

КРАТКИЙ ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ПОТЕНЦИАЛЬНО РУДОНОСНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА (первый этап, 2020 г.)

Перспективные рудоносные участки обнаружены в самых разных районах Мирового океана, в том числе и на акваториях северо-западной части Тихого океана. В то же время, как показывают наши последние исследования с помощью подводных робототехнических средств, в местах сосредоточения значительных запасов железомарганцевых конкреций (ЖМК), кобальтоносных марганцевых корок (КМК) и глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в этой части Тихого океана существуют уникальные глубоководные экосистемы с высоким биологическим разнообразием и биоресурсным потенциалом. Эти экосистемы, в свою очередь, при их сохранении и рациональном природопользовании могут обеспечить последующие поколения уникальным биологическим материалом как для решения проблем продовольственной безопасности, так и получения биологически активных соединений для новых лекарственных препаратов, в том числе с противоопухолевой и антибактериальной активностью. В последние годы все более остро встает вопрос о сохранении этих уникальных экосистем, включая придание им особого природоохранного статуса. В связи с этим, решения о возможности эксплуатации этих экосистем в плане разработок минерального сырья или добычи здесь глубоководных биологических ресурсов, с одной стороны, или же выбор для них природоохранного статуса, должны основываться только на достоверной научной информации об особенностях функционирования этих экосистем и их устойчивости в условиях воздействия внешних факторов. Именно такой подход применяется к принятию соответствующих решений в отношении таких акваторий и в Международном районе Мирового океана, и в районах национальных юрисдикций государств, ратифицировавших Конвенцию о сохранении биологического разнообразия ООН.

В частности, международный регулятор – МОМД (Международный орган по морскому дну), созданный в рамках Конвенции по морскому праву ООН, в качестве обязательного условия перехода от геологоразведки к получению лицензий на разработки минерального сырья в Международном районе Мирового океана определяет проведение в данном районе комплексных экологических исследований, включающих описание донных ландшафтов, инвентаризацию биологического разнообразия, изучение особенностей

функционирования данной глубоководной экосистемы с целью определения степени ее уникальности и устойчивости при воздействии внешних факторов и выработки наиболее безопасных условий природопользования. Так, например, Германия в 2018–2019 гг. в ходе морских экспедиций начала масштабные экологические исследования на своих лицензионных участках в районе Кларион-Клиппертон в центральной части Тихого океана для выполнения условий МОМД при получении лицензии на добычу ЖМК.

Одним из принятых в международной практике маркеров по оценке уникальности донных экосистем и оценке влияния на них антропогенных факторов является разнообразие и распределение донных «коралловых садов» и «губочных рифов», создающих условия для формирования уникальных донных сообществ.

В Северной части Тихого океана с 2012 года в рамках Северо-Тихоокеанской Комиссии по рыболовству в открытом море (NPFC), действующей на основе Конвенции о сохранении биоресурсов открытого моря, определены подходы к выделению т.н. уязвимых морских экосистем (УМЭ) на основе скоплений мягких кораллов и горгонарий, а также распределения глубоководных «коралловых садов». В то же время, в 2018 г. эта же Комиссия признала недостаточность в научных знаниях по распространению глубоководных кораллов и губок в районе Императорского хребта, что не позволяет эффективно регулировать условия глубоководного рыболовства в этом районе Тихого океана. В Атлантике Северо-Атлантическая Комиссия по рыболовству (NEAFC), регулирующая условия добычи биоресурсов в этом районе Мирового океана, также определяет ограничения донного промысла, учитывая состояние индикаторных групп УМЭ (глубоководные кораллы и губки).

В случае обнаружения уникальных донных экосистем, в рамках международного права предусмотрена постановка вопроса об организации в данном районе глубоководных ООПТ, режим которых существенно ограничивает или исключает природопользование на данных участках морского дна.

Уникальные донные экосистемы в северо-западной части Тихого океана, приуроченные к районам активной вулканической деятельности, гидротермальной активности и газовым выходам, в значительной степени совпадают с местами сосредоточения ценных минеральных ресурсов, особенности рудообразования которых также связаны с геологическими и геохимическими особенностями в этом районе Мирового океана.

Вскоре после открытия сообществ глубоководных организмов на глубине около 3000 м в Мексиканском заливе существующих в условиях высоких концентраций метана и сероводорода, последовали многочисленные сообщения о новых «оазисах» на дне

океана, связанных с выходами из осадка метана и других восстановленных соединений. В сообществах метановых выходов (точно так же, как вблизи гидротермальных источников на дне океана) в роли продуцентов выступают хемоавтотрофные микроорганизмы. Некоторые из этих бактерий являются симбионтами многочисленных многоклеточных животных, обитающих в таких глубоководных «оазисах».

Выходы метана (т.н. метановые сипы) — распространенное явление на дне Мирового океана, они встречаются в большом диапазоне глубин и в различных геологических условиях. Для понимания процессов, влияющих на климат Земли, важно знать источники поступления в атмосферу и динамические характеристики потоков этого парникового газа, второго по значению после диоксида углерода. Хотя глубоководные сипы не считаются значительным источником метана, вклад относительно мелководных эпиконтинентальных высачиваний в баланс атмосферы планеты может быть выше, чем полагают, особенно если учесть пространственную протяженность зон разгрузки метана. Кроме того, районы его выходов представляют интерес с точки зрения природопользования как индикаторы месторождений углеводородов. В то же время, развивающиеся в восстановительных условиях биологические системы уязвимы для антропогенного воздействия, и, выбирая режим возможной эксплуатации «сиповых» экосистем, следует хорошо знать их особенности. Перечисленные обстоятельства говорят о несомненной важности комплексного изучения районов метановых выходов, включая исследование населяющих их биологических сообществ.

В морях России выходы метана и связанные с ними сообщества многоклеточных животных ранее были отмечены только в Охотском море и в море Лаптевых. В Беринговом море холодные метановые высачивания не были описаны, однако на континентальном склоне в результате исследований сейсмоки в 1988 и 2007 гг. были определены зоны, которые потенциально могли содержать газогидраты. На существование в данных районах восстановительных условий указывало также присутствие в траловых уловах створок двустворчатых моллюсков плиокардиин. В частности, на основании этих находок было сделано предположение о наличии на Корякском склоне гидротермального района, где были выполнены сборы этих моллюсков.

В настоящее время в наших дальневосточных морях богатые донные сообщества в зонах гидротермальной активности и холодных метановых сипов обнаружены в Беринговом, Охотском и Японском морях. Эти уникальные донные сообщества активно изучаются в рамках глубоководных морских экспедиций с участием ННЦМБ ДВО РАН, ИО РАН, ТОИ ДВО РАН.

