

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи



**Колесник Александр Николаевич**

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО  
ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ЧУКОТСКОМ МОРЕ**

Специальность 25.00.28 «океанология»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель: д.г.-м.н.  
Астахов Анатолий Сергеевич

Владивосток – 2015

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Седиментогенез в арктических морях: изученность, особенности.....	9
1.1 Арктические моря России в целом.....	–
1.2 Чукотское море.....	16
Глава 2 Материал и методы исследований.....	23
Глава 3 Условия современного осадконакопления в Чукотском море.....	30
Глава 4 Общая характеристика современных осадков Чукотского моря.....	37
4.1 Гранулометрический состав и минералогическая характеристика осадков.....	–
4.2 Аутигенные образования: морфологическая характеристика, минеральный состав.....	49
4.3 Выводы.....	61
Глава 5 Химический состав современных осадков Чукотского моря.....	63
5.1 Распределение химических элементов в осадках.....	–
5.2 Полиэлементные ассоциации.....	85
5.3 Химический и изотопный состав аутигенных образований.....	88
5.4 Накопление химических элементов в осадках и железомарганцевых конкрециях....	91
5.5 Аномальные содержания металлов в осадках.....	95
5.6 Выводы.....	97
Глава 6 Обстановки седиментации и факторы, определяющие накопление химических элементов в современных осадках Чукотского моря.....	100
6.1 Обстановки седиментации (по данным химического и гранулометрического состава осадков).....	–
6.2 Механическая дифференциация осадочного материала.....	105
6.3 Роль биоты.....	107

6.4 Окислительно-восстановительные условия.....	111
6.5 Геодинамические условия.....	113
6.6 Факторы, определяющие аномальные содержания химических элементов в осадках.....	115
6.7 Выводы.....	116
Заключение.....	119
Список литературы.....	121
Приложение А (обязательное) Статистические параметры геохимической базы данных по осадкам Чукотского моря.....	134

## Введение

**Актуальность.** В настоящее время исследование и подготовка к масштабному освоению арктического шельфа России проводятся в рамках «Программы разведки континентального шельфа РФ на период с 2012 по 2030 гг.». Программа направлена на повышение геологической изученности шельфа и замещение постепенно выбывающих из эксплуатации участков недр, главным образом континентальных. Однако интерес представляет не только геолого-экономическая сторона вопроса. Процессы седименто- и рудогенеза изучены на шельфе, особенно арктическом, в значительно меньшей степени, чем на суше. Арктические шельфовые зоны (моря) характеризуются своеобразной геотектонической позицией, климатическими условиями, гидро- и литодинамикой. Их изучение могло бы внести существенный вклад в понимание общей картины литогенеза полярной зоны.

Чукотское море является одним из наименее изученных морей Российской Арктики. При безусловном доминировании терригенного осадконакопления, здесь отмечаются районы с существенным количеством биогенного материала и активно протекающими биохимическими процессами. При том что различия в седиментационных обстановках находят явное отражение в химическом составе осадков, изучен он относительно слабо. Весьма скудны и сведения об аутигенных образованиях. В последнее время исследователей стал занимать вопрос влияния на химический состав осадков геодинамических условий, но и здесь еще много неясного. Все это делает Чукотское море достаточно интересным объектом для изучения.

**Цель и задачи.** Цель работы – установить закономерности формирования химического состава современных донных осадков Чукотского моря.

**Основные задачи:**

- комплексно изучить химический состав поверхностного слоя донных осадков (далее по тексту – осадки), провести сравнительный анализ полученных результатов с литературными данными и выявить особенности, присущие современным осадкам Чукотского моря;
- сформировать базу данных по химическому составу осадков Чукотского моря;
- разделить осадки по вариациям химического состава; провести типизацию обстановок осадконакопления; выявить основные факторы, определяющие геохимический облик современных осадков Чукотского моря.

**Научная новизна.** Автором получены и изучены пробы осадков из малоизученных районов Чукотско-Аляскинского сектора Северного Ледовитого океана (Берингов пролив, юго-восточная часть Чукотского и восточная часть Восточно-Сибирского морей, Чукотское

поднятие, Канадская котловина), а также образцы железомарганцевых конкреций (ЖМК), поднятые на новых станциях в пределах ранее установленных в Чукотском море районов конкрециеобразования (подводный каньон Геральд и примыкающее к нему северное мелководье острова Врангеля, северо-западный шельф Аляски). Обнаружены и охарактеризованы аутигенные метанопроизводные карбонаты северо-восточной части Чукотского моря (бровка шельфа). Впервые при изучении донных отложений Чукотского моря применен электронно-зондовый микроанализ; с помощью методов математической статистики обработан самый большой для Чукотского моря массив геохимических данных.

В результате проведенных исследований расширены представления о химическом, особенно микроэлементном, составе современных донных отложений Чукотского моря и факторах, определяющих их геохимический облик; подробно рассмотрены геодинамические условия осадконакопления. Впервые построены карты распределения титана, калия, натрия, стронция, иттрия, иттербия, циркония, лантана, молибдена, серебра, золота, платины, осмия, иридия, рутения и кадмия. Дополнены и детализированы существующие карты распределения кремния, алюминия, железа, марганца, магния, кальция, фосфора, аморфного кремнезема ( $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ ), общего органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ), бария, кобальта, хрома, меди, никеля, свинца, ванадия, цинка и ртути. С помощью методов математической статистики выделены районы Чукотского моря с аномальными и повышенными содержаниями металлов в осадках. Получены новые данные о россыпной минерации шельфа Чукотского моря: установлены зерна цветных и благородных металлов, характер их распределения и районы наибольшей концентрации.

**Теоретическая и практическая значимость.** Представленные в работе данные восполняют дефицит информации по геохимии и минералогии осадков Чукотского моря. В рамках существующих представлений о седиментации в арктических морях (механическая дифференциация обломочного и глинистого терригенного материала при скромной роли биогенных и хемогенных процессов) в диссертации развивается идея о наличии в Чукотском море участков с особыми геодинамическими и гидрохимическими условиями, благоприятствующими обогащению осадков  $\text{C}_{\text{орг}}$  и металлами и образованию ЖМК.

Результаты исследований могут представлять интерес при прогнозировании в Чукотском море концентраций полезных ископаемых – россыпей цветных и благородных металлов, ЖМК.

**Материал и методы.** Отобрано и изучено 296 проб осадков и более 100 образцов аутигенных образований (ЖМК, карбонаты) Чукотского моря, восточной части Восточно-Сибирского моря и примыкающей открытой части Северного Ледовитого океана (далее по тексту – Чукотское море). Основная масса геологического материала получена сотрудниками лаборатории морского рудообразования ТОИ ДВО РАН, в том числе автором, в научных экспедициях 2002–2012 гг. Часть проб предоставлена Е. А. Гусевым (ВНИИОкеангеология,

Санкт-Петербург), Р. Б. Шакировым (ТОИ ДВО РАН, Владивосток), Ван Рудзяном (Университет Тончжи, Шанхай). В работе использованы данные, опубликованные другими исследователями [Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003].

Материал изучался с помощью комплекса аналитических методов: атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии (ИСП-АЭС, ИСП-МС), рентгенофлуоресцентного анализа (содержание большинства макро- и микроэлементов), электронного микрозондирования (химический состав отдельных зерен и микроучастков поверхности), гравиметрии (Si), колориметрии (Fe, Mn, SiO<sub>2</sub>аморф), нейтронно-активационного анализа (Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru), термокатализа и газовой хроматографии (C<sub>орг</sub>), атомно-абсорбционной спектрометрии (Hg), лазерной дифракции и водно-ситового анализа (гранулометрия), рентгеновской дифракции и иммерсии (минеральный состав). В результате только методами плазменной спектрометрии выполнено около 5600 элементоопределений, электронным микрозондированием – свыше 1000 анализов. Данные по валовому химическому составу осадков обработаны методами математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту.** 1. Распределение химических элементов и биогенных компонентов в донных осадках Чукотского моря подчинено (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, P, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>, Cr, Pb, Sr, V, Y, Yb, Zr, La, Mo, Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru, Cd, Hg) или весьма близко (Mn, Ba, Co, Cu, Ni, Zn) к закону нормального распределения, что позволяет использовать методы многокомпонентной статистики для моделирования поведения химических элементов и биогенных компонентов в районах со схожими условиями осадконакопления.

2. Результаты статистического анализа указывают на доминирование в Чукотском море процессов терригенной седиментации, определяющей общий химический состав осадков. Биогенное осадконакопление имеет подчиненное значение и проявляется в повышенных содержаниях в осадках отдельных районов (Южно-Чукотская котловина, каньон Геральд) C<sub>орг</sub>, SiO<sub>2</sub>аморф и частично Ca, Mg, Ba, Sr, P.

3. Геодинамические условия Чукотского моря, определяющие на локальных участках дна образование впадин и современную флюидную активность, проявляются в 1) создании обстановок с недостатком кислорода и обогащении осадков C<sub>орг</sub>, Mo, V, Ag, Ru, 2) активном диагенезе с повышением содержаний в осадках Fe, Mn, Hg, Zn, Co и образованием аутигенных конкреций.

**Личный вклад автора.** Автор является участником трех научных экспедиций в Чукотское море (2008 г., 2009 г., 2012 г.), где им отобрана значительная часть фактического материала: 114 проб осадков, более 100 образцов ЖМК, фрагмент аутигенного карбоната. Автором проведена подготовка к анализу около 300 проб осадков Чукотского моря и статистическая обработка полученных данных. При участии автора получены и обработаны

результаты электронно-микронного анализа осадков, ЖМК, карбоната (более 200 фотографий, свыше 1000 анализов химического состава). Весь иллюстративный материал, представленный в диссертации, подготовлен лично автором.

**Степень достоверности и апробация работы.** В работе задействован значительный по объему фактический материал; станциями пробоотбора покрыт весь шельф Чукотского моря, захвачены прилегающие участки дна Восточно-Сибирского моря, а также открытой части Северного Ледовитого океана.

Основной объем аналитических работ выполнен в аккредитованном Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. В процессе изучения комбинировались традиционные и современные методы анализа, которые в некоторых случаях дублировали или дополняли друг друга. Кроме контроля качества с использованием стандартных образцов, это дало возможность дополнительной сверки данных. Последние обрабатывались методами математической статистики; результаты сопоставлялись с таковыми, полученными и опубликованными в открытой печати другими исследователями.

Изложенные в диссертации результаты представлялись на научных совещаниях различного уровня с 2008 года. По теме диссертации сделано около 30 докладов, в том числе на международных симпозиумах Marine Environment and Resources in XXI Century (Циндао, 2009 г.; Владивосток, 2012 г.) и International Symposium on Polar Sciences (Инчхон, 2014 г.), российско-американских (Котор, 2010 г.; Санкт-Петербург, 2013 г.; Гонолулу, 2014 г.) и российско-китайских (Шанхай, 2012 г.) рабочих совещаниях по вопросам изучения Арктики, международных конференциях «Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики» (Мурманск, 2008 г.), «Ртуть в биосфере (эколого-геохимические аспекты)» (Москва, 2010 г.), «Геология морей и океанов» (Москва, 2011 г., 2013 г.), всероссийских совещаниях «Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ, углеводороды и жизнь» (Москва, 2010 г.), «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории» (Новосибирск, 2013 г.). Материалы, которые легли в основу диссертации, неоднократно представлялись на конференциях молодых ученых ТОИ ДВО РАН (Владивосток, 2009 г., 2011 г., 2013 г.).

