

КРАТКИЙ ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ПОТЕНЦИАЛЬНО РУДОНОСНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА (заключительный этап, 2022 г.)

Глубоководные экосистемы северо-западной части Тихого океана имеют огромный природно-ресурсный потенциал и значение для функционирования Мирового океана и биосферы в целом. Истощение ресурсов суши и прибрежных акваторий, а также развитие технологий, способствовали значительному увеличению интереса к морским ресурсам за пределами шельфа. Это, в свою очередь, определило и основные угрозы океаническому глубоководью: разрушение местообитаний в результате тралений; изменение состава и структуры сообществ в результате вылова; деградация местообитаний под воздействием геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых; изменение условий обитания в связи с загрязнением Мирового океана, процессами акцидофикации и эвтрофикации, изменениями климата.

В последние десятилетия как отдельными государствами, так и в рамках международных проектов предпринимаются конкретные действия по охране и управлению состоянием глубоководных экосистем.

Членами консорциума на протяжении многих десятилетий ведутся работы по изучению глубоководных экосистем Мирового океана, анализу имеющихся здесь ресурсов, разработке методов исследования, подготовке рекомендаций по рациональному природопользованию и управлению морскими экосистемами. С 2020 года эти работы консолидированы в рамках реализации проекта «Фундаментальные проблемы изучения и сохранения глубоководных экосистем в потенциально рудоносных районах Северо-Западной части Тихого океана». Объединение усилий специалистов консорциума позволило добиться интенсификации исследований, возможности комплексного описания глубоководных экосистем, значимого синергетического эффекта, выражающегося в разработке новых методов и подходов в исследовании Мирового океана, появлению передовых работ в области биохимии, геохимии, фармакологии и др.

На третьем этапе (2022 г.) в рамках реализации проекта работы по проекту велись по 7 основным направлениям: описание донных ландшафтов и биологического разнообразия; биогеохимические исследования; микробиологические исследования; молекулярно-генетические и цитологические исследования; биохимические исследования;

фармакологические исследования; природоохранные. В рамках указанных направлений были поставлены следующие основные задачи:

1. Продолжить описание новых таксонов глубоководных организмов и общее зонирование глубоководных сообществ, как на континентальных склонах, в том числе на участках газогидротермальной активности и холодных высачиваний, так и в более глубоководных Курильской котловине и Курило-Камчатском желобе.

2. Продолжить исследования функциональных свойств глубоководных микробных сообществ. Реконструировать метаболические пути как отдельных микроорганизмов, так и микробных сообществ с целью понимания их роли в экологических процессах.

3. Обобщить данные о процессах биоаккумуляции микроэлементов организмами донной фауны глубоководных восстановительных биотопов Берингова моря.

4. Продолжить оценку генетического разнообразия массовых видов глубоководных гидробионтов, изучение адаптационных механизмов гидробионтов к обитанию в экстремальных условиях среды, механизмов регенерации.

5. С использованием биохимических методов и методов изотопного анализа выяснить трофические взаимосвязи и пищевые стратегии в глубоководных донных сообществах.

6. Продолжить массовый скрининг и экстракцию биологически активных веществ из глубоководных гидробионтов, получить индивидуальные соединения биологически активных веществ для установления их химической структуры.

7. На основе комплексного изучения данных глубоководных экосистем и оценки их уникальности дать практические рекомендации по рациональному природопользованию либо по организации в этих районах глубоководных ООПТ.

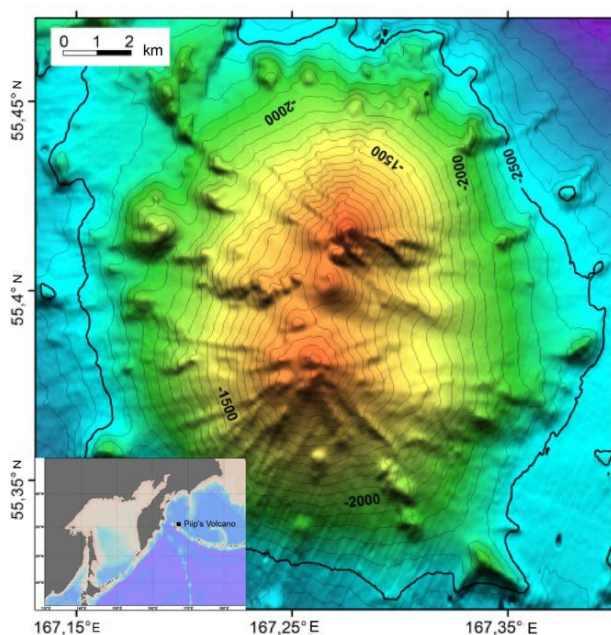
В ходе реализации работ на третьем этапе выполнены все поставленные задачи и получены следующие основные результаты:

