивания расположены на разных глубинах, что, возможно, в определенной степени обуславливает их специфику. Всего на Чукотском склоне на участке длиной 68,5 километров в диапазоне глубин от 693 до 400 м было обследовано пять более или менее обособленных районов (полей) холодных высачиваний: самое глубоководное на глубине 693 м на пятом разрезе, на глубинах около 660 м на третьем и четвертом разрезах, и на глубинах 428 м и 400 м на четвертом разрезе. В целом, выявленные сообщества можно разделить на три типа (табл. 8), характеризующихся своими особенностями:

1. Высачивания на глубинах 695-647 м (рис. 34, 35) - происходят в окружении фонового сообщества *Ophiuroidea*+*Macrura* *Natantia*. Характеризуются развитием многочисленных популяций симбиотрофных моллюсков *Calypptogena pacifica* и других специализированных форм, в частности, погонофор *Archeolinum* sp.. Количество и разнообразие фауны в зонах таких высачиваний по сравнению с фоном резко увеличивается, что, в частности, обусловлено особенностями субстрата (присутствием значительного количества карбонатных образований и материала ледового разноса).

2. Высачивания на глубинах 429-417 м (рис. 36) в пределах фонового сообщества *Protoptilum* /*Asteronyx* + *Brisaster latifrons*. Из специализированных форм в небольшом количестве представлена *Calypptogena pacifica*. Численность и разнообразие фауны в районе высачиваний несколько увеличивается, в частности, здесь отмечены виды актиний, не встреченные ранее. Плотность доминирующего вида - ежей *Brisaster latifrons* - на участках локальных сипов заметно увеличивается по сравнению с окружающим пространством, в то время как морские перья явно избегают мест высачиваний.

3. Высачивания на глубинах 400-402 м (рис. 37) в пределах сообщества с доминированием актиний «*Monactis*». Многочисленные и обширные высачивания, размерами часто более 1 м маркируются развитыми бактериальными матами. Анализ фотографий свидетельствует о присутствии редких калиптоген на периферии сипов. Видимой реакции макрофауны на такие сипы не наблюдается.

Таблица 8. Основные характеристики донных сообществ сиповых полей.

Глубина, м (разрез)	Фоновое сообщество	Симбиотрофные виды сипового поля	Ландшафтообразующие виды сипового поля
695 – 689 (5)	<i>Ophiophtalmus normani</i> + <i>Macrura</i> <i>Natantia</i>	<i>Calypptogena pacifica</i> , Thyasiridae gen.sp.	<i>Calypptogena pacifica</i> , <i>Macrura</i> <i>Natantia</i> , <i>Caryophyllia</i> , <i>Brachiopoda</i>
665 – 660 (3)	<i>Ophiophtalmus normani</i> + <i>Macrura</i> <i>Natantia</i>	<i>Calypptogena pacifica</i> , <i>Archeolinum</i> sp., Thyasiridae gen.sp.	<i>Calypptogena pacifica</i> , <i>Macrura</i> <i>Natantia</i> , <i>Caryophyllia</i> , <i>Brachiopoda</i>
663 – 647 (4)	<i>Ophiophtalmus normani</i> + <i>Macrura</i> <i>Natantia</i>	<i>Calypptogena pacifica</i> , <i>Phreagena</i> sp., Thyasiridae gen. sp.	<i>Calypptogena pacifica</i> , <i>Actiniaria</i> ; <i>Hormathiidae</i> ?
429 – 417 (4)	<i>Protoptilum</i> sp./ <i>Asteronyx</i> + <i>Brisaster latifrons</i>	<i>Calypptogena pacifica</i> , Provannidae?	<i>Brisaster latifrons</i>
400 – 402 (4)	Актинии “ <i>Monactis</i> ”	<i>Calypptogena pacifica</i>	Актинии “ <i>Monactis</i> ”

Открытие донных сообществ ассоциированных с углеводородными высачиваниями на склоне Чукотки является одним из важнейших результатов рейса. Существование специфических сообществ на Чукотском склоне ранее предполагали на основе находок облигатных симбиотрофных двустворчатых моллюсков *Pliocardiiinae* (*Vesicomidae*) (Данилин, 2013; Krylova et al., 2018). Обнаруженные и исследованные в рейсе углеводородные высачивания на горизонте глубин от 400 до 700 м представляют собой новый район восстановительных биотопов в масштабе Мирового океана. Сообщества сипов Хатырского прогиба являются самыми северными в мире современными восстановительными сообществами, в которых встречены двустворчатые

моллюски плиокардиины. В бассейне Тихого океана это самое северное сообщество, основанное на хемосинтезе, известное к настоящему времени.



Рисунок 33 - Поселение везикомиид *Calyptogena pacifica* на глубине 658м, слева видна крупная раковина *Phreagena sp.*



Рисунок 35 - «Трещина калиптоген»: поселение *Calyptogena pacifica*, глубина 659м