С внерифтовыми поднятиями (поднятия вулканического происхождения или погрузившиеся архипелаги) связаны не только многочисленные рудопоявления, но и разнообразные сообщества донной и пелагической фауны. В отличие от обычно разреженных биологических сообществ абиссальных равнин, подводные горы и хребты оказываются районами повышенного биоразнообразия, поскольку могут являться опорными точками для расселения глубоководной фауны (рефугиями и фаунистическими центрами), служить биогеографическими барьерами и границами или, в силу особых геохимических условий, формировать условия для функционирования уникальных глубоководных экосистем. В то же время, глубоководные экосистемы подводных гор признаны уязвимыми объектами в Мировом океане (т.н. уязвимые морские экосистемы – УМЭ), поскольку их восстановление после химического загрязнения, механических повреждений донными тралами или в результате чрезмерного вылова гидробионтов происходит крайне медленно, по сравнению с мелководными экосистемами. Особенно это важно для крупных и медленно растущих прикрепленных организмов – кораллов и губок, формирующих уникальные донные сообщества на склонах подводных поднятий. Эти самые долгоживущие обитатели глубоководья обеспечивают субстрат и условия для многочисленных донных организмов и тем самым выполняют важнейшую средообразующую функцию. Особенно актуально сохранение таких экосистем в условиях активизации добычи минеральных ресурсов из океанских глубин, а также в районах активного глубоководного рыболовства, где донные сообщества подвергаются разрушительным воздействиям донных тралов. По этим же причинам для изучения уязвимых глубоководных экосистем существенно ограничены возможности применения традиционных дночерпателей, тралов и драг и могут применяться только подводные робототехнические средства, не наносящие повреждений донным ландшафтам и сообществам и обеспечивающие «штучное» изъятие биологических объектов для лабораторных исследований. Именно эти технологии уже применяются и будут применяться в экспедициях ННЦМБ ДВО РАН по изучению уникальных глубоководных экосистем северо-западной части Тихого океана. Незаменимым средством для выполнения работ, связанных с исследованием гидротермальной деятельности, картированием донных ландшафтов, сканированием морских осадков, поиском минерального сырья и т.п. являются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), способные обеспечить в режиме реального времени получение большого объема информации и выполнение широкого спектра задач. Для этих целей крайне важно оснащение используемых и создаваемых робототехнических комплексов высококачественными системами и устройствами навигации и управления с элементами

искусственного интеллекта для автоматического выполнения подводных исследовательских операций, что позволит снизить нагрузку, оказываемую на операторов ТНПА, а также повысить качество и скорость выполнения дорогостоящих подводных работ. В рамках серии экспедиций с участием ННЦМБ ДВО РАН, ИО РАН и ТОИ ДВО РАН в северо-западной Пацифике с использованием новых робототехнических средств уникальные глубоководные сообщества с высоким биологическим разнообразием обнаружены на склонах подводных гор Императорского хребта и подводных вулканах Берингова моря.

Для обеспечения высокой сохранности ценного биологического материала из глубоководных экосистем необходимы особые условия его хранения и последующей обработки. Так, материалы из глубоководных экспедиций в северо-западной части Тихого океана поступают в уникальный роботизированный «Морской Биобанк» ННЦМБ ДВО РАН, что позволяет использовать данный материал для последующих молекулярно-биологических, генетических, биохимических и фармакологических исследований. Для этих Условия и технологии хранения биологического материала в «Морском Биобанке» ННЦМБ ДВО РАН соответствуют самым высоким мировым стандартам.

Ключевые группы морских организмов в глубоководных сообществах привлекают большое внимание, в том числе как индикаторы состояния глубоководных экосистем. Однако многие из этих групп остаются крайне слабо изученными, что требует продолжения масштабных работ по инвентаризации глубоководной биоты, в том числе и в северо-западной части Тихого океана.

В последнее десятилетие благодаря использованию глубоководных технических средств ведутся активные работы по описанию биоразнообразия глубоководных экосистем северо-западной части Тихого океана. В серии глубоководных экспедиций, организованных ННЦМБ ДВО РАН, собраны сотни новых видов морских организмов и описаны уникальные донные сообщества с очень высоким биологическим разнообразием. Однако мы еще недостаточно понимаем особенности функционирования этих экосистем: потоки органического вещества и его рециркуляции в донных осадках, трофические связи и пищевые цепи в сообществах, биохимические особенности глубоководных организмов и их генетическое разнообразие, определяющее устойчивость популяций. Особенно актуальны эти исследования применительно к уникальным глубоководным экосистемам, расположенным в рудоносных районах северо-западной Пацифики, в связи с потенциальными негативными воздействиями в результате возможной добычи минерального сырья.

Для определения механизмов функционирования глубоководных экосистем и трофических взаимоотношений в сообществах донных организмов большое значение имеет исследование маркерных жирных кислот, позволяющее понять пищевые источники для отдельных гидробионтов. В частности, такой подход впервые был применен при исследовании уникальной экосистемы подводного вулкана Пийпа, характеризующейся сложным вертикальным зонированием на различных глубинах, включая коралловые и губочные «риффы» на склонах и масштабные гидротермальные выходы на вершине вулкана. Впервые начаты работы по составлению профиля липидов глубоководных кораллов наших дальневосточных морей.

Глубоководные организмы являются перспективным источником различных соединений, обладающих высокой биологической активностью. Многие из этих соединений демонстрируют выраженную цитотоксичность в отношении ряда линий раковых клеток человека, высокую антипролиферативную и антибиотическую активность. Морские грибы, полученные из глубоководных осадков, дали множество новых метаболитов, включая индольные дикетопиперазины, индоловые и хиназолиновые алкалоиды, производные стеригматоцистина, бензодиазепиновые алкалоиды, поликетиды, спиродитерпеноиды, сесквитерпеновые хиноны, сорбициллиноиды и триходероны с сильной цитотоксической, антибиотической и противовирусной активностью. Глубоководная микрофлора рассматривается в настоящее время самым перспективным источником получения новых групп антибактериальных препаратов, поскольку уже около 80% антибиотиков, полученных из наземного сырья, утратили свою эффективность.

Исследования глубоководных организмов как источников уникальных биологически активных соединений на акваториях северо-западной Пацифики активно ведутся биохимиками ТИБОХ ДВО РАН, ННЦМБ ДВО РАН и ДВФУ.