1. Показано, что абиссальные сообщества Курильской котловины (Охотское море) достаточно устойчивы и приспособлены к постоянному дефициту кислорода на глубинах более 3000 м. Высокое содержание органического вещества в осадках Курильской котловины, вероятно, частично компенсирует негативное влияние дефицита кислорода на донную фауну. Обмен донной глубоководной фауной между Охотским морем и Тихим океаном происходит через глубоководные проливы между Курильскими островами.

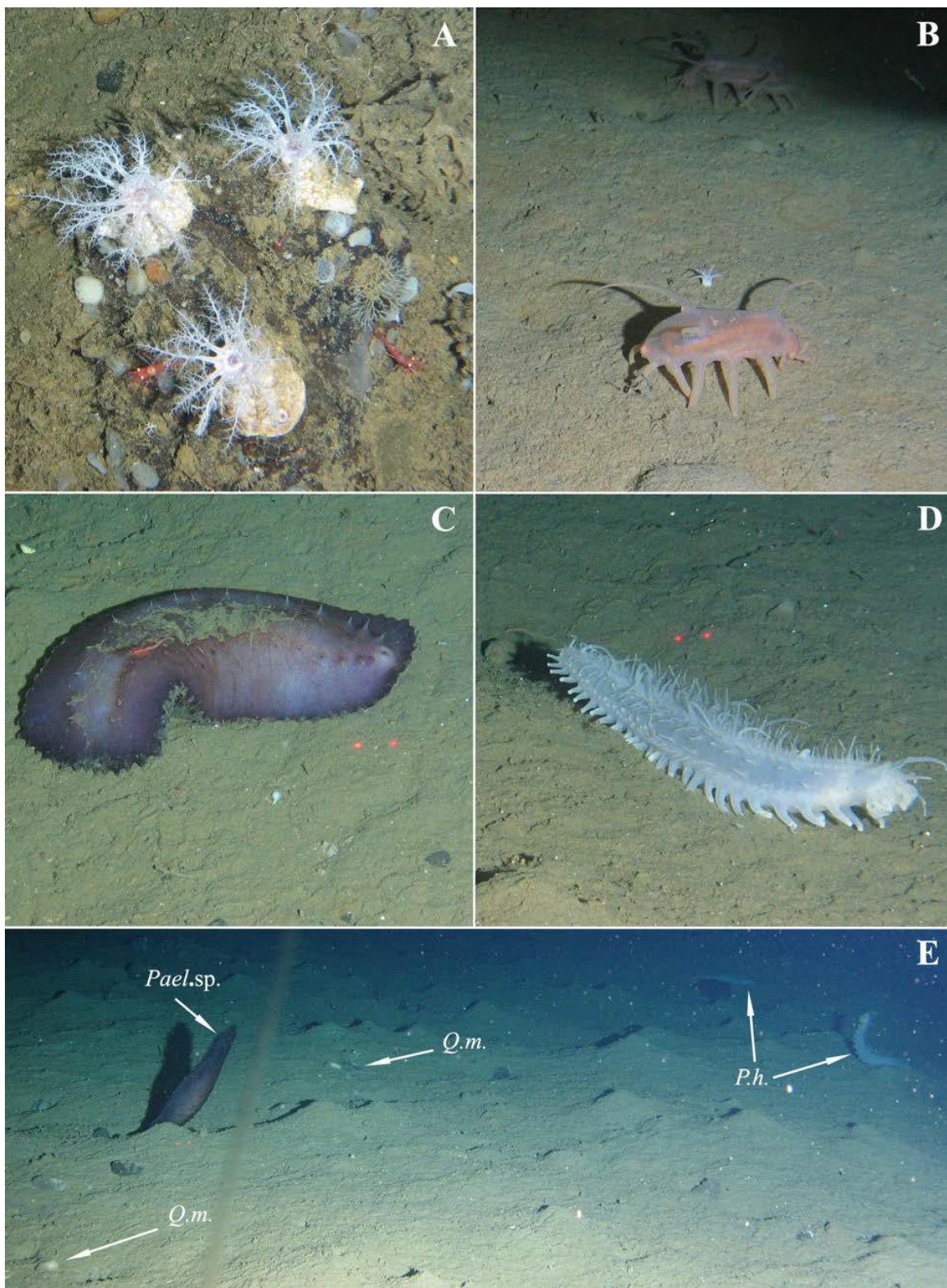
Высокая первичная продукция поверхностных вод и поступление богатых органическим веществом охотоморских вод через проливы Курильских островов обеспечивают разнообразную и обильную донную фауну в абиссальной и хадальной зонах Курило-Камчатского желоба.