Рисунок 36 - «Ежовый сип»: высачивание на глубине 426м

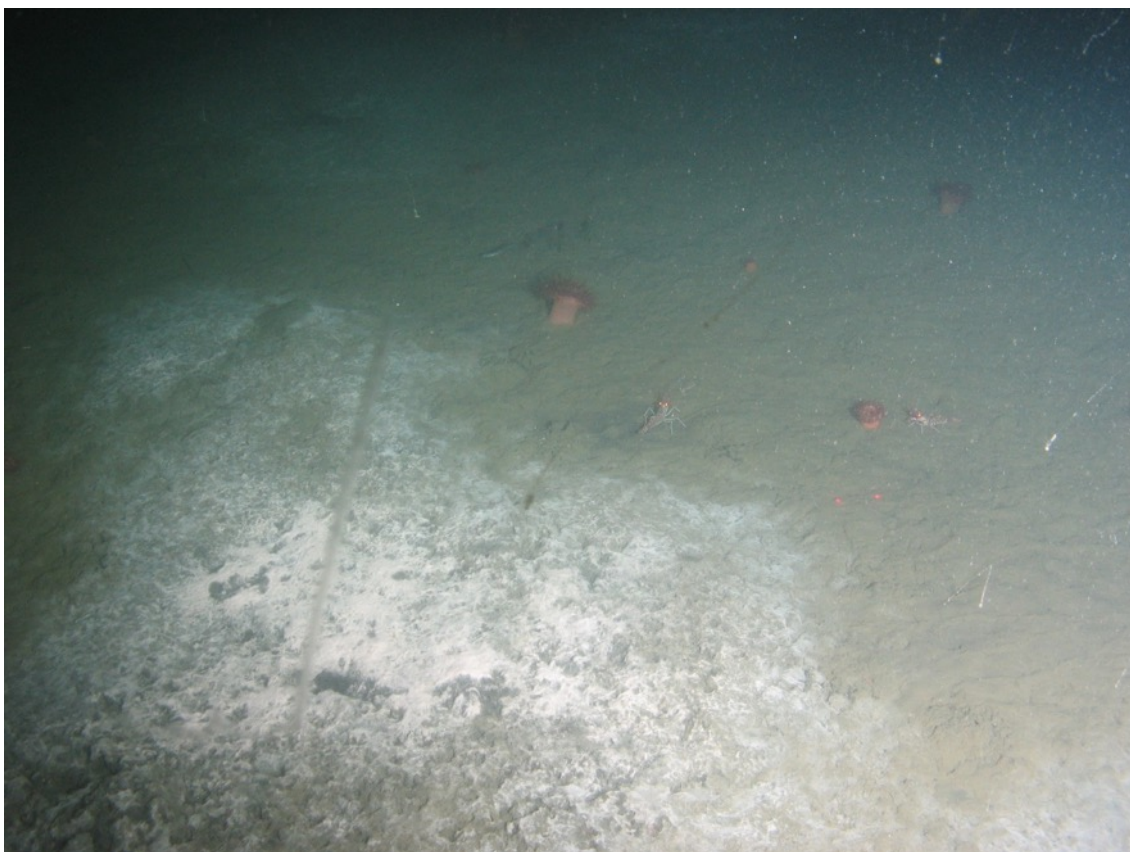


Рисунок 37 - Высачивание на глубине 401 м

4.3 Разработка системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА

В наши дни для эффективного решения исследовательских, технологических и аварийно-спасательных задач в глубинах Мирового океана активно разрабатываются и используются подводные робототехнические комплексы, предназначенные для решения различных типов глубоководных операций. В частности, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), оснащаемые видеокамерами, сенсорами, пробоотборниками и манипуляторами, используются для выполнения осмотровых и манипуляционных операций с непротяженными объектами в ограниченной рабочей зоне. Для решения обзорно-поисковых задач и обследования протяженных объектов и больших территорий используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащаемые высокоточными системами навигации и способные преодолевать большие расстояния.

Однако при выполнении исследований в областях гидрографии, геохимии, геологии, морской биологии, разведки нефтяных и газовых месторождений существует важная задача обследования больших глубоководных полигонов с необходимостью высококачественной видео и фотосъемки, профилирования, обнаружения объектов, а также отбора проб воды, грунта, животных и газа на всем протяжении маршрута движения. Современные АНПА не обладают достаточными функциональными возможностями для эффективного выполнения всех перечисленных операций, особенно манипуляционных. Кроме того, процесс выполнения этих операций в реальном масштабе времени должен контролироваться специалистами, определяющими цели и места пробоотбора, а также корректирующими маршрут движения аппарата. Поэтому для эффективного решения указанной задачи целесообразно использовать ТНПА, но возможности этих аппаратов сильно ограничиваются наличием гибкого кабель-троса, на который оказываются значительные гидродинамические и гидростатические влияния со стороны окружающей водной среды. При работе на больших глубинах и в условиях сильных течений эти влияния приводят к негативным силовым и моментным воздействиям со стороны кабель-троса на ТНПА, затрудняющим его перемещение.

Для решения проблемы ограничения мобильности ТНПА используется промежуточный блок-заглубитель, соединяющий толстый армированный кабель-трос спускоподъемного устройства с гибким кабелем связи ТНПА. Эта распространенная схема обеспечивает высокую мобильность ТНПА в пределах его рабочей зоны, ограниченной длиной гибкого кабеля. Однако блок-заглубитель часто может соударяться с грунтом, создавая аварийную ситуацию, грозящую обрывом легкого кабеля. При этом для исключения аварийных ситуаций и высокоточного перемещения ТНПА по заданному маршруту необходимо одновременно и согласованно управлять ТНПА и судном-носителем, а также длиной армированного кабель-троса, постоянно контролируя взаимное расположение ТНПА и его блока-заглубителя и полностью исключая соударения этого заглубителя с дном. Управление движением указанной связки особенно осложняется в случае отсутствия у судна-носителя системы динамического позиционирования в пространстве.