**Публикация результатов.** По теме диссертации опубликовано около 50 работ (2008–2015 гг.), в том числе 12 статей, восемь из которых – в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК при Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 142 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (176 источников) и приложения. Текстовую часть работы сопровождают 29 рисунков и 15 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. А. С. Астахову и всему коллективу лаборатории морского рудообразования ТОИ ДВО РАН. За консультационную поддержку на стадии обсуждения диссертации автор признателен д.г.-м.н. А. И. Обжирову, д.г.-м.н. Е. П. Леликову, д.г.-м.н. А. Н. Деркачеву, к.г.-м.н. О. В. Дудареву, к.г.-м.н. Е. П. Терехову, к.г.-м.н. Р. Б. Шакирову, к.г.-м.н. Ю. И. Мельниченко. Благодарность выражается также коллегам по экспедиционным работам к.г.-м.н. Т. В. Матвеевой и к.г.-м.н. Е. А. Логвиной (ВНИИОкеангеология), к.г.-м.н. Е. Г. Вологиной (ИЗК СО РАН), особая благодарность – к.г.н. А. А. Босину (ТОИ ДВО РАН). Неоценимую помощь в проведении аналитических работ оказали к.г.-м.н. А. А. Карабцов, Н. В. Бондарчук, Н. В. Зарубина (ДВГИ ДВО РАН), А. И. Боцул, А. А. Марьяш (ТОИ ДВО РАН), к.г.-м.н. Л. А. Павлова, М. А. Митичкин (ИГХ СО РАН), Т. С. Филева, С. П. Сумкина, И. А. Калашникова (ИЗК СО РАН).

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований РАН, ФЦП «Мировой океан», при финансовой поддержке ДВО РАН (проекты № 10-III-B-07-175, № 11-III-B-07-144, № 11-III-B-07-145, № 12-III-B-07-125, № 12-III-B-07-007, № 13-III-B-07-127, интеграционный проект с СО РАН № 12-II-CO-07-021) и РФФИ (проекты № 09-05-98585-р\_восток\_a, № 15-05-05680\_a, российско-китайский проект № 12-05-91167-ГФЕН\_a).



# Глава 1 Седиментогенез в арктических морях: изученность, особенности

Седиментогенез есть не что иное, как образование осадка. Согласно современным представлениям, этот процесс включает стадии гипергенеза (продуцирования вещества), мотогенеза (транспортировки вещества) и седиментации (формирования осадка) [Справочник..., 1983]. Седиментогенез, как правило, рассматривают в качестве одной из стадий литогенеза. Для последнего выделяется несколько типов: ледовый, гумидный, аридный, вулканогенно-осадочный, океанский [Страхов, 1960, 1963, 1976]. При изучении литологических процессов в полярных зонах – сухопутных и морских – появился термин «полярный литогенез» [Данилов, 1978; Лапина и др., 1968]. Этот тип литогенеза характеризуется отрицательными среднегодовыми температурами воздуха, поступлением осадков преимущественно в твердой фазе, наличием ледового покрова на суше и море, низкой температурой морской воды, большими площадями бассейнов, замедленностью химических и биологических процессов, почти полным отсутствием аутигенного минералообразования. И. Д. Даниловым [1978] было показано, что полярный литогенез осуществляется на суше и в водоемах при определяющем влиянии криогенных процессов в промерзающих, мерзлых и протаивающих грунтах и горных породах. Однако дальнейшие исследования позволили сделать вывод о том, что осадки арктического шельфа, как правило, находятся не в мерзлой среде, то есть криогенез не оказывает значительного влияния на седиментогенез в пределах арктических морей и хемогенные и биогенные процессы протекают в осадках достаточно активно. В связи с этим предложено понятие морского (шельфового) полярного литогенеза как элемента полярного литогенеза по И. Д. Данилову [Кошелева, 2002].

Основное внимание в этой главе будет уделено геохимическим аспектам современного (голоценового) осадконакопления в арктических морях России в целом и в Чукотском море в частности.

## 1.1 Арктические моря России в целом

**История исследований.** Группа арктических морей России объединяет близкие по природе окраинные моря Северного Ледовитого океана: Баренцево, Карское, Лаптевых,

Восточно-Сибирское и Чукотское [Добровольский, Залогин, 1982]. Белое море тоже относится к морям Северного Ледовитого океана, но почти целиком лежит к югу от Полярного круга и поэтому в данном разделе не рассматривается.

Изучение донных осадков морей Российской Арктики началось почти два века назад и около столетия отличалось эпизодичностью, проводилось в наиболее доступных южных частях морей и было направлено на выявление общих характеристик и химизма донных осадков. В 1930-е – 1940-е гг. исследования стали более систематическими. В это время появились первые сведения о грунтах внешнего шельфа. Опубликованные работы данного этапа исследований содержат в основном характеристики донных отложений на отдельных участках их распространения в Баренцевом и Карском морях. С середины 50-х гг. прошлого века пробоотбор в арктических морях стал проводиться более регулярно, с обязательным комплексным изучением вещественного состава осадков (преимущественно поверхностных). С конца 1970-х гг. началось детальное изучение физических свойств и органо-геохимических комплексов (органическое вещество, битуминозные компоненты, газовый состав) донных отложений; было достигнуто значительное расширение стратиграфического и возрастного диапазона опробуемых осадков, вскрыты и изучены отложения среднего и позднего плейстоцена. Тогда же стали проводиться работы, направленные на поиск, прогноз и оценку месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа. В нашей стране исследования в разные годы по различным направлениям и в различном объеме велись Плавморнином (в 1929 году реорганизован в ГОИН), ПИНРО, ВНИРО, ААНИИ, ММБИ КФ АН СССР (с 1992 года ММБИ КНЦ РАН), ПГО «Севморгеология» (сейчас ФГУ НПП «Севморгео»), НИИГА (после 1981 года ВНИИОкеангеология), ИО АН СССР (с 1992 года ИО РАН), ВСЕГЕИ и др. За рубежом на полярных исследованиях специализируются Северо-Американский Арктический институт (Канада), Французский полярный институт, Норвежский полярный институт, Национальный институт полярных исследований (Япония), Институт полярных и морских исследований Альфреда Вегенера (Германия), Институт полярных исследований им Скотта (Великобритания), Институт полярных исследований Китая и др. Примером наиболее значимых изданий, в которых обобщены результаты изучения арктических морей России, глубоководных котловин Северного Ледовитого океана и их континентально-островного обрамления, могут служить: том «Северный Ледовитый океан» в составе «Атласа океанов» [1980], «Атлас грунтов Северного Ледовитого океана» [1981], монография «Моря Советской Арктики» (Геология СССР, т. 9) [1984], «Атлас Арктики» [1985], монография «Баренцевская шельфовая плита» [1988], книги «Опыт системных океанологических исследований в Арктике» [2001], «Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология» [2002], «Арктические моря» шеститомника «Геология и полезные ископаемые России» (Т. 5, кн. 1) [Геология...

2004], Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas [1974], Tectonic Evolution of the Bering Shelf – Chukchi Sea – Arctic Margin and Adjacent Landmasses [2002], The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean [2004] и др. В 1937 году ААНИИ начал выпуск специализированного журнала «Проблемы Арктики» (с 1958 года «Проблемы Арктики и Антарктики»). Наиболее крупным англоязычным периодическим изданием по вопросам Арктики является, пожалуй, журнал «Арктика» (Arctic Journal), публикуемый Северо-Американским Арктическим институтом (Arctic Institute of North America).

**Донные осадки.** Неоплейстоцен-голоценовые отложения арктических морей России формировались в достаточно сходных условиях осадконакопления, общих для полярного литогенеза [Кошелева, 2002; Кошелева, Яшин, 1999 и др.]. Формирование шло за счет терригенного материала местных источников, стока рек или абразии берегов (моря Карское и Лаптевых), абразии берегов или стока рек (остальные моря), ледового разноса (см. таблицу 1). Массивы льда при своем таянии и дрейфе на 7,3–10,2 % обогащают осадок бассейнов аэрозольным, абрадируемым и речным материалом. Материал речного стока приурочен в основном к барьерам река – море, в прибрежной зоне морей его доля не превышает 1 %. Абразия берегов питает осадки мелководья. Больше четверти, а в морях Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском около половины поступающего материала выносятся за пределы бассейнов по палеодолинам рек или желобам (Карское море) к подножию континентального склона.

По данным сейсмического профилирования и особенностям состава осадков, в осадочной толще арктических морей России выделяется три литостратиграфических комплекса (ЛСК): нижний ( $Q_I - Q_{III}^2$ ), средний ( $Q_{III}^{2-3}$ ) и верхний ( $Q_{III}^4 - Q_{IV}$ ). Подробное описание всех трех комплексов приведено в монографии В. А. Кошелевой и Д. С. Яшина [1999]. Мы же, руководствуясь целью и задачами нашего исследования, ограничимся кратким рассмотрением только верхнего комплекса преимущественно по работам [Кошелева, 2002; Кошелева, Яшин, 1999]. Отложения верхнего ЛСК практически сплошным чехлом, с размывом, перекрывают различные горизонты неоплейстоцена. Пачка серых уплотненных глинистых осадков, начинающая разрез отложений последней трансгрессии, перекрывается нелитифицированными и полужидкими голоценовыми осадками с частыми фациальными переходами. Большие мощности (от метров до десятков метров) отложений приурочены к желобам, впадинам и приматериковому мелководью. Повышенный выход тяжелой фракции (до 36 %) и преобладание устойчивых минералов указывают на формирование осадков за счет материала ближайших областей сноса. Преимущественно полевошпат-кварцевый состав осадков связан с довольно быстрым поступлением терригенного материала на дно бассейнов, близостью и составом пород областей сноса.