Обилие макрофауны на дне эвтрофного Курило-Камчатского желоба намного выше, чем сообщалось ранее. Высокое гидростатическое давление, вероятно, является основным лимитирующим фактором, влияющим на вертикальное распределение животных в хадальной зоне желоба. Также на распределение донных животных в желобе большое влияние оказывает неоднородность субстрата и неустойчивость на его склонах. Небольшое количество видов макрофауны, сумевших приспособиться к донным местообитаниям желоба, образует обильные поселения. Ряд доминирующих на дне желоба видов имеют хемосинтетических эндосимбиотических бактерий. Это свидетельствует о важности хемосинтетического органического углерода для поддержания донных сообществ на максимальных глубинах желоба.

Проведен сравнительный анализ структуры сообществ двух различающихся восстановительных биотопов в Беринговом море - гидротермальных выходов вулкана Пийпа и метановых высачиваний на Корякском склоне. Оба биотопа характеризуются повышенным содержанием метана в придонной воде и целого ряда химических элементов. В гидротермальном биотопе среда обитания в целом более агрессивная, что отражается на видовом богатстве: на вулкане Пийпа в общей сложности отмечено 129 видов макро- и мегафауны, в то время как на метановых выходах Корякского склона 335 видов. В гидротермальных сообществах на вулкане Пийпа отмечена более высокая численность и более агрегированная структура поселений ряда видов по сравнению с районом метановых выходов. Кроме того, гидротермальное сообщество отличается более высокой долей облигатных для восстановительных условий видов (степенью облигатности).