Работы и эксперименты в экспедициях в Японском, Охотском и Беринговом морях с ТНПА рабочего класса Sub-Atlantic Comanche 18, который базируется на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», показали, что перемещение этого аппарата и его блока-заглубителя по протяженным глубоководным маршрутам является очень сложной задачей. При этом операторы испытывают сенсорные, эмоциональные и интеллектуальные перегрузки, поскольку им приходится принимать решения, анализируя большой объем информации и учитывая особенности сразу нескольких динамических объектов, а также условия выполнения подводных работ: течения, рельеф в зоне работ и желаемый маршрут перемещения ТНПА. В результате человеческий фактор часто становится причиной снижения качества и увеличения времени выполнения научно-исследовательских и технологических подводных операций или даже аварийных ситуаций.

Для успешного решения указанной проблемы в экспедиции были решены задачи разработки, программной реализации и натурных испытаний системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов, предназначенной для точного и безаварийного перемещения судна-носителя, ТНПА и его блока-заглубителя.

4.3.1 Управление согласованными перемещениями ТНПА и блока-заглубителя

Современные специализированные суда-носители ТНПА, например, НИС «Академик Голицын» и НИС «Мстислав Келдыш», оборудованы системами динамического позиционирования не ниже второго класса, который подразумевает автоматическое удержание судна в заданной точке пространства с требуемым углом курса при максимальных расчетных параметрах воздействия внешней среды.

Взаимное расположение ТНПА и его блока-заглубителя определяется с помощью установленных на них маяков гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой, антенна которой закрепляется на обеспечивающем судне-носителе. Навигационная система определяет координаты x_v , y_v и z_v ТНПА, а также координаты x_d , y_d и z_d блока-заглубителя в жестко связанной с судном прямоугольной системе координат XYZ , начало которой - C расположено в центре его величины (водоизмещения), ось Y совпадает с горизонтальной - продольной осью судна, ось Z - с его вертикальной осью (направлена вниз), а X составляет с ними правую тройку.

Работа ТНПА возможна только при нахождении объекта работ или целевой точки маршрута в рабочей зоне аппарата, размеры которой определяются длиной q гибкого плавучего кабеля (рис. 38), а ее расположение в пространстве - местоположением блока-заглубителя, удерживаемого жестким кабель-тросом. Для высокоточного перемещения ТНПА по протяженным маршрутам необходимо так управлять перемещениями судна-носителя и длиной выданного кабель-троса, чтобы блок-заглубитель ТНПА обеспечивал наибольшую свободу маневрирования этого аппарата.

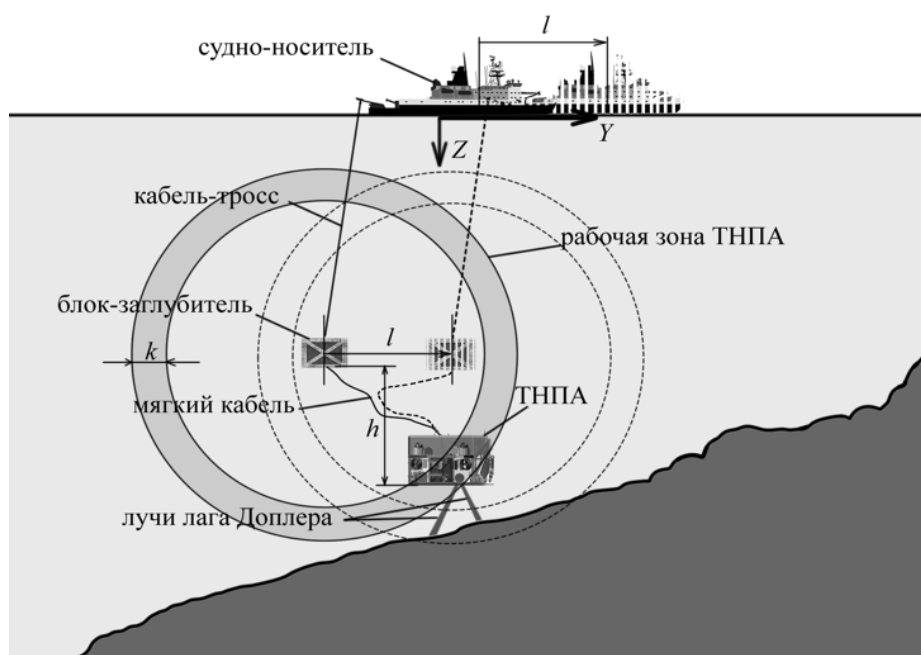


Рисунок 38 - Подводный комплекс ТНПА

Чтобы обеспечить эффективную работу ТНПА, исключая ситуации, в которых блок-заглубитель и гибкий кабель связи соударяются с дном, этот блок должен удерживаться выше ТНПА на задаваемую оператором величину h , которая определяется на основе опытных данных и экспертных знаний.

Для этого вычисляется длина m выдаваемого или сматываемого спускоподъемным устройством кабель-троса с помощью выражения:

$$m = \frac{(h - (z_v - z_d))\rho}{z_d}, \quad (1)$$

где z_v - глубина ТНПА, z_d - глубина блока-заглубителя, p - длина армированного кабель-троса, выданного спускоподъемным устройством. Причем выражение (1) позволяет определять желаемую длину m , приближенно учитывая влияния вязкой среды на кабель-трос и блок-заглубитель, приводящие к разнице между p и z_d .