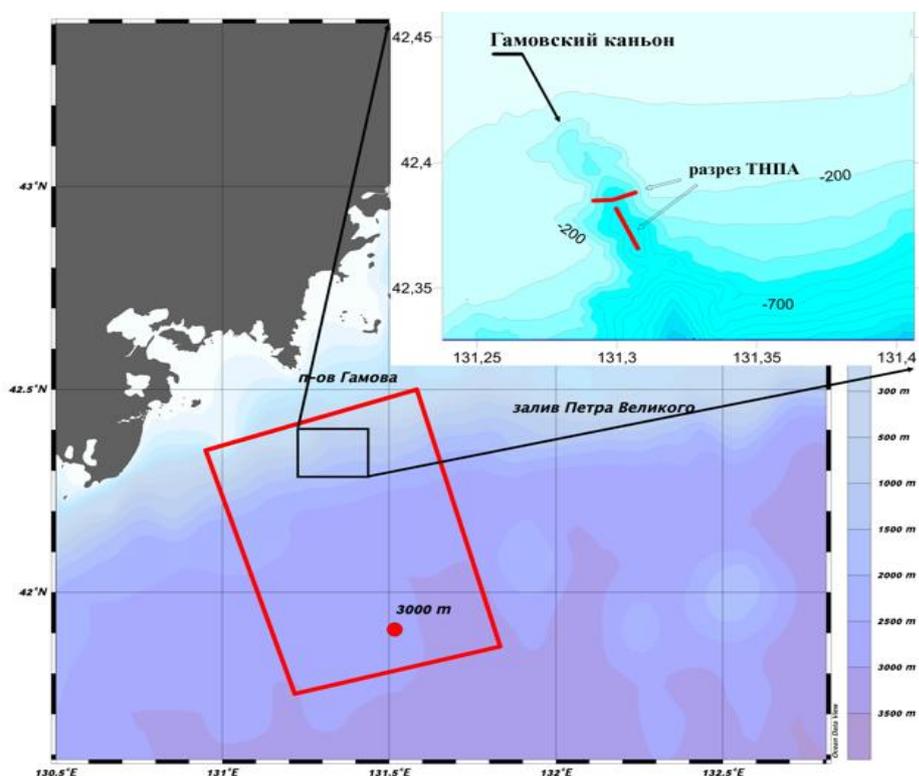
В последние годы активный поиск противораковых средств, действующих на молекулярные сигнальные пути, отвечающие за пролиферацию раковых клеток, привёл к появлению нескольких таргетных лекарств. Кроме того, недавние исследования показали, что экстракты и вещества, полученные из морских источников, могут обладать не только цитотоксической противоопухолевой активностью, но также, экстракты морских беспозвоночных содержат соединения, обладающие специфической противоопухолевой активностью.

В связи с этим, при оценке уникальности глубоководных экосистем в мировой практике все более учитывается их потенциальная ценность и значимость в качестве источников уникального биологического сырья для новых лекарственных средств.

Задачи изучения, рационального природопользования и сохранения уникальных глубоководных экосистем, расположенных в перспективных для добычи глубоководных минеральных ресурсов рудоносных районах северо-западной Пацифики, и определили спектр запланированных исследований, выполняемых на этапах данного научного проекта. Полученные новые данные о реальном биологическом разнообразии этих экосистем, особенностях их функционирования, их продукционном потенциале и возможностях восстановления при различных внешних воздействиях, а также возможностях их рачительного природопользования лягут в основу принятия научно-обоснованных решений при рассмотрении вопросов о возможности потенциальной разработки донных месторождений минерального сырья в этих районах Мирового океана.

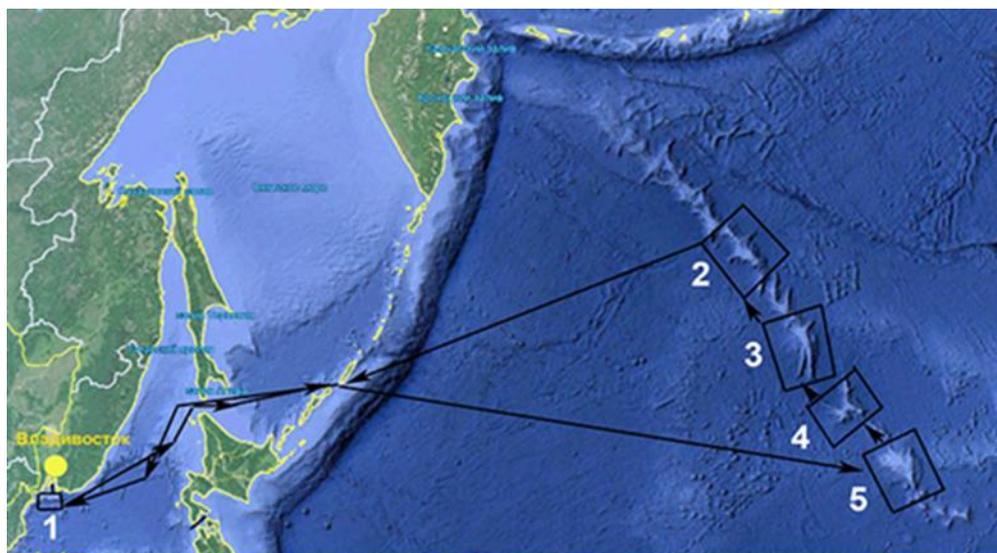
По итогам выполнения 1-го этапа проекта следует отметить следующие важнейшие научные результаты:

Получены новые данные о пространственной структуре глубоководных сообществ Гамовского каньона (Японское море), района холодных метановых высачиваний Чукотского (Коряжского) склона и гидротерм подводного вулкана Пийпа (Берингово море). Описаны холодные высачивания метана (сипы) на Чукотском склоне Берингова моря, определяющие структуру и функционирование донных биоценозов на различных глубинах континентального склона.



Карта-схема района работ (Гамовский каньон)

Впервые получены данные о донных ландшафтах и биоразнообразии глубоководных экосистем подводных гор Императорского Хребта (северо-западная часть Тихого океана). С использованием данных, полученных с помощью ТНПА «Comanche 18», показана сложная вертикальная зональность на склонах гайотов, описаны особенности распределения и структура донных сообществ Императорского хребта. Выявлены организмы-индикаторы уязвимых глубоководных экосистем северо-западной части Тихого океана – глубоководные кораллы *Ostocorallia* и губки *Hexactinellidae*, дана их биогеографическая характеристика. Впервые показано изменение фауны кораллов *Ostocorallia* в широтном направлении на горах и гайотах хребта, выявлена биогеографическая граница в районе Императорского хребта. Описано значительное биотопическое разнообразие, даны геологические характеристики склонов подводных поднятий и прилегающего плато, определяющие неравномерность распределения биотических комплексов и отдельных таксонов гидробионтов. Значительно расширен список индикаторных организмов глубоководных экосистем, сделаны уникальные и важные для биогеографии находки новых для науки видов животных. Отмечена роль расположенной в меридиональном направлении цепи подводных гор и гайотов Императорского хребта в качестве одной из биогеографических границ, определяющих распространение глубоководных гидробионтов в северной части Тихого океана.