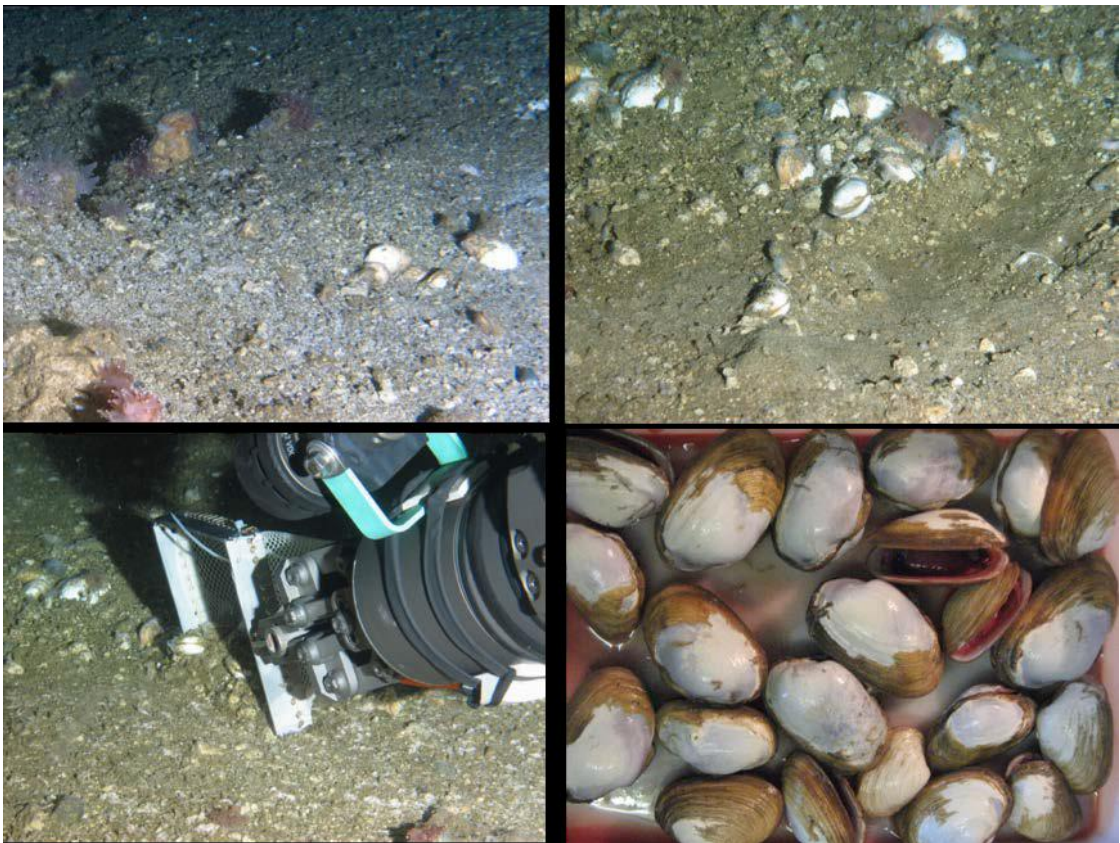
Расположение вулкана Пийпа и его батиметрическая карта



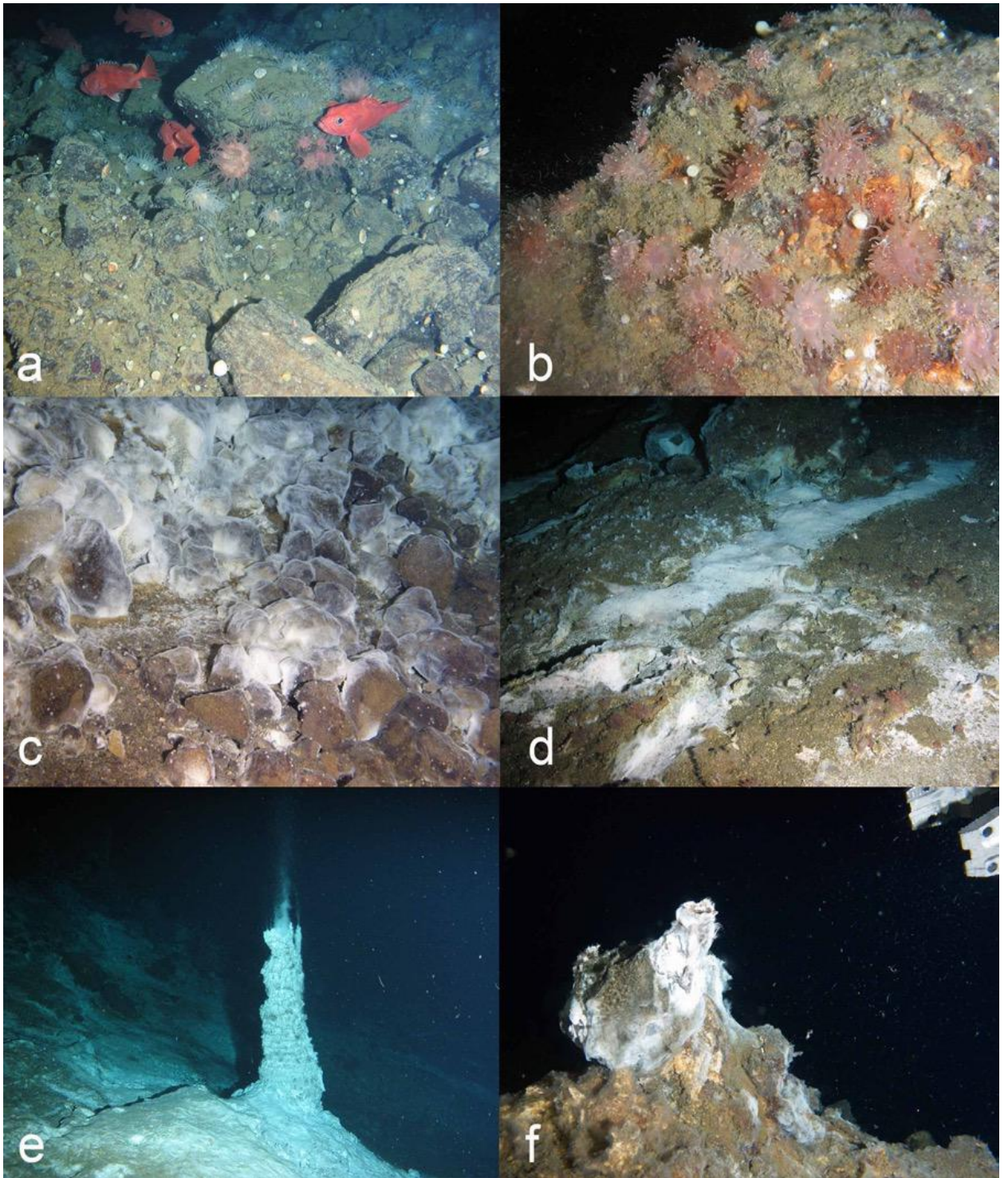
Исследуемые виды голотурий: (A) *Psolidium* sp.; (B) *Scotoplanes kurilensis*; (C) *Paelopatides* sp.; (D) *Pannychia henrici*; (E) Пример совместного нахождения нескольких видов детритофагов, глубина около 1950 м (P.h. – *Pannychia henrici*; Pael.sp. – *Paelopatides* sp.; Q.m. – *Quatuoralisia malahovi*). Расстояние между лазерами 45 мм.