Таблица 1 – Распределение осадочного (терригенного) материала в арктических морях России, включая Чукотское море [Кошелева, Яшин, 1999]

Море		Барьер река-море		Прибрежье	«Покров» бассейна	Бассейн				Всего		Выносятся из бассейна	
		взвешенный	растворенный			абразия берегов (+речной сток)	лед припайный (абрадируемый и речной материал)	речной сток	абразия берегов	лед покровный (аэрозольный материал)	местные источники	поступило	накоплено
Баренцево	млн т/год	7,69	18,98	62,0	8,84	1,27	3,72	27,37	242,57	372,44	274,93	97,51	26,2
	%	2,0	5,0	16,7	2,4	0,3	1,0	7,4	65,2	100			
Карское	млн т/год	30,0	166,72	63,48	36,63	10,79	4,42	16,83	188,72	517,59	220,68	296,91	57,4
	%	5,8	32,3	12,4	7,0	2,0	0,8	3,2	36,5	100			
Лаптевых	млн т/год	21,49	58,38	60,05	16,59	3,88	3,59	11,8	215,26	391,04	234,53	156,51	40,0
	%	5,5	14,9	15,4	4,3	1,0	0,9	3,0	55,0	100			
Восточно-Сибирское	млн т/год	25,22	14,32	129,18	14,87	0,37	9,93	15,33	207,56	416,78	234,0	182,78	43,8
	%	6,0	3,4	31,0	3,6	<0,1	2,4	3,7	49,8	100			
Чукотское	млн т/год	1,48	4,45	46,38	4,69	0,29	3,87	11,96	133,78	206,9	149,9	57,0	27,5
	%	0,7	2,2	22,4	2,3	0,1	1,9	5,7	64,7	100			
Всего, млн т/год		85,88	262,85	361,09	81,62	16,6	25,53	83,29	987,89	1904,89	1114,04	790,71	

В осадках верхнего ЛСК повсеместно наблюдается преобладание устойчивых минералов над неустойчивыми, что особенно характерно для прибрежных осадков. На некоторых возвышенных участках дна происходит естественное шлихование, что приводит к концентрации в осадках тяжелых минералов [Кошелева, 1988, 2002]. Глинистый материал хлорит-гидрослюдистого состава поступает в бассейн седиментации за счет абразии ближайших четвертичных рыхлых образований. Концентрация карбоната кальция в осадках составляет в основном первые проценты, иногда достигая 22 %. Малые содержания  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  (до 12 %, при повышении концентрации в западных частях морей Карского и Лаптевых) вызваны поступлением из отложений среднего и нижнего ЛСК. Наибольшие концентрации  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  (более 12 %), приуроченные к отдельным участкам шельфа Чукотского моря (см. п. 1.2), объясняются расцветом диатомовых водорослей. Несколько бóльшие (на 0,5–1,5 %) содержания  $C_{\text{орг}}$  в осадках верхнего ЛСК (по сравнению со средним ЛСК) обусловлены не только возрастающей ролью организмов, но и частичной утратой  $C_{\text{орг}}$  в нижележащих отложениях за счет анаэробного разложения на стадии диагенеза. Повышенные содержания реакционноспособных форм железа (до 6,7 %) и марганца (до 2 %), особенно в глинистых осадках, – результат их поступления в осадок сорбционным путем на коллоидных алюмосиликатных и гидроксидных частицах, а также за счет миграции из подстилающих отложений. Осадки верхнего ЛСК характеризуются значительным разнообразием и большим содержанием органических остатков микрофауны, моллюсков и спорово-пыльцевых комплексов. Фиксируется аутигенное минералообразование.

В составе голоценовых осадков арктических морей России – от мелководья (зона I; до изобаты 25–30 м) через переходную зону (зона II; от 25–50 до 100 м, реже 200 м) к внешнему шельфу (зона III; от 100–200 м и глубже) – отмечаются следующие особенности [Кошелева, 2002; Кошелева, Яшин, 1999].

1. По гранулометрическому составу осадки от преимущественно крупнозернистых становятся тонкозернистыми и глинистыми.

2. По минеральному составу осадки мелководной зоны обогащены устойчивыми минералами. Их состав пестрый и близок породам ближайших областей сноса, сложенных разновозрастными доголоценовыми образованиями. Осадки переходной зоны шельфа полимиктовые, их состав зависит от состава подстилающих пород и пород, слагающих ближайшие области сноса. Для осадков внешнего шельфа характерна унаследованность минерального состава от подстилающих местных источников материала, сложенных разновозрастными породами. От первой зоны к третьей уменьшается выход тяжелой фракции и содержание монтмориллонита, исчезает каолинит, нарастает количество аутигенных минералов.

3. По химическому составу осадки всех зон бедны хромом, свинцом, ванадием, натрием, магнием, титаном, цирконием, железом, марганцем, иттрием. По содержанию реакционноспособных форм железа и марганца донные отложения в основном безжелезистые и безмарганцовистые; содержание железа и марганца на процент – доли процента больше в осадках зон I и III. Повышенные содержания карбоната кальция в мелководной и переходной зонах шельфа связаны с образованием биогенного кальцита; повышенные содержания  $C_{орг}$  в осадках зон I и II обусловлены выносом рек и более заметным фотосинтезом растений, а также поступлением с теплыми атлантическими и тихоокеанскими водами. Содержание фосфора повсеместно меньше 0,1 %, кроме отдельных участков, где его концентрация может достигать 0,6 %. Неравномерно распределен  $SiO_{2аморф}$ , его большие содержания характерны для осадков зон I и III. Микроэлементный состав обусловлен составом пород областей сноса.

Необходимо отметить, что в последнее время в арктических морях кроме активной деятельности экзогенных процессов фиксируется влияние и более глубоких сфер Земли. Система кайнозойских рифтов Арктики [Богданов и др., 1995 и др.] рассматривается как наиболее вероятный канал поступления гидротермального глубинного вещества в верхние слои литосферы (вопрос является малоизученным).

Как достаточно важный объект исследования рассматриваются аутигенные образования (железомарганцевые, карбонатные, пиритовые конкреции и др.). Большое значение они приобретают при расшифровке процессов перераспределения вещества в стадию диагенеза. Известны попытки использования конкреций в стратиграфических целях [Бродская, 1959 и др.]. Вместе с тем систематическое изучение аутигенных образований началось не так давно: часть вопросов требует если не решения, то конкретизации.

**Железомарганцевые образования (ЖМО)** – наиболее распространенный вид аутигенных образований в осадках арктических морей. Арктические ЖМО (конкреции, корки и другие морфотипы) встречаются, как правило, на границе вода – дно в прибрежных частях морей на глубине 50–100 м [Батурин, 2011; Безродных и др., 1984; Богданов и др., 1994; Иванова и др., 2005; Калягин и др., 2001; Стрекопытов, Дубинин, 2001; Ingri, Pontér, 1987]. Обнаружены и погребенные конкреции [Калиненко, 1984]. Чаще всего ЖМО приурочены к алевритовым пескам и песчаным алевритам. Рудная часть состоит преимущественно из рентгеноаморфных сильногидратированных оксидов железа и марганца. Окристаллизованные минеральные фазы представлены ферроксигитом (часто образует тонкие смеси с глинистыми частицами), гетитом, вернадитом, реддингитом, липскомбитом, бернесситом, асболоном, пиролюзитом (?), фосфатами железа; терригенная примесь (ее доля значительна) – кварцем, полевыми шпатами, хлоритом, глинистыми минералами и др. [Батурин, Дубинчук, 2011; Безродных и др., 1984; Гуревич, Яковлев, 2005; Чухров и др., 1976; Шнюков и др., 1987].

Химический состав ЖМО варьируется в широких пределах, но в основном для арктических конкреций и корок характерно доминирование железа над марганцем, высокое содержание кремния, алюминия и некоторых других нерудных макроэлементов. Отмечается относительная обедненность никелем, медью, цинком, свинцом, барием, стронцием и обогащенность ванадием и вольфрамом (для мелководных морских ЖМО, в отличие от глубоководных океанских, вообще типичны низкие содержания основных рудных микроэлементов).

Согласно наиболее распространенной диагенетической гипотезе формирования арктических ЖМО, основную роль в их образовании играет диффузионное и медленное фильтрационное поступление к поверхности дна восстановленных поровых растворов, несущих ионы железа и марганца. В условиях поверхностно-активного слоя происходит окисление этих ионов богатыми кислородом придонными водами холодных течений; резкий скачок окислительно-восстановительного потенциала вызывает выпадение гидроксидов железа и марганца [Гуревич, Яковлев, 2005].

**Аутигенные карбонаты** (в виде стяжений) известны в позднеледниковых глинах Фенноскандии, в морских и пресноводных глинах, суглинках, алевритах на северо-востоке Западной Сибири и западе Таймырской низменности, в горах Путорана, на Чукотке, Аляске, севере Канады и северо-западе США [цит. по: Данилов, 1978, с. 138], в северных морях, на антарктическом шельфе [Леин и др., 2000; Judd, Novland, 2007; Schubert et al., 1997; Suess et al., 1982]. Их форма и размеры весьма разнообразны. Из аутигенных минералов преобладают Mg-кальцит, кальцит и арагонит, нередко находящийся в парагенезисе с пиритом и/или баритом. Иногда определенную роль играют карбонаты марганца, железа, магния; в отдельных случаях отмечаются конкреции с доломитовым цементом. Химический состав прибрежно-морских и морских карбонатных образований варьируется в широких пределах, но в целом отвечает их минеральному составу.

Согласно современным представлениям [Леин, 2004], аутигенное карбонатообразование в океане есть биогеохимический (микробиологический) процесс, вовлекающий в современный цикл углерода:

- органический углерод донных отложений;
- углерод метана (диагенетического, термогенного, термогенного и гидротермального);
- углерод гидротермального метана;
- углерод  $\sum HCO_3^-$  морской воды и гидротермального флюида.

Для арктических морей характерны «карбонатные конкреции, часть которых формируется из углекислоты, образованной при разложении органического вещества осадков, а другая часть – за счет изотопно-легкой углекислоты, образованной при микробном окислении метана» [Леин, 2013, с. 164].

## 1.2 Чукотское море

Несмотря на довольно длительную, с 1878 года, историю исследований, Чукотское море до сих пор является неравномерно и в целом слабо изученным, в том числе в литолого-геохимическом аспекте. Американский (восточный) сектор моря описан более подробно, российский – менее. Непосредственно вопросам осадкообразования в Чукотском море посвящено относительно небольшое количество научных работ, например [Астахов и др., 2008, 2013б; Белов, Огородников, 1976; Грабецкая, Павлидис, 1982; Гусев и др., 2009; Логвиненко, Огородников, 1980; Огородников, Русанов, 1978, 1984; Павлидис, 1982; Павлидис и др., 1983; Семенов, 1965; Шуйский, Огородников, 1981; Carsola, 1954; Creager, McManus, 1965; Diets et al., 1964; Gusev et al., 2009; Keigwin et al., 2006; McCulloch, 1967; Viscosi-Shirley et al., 2003].

Сейчас в российском секторе Чукотского моря намечился новый период активных научно-исследовательских работ (первый наблюдался в 70–80-х гг. прошлого века), и связан он с поиском и освоением месторождений нефти и газа на континентальном шельфе Российской Арктики (как весьма перспективный в этом отношении рассматривается Северо-Чукотский осадочный бассейн), а также мониторингом состояния природной среды Арктики, направленным на выявление причин глобального потепления.

**Донные осадки.** Исследования показывают, что голоценовые отложения Чукотского моря в основном представляют собой монотонную толщу терригенных осадков, сложенных в разных соотношениях алевритовым и глинистым материалом [Кошелева, Яшин, 1999]. Мощность осадочных отложений, накопленных в Чукотском море за голоцен, варьируется от двух десятых и менее до пяти и более метров; расчетный объем отложений – 553,11–749,54 км<sup>3</sup> [Кошелева, Яшин, 1999]. Средняя скорость осадконакопления – 15 см/тыс. лет, что характерно для полярных морей и многих окраинных морей Мирового океана [Шуйский, Огородников, 1981].

**Источники и баланс осадочного материала.** Осадки Чукотского моря питаются из нескольких источников. Первые оценки баланса осадочного материала были выполнены Н. А. Беловым (1976), Ю. Д. Шуйским и В. И. Огородниковым (1981). Согласно этим оценкам, материал поступает в бассейн в результате абразии берегов и подводного склона, а также с речным стоком (его второстепенное значение обусловлено перехватом речных наносов многочисленными лагунами, лиманами, заливами, часто – малым речным стоком). Кроме того, поставка материала происходит в ходе ледового сноса и эоловых процессов (роль ветрового выноса терригенного материала несущественна). Значительная, а то и главная роль в поставке осадочного материала отводится Берингоморскому течению – до 154 млн т/год



[Лисицын, 1966]. Вопрос питания Чукотского моря осадочным материалом отражен также в публикации Ю. А. Павлидиса [1982].