Карта-схема района работ: 1 – Гамовский каньон (тестовый полигон, Японское море), 2 – гайот Нинтоку, 3 – гайот Оджин, 4 – гора Джингу, 5 – гайот Коко

В рамках изучения глубоководной ихтиофауны в районе подводных гор Императорского хребта (зона активного глубоководного рыболовства) отмечены 80 видов

рыб из 60 родов и 38 семейств. Впервые для данного района обнаружены 4 вида глубоководной ихтиофауны. Большая часть ихтиофауны представлена донными и придонными видами рыб (14 донных, 23 придонных или бенто-пелагических, 43 мезопелагических видов).

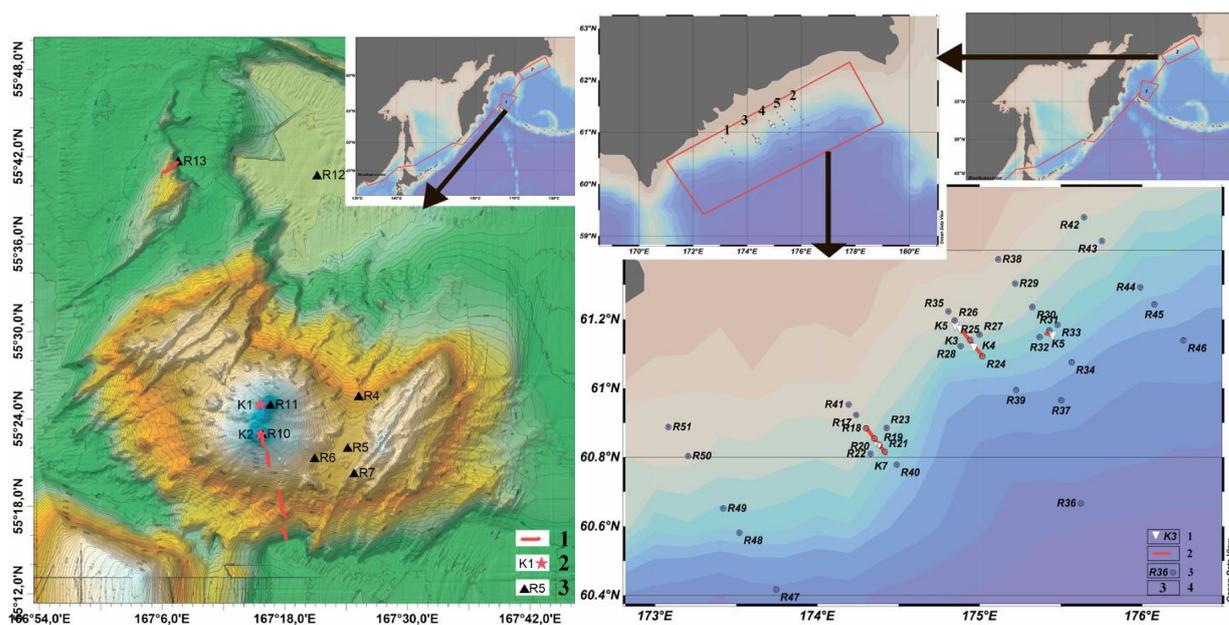
Обнаруженные на Чукотском склоне углеводородные высачивания на горизонте глубин от 400 до 700 м представляют собой новый масштабный район восстановительных биотопов в северной части Тихого океана. Сообщества сипов Хатырского прогиба являются самыми северными в мире современными восстановительными сообществами, в которых встречены двустворчатые моллюски плиокардиины. Дана характеристика состава и структуры сообществ в районе обнаруженных метановых выходов. Предварительный анализ показал значительные различия в составе и структуре сообществ трех обследованных диапазонов глубин в реакции фоновой фауны на высачивания восстановленных соединений. Наиболее заметные изменения биоты вблизи высачиваний наблюдались на максимальных глубинах (647–695 м), где формировались сообщества с доминированием облигатного для восстановительных условий симбиотрофного вида двустворчатых моллюсков *Calyptogena pacifica*, играющего ландшафтообразующую роль. На меньших глубинах наблюдалось уменьшение роли симбиотрофных животных, а в качестве ландшафтообразующих выступают виды фона: на глубинах от 417 до 429 м – морской еж *Brisaster latifrons*, а в сообществах в горизонте 400–402 м – актиния *Sagartiogeton cf. californicus*. Сообщества метановых выходов с ландшафтообразующими двустворчатыми моллюсками *Calyptogena pacifica* на глубинах 695–647 м отличались максимальным числом видов (>170), в 5–6 раз превышающим таковое в сообществах на других глубинах. Здесь отмечено максимальное число видов, не встреченных на других глубинах (>135). Кластерный анализ на основе количественных данных показал значительные отличия структуры и состава сообществ на глубинах 647–695 м от более мелководных сообществ. Помимо ландшафтообразующих видов *Brisaster latifrons* и *Sagartiogeton cf. californicus*, сообщества на глубинах от 400 до 429 м характеризовались доминированием полихет трех семейств (*Nephtyidae*, *Cossuridae* и *Paraonidae*) над остальными группами макрофауны (50–60%). В целом, по предварительным данным можно утверждать, что наибольшее влияние метановых выходов на окружающие сообщества проявлялось на наибольших глубинах в рамках диапазона глубин, где были отмечены данные высачивания на Чукотском склоне.

Получены новые данные о разнообразии и видовом составе массовых и доминирующих групп донных беспозвоночных в глубоководных экосистемах северо-западной части Тихого океана: *Porifera*, *Cnidaria*, *Polychaeta*, *Sipuncula*, *Echiuroidea*,