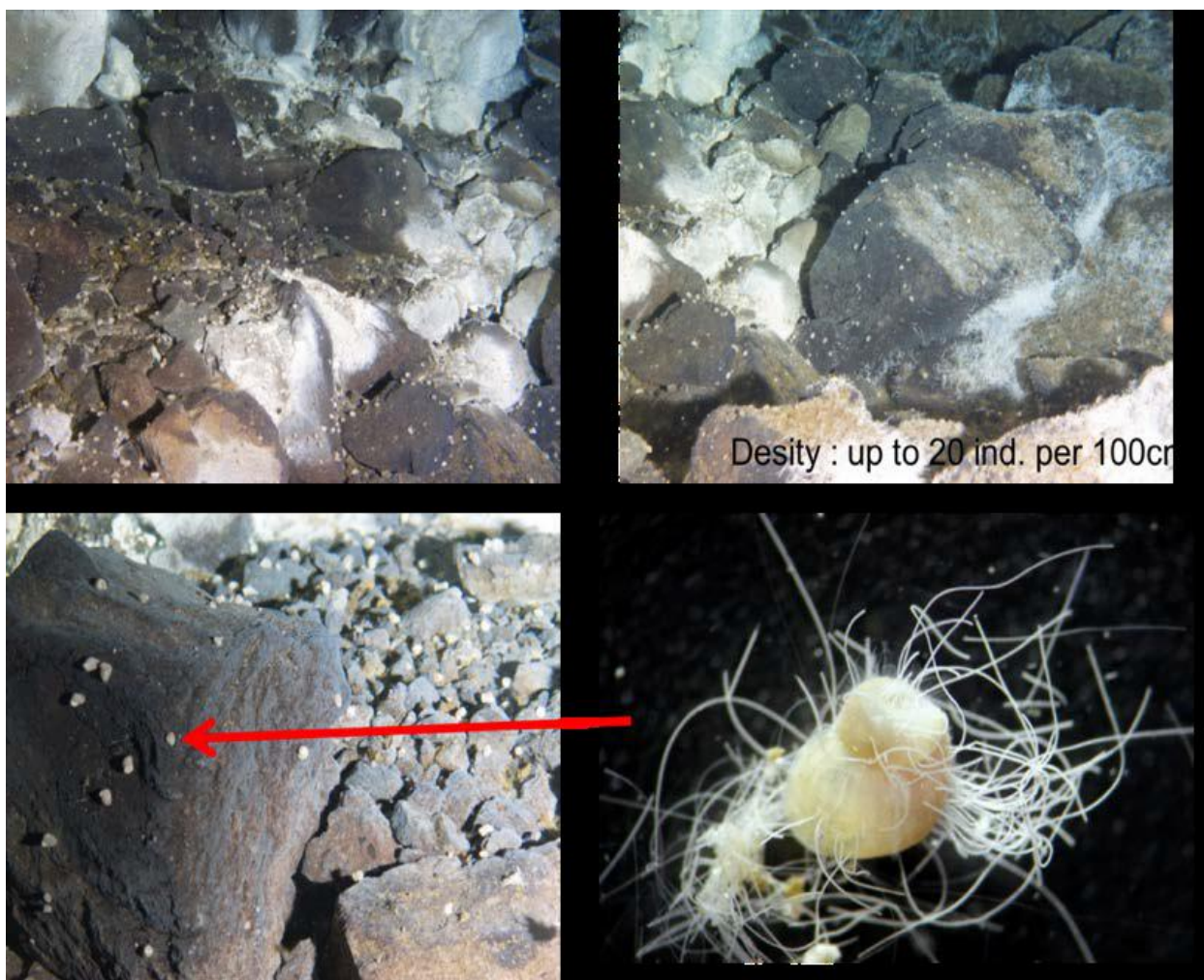
Vulcanella koltuni sp. nov. на Южной вершине вулкана Пийпа (глубина 469,5 м) рядом с выходом гидротермального флюида