По новым расчетам [Кошелева, Яшин, 1999], основным источником терригенного материала в бассейне (64,7 %) являются размывающиеся на отдельных подводных возвышенностях более древние осадки или породы дна (см. таблицу 1). Абразия берегов поставляет в прибрежную часть бассейна 22,4 % вещества. Ледовый материал оказывает заметное влияние на формирование осадков прежде всего аэрозольного происхождения (5,7 %). Доля материала речного стока невелика – 2,9 %. Более четверти (27,5 %) поступающего материала выносится за пределы Чукотского моря.

В вещественном составе голоценовых осадков Чукотского моря выявлены определенные особенности.

1. Осадки имеют пеструю, от серой до бурой, окраску. Серые (восстановленные) осадки характерны для зон, обогащенных органическим веществом (основная часть бассейна); развитие верхнего коричневатого-бурого (окисленного) слоя осадков отмечается в районах с повышенными содержаниями железа и марганца и низкими концентрациями органического вещества (северная относительно глубоководная часть моря) [Логвиненко, Огородников, 1980]. Типичны значительная влажность и малая плотность.

2. В Чукотском море распространены осадки всех гранулометрических типов – от песков до пелитовых илов; обнаруживается крупнообломочный материал [Белов, Огородников, 1976; Гусев и др., 2009; Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982; Шуйский, Огородников, 1981]. Показано, что распределение отдельных гранулометрических фракций осадков подчиняется основным законам механической дифференциации (здесь и далее, до конца абзаца, по [Шуйский, Огородников, 1981]). Наиболее четко она проявляется у песчаной (1,0–0,1 мм) и пелитовой (мельче 0,01 мм) фракций и менее выражена у алевритовой и субколлоидой. В целом же от берегов в сторону открытого моря происходит увеличение количества тонкозернистых и уменьшение грубозернистых частиц. В подобных закономерностях находит отражение циркумконтинентальная зональность осадконакопления. На общем фоне циркумконтинентальной зональности отчетливо выражена и вертикальная (гипсометрическая), проявляющаяся в изменениях гранулометрического состава в зависимости от глубин, причем в морских фациальных условиях на гранулометрию осадков влияют не столько абсолютные глубины, сколько относительные перепады глубин и конфигурации рельефа дна. Определенный отпечаток на гранулометрию накладывает также ледовый покров.

3. Для осадков Чукотского моря характерно наличие землистых масс гидроксидов железа, редких лимонит-гематитовых псевдоморфоз, малое (но повсеместное) присутствие

мельчайших зернышек пирита, пленок и сгустков органического вещества, трубочек полихет и водорослей.

Иногда на поверхности дна или в осадочной толще встречаются конкреции, но только железомарганцевые (см. «Железомарганцевые образования», с. 20). Факты обнаружения конкреций иных типов, например карбонатных, в Чукотском море не зафиксированы. О них упоминается при описании морских и ледниково-морских отложений нижнего плейстоцена, распространенных по берегам у входа в залив Лаврентия и на восточном берегу южной части залива Креста на Чукотском полуострове [Петров, 1966].

4. Минеральный состав осадков Чукотского моря преимущественно полевошпат-кварцевый, иногда (на мелководье) кварц-полевошпатовый. Гравийно-галечно-щебенистый материал представлен метаморфическими породами близрасположенных областей сноса (см. главу 3). Выход минералов тяжелой фракции от крупноалевритовой фракции осадка – менее 9,5 %, в основном – менее 5 %.

Терригенно-минералогические провинции по акцессорным минералам на мелководье – чернорудные, в центральной части бассейна – пироксеновые, на внешнем шельфе – пироксеновые и амфиболовые, в переходной зоне шельфа – эпидотовые и амфиболовые с конкретными минералами-индикаторами. Лицо терригенно-минералогической провинции определяют черные минералы и пироксены, в меньшей степени – эпидот-цоизиты и амфиболы. По сравнению с плейстоценовыми, в голоценовых осадках меньше амфиболов и эпидота и больше черных рудных минералов и пироксенов. Аутигенные минералы: кварцин, микростяжения кремней, опал, глауконит, кальцит, сидерит, железисто-карбонатные агрегаты, пирит и марказит, гидрослюды. По глинистой фракции осадки хлорит-гидрослюдистые, в меньшей степени – монтмориллонит-гидрослюдистые, на мелководье иногда каолинит-хлорит-гидрослюдистые.

Результаты изучения минерального состава донных осадков Чукотского моря изложены в публикациях [Грабевская, Павлидис, 1982; Гусев и др., 2009; Viscosi-Shirley et al., 2003 и др.]. Наиболее полно и обстоятельно вопрос, пожалуй, рассмотрен в монографии [Кошелева, Яшин, 1999].

5. В валовом химическом составе наблюдается высокое содержание кремния – 27,14–41,92 % [Белов, Огородников, 1976]. Оно увеличивается в песчаных отложениях и уменьшается в глинистых. Наиболее высокое содержание (39,36–41,92 %) зафиксировано в пробах, отобранных на западном мелководье, прилегающем к Чукотскому полуострову, и у побережья полуострова Аляска. Для алюминия, железа и других макроэлементов характерна обратная зависимость: увеличение содержания в глинистых осадках и уменьшение в песчаных. В осадках

содержится незначительно количество свободной углекислоты, щелочные макроэлементы (Na, K) доминируют над щелочноземельными (Mg, Ca) [Белов, Огородников, 1976].

Содержание железа и марганца малó. По разным данным [Белов, Огородников, 1976; Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982], железа – около 1–5 %, марганца – от 0,01 до 1,25 %. Повышенные содержания железа и марганца в северной части моря обусловлены смешением вод, имеющих различные гидрохимические показатели (атлантических, поднимающихся по материковому склону, и чукотских, сформированных в основном тихоокеанскими водными массами: см. главу 3). В результате такого смешения возникают наиболее благоприятные условия для окислительных процессов, что и создает повышенные концентрации железа и марганца в осадках [Белов, Огородников, 1976]. На остальной части шельфа увеличение содержания железа и марганца идет с увеличением дисперсности донных отложений.

По содержанию карбоната кальция осадки можно считать бескарбонатными [Белов, Огородников, 1976; Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982]. Максимальные концентрации (до 10,87 %) приурочены к участку северо-восточнее Колючинской губы, где, по-видимому, выходят на поверхность дна и размываются нижнекаменноугольные терригенно-карбонатные породы [Кошелева, Яшин, 1999]. Несколько повышенные содержания карбоната кальция в осадках восточной части моря – результат поступления обломочного карбоната с Канадского арктического архипелага [Белов, Огородников, 1976]. Микроскопическое изучение голоценовых отложений, вскрытых трубками в Чукотском море, показывают наличие бентосных фораминифер, представленных секреторными видами с карбонатной раковиной (агглютинирующие формы практически не встречаются) [Саидова, 1994]. Таким образом, карбонат кальция является частично биогенным, частично терригенным. Согласно [Белов, Огородников, 1976], фауна фораминифер решающего влияния на формирование биогенного карбоната не оказывает. Содержание фосфора в осадках – не более 0,21 % [Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982]; повышенные концентрации элемента характерны для западной и центральной частей бассейна. Количество  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  достигает 10–14 %; его генезис биогенный [Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982]. Средние содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  во всех гранулометрических типах осадков выше, чем в других арктических морях, хотя максимальное количество  $\text{C}_{\text{орг}}$  принципиально не меняется: В. А. Кошелева и Д. С. Яшин [1999] приводят для глинистых разностей значения 2,5–3 %. Данные по содержанию  $\text{C}_{\text{орг}}$  в осадках Чукотского моря опубликованы также в работах [Леин и др., 2007; Павлидис, 1982; Романкевич, Ветров, 2001; Grebmeier et al., 2006; The Organic Carbon..., 2004].

Наиболее детально химический состав донных осадков Чукотского моря, особенно микроэлементный, рассмотрен в публикациях А. С. Астахова с соавторами [2008, 2013б]. В

этих работах обозначены некоторые литохимические признаки современной геодинамической активности, наблюдаемой в регионе.

6. В осадках Чукотского моря встречаются многочисленные и разнообразные раковины двустворчатых моллюсков (арктические, высокоарктические, атлантические и тихоокеанские виды); микрофауна представлена арктическими, в незначительном количестве атлантическими видами; спорово-пыльцевой комплекс сложен преимущественно тундровой растительностью; диатомовые водоросли разнообразны и многочисленны [Гусев и др., 2009; Кошелева, Яшин, 1999; Полякова, 1989, 1997; Саидова, 1994; Grebmeier et al., 2006 и др.]. На фоне других морей Северного Ледовитого океана Чукотское море выделяется высокой биопродуктивностью фитопланктона (локальной). В результате в тонкозернистых осадках южной части бассейна отмечается высокое содержание  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ ; на отдельных участках зафиксирована очень высокая продуктивность бентоса [Сиренко, Гагаев, 2007; Grebmeier et al., 2006]. Многие исследователи объясняют это проникновением через Берингов пролив относительно теплых тихоокеанских вод. В Чукотском море (в отличие, например, от Восточно-Сибирского) доминирует морское планктоногенное органическое вещество [Ветров и др., 2008; Grebmeier et al., 2006].

Типизация обстановок осадконакопления. На основе комплекса геолого-геоморфологических, геофизических, литодинамических и литологических данных выделено 11 фациально-седиментационных зон Чукотского моря [Павлидис, 1982]. Предложенная схема осадконакопления не рассматривается как конечный вариант. «Остаются еще нерешенными некоторые вопросы, среди которых следует назвать: выяснения полных мощностей голоценовых отложений на шельфе и более детальное биостратиграфическое расчленение толщи, установление состава и происхождения отложений, подстилающих голоценовую толщу, определение геохимической обстановки осадконакопления, составление четких литодинамических схем и расчет баланса осадочного материала в Чукотском море» [Павлидис, 1982, с. 75]. Коллективом исследователей под руководством А. С. Астахова проведена литохимическая типизация обстановок осадконакопления в Чукотском море с применением методов многокомпонентного статистического анализа [Астахов и др., 2008, 2013б]. В итоге сделан вывод о том, что «основным фактором, определяющим кластеризацию, является разделение первично терригенного вещества по размерности в процессе осадконакопления» [Астахов и др., 2013б, с. 303].

**Железомарганцевые образования** в Чукотском море распространены локально: в Колючинской губе на северном побережье Чукотского полуострова (плоские конкреции с каменистым ядром, а также сигарообразные безъядерные и трубчатые ЖМО), в подводном каньоне Геральд (конкреции и корки на поверхности валунов и гальки) и примыкающем к нему северном мелководье острова Врангеля, а также на северо-западном шельфе Аляски

(черепитчатые конкреции без галечникового ядра) на глубинах 14–95 м в верхнем слое осадочной толщи или на границе вода – дно [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982; Кошелева, Яшин, 1999]. Есть информация о микроконкрециях (узелковых, гроздевидных, глобулярных и др.) в толще осадков Чукотской котловины (впадины) [Wang et al., 2010, 2013]. Исследователи видят причину такого разнообразия внешних форм ЖМО в особенностях физико-химических и гидрогеодинамических условий среды (см. главу 3).