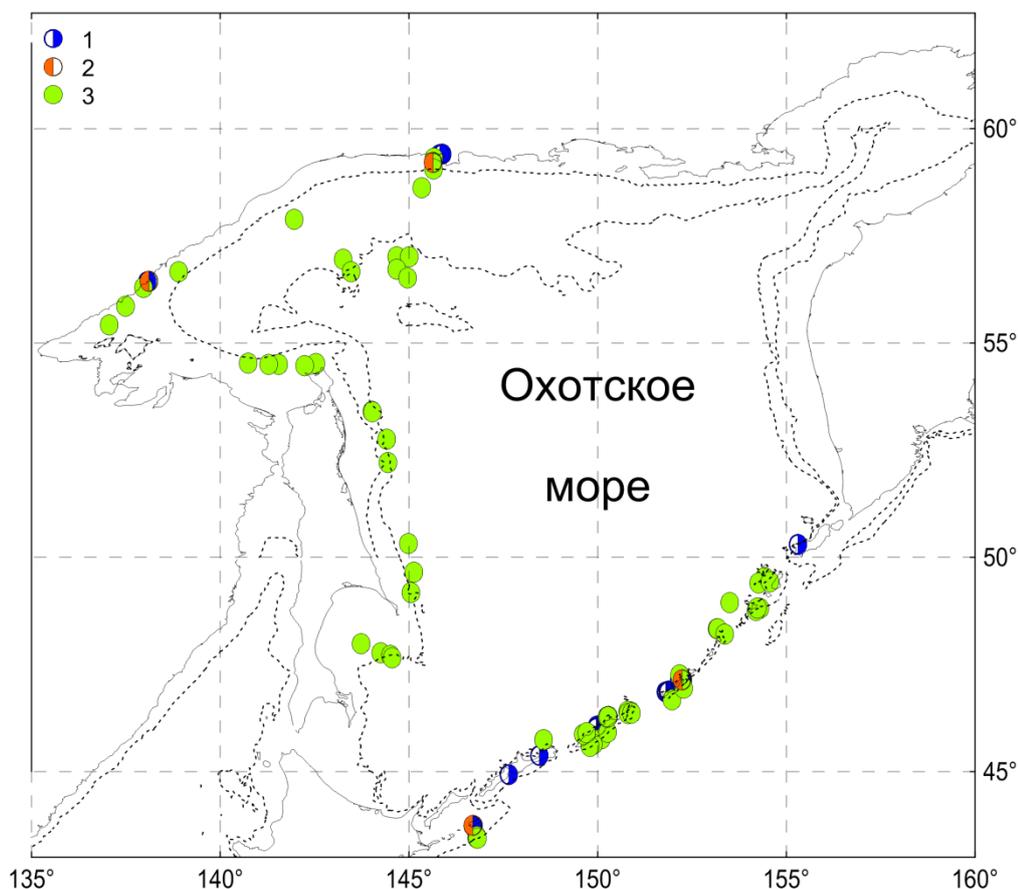
Kinorhyncha, Nematoda, Nemertea, Bivalvia, Crustacea (Isopoda, Cumacea, Decapoda), Echinodermata (Asteroidea, Echinoidea, Ophiuroidea, Holothuroidea) и др. Изучены особенности пространственного распределения представителей различных таксонов беспозвоночных животных. В частности, для фауны Isopoda показан высокий уровень эндемизма в глубоководных районах, в различной степени изолированных от океанической абиссали, где отмечено наибольшее видовое разнообразие этих животных. Также отмечено влияние на распределение глубоководной биоты таких факторов как доступность пищевых ресурсов, содержание кислорода в придонной воде, скорость придонных течений и др.

В районе метановых высачиваний на Чукотском склоне Берингова моря отмечено высокое фаунистическое богатство многочетинковых червей (Polychaeta), существенно превышающее таковое в прилегающих фоновых биотопах. На склонах подводного вулкана Пийпа в фауне полихет выделены виды-индикаторы гидротермальных высачиваний.

По материалам предшествующих глубоководных экспедиций (НИС «Витязь», 1953–1954 гг., экспедиций ННЦМБ ДВО РАН: KuramBio (НИС «Sonne», 2012 г.), SokhoBio (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2015 г.), KuramBio II (НИС «Sonne», 2016 г.)) для абиссали северо-западной части Тихого океана описаны три новых для науки вида двустворчатых моллюсков тиазирид (глубины от 5000 до 9500 м). Лписаны несколько новых видов Kinorhyncha, в том числе непосредственно из зоны гидротермальной активности на действующем подводном вулкане Пийпа.



Карта схема погружений ТНПА Comanche 18 и отбора проб А – Полигон 1 (1 – треки погружений; 2 – станции отбор воды с помощью ТНПА; 3 – станции отбора воды с помощью комплекса батометрической кассеты и STD зонда); В – Полигон 2 (1 – станции отбор воды с помощью ТПА; 2 – треки погружений; 3 – станции отбора воды с помощью комплекса батометрической кассеты и STD зонда; 4 – номера трансект)



Карта станций в экспедиции НИС “Академик Опарин” в 2019 года: 1 – районы водолазных работ, 2 – районы литоральных сборов, 3 – районы драгировки

По результатам наших глубоководных экспедиций проведен предварительный анализ ихтиофауны из районов склона Курильских островов. Отмечено значительное сходство с ихтиофауной глубоководной части Охотского моря, но при большем видовом разнообразии. Отмечены представители стихеевых Stichaeidae, бельдюговых Zoarcidae, рогатковых Cottidae, липаровых Liparidae, психролютовых Psychrolutidae, круглонеревых Cyclopteridae, среди которых обнаружено несколько новых для науки видов.

Получены новые данные по биологии и распространению ранее малоизученных липаровых рыб (роды *Careproctus* и *Liparis*), важные для понимания филогении и зоогеографии этих представителей глубоководной ихтиофауны.

В рамках изучения генетического разнообразия в популяциях глубоководных организмов получены новые данные, важные для понимания филогенетических отношений в данных группах и межфаунистических связей в глубоководье Тихого океана. Так, например, на основе молекулярно-филогенетического анализа глубоководных

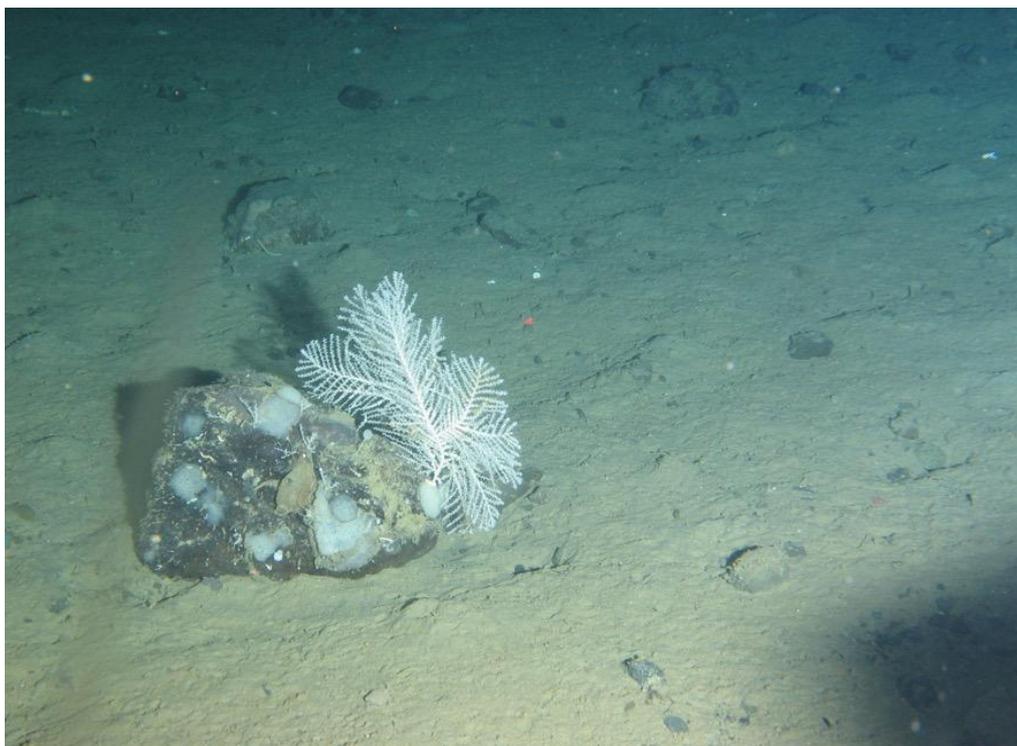
немертин (Nemertea) семейства Cephalotrichidae с использованием мультигенного подхода выявлены три клады: Cephalothrix, Procephalothrix и интерстициальные цефалотрихиды. Показаны филогенетические связи с представителями этой группы немертин из арктических вод и других глубоководных районов Тихого океана.