Calyptogena pacifica (сем. Vesicomuylidae), южная вершина вулкана Пийпа, глубина 460 м



a) неактивный участок Северной вершины; b) неактивный участок Южной вершины; c) бактериальные маты, покрывающие дациты на Северной вершине; d) бактериальные маты, маркирующие трещины в карбонатах на Южной вершине; e) ангидритовая активная гидротермальная постройка на Северной вершине; f) карбонатная активная гидротермальная постройка на Южной вершине



Поселения и внешний вид брюхоногого моллюска *Provanna* sp., нового для науки облигатного гидротермального вида

Подготовлено гидробиологическое описание донных сообществ Гамовского каньона, описаны особенности состава и структуры сообществ, вертикальная зональность. Высокое биоразнообразие в пределах относительно небольшой локальной акватории, близкое расположение профильных организаций, научного флота и возможность проведения работ в любой сезон года определяют высокий потенциал Гамовского каньона как модельного полигона для проведения долговременных мониторинговых работ глубоководных экосистем дальневосточных морей России.

Описано 12 новых для науки видов из различных таксонов макро- и мейофауны, исследуемых глубоководных экосистем. Уточнены диагнозы таксонов, области распространения, систематическое положение и особенности биологии. Получены данные о нуклеотидных последовательностях ядерной и митохондриальной ДНК широко круга таксонов (рыбы, губки, актинии, немуртины, голотурии, полихеты, ракообразные). Выявлены филогенетические отношения таксонов, генетическое разнообразие, особенности географического распространения видов, вертикальной приуроченности.

Выполнена модернизация системы информационной поддержки операторов ТНПА. Предложенная система на основе навигационной информации позволяет выработать рекомендации операторам ТНПА, а также предупреждать возникновение потенциально опасных ситуаций в процессе работ. Проведена модернизация системы программного управления АНПА ММТ-3500, которая позволяет оптимизировать использование вычислительных ресурсов аппарата, а также расширить возможности по заданию более сложных миссий и передаче телеметрической информации. Помимо этого, был разработан новый метод позиционно-силового управления АНПА, оснащенными ММ. Синтезированная на базе этого метода система управления позволит эффективно выполнять распространенные контактные операции с помощью ММ, при этом не требуя установки дорогих многокомпонентных силовых датчиков.

Для повышения точности позиционирования АНПА разработана высокоточная комбинированная навигационная система, позволяющая определять местоположение аппарата в абсолютной СК. Созданная система, основываясь на информации о пеленге АНПА, даваемой произвольным количеством приемо-передающих элементов (гидрофонов), позволит получать координаты АНПА с погрешностью, не превышающей 2 м. При этом были исследованы различные конфигурации установки приемо-передающих устройств для пеленга АНПА.