«Аутигенная минералогическая фаза, образующая главную часть конкреций, – это колломорфные высокогидратированные окислы железа и марганца» [Калининко, Павлидис, 1982, с. 121]. Окристаллизованные минеральные фазы железа и марганца представлены гематитом, вернадитом и асболоном [Батурин, Дубинчук, 2011]. В ЖМК найдены микроскопические вкрапления пирита, рассеянные игольчатые кристаллиты рутила и единичные частицы самородного золота [Батурин, Дубинчук, 2011; Шнюков и др., 1987].

Конкреции Чукотского моря железистые: Mn/Fe варьируется от 0,01 до 0,87. Характерно высокое содержание нерудных макроэлементов (связано с наличием терригенной примеси) и различное, но в целом низкое или очень низкое (относительно океанских ЖМО) содержание цветных, благородных металлов и других ценных микроэлементов [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982].

Исследователи относят ЖМК Чукотского моря к диагенетическим. На это, в частности, указывает морфология стяжений, обогащенность нижней части ЖМК (по сравнению с верхней) и поверхностного слоя подстилающих осадков (по сравнению с нижележащей осадочной толщей) основными рудообразующими элементами – железом, марганцем, фосфором [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982]. Результаты био-, геохимических и петрографических исследований подтверждают активный характер постседиментационных изменений, происходящих в осадках Чукотского моря, в том числе на участках дна, где обнаружены ЖМК [Кошелева, 2002; Кошелева, Яшин, 1999; Леин и др., 2007; Grebmeier et al., 2006]. Правда, в последнее время на основе некоторых особенностей состава ЖМК с учетом общей геодинамической обстановки в регионе (см. главу 3) делаются предположения о возможной поставке в конкреции рудного материала из глубинных разломов [Батурин, Дубинчук, 2011], а также о том, что необходимые условия формирования стяжений могут определяться влиянием флюидодинамических процессов, характерных для современной стадии развития грабен-рифтовой системы [Астахов и др., 2010в].

*Обзор литературы, посвященной различным аспектам полярного морского седиментогенеза, показал, что для Чукотского моря – одного из наименее изученных морей Российской Арктики – особого внимания и конкретизации требуют такие вопросы, как 1)*

*химический состав осадков (имеющиеся сведения касаются главным образом макрокомпонентного состава осадков внутреннего шельфа и получены с помощью устаревших методов анализа), 2) аутигенное минералообразование, 3) факторы и обстановки, определяющие накопление химических элементов в осадках и образование аутигенных минералов (стяжений).*

## Глава 2 Материал и методы исследований

**Фактический материал.** Донные осадки. Материалом для исследований послужили пробы поверхностных (0–3 см) донных осадков (всего 296 проб), отобранные с глубин от 16 до 3850 м на всей площади шельфа Чукотского моря, а также в восточной части Восточно-Сибирского моря и примыкающей открытой части Северного Ледовитого океана в рейсах НИС «Профессор Хромов» 2002 и 2004 гг. (9 и 13 проб соответственно отобраны сотрудниками ТОИ ДВО РАН), 2009 и 2012 гг. (114 проб, отбор проводился лично автором в составе геологического отряда, состоящего из сотрудников ТОИ ДВО РАН и ФГУП «ВНИИОкеангеология»). Часть проб получена в экспедициях на ГИСУ «Север» 2006 года (13 проб отобраны сотрудниками ТОИ ДВО РАН), НИС «Академик М. А. Лаврентьев» 2008 года (33 пробы отобраны сотрудниками ТОИ ДВО РАН) и на морском буксире «Шуя» 2006 года (76 проб получены от Е. А. Гусева, ФГУП «ВНИИОкеангеология»). Для исследований привлекался материал, отобранный в ходе 1-й и 2-й Китайских арктических экспедиций 1999 и 2003 гг. (38 проб получены от Ван Рудзяна, Университет Тончжи, Шанхай) (рисунок 1). Кроме того, в работе использованы данные, полученные и опубликованные по осадкам Чукотского моря другими исследователями: 37 проб – [Feder et al., 1994], 41 проба – [Viscosi-Shirley et al., 2003].

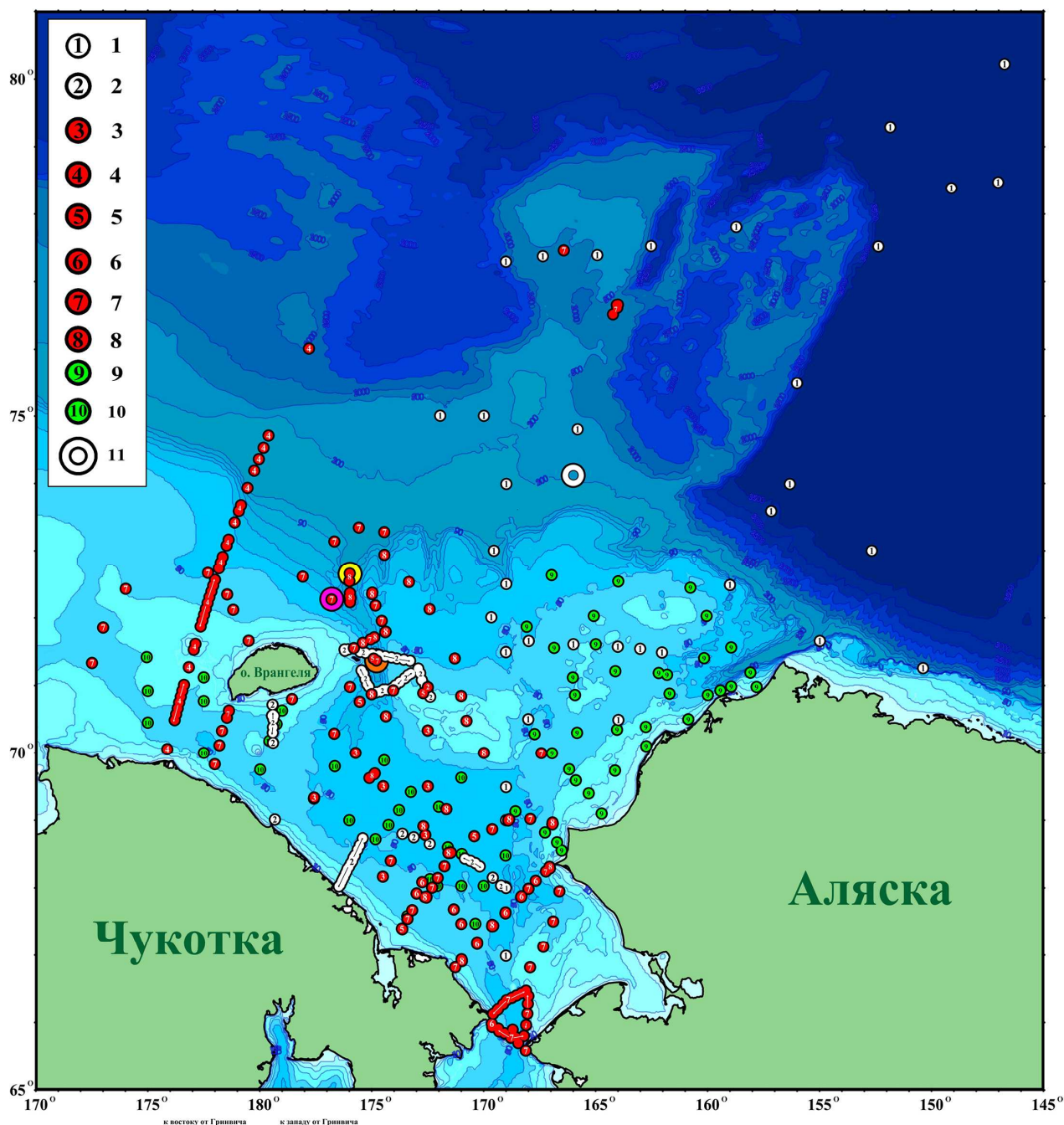
**Аутигенные образования.** Материалом для исследований послужили более 100 образцов ЖМК и крупный фрагмент аутигенного карбоната. Образцы отобраны в каньоне Геральд и на бровке шельфа в северо-восточной части моря (рисунок 1). Весь материал получен лично автором в научных экспедициях на НИС «Профессор Хромов» (2009 г., 2012 г.).

**Методы.** Пробоотбор осадков осуществлялся с помощью дночерпателей и грунтовых трубок. Аутигенные образования поднимались на борт судна тралами, биологической драгой и дночерпателями. Для изучения геологического материала использовался комплекс аналитических и статистических методов. Основное внимание было уделено анализу химического состава осадков (таблица 2, подробнее – см. текст).

Для определения химического состава осадков и аутигенных образований пробы высушивались до постоянного веса при температуре 25 °С, истирались в агатовой ступке и просеивались через сита с размером ячейки 0,05 или 0,063 мм. После отбирались навески для определения содержания биогенных компонентов массой от 1 до 5 г (в зависимости от предполагаемого содержания) и навески на общий химический анализ.

Содержания макрокомпонентов (за исключением Si, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>) в большинстве проб осадков, а также всех аутигенных образований определялись методом ИСП-АЭС на приборе iCAP 6500DUO (Thermo Electron Corporation, США), микрокомпонентов (кроме Hg, Au, Pt, Os,

Ir, Ru) – методом ИСП-МС на спектрометре Agilent 7500с (Agilent Technologies, США) в ДВГИ ДВО РАН.



1, 2 – станции отбора проб осадков, переданных ТОИ ДВО РАН: 1 – Университетом Тончжи, Шанхай, 2 – ФГУП «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург; 3–8 – станции отбора проб осадков, выполненные сотрудниками ТОИ ДВО РАН: 3 – НИС «Профессор Хромов», 2002 г., 4 – НИС «Академик М. А. Лаврентьев», 2008 г., 5 – НИС «Профессор Хромов», 2004 г., 6 – ГИСУ «Север», 2006 г., 7 – НИС «Профессор Хромов», 2009 г., 8 – НИС «Профессор Хромов», 2012 г.; 9, 10 – литературные данные: 9 – [Feder et al., 1994], 10 – [Viscosi-Shirley et al., 2003]; 11 – станции отбора образцов аутигенных образований, выполненные сотрудниками ТОИ ДВО РАН (цветом обозначены: розовым – ст. 1, дискоидальные железомарганцевые конкреции (ЖМК), НИС «Профессор Хромов», 2009 г.; оранжевым – ст. 3, лепешковидные ЖМК, НИС «Профессор Хромов», 2009 г.; белым – ст. 4, плитчатые ЖМК и фрагмент аутигенного карбоната, НИС «Профессор Хромов», 2009 г.; желтым – ст. 5, дискоидальная ЖМК, НИС «Профессор Хромов», 2012 г.)

Рисунок 1 – Карта фактического материала.