В то же время, когда ТНПА, перемещаясь к целевой точке, приближается к границам его рабочей зоны на расстояние k (см. рис. 1), необходимо перемещать блок-заглубитель в сторону аппарата. При этом проверяется выполнение условия

$$\sqrt{(x_v - x_d)^2 + (y_v - y_d)^2 + (z_v - z_d)^2} \geq (q - k), \quad (2)$$

и если оно выполняется, то вычисляются величина $l = \sqrt{(x_v - x_d)^2 + (y_v - y_d)^2}$ смещения судна-носителя, а также направление этого смещения, которое определяется желаемым углом β курса судна:

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_0 + \arccos \frac{y_v - y_d}{l}, \text{ если } (x_v - x_d) \geq 0 \text{ и } (y_v - y_d) \geq 0, \\ \beta &= \beta_0 - \arccos \frac{y_v - y_d}{l}, \text{ если } (x_v - x_d) \leq 0 \text{ и } (y_v - y_d) \geq 0, \\ \beta &= \beta_0 + \pi - \arccos \frac{y_v - y_d}{l}, \text{ если } (x_v - x_d) \geq 0 \text{ и } (y_v - y_d) \leq 0, \\ \beta &= \beta_0 - \pi + \arccos \frac{y_v - y_d}{l}, \text{ если } (x_v - x_d) \leq 0 \text{ и } (y_v - y_d) \leq 0, \end{aligned}$$

где β_0 - текущий угол курса судна-носителя, причем это судно может перемещаться в направлении курсового угла β , сохраняя исходную ориентацию β_0 . Необходимо отметить, что условие $(x_v - x_d) = 0$ и $(y_v - y_d) = 0$ невыполнимо, поскольку ТНПА находится вблизи границ его рабочей зоны. Величина k экспериментально определяется оператором и позволяет заблаговременно начать перемещение судна-носителя. Кроме того, при выполнении условия (2) генерируется предупреждение операторам о приближении ТНПА к границам его рабочей зоны.

Если судно-носитель имеет систему динамического позиционирования в пространстве, то предложенный алгоритм управления позволяет точно перемещать блок-заглубитель, но в случае отсутствия у судна системы позиционирования управление его движениями значительно усложняется. В настоящее время для работы с ТНПА активно используются НИС, например, «Академик М.А. Лаврентьев» и «Академик Опарин», имеющие лишь ограниченные средства позиционирования (главный двигатель и носовые подруливающие устройства), позволяющие перемещать судно с неизбежными ошибкам позиционирования особенно в условиях течений и воздействий ветра. Опыт экспедиционных работ показал, что даже в условиях ограниченной маневренности таких судов возможно перемещение блока-заглубителя ТНПА с точностью, достаточной для выполнения исследовательских операций. Однако даже под управлением опытного экипажа возникают трудности при остановке судна-носителя в заданной точке, при этом изменение направления его движения часто происходит с продолжительной задержкой и смещением относительно желаемого положения в пространстве.

Поэтому при перемещении по протяженным маршрутам ТНПА, обеспечиваемого судном без системы динамического позиционирования, целесообразно задавать желаемые направление и скорость движения судна и перемещать ТНПА вслед за этим судном. При этом ТНПА все время должен находиться в передней полусфере своей рабочей зоны (рис. 39). Такое взаиморасположение ТНПА и его блока-заглубителя дает возможность остановиться вблизи обнаруженного объекта и выполнить заданную операцию, не требуя моментальной остановки

судна-носителя. Кроме того, при движении вверх по склону указанное взаиморасположение позволяет избежать запутывания плавучего кабеля связи и соударения заглубителя с дном.

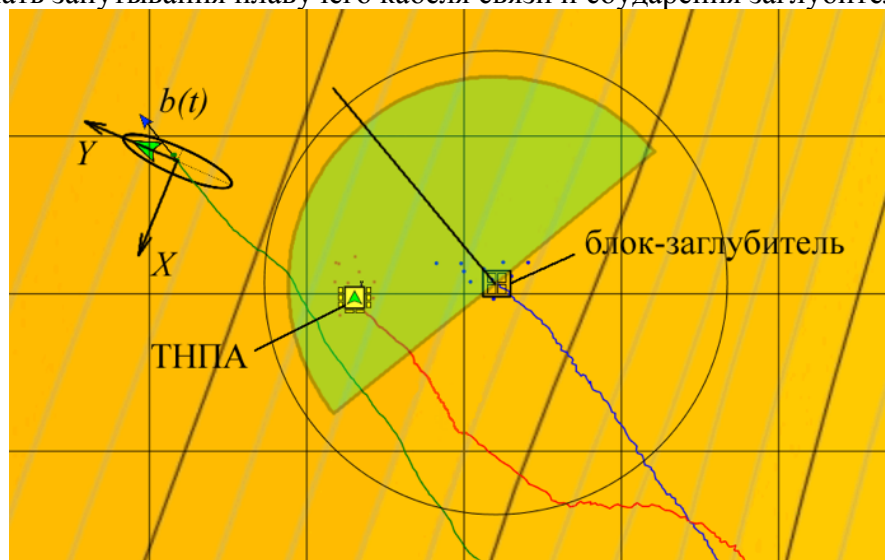


Рисунок 39 - Рабочая зона ТНПА

Если ТНПА находится в желаемом сегменте его рабочей зоны, то в системе координат XY угол между единичным вектором $b(t)=[\sin(\beta_r), \cos(\beta_r)]^T$, определяющим текущее направление движения судна, и вектором $c(t)=[(x_v-x_d), (y_v-y_d)]^T$, соединяющим ТНПА с его блоком-заглубителем, не превышает 90° . При этом выполняется условие:

$$\arccos \frac{b(t)c(t)}{\|b(t)\|\|c(t)\|} \leq \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где β_r – текущий курсовой угол, определяющий направление перемещения судна-носителя в системе координат XYZ . Этот угол измеряется судовой системой GPS и в условиях ветрового сноса и (или) течений может отличаться от угла курса β_0 , определяющего пространственную ориентацию продольной оси судна. Если условие (3) не выполняется, то вырабатывается оповещение о необходимости перемещения ТНПА в желаемый сегмент его рабочей зоны.