Выполнена программная реализация алгоритма идентификации заранее известных объектов для выполнения манипуляционных операций. Созданное ПО позволяет совмещать облака точек целевого объекта и отсканированного пространства, при этом осуществляется проверка точности наложения облаков точек с помощью проверочных траекторий. Реализован алгоритм взаимодействия с СТЗ, включающий в себя подключение, прием, хранение данных, поступающих от СТЗ, а также управление параметрами этой системы. Кроме того, была проведена калибровка стереокамеры для работы под водой при отсутствии естественного освещения. Выполнены бассейновые и морские эксперименты, результаты которых подтвердили работоспособность СТЗ и реализованных алгоритмов.

Спроектирован и изготовлен ММ для АНПА ММТ-3500. Разработаны, изготовлены и смонтированы блоки управления электроприводами его степеней подвижности. Осуществлен монтаж изготовленного ММ для проведения стендовых испытаний. Также был разработан комплекс ПО, обеспечивающий управление этим ММ. Этот комплекс позволяет обрабатывать информацию, поступающую от СТЗ, и на ее основе формировать программные сигналы управления ММ. Разработанное ПО является модульным, что обеспечивает его стабильную работу с различными типами подключаемых устройств

2. Проведено обобщение данных по биоаккумуляции большой группы микроэлементов донными сообществами восстановительных биотопов в Беринговом море. Несмотря на различия биотопов, биоаккумуляция микроэлементов характеризуется общими чертами. Источниками химических элементов для организмов служат диффузные гидротермальные флюиды на вершинах вулкана Пийпа и холодные метановые высачивания дна Корякского склона, обогащенные большинством элементов по сравнению с океанской водой (до 10^4 раз). Сильный градиент концентрации способствует миграции микроэлементов в окружающую морскую воду с последующим их рассеиванием в океане. Главной мишенью биоаккумуляции не только эссенциальных (Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mo), но и потенциально токсичных (As, Cd, Pb, U, W) являются мягкие ткани организмов с высоким содержанием органического углерода (в среднем около 50 % C_{org}). Выявлены высокие значения фактора биологического концентрирования BCF (от 10^3 до 10^7) для изученных элементов, особенно для Co, Ni, Cu, Zn и Cd.

Изучение вертикальных закономерностей распределения ВПАУ и РПАУ в Центральной котловине Японского моря показало, что они в основном определяются гидрологическим и биогеохимическим режимами района исследований.

3. На примере отдельных видов иглокожих изучены механизмы регенерации. Проведено секвенирование транскриптома продольной мышечной ленты голотурии с целью выявления генов, которые могут принимать участие в регенерации. Выявлено 6 генов транскрипционных факторов и 7 генов матриксных металлопротеиназ, проявляющих дифференциальную экспрессию при миогенезе. Найденные гены могут быть вовлечены в регенерацию мышц. Описан процесс регенерации руки у морской лилии *Parahyocrinus sp. cf. cyanae*.

Проведены исследования анатомии глубоководных гидробионтов с целью выявления адаптационных механизмов, показаны особенности строения морских звезд и моллюсков, связанные с существованием в экстремальных условиях обитания. Впервые описан механизм образования монокристаллов на поверхности раковин глубоководных гребешков.

4. С использованием анализа состава жирных кислот и соотношений стабильных изотопов углерода и азота выявлены пищевые стратегии и трофические связи в сообществах восстановительных биотопов Берингова моря. Выявлены виды, потребляющие органическое вещество хемосинтетического происхождения. Показано, что значительный приток органического вещества из фотического слоя обеспечивает высокое обилие и разнообразие гидробионтов на абиссали Берингова моря.

5. Проведено метагеномное профилирование и функциональная характеристика некультивируемого микробного разнообразия донных осадков у берегов полуострова Камчатка. Установлено крайне высокое разнообразие прокариот и присутствие в большом количестве неидентифицированных таксонов. Большинство последовательностей (более 98 %) были классифицированы только на уровне классов и порядков.