Таблица 2 – Методы анализа, использованные при изучении химического состава осадков Чукотского моря (более подробное описание – см. текст)

Компонент осадка	Метод определения содержания, прибор	Количество проанализированных проб
Si	гравиметрический	249
Ti, Ca, Mg	- ИСП-АЭС, прибор iCAP 6500DUO (основной); - атомно-эмиссионный, прибор Plasmaquant 110	195 (Ti), 196 (Ca), 237 (Mg)
Fe, Mn	- ИСП-АЭС, прибор iCAP 6500DUO (основной); - колориметрический, приборы ФЭК-2 и СД-46	223 (здесь и далее по колонке: цифра относится к каждому из перечисленных элементов)
Al, K, Na, P	ИСП-АЭС, прибор iCAP 6500DUO	249 (Al), 163 (K), 123 (Na), 103 (P)
C <sub>орг</sub>	- термокатализ (термокаталитическое окисление), прибор типа TOC-V <sub>CPN</sub> (основной); - газовая хроматография, прибор EA 1110 CHNS-O	299
SiO <sub>2аморф</sub>	колориметрический	72
Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Y, Yb, Zn, Zr, La, Mo, Cd	- ИСП-МС, прибор Agilent 7500c (основной); - атомно-эмиссионный, прибор Plasmaquant 110	196 (Ba, Y, Yb), 223 (Co, Cr, Cu, Ni, V, Zn), 237 (Sr, La), 181 (Zr), 103 (Mo, Cd)
Au, Pt, Os, Ir, Ru	нейтронно-активационный	21
Ag	- ИСП-МС, прибор Agilent 7500c (основной); - нейтронно-активационный	141
Hg	атомно-абсорбционная спектрометрия, прибор РА-915+	280

Предварительно измельченные и просеянные пробы высушивались до постоянного веса при температуре 105 °С, а затем вскрывались прямым кислотным разложением (на этой стадии в обработке каждой категории проб – осадки, ЖМК, карбонаты – имелась своя специфика). Как внутренний стандарт при анализе использовался раствор в первом случае кадмия (концентрация 10<sup>-4</sup> %), во втором – индия (концентрация 10<sup>-7</sup> %). Контроль качества элементопределений осуществлялся с применением стандартных образцов океанических отложений СДО-4 (ООПЕ601) и СДО-6 (ООПЕ603). Относительное стандартное отклонение при определении содержания макроэлементов (кроме Si, SiO<sub>2аморф</sub>, C<sub>орг</sub>) составило 4–5 %, молибдена – 20–25 %, серебра из-за больших природных вариаций – более 50 % [Кузнецова и др., 2004] (для части проб донных осадков содержание серебра и других благородных металлов

определено с большей точностью нейтронно-активационным методом – см. следующий абзац), остальных элементов (за исключением Hg, Au, Pt, Os, Ir, Ru) – 5–15 %, что в целом соответствует критериям качества выполнения элементного анализа, принятым в геохимических исследованиях [Кузнецова, Зарубина, 2004]. Часть проб осадков (полученных в основном в рейсах 2002–2006 гг.) анализировалась следующим образом. Определение содержаний микроэлементов и некоторых макроэлементов (Ti, Ca, Mg) выполнялось атомно-эмиссионным методом на спектрально-аналитическом комплексе Plasmaquant 110 (Analytik Jena AG, Германия) по стандартной методике [Кузьмин, Зотов, 1988; Томпсон, Уолш, 1988]. Разложение образцов производилось в смеси концентрированных азотной и плавиковой кислот. Содержание железа и марганца определялось колориметрическим методом на приборах ФЭК-2 и СД-46.

Определение содержаний благородных металлов (Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru) в осадках выполнялось нейтронно-активационным методом с микропробирным концентрированием по стандартной методике [Аникиев и др., 1997; Kolesov, Sapozhnikov, 1995] в ГЕОХИ РАН. Пределы обнаружения для серебра, рутения, осмия, платины составили  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  %, золота и иридия –  $10^{-9}$ – $10^{-12}$  %, погрешность измерений – от 5 до 30 % в зависимости от уровня содержаний элемента в пробе.

Содержание ртути определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе РА-915+ с пиролитической приставкой РП-91С (ООО «Люмэкс», Россия) по стандартной методике [Sholupov et al., 2004] в ТОИ ДВО РАН. Контроль качества элементопределений осуществлялся при помощи стандартного образца ГСО 7183-95. Относительное стандартное отклонение составило 1,75 %.

Содержание кремния в пробах осадков и аутигенных образований определялось методом гравиметрии в ДВГИ ДВО РАН. Для разложения образца использовалось сплавление с безводным карбонатом натрия. Чтобы полностью выделить кремнекислоту, раствор выпаривался, осадок высушивался, прокаливался до постоянной массы и взвешивался. Далее, после обработки фтористоводородной кислотой и отгонки летучих соединений кремния, выполнялось повторное взвешивание. Содержание кремния в навеске образца устанавливалось по разности первого и второго взвешиваний. Относительное стандартное отклонение не превышало 2–5 %.

Содержание  $C_{орг}$  (а также общего углерода  $C_{общ}$  и общего неорганического углерода) в основной массе проб осадков и всех аутигенных образованиях определялось на анализаторе типа TOC-V<sub>CPN</sub> с приставкой SSM-5000A (Shimadzu, Япония) в ТОИ ДВО РАН. Работа анализатора основана на методе измерения поглощения инфракрасного излучения двуокисью углерода, образующейся при сжигании органических и неорганических соединений. В

зависимости от используемого стандарта (ГСО 1757 или ГСО 1756) относительное стандартное отклонение при сжигании  $C_{\text{общ}}$  составляло соответственно 2,89 или 1,114 %, общего неорганического углерода – 2,89 или 0,75 %. Содержание  $C_{\text{орг}}$  определялось по разности общего и общего неорганического углерода. Для части проб осадков, отобранных преимущественно в научных экспедициях 2002–2006 гг., анализ содержания  $C_{\text{общ}}$  производился на приборе EA 1110 CHNS-O (Carlo Erba, Италия),  $C_{\text{орг}}$  – после извлечения из проб карбонатов однонормальным раствором соляной кислоты [Stax, Stein, 1993].

Содержание  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  во всех пробах осадков (часть данных взята из работы [Астахов и др., 2013б]) определялось колориметрическим методом в двойной содовой вытяжке на водяной бане в соответствии с методикой [Mortlock, Froelich, 1989]. Анализ выполнялся в Университете Тончжи, Шанхай.

В итоге количество элементоопределений для осадков составило более 5000 по 34 элементам, для аутигенных образований – свыше 300 по более чем 50 элементам. Кроме того, в работе использованы данные по химическому составу осадков Чукотского моря, полученные и опубликованные другими исследователями [Астахов и др., 2013б; Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003].

Качественный и полуколичественный рентгенофлуоресцентный анализ проб осадков и образцов аутигенных образований также проводился, но его результаты используются в работе только как вспомогательные.

Определение гранулометрического состава донных осадков (126 проб) выполнено на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 ECONOMY (Fritsch, Германия) [Боцул, 2002] и частично водно-ситовым методом по стандартной методике [Петелин, 1967] в ТОИ ДВО РАН.

Минеральный состав донных осадков изучался выборочно (семь проб из Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд; координаты станций пробоотбора – см. примечание к таблице 3, с. 41). Минералогия псаммит-алевритовой составляющей определялась иммерсионным методом (минералы легкой и тяжелой фракций, разделенные в бромформе с удельным весом 2,7, идентифицировались в препаратах на микроскопе МИН-8), пелитовой – в ходе рентгеноструктурного анализа (в качестве основного использовался прибор ДРОН-3: излучение –  $\text{CuK}\alpha$ , Ni-фильтр, напряжение анода рентгеновской трубки – 25 кВ, сила тока – 20 мА) в ИЗК СО РАН. Фракции разделялись водно-ситовым методом.

Минеральный состав аутигенных образований (пять проб: три – ЖМК, две – карбонат) анализировался на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (Россия) в ДВГИ ДВО РАН. В работе использовалась рентгеновская трубка с медным анодом БСВ-23. Съемка проводилась в интервале углов  $2\Theta = 4^\circ \div 70^\circ$  в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Напряжение анода рентгеновской трубки

составляло 35 кВ, сила тока – 10 мА, угол отражения монохроматора – 13°. Присутствие в образце минеральной фазы считалось доказанным, если экспериментальные значения межплоскостных расстояний к порядку отражения от плоскости совпадали со справочными данными по трем-четырем самым интенсивным линиям.

Определение химического состава микроучастков поверхности (частиц) аутигенных образований и осадков выполнено на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 (JEOL Ltd., Япония) в ДВГИ ДВО РАН по отработанной методике [Колесник, Колесник, 2013, 2015]. На стадии подготовки к анализу для придания хрупким и пористым образцам ЖМК необходимой механической прочности использовалась пропитка из эпоксидной смолы. В дальнейшем из образцов аутигенных образований было изготовлено шесть аншлифов: по одному на каждую станцию отбора ЖМК, а также два аншлифа карбоната. При полировке поверхности аншлифов применялись алмазные пасты различной размерности на органической основе, не содержащие в своем составе каких-либо металлов в количествах, достигающих предела обнаружения прибора, – 0,01 вес. %. Осадки к анализу готовились следующим образом: выделенный водно-ситовым методом песчано-алевритовый материал клеился на полоски проводящего скотча или крепился на столбики. Всего было подготовлено 15 полосок (столбиков) – по одной-две на каждую из девяти проб осадков, отобранных для изучения под микронзондом. Аншлифы и полоски/столбики напылялись тонким слоем углерода. В ходе анализа энергетическое разрешение детектора на MnK $\alpha$ -линии составляло 137 эВ, ускоряющее напряжение – 20 кВ, сила тока – 10<sup>-8</sup> А, угол отбора рентгеновского излучения – 45°. Объем анализируемой области не превышал в диаметре 2–5 мкм. Содержание элементов рассчитывалось автоматически (с коррекцией матричных эффектов) из отношения интенсивностей линий, излучаемых образцом, к интенсивностям тех же линий, полученных на стандартах (задействован не настроенный набор стандартов). Погрешность измерений не превышала 2 отн. %. Затруднения вызывал только количественный анализ содержаний легких элементов, в том числе кислорода и углерода (последний, из-за углеродного напыления образцов, в результатах анализа вообще не учитывался). В итоге получены 228 изображений поверхности аншлифов аутигенных образований и столбиков/полосок осадков в отраженных электронах (ЖМК – 78, карбонат – 65, осадки – 85 фото), а также 1072 энергодисперсионных рентгеновских спектра вещества с данными о его химическом составе (ЖМК – 440, карбонат – 199, осадки – 433 анализов). Соответствие вещества конкретной минеральной фазе проверялось сопоставлением химического состава проанализированного участка поверхности (частицы) с «эталонным» (из справочной литературы) составом того или иного минерала.

Относительно небольшие по объему электронно-микронзондовые работы по определению химического состава отдельных минеральных зерен железа и марганца (100 анализов, 12 спектров, 19 фото), выявленных в ЖМК, проведены в ИГХ СО РАН.

Определение изотопного состава углерода и кислорода ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) в аутигенном карбонате (три пробы из разных частей образца) выполнено с использованием комплекса аппаратуры корпорации Thermoelectron: масс-спектрометра Delta V Advantage и установки Gas-Bench-II. Разложение проб и стандартов КН-2 и NBS-19 проводилось с помощью фосфорной кислоты при 50 °С. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  получены в промилле (‰) относительно стандарта V-PDB,  $\delta^{18}\text{O}$  – относительно стандарта V-SMOW (для дальнейшей работы пересчитаны на V-PDB). Точность (воспроизводимость) определения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  находится в пределах  $\pm 0,2$  ‰. Определение выполнено в ГИН РАН.