При этом согласно выражению (1) происходит вычисление длины m выдаваемого или сматываемого спускоподъемным устройством кабель-троса, но задаваемая величина h (см. рис. 1) должна быть переменной и определяться на основе опытных данных и экспертных знаний с учетом выполнения условия (3), а также с учетом сложности рельефа донной поверхности, определяемого абсолютным доплеровским лагом с помощью метода, изложенного в работе Филаретова с соавторами (Филаретов и др., 2017а).

4.3.2 Программная реализация системы поддержки деятельности операторов

Для обеспечения операторов наглядными рекомендациями и предупреждениями, формируемыми в реальном масштабе времени на основе экспертной оценки информации, получаемой с различных датчиков, сенсоров и навигационных систем разных производителей, в работе предложена архитектура системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА, изображенная на рис. 3. Программная реализация этой системы разрабатывалась в среде .Net Framework на основе подхода ранее описанного подхода (Филаретов и др., 2017b), при этом ее архитектура претерпела ряд изменений. Для удобства подключения к системе различных датчиков и устройств в ее состав включен модуль коммуникации с внешними устройствами (рис. 40), который асинхронно выполняет передачу и обработку данных.

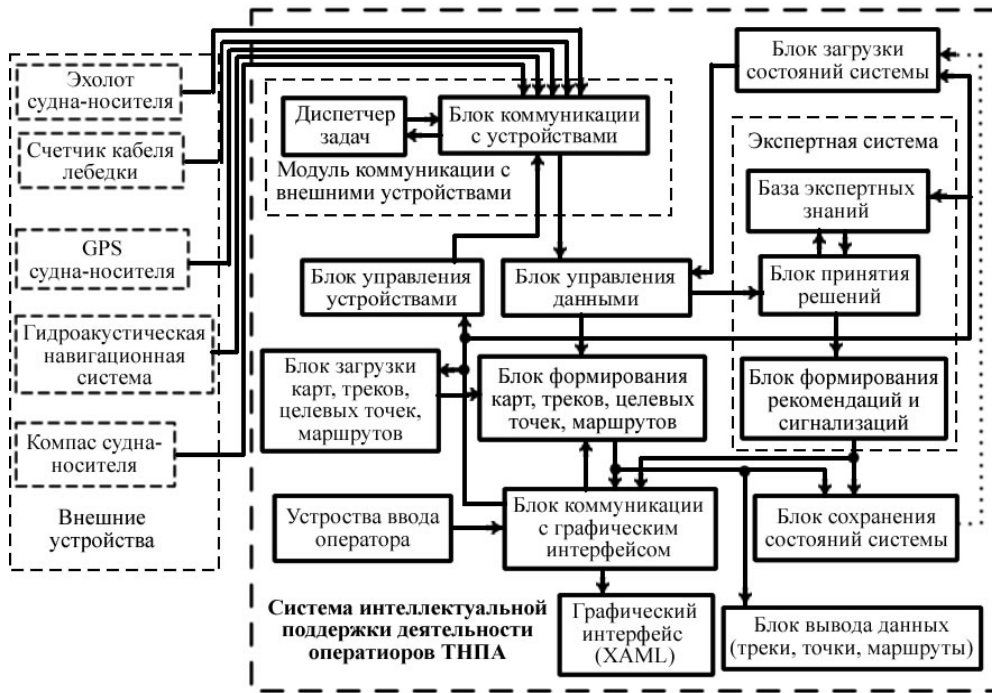


Рисунок 40 - Обобщенная структурная схема системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА

Диаграмма классов этого модуля представлена на Рисунке 41. Методы передачи и обработки данных с конкретными устройствами реализуются в соответствующих классах: SonarDyne, WinchCable, TrackLink и др., базовым для которых является абстрактный класс ACDevice, реализующий общие для всех устройств методы (ClosePort(), GetActions() и др.) и поля (actionList, name и др.). При этом в классе каждого устройства определяются методы, которые должны выполняться асинхронно в отдельных потоках, для этого создается коллекция объектов actionList типа ActionInfo. Поля этого типа хранят информацию о методе, который должен выполняться асинхронно, а также информацию, необходимую диспетчеру задач TaskManager для управления процессом асинхронного выполнения этого метода.

В результате система интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА взаимодействует с внешними устройствами посредством класса DeviceControl, методы которого позволяют создавать классы отдельных устройств и запускать их внутренние методы в отдельных потоках при помощи диспетчера задач. Это позволяет минимизировать машинное время, затрачиваемое на ожидание данных, а также управлять производительностью методов обработки этих данных.

Обработанные данные устройств поступают в блок управления данными (рис. 40), который перераспределяет их по другим блокам. Так координаты гидроакустических маяков и судна-носителя передаются в блок формирования карт, треков, целевых точек, маршрутов, который формирует треки и выполняет их фильтрацию для дальнейшей передачи в блок коммуникации с графическим интерфейсом, а также составляет карты зон работ, определяет и планирует маршруты движения ТНПА и обеспечивающего судна-носителя. Блок управления данными также формирует информацию о взаимном расположении судна-носителя, ТНПА и его блока-заглубителя для дальнейшей передачи экспертной системе. Блок коммуникации с графическим интерфейсом отвечает за обработку команд оператора при взаимодействии с графическим интерфейсом, а также его обновление в процессе работы системы.