В рамках изучения молекулярно-биологических и цитологических адаптаций гидробионтов к условиям среды обитания в глубоководных экосистемах, в частности пластичности сенсорной и нервной систем, выполнены иммуногистохимические исследования нервной системы крабов на примере *Hemigrapsus sanguineus*. А на примере глубоководных хемотрофных моллюсков *Calyptogena* изучены эволюционные адаптивные решения в репродуктивной биологии, в частности особенности их сперматогенеза.

В рамках изучения трофических взаимоотношений глубоководных гидробионтов определен состав жирных кислот общих липидов у различных представителей макробентоса, собранных в районе массива Вулканологов на обеих вершинах и склонах подводного вулкана Пийпа (Берингово море) (глубины от 338 м до 755 м). На основе анализа жирнокислотного (ЖК) состава показаны два основных пути в питании донных организмов: пищевые цепочки от хемоавтотрофных бактерий (в том числе, живущих в симбиотических отношениях с двустворчатыми и брюхоногими моллюсками) и пищевые цепочки, связанные с поступлением органического вещества из фотического слоя (т.н. «дождь трупов» и т.п.). Интересно, что для некоторых гидробионтов установлено получение пищи из обоих этих источников.

Животные в каждой из этих групп обладает своими характерными особенностями ЖК состава. Так, например, глубоководные голотурии имеют высокое содержание маркеров детритной пищевой цепи, поскольку питаются переработанными частичками детрита с поверхности донных осадков. Кораллы имеют высокое содержание маркеров от зоопланктона (20:1, 22:1) и n-3 ПНЖК, так как в их питании преобладают мелкие ракообразные и «падающий сверху» мертвый планктон. Многие ракообразные имеют симбиотических бактерий, но часть пищи получают, поедая живых (амфиподы) или погибших (остракоды) представителей мейо- и макрофауны.

Было идентифицировано 90 ЖК различного строения.



Горгонария *Narella* sp., глубина 2641 м

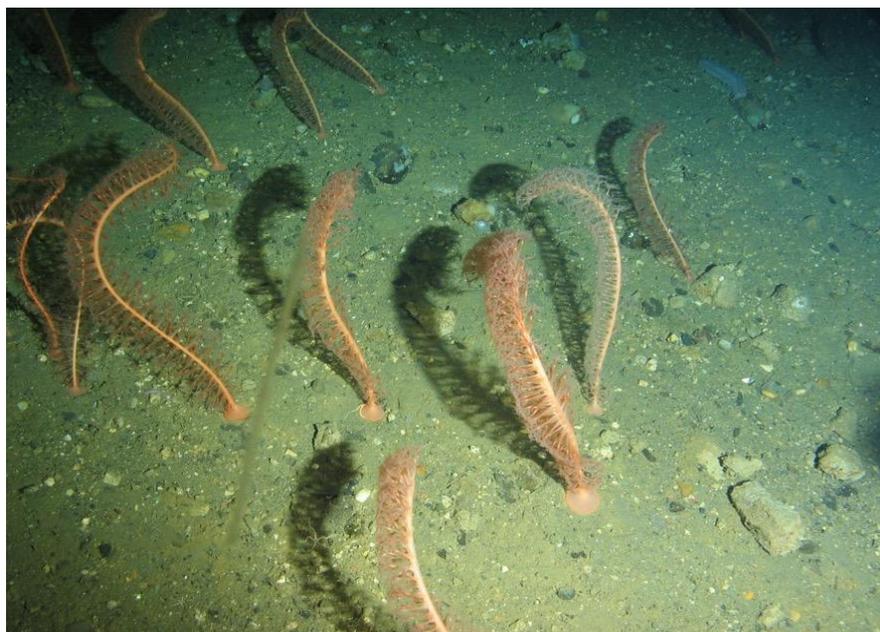
Проведенные исследования показывают высокую эффективность биохимического жирнокислотного анализа для установления трофических связей в глубоководных сообществах, существенно расширяя наши представления о функциональных механизмах, обеспечивающих устойчивость глубоководных экосистем. Показанное в наших работах высокое разнообразие жирных кислот у гидробионтов, представляющих различные трофические уровни, помимо расширения наших представлений о тонких механизмах функционирования глубоководных сообществ, открывает новые перспективы получения новых биологически активных соединений, которые могут использоваться для новых видов функционального питания и новых лекарственных средств.

В рамках фармакологических исследований получены 274 экстракта из 49 образцов глубоководных беспозвоночных и грибов, собранных на глубинах 2200–3300 м в юго-западной части Берингова моря. Показано наличие специфической Wnt-ингибирующей активности у 24 экстрактов. Наиболее перспективными объектами являются представители Echinodermata (морские звезды, голотурии и офиуры). Из представителей этих групп выделен широкий спектр биологически активных соединений: полисахариды, фосфолипиды и гликолипиды, тритерпеновые гликозиды (сапонины). В ходе скрининга получены соединения, проявляющие острую противоопухолевую цитотоксическую активность, а также демонстрирующие специфическую активность против Wnt-сигнального пути. Предполагается, что полученные экстракты из глубоководных офиур (Ophiuroidea), обладающие , широким спектром биологической активности –

антипролиферативной и антиметастатической, могут быть использованы для разработки нового безопасного терапевтического агента.