Статистический анализ. Графическая обработка данных. База данных, полученная по химическому составу осадков Чукотского моря и дополненная литературными сведениями [Астахов и др., 2013б; Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003], анализировалась в два этапа. На первом этапе использовались методы преобразования цифровой информации в графическую. Для этого с помощью программы вычерчивания карт Surfer 9 (Golden Software Inc., США) в прямоугольной системе координат методом kriging были построены карты распределения 34 химических элементов и биогенных компонентов. На втором этапе применялись методы многокомпонентной статистики – корреляционный и кластерный анализы (оба проведены с помощью программного пакета Statistica 8). Для первого были вычислены парные коэффициенты корреляции с определением значимости по критерию Пирсона ( $p < 0,05$ ), для второго – создана полная выборка по 181 станции с информацией о содержании 22 химических элементов. При выделении кластерных групп использовался метод наиболее удаленного соседа (complete linkage), в качестве меры сходства был выбран коэффициент корреляции Пирсона.

*Итак, материалом для исследований послужили 296 проб донных осадков и свыше 100 образцов аутигенных образований Чукотского моря. Для изучения фактического материала (гранулометрический, минеральный, химический, изотопный состав) задействован комплекс аналитических методов (более 10). Основное внимание уделено изучению валового химического состава осадков (свыше 5000 определений по 34 компонентам осадка), а также изучению осадков на микроуровне (более 400 анализов химического состава частиц осадка). Данные по валовому химическому составу осадков обработаны методами математической статистики.*

## Глава 3 Условия современного осадконакопления в Чукотском море

В главе рассматриваются геологическое строение континентального обрамления, геодинамические условия, морфология дна, климат и гидрология Чукотского моря.

**Геологическое строение континентального обрамления. Петрофонд** (приводится по работам [Геология СССР, 1970а, 1970б; Ирдли, 1954; Лисицын, 1966; Павлидис, 1982; Smith, 1939], с учетом [Геология..., 2004; Grantz et al., 1990; Tectonic Evolution..., 2002; Thurston, Theiss, 1987 и др.]). Континентальное обрамление Чукотского моря в геологическом отношении весьма разнообразно, что создает возможность для поступления в бассейн терригенного материала различного петрографического и минералогического состава (рисунок 2).

Со стороны Чукотки в береговую зону Чукотского моря поступают продукты разрушения следующих основных комплексов коренных пород.

1. Комплекс пород, развитый в бассейне реки Чегитун (Восточная Чукотка), включающий протерозойские гнейсы; известняки, доломиты, мергели ордовика; сланцы силура; известняки, филлиты, известковистые сланцы девона; известняки, песчаники, алевролиты нижнего карбона. Определенное значение имеют протерозойские гранитоидные интрузии.

2. Комплекс пород, развитый в бассейнах рек Амгуэма и Экитан (Северо-Восточная Чукотка), включающий алевролиты и песчаники, а также покровы андезитовых, дацитовых, липаритовых лав мела.

3. Комплекс девонских терригенных осадочных пород (песчаники, сланцы, алевролиты) междуречья Рывеем – Яканваам (Северная Чукотка).

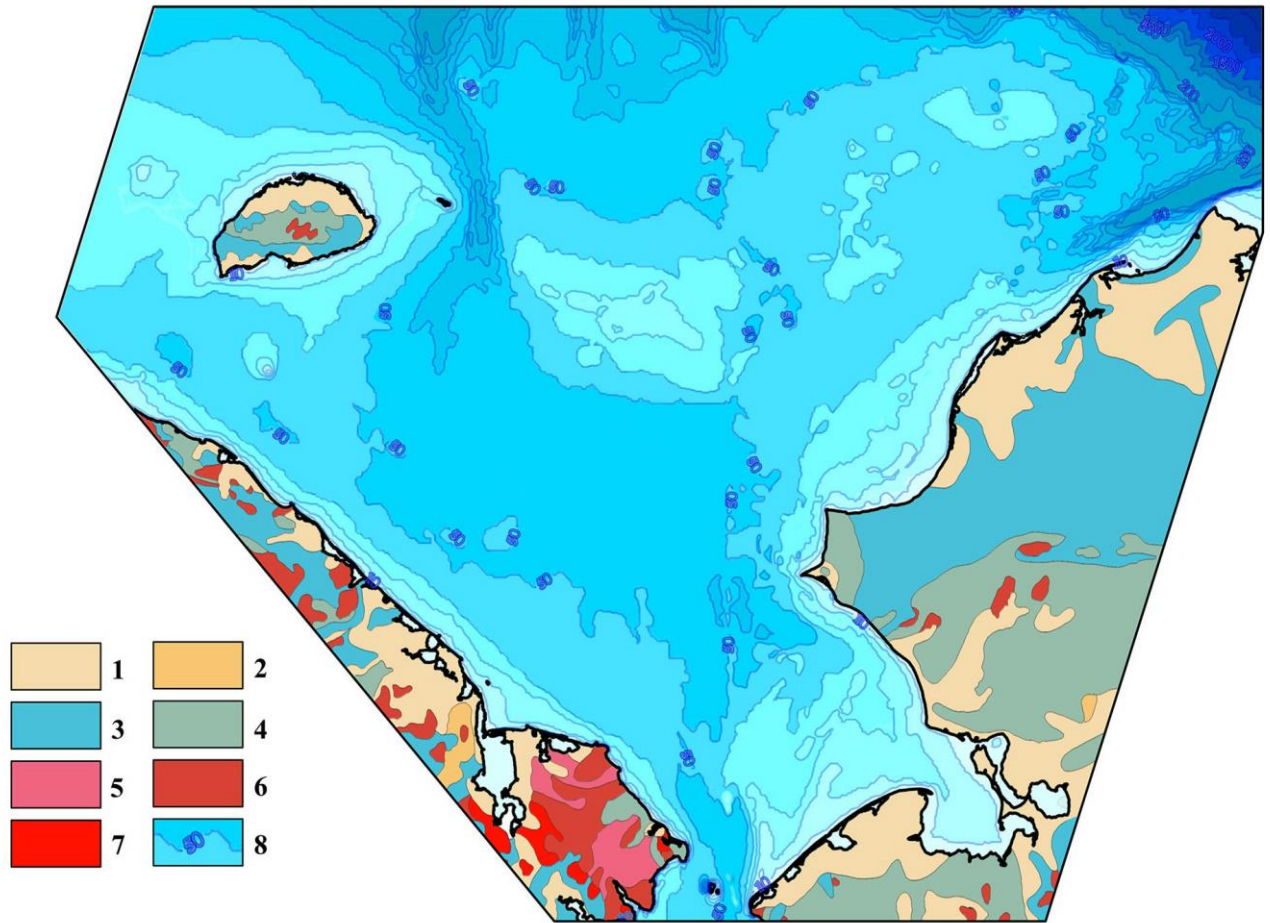
4. Девонские и нижнекарбоновые осадочные породы (песчаники, алевролиты, сланцы), обнажающиеся в береговых обрывах на участке берега от мыса Инкигур почти до Уэлена (за исключением лагуны Инун).

5. Комплекс пород побережья в районе от поселка Уэлен до мыса Дежнева, включающий главным образом метаморфиты протерозоя, известняки нижнего карбона и меловые нефелиновые сиениты.

6. Гранитоидные меловые интрузии мысов Шмидта (Северная Чукотка, у пролива Лонга), Сердце-Камень (Восточная Чукотка) и др.

Западная часть Аляски, примыкающая к Чукотскому морю, геоморфологически подразделяется с севера на юг на следующие области: Арктическая

прибрежная равнина, хребет Брукса (занимает центральную часть региона), плато и низменность Центрального Юкона, полуостров Сьюард (с запада обрамляет Берингов пролив).



1–7 – континентальные отложения: 1 – четвертичные, 2 – палеоген-неогеновые, 3 – мезозойские, 4 – палеозойские, 5 – докембрийские, 6 – гранитоиды, гранодиориты, диориты, 7 – диабазы, габбро, долериты; 8 – изобаты, по данным Генеральной батиметрической карты океанов (ГЕБКО\_08)

Рисунок 2 – Геологическая схема континентального обрамления Чукотского моря, по [Павлидис, 1982].

Палеозойские породы Аляски обнажаются главным образом на хребте Брукса, полуострове Сьюард и Центральном плато. Наиболее полный разрез палеозоя известен в пределах Центрального плато в районе рек Юкон и Танана. Развиты основные вулканические лавы типа базальтов и диабазов. Кроме вулканических пород, толща палеозоя включает здесь осадочные породы: глинистые сланцы, песчаники, конгломераты, известняки и др.

Антиклинорий хребта Брукса в центре сложен палеозойскими метаморфическими породами. В заливе Коцебу (самый крупный залив Западной Аляски) довольно близко к берегу подходят отроги этого хребта (горы Де-Лонга), сложенные образованиями верхнего девона и карбона. У мыса Лисберн обнажаются верхнедевонские осадочные породы (кварциты, песчаники, конгломераты) и нижнекарбоновые вулканогенные породы типа диабазов.

Северный склон хребта Брукса сложен последовательно осадочными породами пермо-триаса, юры и мела.

Арктическая прибрежная равнина сложена многокилометровой толщей осадочных пород мела, которые покрыты у побережья Чукотского моря и моря Бофорта достаточно мощной толщей четвертичных отложений. На Аляске широко распространены мощные четвертичные отложения. Они занимают почти половину водосборной площади американского побережья Чукотского моря (рисунок 2).

Геологическое строение полуострова Сьюард отличается большой сложностью в петрографическом отношении. Наиболее древними здесь являются породы ордовика (кварцево-хлоритовые, углисто-кремнистые и слюдястые сланцы, известняки, углистые кварциты, гнейсы). Породы нижнего силура представлены почти исключительно известняками. Известны отдельные выходы девонских и каменноугольных метаморфизованных известняков и филлитов. Мезозойские отложения (конгломераты, песчаники, сланцы с прослоями углей) распространены ограниченно. Третичные отложения встречаются в виде континентальных фаций (конгломераты, песчаники, глины, угли). Изверженные породы (андезиты, граниты, диориты) имеют мезозойский возраст. Северное побережье полуострова сложено аллювиально-морскими осадками.

На острове Врангеля – самом крупном в Чукотском море (остров в равной мере относится и к Восточно-Сибирскому морю) – наиболее древними породами являются верхнедевонские – нижнекаменноугольные, преимущественно терригенные отложения, объединенные в свиту берри мощностью более 3500 м [Геология СССР, 1970а]. Отложения нижнего карбона (глинисто-известняковые, глинистые, песчаниково-известняковые), согласно залегающие на породах свиты берри, имеют на острове наибольшее распространение. Отложения верхнего триаса (базальный слой переслаивающихся с песчаниками полимиктовых гравелитов, толща песчаников и глинистых сланцев с прослоями алевролитов) развиты в основном в южной части острова; они несогласно залегают на породах верхнего карбона. Рыхлые отложения четвертичной системы широко распространены по всему острову. В гористой части развиты элювиально-делювиальные образования. Их шлейфы часто спускаются на прибрежные равнины, где сменяются аллювиальными отложениями. Сохранились ледниковые образования, по-видимому, позднеплейстоценовые. Комплекс изверженных пород на острове развит локально. Магматические породы в основном представлены палеозойскими плагиогранитами, гранит-порфирами и граносиенитами.