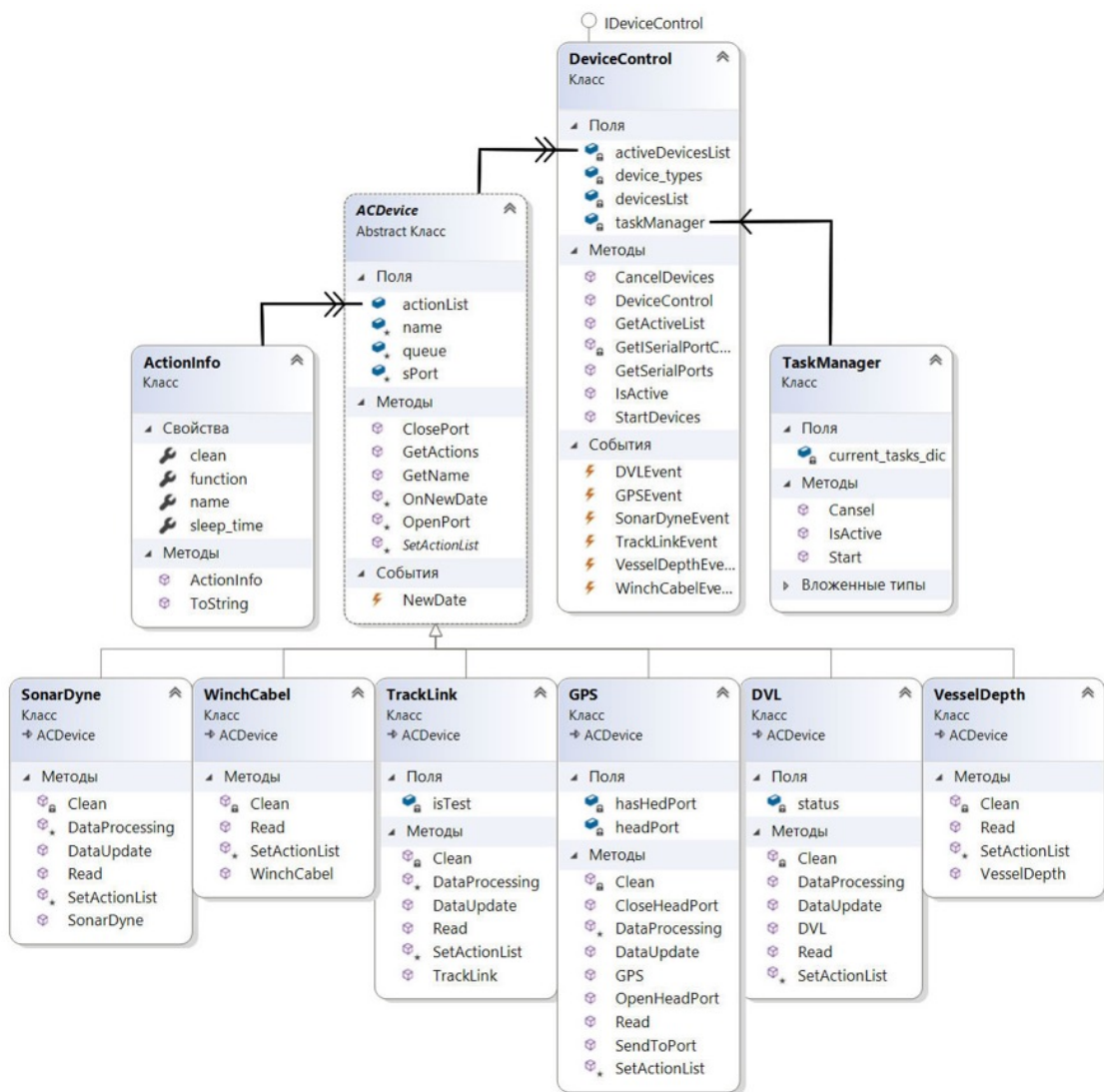


Рисунок 41 - Диаграмма классов модуля коммуникации с внешними устройствами

Вычисление величин m , l , β и h , определяющих желаемое взаиморасположение указанных объектов, реализуется в блоке принятия решений. Причем переменная величина h формируется этим же блоком на основе хранящихся в базе экспертных знаний формализованных оценок условий выполнения подводной операции. Эти оценки задаются операторами или могут определяться автоматически на основе информации с датчиков. При этом учитываются накопленные опытные знания о последствиях выбора того или иного значения h . Кроме того, согласно схеме, представленной на Рисунке 40, блок принятия решений сопоставляет текущие данные, получаемые с датчиков и внешних устройств, с данными базы формализованных представлений безопасности, таких как: аварийное натяжение гибкого кабеля, сложный рельеф морского дна, возможный контакт блока-заглубителя с дном или ТНПА, выход ТНПА из желаемого сегмента его рабочей зоны и др. При этом выявляется возможность возникновения аварийной ситуации и формируются рекомендации и сигнализации для операторов.

В системе интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА реализована возможность сохранения карт, треков, целевых точек и маршрутов для дальнейшего предоставления заказчикам подводных работ, а также возможность их загрузки в систему для выполнения повторных погружений ТНПА с целью поиска и дополнительного исследования найденных ранее подводных объектов. Указанные функции реализованы в блоках вывода данных и загрузки данных, соответственно.