В частности, у представителей чешуйчатых голотурий из семейства Psolidae и у представителей отряда Synallactida были обнаружены тритерпеновые гликозиды с противораковой активностью. Экспериментально подтверждена специфическая Wnt-ингибирующая активность отдельных соединений из спиртового экстракта *Ophiura sarsii*. У данного вида офиур впервые для представителей этой группы гидробионтов был выделен порфирин. У представителей морских звезд (класс Asteroidea) обнаружены стероидные гликозиды, особенно астросапонины, демонстрирующие широкий спектр биологической активности, включая цитотоксическое, гемолитическое, антибактериальное, противовоспалительное, противоопухолевое и противораковое действие. Представлен список гидробионтов, у которых были обнаружены различные соединения с выраженной Wnt-ингибирующей активностью. На примере голотурий проведено сравнительное изучение анти-Wnt активности экстрактов из различных отделов тела этих животных. Приводятся данные по молекулярному механизму ингибирующей деятельности обнаруженных соединений. Изучена ингибирующая активность против Wnt соединений из морских грибов *Penicillium*. Для представителей нескольких таксонов морских звезд описан широкий спектр астросапонинов, демонстрирующих цитотоксическое, цитостатическое, противомикробное и противовоспалительное действия. Изучены сульфатированные стероиды из морских губок, проявляющие антимикробную, противогрибковую и цитотоксическую активность. В частности, из морской губки северо-западной части Тихого океана *Haliclona gracilis* было выделено семь новых стероидов, грацилосульфаты А-Г, имеющие 3 β -О-сульфонато, 4 β -гидрокси фрагмент, который редко встречается в моноссульфатированных стероидах.

В рамках данного проекта из голотурии *Thyonidium kurilensis* были выделены шесть неизвестных ранее тритерпеновых гликозидов. Эти гликозиды включают пять различных углеводных цепей (курилозиды групп А, С-Г), в том числе три новых. Сульфатированные гексасахаридные цепи курилозидов D и F являются третьей и четвертой находками в гликозидах голотурий, соответственно, дополнительно к углеводным цепям кладолозидов групп К и L с таким же типом углеводных цепей. Все они отличаются друг от друга моносахаридным составом и положением сульфатной группы.



Морские перья *Anthoptilum grandiflora*, глубина 1687 м

Также исследованы окисленные цереброзиды, выделенные из экстракта глубоководной стеклянной губки *Aulosaccus* sp. Определены структуры 18 ранее неизвестных соединений, обнаруженных в сложной смеси окисленных цереброзидов из экстракта этой губки. Изучаются новые стероиды из глубоководной морской губки *Haliclona gracilis*, тритерпеновые гликозиды из глубоководной голотурии *Thyonidium kurilensis* и липиды из глубоководной стеклянной морской губки *Aulosaccus* sp. Установлено их полное химическое строение, включая абсолютную стереохимию их асимметрических центров, и изучена их биологическая активность.

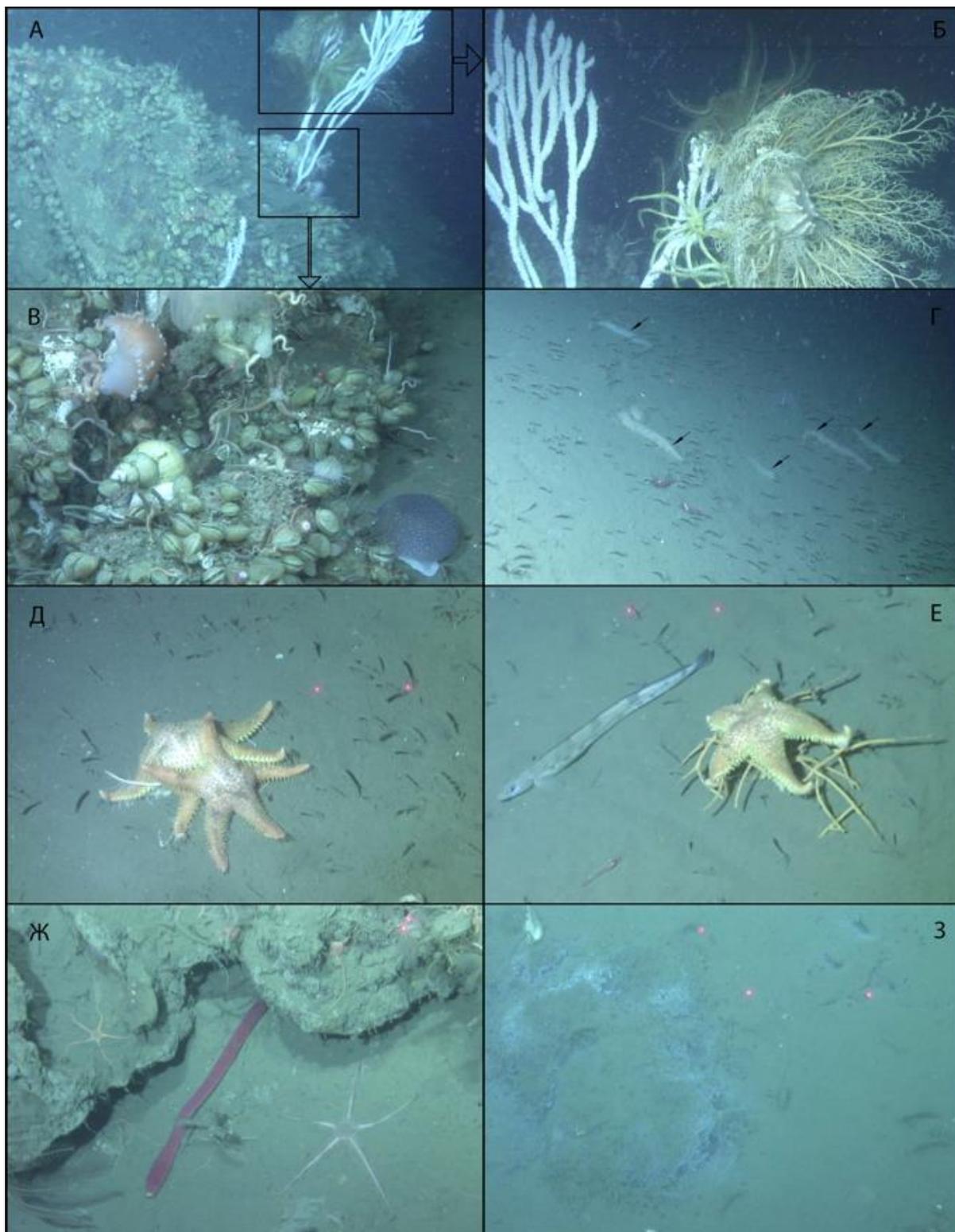
Изучен состав и противовирусная активность полигидроксинафтохинонов глубоководных образцов плоского морского ежа *Echinarachnius parma* демонстрирующих цитотоксическую и антигерпетическую активность. Было показано, что глубоководные представители этих ежей, помимо обычного для этого вида набора спинохромов: спинохром D, спинохром E и три бинафтохинона, содержали, кроме эхинохрома А (ЭхА), еще и эхинамин А (ЭаминА) и эхинамин В (ЭаминВ), не обнаруженные у мелководных представителей *E. parma*. Показана перотивирусная активность спинохромов морских ежей, превышающая эффективность препарата ацикловир. Показано, что спинохромы ЭаминА, ЭаминВ и ЭхА проявляют значительную антигерпетическую активность, в основном из-за их прямых вирулицидных свойств, но они также ингибируют прикрепление вируса к клеткам и, в меньшей степени, проникновение вируса в клетки. Блокирование ранних стадий инфекции HSV-1 может быть привлекательной терапевтической стратегией, преимущество которой состоит в том, что она может

предотвратить распространение вируса, не убивая инфицированные вирусом клетки, как это происходит с ацикловиром. Другой механизм противовирусного действия спинохромов, обладающих ярко выраженными антиоксидантными свойствами, связан со снижением внутриклеточного уровня АФК, индуцированного вирусом.