Исследована структура липоолигосахарида продуцируемого бактерией *Idiomarina zobellii* КММ 231^T.

Описан новый вид *Microbulbifer okhotskensis*.

Изучено биоразнообразие культивируемых мицелиальных грибов, выделенных из донных отложений, и беспозвоночных (губок и голотурий) в глубоководных донных сообществах, сформировавшихся на подводном вулкане Пийпа, Берингово море. Выделено 68 изолятов грибов, относящихся к 11 таксонам из 3 родов (*Aspergillus*, *Penicillium* и *Cladosporium*).

Проведен сравнительный анализ культуральных и молекулярных методов биоиндикации для выявления и описания типов нефтегазовых залежей. Наиболее перспективным оказался метод оценки анаэробной деградации углеводов. Изучение генов-маркеров *mcrA*, *pmoA*, *dsrB*, *alkBB*, *bssA* и *masD* позволило выделить участки с разным типом отложений. С помощью культуральных методов описана способность аэробных и факультативно-анаэробных углеводородокисляющих микроорганизмов к анаэробной утилизации углеводов.

6. Выделены индивидуальные соединения биологически активных веществ различной природы (липоолигосахариды, хитиноидозиды, гликозиды, церамиды и цереброзиды, алкалоиды, батзелладины, хлорины, жирные кислоты и др.), изучена их структура и активность. Показана перспективность изучения глубоководных морских микроорганизмов и беспозвоночных как источников новых природных веществ, обладающих уникальными структурными особенностями и фармакологическим потенциалом.

Описан широкий спектр глио- и нейротропного действия синаптамида, подчеркивающих его высокий терапевтический потенциал. Исследовано влияние биологически активной добавки, содержащей композицию этаноламидов жирных кислот, полученной из глубоководного кальмара *Berryteuthis magister*, на процессы нейровоспаления и памяти в гиппокампе мыши. Показано, что специфическое действие отдельных компонентов комплекса NAE обеспечивает широкое терапевтическое применение изучаемой биологически активной добавки с практически полным отсутствием негативных побочных эффектов.

Продемонстрированы впечатляющие фототоксические свойства хлорина ЕТРА, выделенного из экстракта офиуры *Ophiura sarsii*, in vitro на панели клеток рака молочной железы и глиобластомы, продемонстрирован огромный потенциал этого природного хлорина в качестве фотосенсибилизатора для противоопухолевой фотодинамической терапии in vivo в мышинной модели. Кроме того, выделены новые для семейства Ophiuraidea хлорины и исследованы их фототоксические свойства в сравнении с известным фотосенсибилизатором феофорбидом а в клетках рака молочной железы человека. Описана Wnt-ингибирующая активность каррагинанов, полученных из морских водорослей. Выяснено, что низкомолекулярные каппа- и лямбда- каррагинаны проявляют дозозависимое ингибирование метаболизма и жизнеспособности клеток карцином толстой кишки и пищевода.

7. Предложено научное обоснование придания вулкану Пийпа статуса «особо охраняемой природной территории» (ООПТ). Накопленные к сегодняшнему дню данные позволяют рассматривать экосистему вулкана Пийпа (Берингово море) как уникальную и нуждающуюся в сохранении.

Для ряда гайотов Императорского хребта выделены донные ландшафты, которые можно рассматривать как перспективные для природоохранной деятельности и дальнейшего изучения: потенциальные уязвимые морские экосистемы, которые характеризуются наличием плотных поселений восьмилучевых кораллов горгонарий (*Octocorallia*) (северо-запад плосковершинной части гайота Коко); район развития массовых поселений губок *Hexactinellidae* (*Spongia*) (крупные стебельчатые и воронковидные формы) на северном склоне горы Джингу; ландшафты с доминированием иглокожих (морские ежи, офиуры и голотурии). Детальное изучение таксономического состава макро- и мегафауны Императорского хребта представляет ценность для выявления возможных биогеографических границ и реконструкции истории формирования батидальной фауны этого района. Полученные нами сведения вносят вклад в формирование базы данных, необходимой для разработки научно обоснованной методологии при выработке мер по рациональному использованию и сохранению биоресурсов подводных поднятий.