Дополнительно была реализована возможность сохранения и загрузки состояний системы. Причем каждое изменение состояния системы, а именно, поступление данных устройства,

команды операторов ТНПА, сигнализации и т.п. автоматически сохраняются в файл. В результате чтения сохраненного файла с использованием блока загрузки состояний системы выполняется полноценное воспроизведение ее сохраненных состояний. Эта возможность позволяет анализировать процесс выполнения уже завершенных погружений ТНПА с целью выявления ошибок как в работе системы, так и в действиях операторов ТНПА.

Указанные функциональные особенности разработанной системы позволяют значительно повысить качество и скорость выполнения дорогостоящих подводных операций, что подтверждается исследованиями этой системы в условиях реальных морских экспедиций.

4.3.3 Исследование системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА

Экспериментальные исследования разработанной системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА выполнялись непосредственно в ходе экспедиции. Разработанная система эксплуатировалась в процессе всех погружений ТНПА, позволяя операторам планировать маршруты перемещений аппарата и его судна-носителя, задавать целевые точки или указывать местоположения подводных объектов как посредством ввода географических координат, так и с помощью отметок на загруженной карте зоны работ. При выполнении подводных операций активно использовалась возможность системы отмечать найденные подводные объекты и отобранные морские организмы с помощью добавления маркеров и ввода подписей, идентифицирующих подводные объекты. Графическим интерфейсом отображался добавленный нумерованный маркер с текущими координатами ТНПА на карте зоны работ, а также запись с идентифицирующей подписью в списке целевых точек (рис. 42). При этом система добавляла в лог файл погружения запись, содержащую координаты объекта, глубину, идентифицирующую подпись, а также время и дату. Эти записи позволили в процессе текущего или любого другого погружения вернуться к обнаруженному ранее подводному объекту для его отбора или повторного изучения, а также упростить учет обнаруженных объектов.



Рисунок 42 - Графический интерфейс системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА в процессе выполнения подводной операции

На основе информации, получаемой от гидроакустического навигационного комплекса с ультракороткой базой Sonardyne Fusion, а также системы GPS судна-носителя, разработанная система с помощью графического интерфейса отображала треки перемещений этого судна, ТНПА и его блока-заглубителя. При этом в системе реализована возможность фильтрации указанных треков с помощью экспоненциального фильтра, а также ручной настройки его коэффициента

фильтрации. В процессе выполнения подводных работ треки сохранялись в лог файлы, формат которых позволил легко загружать их в различные программы для построения трехмерных поверхностей и рельефов, в том числе морского дна. На Рисунке 43 изображена трехмерная модель поверхности подводного вулкана Пийпа, построенная с помощью программного пакета Surfer 13 фирмы Golden Software, а также треки перемещения ТНПА Comanche 18 в процессе исследования этого вулкана.

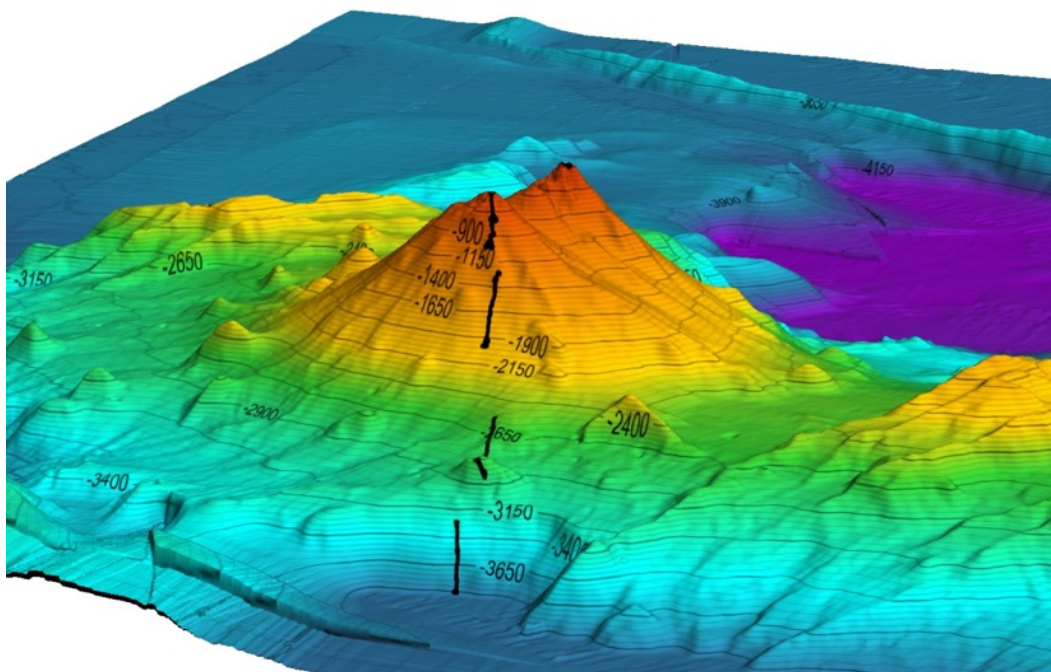


Рисунок 43 - Модель подводного вулкана Пийпа и треков перемещений ТНПА

Экспериментальные исследования, выполненные в экспедиции, позволили в полной мере оценить эффективность использования разработанной системы, обеспечивающей интеллектуальную и информационную поддержку операторов, планирование миссий, а также формирование рекомендаций и предупреждений о возможных аварийных ситуациях. Генерируемые программой предупреждения и рекомендации для операторов ТНПА позволили избежать аварийных ситуаций, а реализованная в системе возможность сохранения и загрузки ее состояний позволила выполнить анализ ошибок в работе системы и в действиях операторов ТНПА, а также принять меры для их исключения. Таким образом, созданное программное средство позволило повысить скорость и качество выполнения дорогостоящих подводных работ, избежать аварийных ситуаций в процессе их выполнения, а также упростить построение треков перемещений ТНПА и учет обнаруженных подводных объектов.