В рамках геохимических исследований в глубоководных экосистемах северо-западной части Тихого океана получены новые данные о структуре донных осадков и особенностях накопления и распределения тяжелых металлов в донных осадках и тканях гидробионтов. Результаты гранулометрического состава показали, что осадки Курильской котловины Охотского моря представлены пелит-алевритовыми и алеврит-пелитовыми илами оливкового цвета с большим содержанием диатомовых водорослей. Осадки со станций, расположенных на абиссальной равнине Тихого океана, примыкающей к Курило-Камчатскому желобу, представлены пелит-алевритовыми и алеврит-пелитовыми илами светло- и темно-коричневого цвета. Донные отложения, расположенные в ККТ, также представляют собой пелит-алевритовые илы, однако в некоторых пробах присутствует песчаная фракция.

Показано, что осадки Курильской котловины характеризуются незначительным обогащением As, Cu, Zn, Pb и Cd, а отложения района ККТ – незначительным обогащением Sb, As и Pb. Степень воздействия между элементами по экологическому риску оценивается как $Cd > As > Cu > Pb > Cr > Zn$. Все элементы показали низкий экологический риск в районах исследования ($E_{ir} < 40$).

Впервые выявлены особенности распределения большой группы химических элементов в организмах, обитающих в восстановительных биотопах Чукотского (Корякского) склона Берингова моря. Для всех таксонов установлено максимальное содержание макроэлемента кальция, являющегося структурным элементов карбонатных биоминералов. Содержание кальция в десятки раз превышает таковое для железа. Показано преимущественное накопление ряда тяжелых металлов V, Cr, Co, Ni, Zn, Mo, Cd, W и U в жабрах симбиотрофных моллюсков *Calyptogena pacifica*. В карбонатных раковинах *Calyptogena pacifica* максимально содержание Ca, Sr, кроме того, повышено по сравнению с жабрами содержание Ti, Mn и Ba. Для других таксонов повышенное накопление большинства элементов по сравнению с раковиной выявлено также в мягких тканях. Вольфрам найден в минимальных содержаниях по сравнению с другими элементами. Донные осадки района метановых выходов характеризуются повышенными содержаниями (выше 1.0%) макроэлементов железа, кальция, титана, марганца, бария и стронция, а среди микроэлементов – V, Cr, Ni, Cu, Zn и Zr.



А–В – сообщество твердых субстратов, глубина около 750 м; Г – сообщество мягких грунтов равнинных участков каньона, глубина 774 м (стрелками указаны голотурии *Synallactes* sp.); Д, Е – морские звезды, атакующие морскую лилию (Д) и губку (Е), глубина около 700 м; Ж – крупная немертина, глубина около 650 м; З – бактериальные маты, глубина 608 м

В рамках разработки новых технических методов ресурсной оценки и мониторинга глубоководных экосистем выполнены работы по совершенствованию технологий гидроакустического мониторинга водной среды. Разработан акустико-гидрофизический комплекс для мониторинга изменчивости полей температур и течений и проведено его испытание на морском полигоне. Основой представленных разработок послужило применение сложных псевдослучайных широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией для мониторинга изменчивости структуры и динамики вод, что позволяет проводить выделение, разделение и идентификацию акустических импульсов, распространяющихся по разным лучевым траекториям. Для проведения экспериментальных исследований полей течений методом встречного акустического зондирования была создана система, корреспондирующие элементы которой могут совмещать функции, как приемников, так и излучателей звука (трансиверы). Полученные результаты важны для решения задач акустического мониторинга морской среды, корректного позиционирования подводной аппаратуры и наблюдения за подводными объектами.

В рамках разработки и внедрения новых алгоритмов интеллектуального распознавания морских организмов при использовании автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) разработан комплекс программ для распознавания биологических объектов на изображениях, полученных от бортовых видеокамер подводных аппаратов (ПА). На примере биологических объектов (крабов) разработан алгоритм автоматического количественного подсчета объектов на последовательности изображений. Особенности работы реализованных алгоритмов были проверены при распознавании объектов на реальных фотоизображениях, полученных АНПА при выполнении глубоководных миссий. Кроме того, было разработано программное обеспечение для формирования обучающей выборки, необходимой для обучения «нейронной сети» (НС), используемой при распознавании морских животных. Разработана дополнительная система интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА и АНПА. В частности, для выполнения обнаружения, распознавания и подсчета морских организмов и других объектов на фотоизображениях морского дна разработана дополнительная цифровая оптическая фотосистема; для разработки и внедрения системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов АНПА и экипажа обеспечивающего судна-носителя разработан судовой пост оператора, обладающий эргономичным интерфейсом и обеспечивающий создание и редактирование программ-заданий АНПА; для повышения надежности функционирования АНПА при выполнении научно-исследовательских

операций разработана контрольно-аварийная система АНПА, ключевой особенностью которой является относительно независимое поведение ее составных частей в штатных и аварийных режимах работы; выполнена программная реализация системы идентификации заранее известных объектов, использующая бортовой многолучевой гидроакустический сонар АНПА в качестве основной системы технического зрения, что позволяет на основе данных от сонара точно определять положение и пространственную ориентацию известных объектов.

В рамках первого этапа проекта на основе проанализированных данных по состоянию и особенностям функционирования глубоководных экосистем в районах исследования в северо-западной части Тихого океана проведен подготовительный анализ возможности организации глубоководных ООПТ. Также проанализирован первый международный опыт в организации глубоководных ООПТ в районах за пределами национальной юрисдикции на примере сходных глубоководных экосистем в других районах Тихого океана.

В заключении необходимо отметить, что все намеченные в рамках первого этапа проекта работы выполнены в полном объеме.

По итогам работы в рамках первого этапа опубликованы и сданы в печать статей в ведущих международных журналах, что превышает исходно заявленные показатели.