Список использованных источников

27. Богданова О.Ю., Горшков А.И., Баранов Б.В. и др. Гидротермальные образования подводного вулкана Пийпа (Командорская котловина) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 49-62.
28. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС. 2001. 500 с.
29. Грецкая Е.В., Петровская Н.А. Нефтегазоносность Хатырского осадочного бассейна (Берингово море) // Газовая промышленность, 2010. Спец. вып. – С. 38-44.
30. Дальневосточные моря России (в 4 кн.). Книга 3. Геологические и геофизические исследования (гл. ред. Акуличев В.А.). М.: Наука, 2007. 503 с.
31. Забанбарк А. Перспективы нефтегазоности берингоморского региона // Океанология, 2009. Т. 49, № 5. С. 784-795.
32. Иванов М.В., Леин А.Ю., Гальченко В.Ф., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Гулин М.Б., Русанов И.И., Миллер Ю.М. и Купцов В.И. Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовыделений Черного моря // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. С. 1235-1245.
33. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. М. Наука. 1994. 448 с.
34. Малютин А.Н. Глубоководные (холодноводные) коралловые сообщества северной Пацифики и проблемы их сохранения // Биология моря. 2015. Т. 41, № 1. С. 3-12.
35. Миловский Г.А., Малышев Н.А., Бородулин А.А., Ишмухаметова В.Т., Орлянкин В.Н. Прогнозирование месторождений углеводородов в чукотско-камчатском регионе на основе обработки космических и геолого-геофизических данных // Исследование Земли из космоса, 2015. - №5. – С. 62-72
36. Нефтегазоносные бассейны Дальнего Востока СССР. Под ред. акад. А.А. Трофимука. - М.: «Недра», 1971, 184 с.
37. Сагалевиц А.М., Торохов П.В., Галкин С.В., Москалев Л.И. Матвеев В.В. Гидротермальные проявления подводного вулкана Пийпа (Берингово море) // Известия РАН, сер. геолог. 1992. № 9. С. 104-114.
38. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Лурило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Издательство КамГУ им. Витуса Беринга. 2009. 191 с.
39. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Подход к разработке информационно-управляющей системы для телеуправляемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2017а. № 1(23). С. 44-49.
40. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление, 2017б. №8. Т. 18. С. 543–549.
41. Aloisi G., Wallmann R., Bollwerk S. M., Derkachev A. Bohrmann G. Suess E. The effect of dissolved barium on biogeochemical processes at cold seeps // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. V. 68, № 8. P. 1735–1748.
42. Corliss J.B., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M., von Herzen R.P., et al. Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift // *Science*, 1979, Vol. 203. P. 1073–1083.
43. Crist D.T., Scowcroft G., Harding J.M. World ocean census: a global survey of marine life. A Firefly Books (US) Inc. 2009. 256 p.
44. Danovaro R., Canals M., Tangherlini M., Dell’Anno A., Gambi C., Lastras G., Amblas D., Sanchez-Vidal A., Frigola J., Calafat A.M., Pedrosa R., Rivera J., Rayo X., Corinaldesi C. A submarine volcanic eruption leads to a novel microbial habitat // *Nature Ecology & Evolution*, 2017. Vol. 1: 0144.
45. Dodd M.S., Papineau D., Grenne T., Slack J.F., Rittner M., Pirajno F., O’Neil J., Little C.T.S. Evidence for early life in Earth’s oldest hydrothermal vent precipitates // *Nature*, 2017. Vol. 543. P. 60–64.
46. German C.R., Ramirez-Llodra E., Baker M.C., Tyler P.A., ChEss Scientific Steering Committee. Deep-water chemosynthetic ecosystem research during the census of marine life decade and beyond_ a proposed deep-ocean road map_ German et al 2011 // *PLoS ONE* 6(8): e23259.
47. Krylova E.M., Sahling H. Recent bivalve molluscs of the genus *Calypptogena* (Vesicomidae) // *Journal of Molluscan Studies*, 2006. V. 72. P. 359-395.

48. Levin L.A. Hydrothermal Vents and Methane Seeps: Rethinking the Sphere of Influence / L. A. Levin, A. R. Baco, D. A. Bowden, A. Colaco, E. E. Cordes, et al. // *Front. Mar. Sci.* - 2016. – Vol. 3:72.
49. List of species of free-living invertebrates of the Russian Far Eastern seas. Exploration of the fauna of the seas. Sirenko B.I. (ed.).2013. V. 75 (83). 254 p.
50. Lundsten L., Barry J.P., Caillet G.M., Clague D.A., DeVogelaere A.P., Geller J.B. (2009a) Benthic invertebrate communities on three seamounts off Southern and Central California // *Marine Ecology Progress Series*. 2009. Vol. 374. P. 23–32.
51. Nisbet E.G. The habitat and nature of early life / E. G. Nisbet, N. H. Sleep // *Nature* – 2001. - Vol. 409. - P. 1083-1091.
52. Paull C.K., Hecker B., Commeau R., Freeman-Lynde R.P., Neumann C., et al. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa // *Science*, 1984. Vol. 226. P. 965–967.
53. Roberts J.M., Wheeler A.J., Freiwald A. Reefs of the deep: the biology and geology of cold-water coral ecosystems // *Science*. 2006. V. 213 P. 543–547.