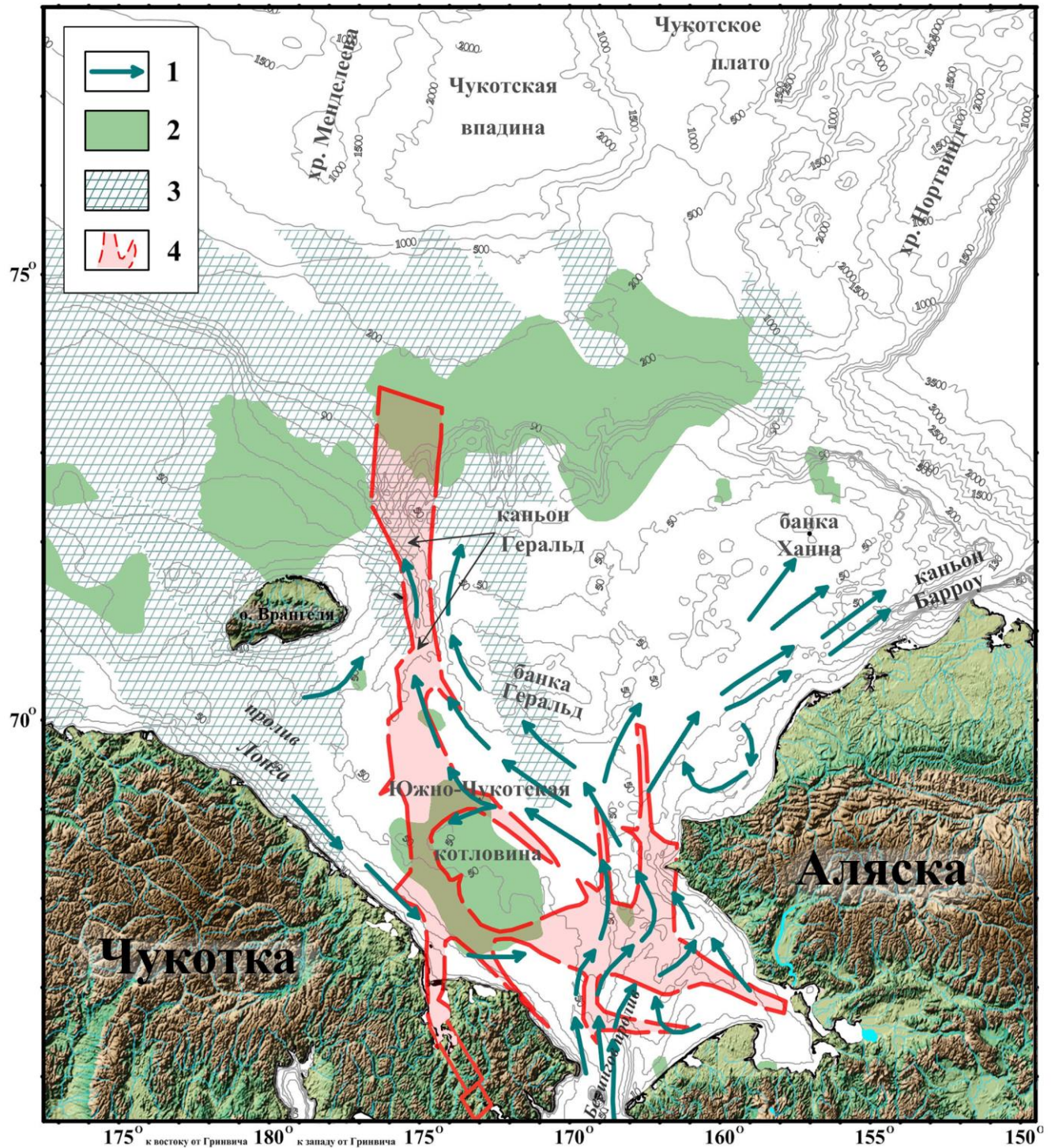
Важным моментом, который необходимо учитывать при изучении минералого-геохимического облика донных осадков Чукотского моря, является наличие рудных месторождений и многочисленных рудопроявлений в пределах



континентального обрамления (Sn, Sb, W, Hg, Au, Ag, полиметаллы и др.), в прибрежной полосе и на шельфе (Au, Sn) [Бабкин, 1969; Волков и др., 2006; Геология..., 2002, 2004; Додин, 2009; Додин и др., 1994; Иванова и др., 2005; Металлогенические зоны..., 1984]. Образующиеся в результате денудации коренных месторождений Чукотки и Аляски россыпи имеют аллювиальное, прибрежно-морское, полигенное происхождение. Структурными ловушками шельфовых россыпей могут служить грабен-долины (см. ниже «Геодинамические условия...»). Для Чукотского моря, в частности, отмечены «весьма надежные предпосылки эндогенной золотоносности и благоприятные условия для формирования генетически разнотипных и разновозрастных россыпей золота, располагающихся на различных уровнях в осадочном чехле шельфа на подводных склонах поднятий» [Флеров и др., 2011, с. 166].

**Геодинамические условия** Чукотского моря во многом определяются наличием здесь зоны современного растяжения земной коры [Леви и др., 2009]. Возможным следствием является современная активизация грабен-рифтовой системы субмеридиональных и субширотных структур, сформированных в мезозое – раннем кайнозое (рисунок 3) [Поляк и др., 2010; Сенин и др., 1989; Шипилов и др., 1989]. Среди неотектонических структур наиболее известен Чукотский грабен [Шипилов и др., 1989]. Он протягивается от Восточной Чукотки на юге через каньон (желоб) Геральд до по крайней мере бровки шельфа на севере. Чукотский грабен отличается повышенной мощностью кайнозойских отложений и как часть грабен-рифтовой системы в неоген-четвертичное время претерпел активизацию, сопровождавшуюся базальтовым вулканизмом и гидротермальной деятельностью. В его сухопутной части на Восточной Чукотке (Колючинско-Мечигменская зона) известны кайнозойские вулканиты и многочисленные гидротермальные источники с температурой изливающихся вод до 97 °С [Федоров, Смирнов, 2014; Чешко и др., 2004]. Гидротермальные источники этой зоны выделяются среди других на Чукотском полуострове по составу газов с аномальным количеством признаков содержания мантийных компонент [Поляк и др., 2010]. К этой же зоне приурочены эпицентры многочисленных мелкофокусных землетрясений малой амплитуды [Имаев и др., 2000]. Анализ фокальных механизмов сильнейших землетрясений и сейсмотектонических дислокаций позволил выделить на Восточной Чукотке современную рифтовую зону [Fujita et al., 2002]. В пределах Чукотского моря современная активизация грабен-рифтовой системы проявлена в сейсмичности акватории вблизи Восточной Чукотки и в рельефе дна, полностью отражающем положение основных отрицательных неотектонических структур. В составе осадочного чехла прогибов предполагается (по геофизическим данным) наличие вулканогенных образований [Шипилов и др., 1989]. На севере грабен-рифтовая

система Чукотского моря граничит с кайнозойским рифтогенным бассейном Чарли. Из-за слабой изученности региона их взаимоотношения неизвестны.



1 – направление преобладающих поверхностных течений [Коучмен и др., 1979; Weingartner et al., 2005];  
 2, 3 – распространение придонных вод с дефицитом кислорода (менее 6 мл/л) летом (2) и зимой (3) [Обзор..., 2008]; 4 – мезозойско-кайнозойская грабен-рифтовая система Чукотского моря [Шипилов и др., 1989; Fujita et al., 2002]; рельеф суши и морского дна – по данным Генеральной батиметрической карты океанов (ГЕБКО\_08)

Рисунок 3 – Некоторые геодинамические, морфологические, гидрологические, гидрохимические условия осадконакопления в Чукотском море.

В последнее время в научной литературе стал обсуждаться вопрос влияния (локального) геодинамической активности Чукотского моря на геохимический облик донных осадков. Первые результаты представлены в публикациях [Астахов и др., 2008, 2013б].

**Морфология дна** Чукотского моря (вопрос рассматривается главным образом по работам [Добровольский, Залогин, 1982; Особенности формирования..., 1971; Павлидис, 1982]) – результат взаимосвязанных структурно-тектонических и экзогенных процессов.

Большая часть шельфа представляет собой выровненную поверхность с отдельными положительными и отрицательными формами рельефа. Преобладающие глубины – 50 м. Дно прорезано двумя каньонами – Геральд и Барроу (рисунок 3). В пределах центральной зоны шельфа располагается область распространения холмисто-грядового рельефа, образующего многочисленные подводные банки, например банки Геральд и Ханна. В этой же зоне находится наиболее обширная аккумулятивная равнина – Южно-Чукотская котловина (впадина).

Интересным представляется обнаружение в пределах Чукотского плато (примыкающая к Чукотскому морю открытая часть Северного Ледовитого океана – см. рисунок 3), на глубинах более 400 м, поля покмарков [Mayer et al., 2008]. Образование подобных воронкообразных структур связывается исследователями с фокусированным выходом на морское дно флюидных потоков, представленных углеводородами, седиментационными водами, биогенным метаном и продуктами разложения газогидратов [Andresen, Huuse, 2011; Hustoft et al., 2010; Judd, Hovland, 2007]. Для покмарков Чукотского плато геофизических аномалий, связанных с разгрузкой свободного газа в приповерхностных отложениях, не зафиксировано.

**Климат.** Осадкообразование в Чукотском море находится в тесной зависимости от климата – полярного морского, что предполагает небольшое поступление солнечного тепла к поверхности моря и малые годовые колебания температуры воздуха, холодную продолжительную зиму и короткое дождливое лето [Добровольский, Залогин, 1982]. Отмечаемое в последнее время потепление накладывает свои отпечатки: зафиксировано уменьшение площади и мощности ледового покрова Северного Ледовитого океана, изменение температурного режима мерзлоты, увеличение объема речного стока, повышение биологической продуктивности морских вод и др. [цит. по: Пипко и др., 2011, с. 699]. Изменения климата в прошлом нашли отражение в рельефе дна, строении и составе осадочной толщи Чукотского моря.

**Гидрологическая характеристика.** Чукотское море отличается достаточно сложной системой течений (рисунок 3). Огромное, если не решающее значение имеет Берингоморский поток (скорость течения до 150–300 см/с). По разным данным, через Берингов пролив ежегодно проходит 22–30 тыс. км<sup>3</sup> воды [Океанографическая энциклопедия, 1974; Плахотник, 1962]. Она приносит с собой около  $33,5 \times 10^{15}$  ккал тепла (это делает Чукотское море одним из самых

теплых арктических морей) и огромные, до 154 млн т, массы влекомого, взвешенного и растворенного материала [Лисицын, 1966; Тимофеев, 1960]. Согласно [Аксенов и др., 1987], через Берингов пролив, кроме прочего, поступает около 60 млн т биогенного материала (в основном диатомовый фитопланктон). Из пролива Лонга поступают холодные и более плотные воды Восточно-Сибирского моря (скорость потока 10–30 см/с); в этот перенос вовлекается и часть берингоморских вод. В результате в южной части Чукотского моря в центре халистазы четко выделяется «мертвое пятно» [Павлидис, 1982].

Чукотское море можно отнести к бесприливным. Большую часть года оно покрыто льдами, хотя обстановка существенно меняется год от года (см. выше «Климат»).

Согласно гидрохимическим данным, в Чукотском море существуют участки с сезонным и круглогодичным дефицитом кислорода в придонных водах (рисунок 3).

*Анализ основных факторов осадконакопления показал, что осадки Чукотского моря формируются в условиях полярного морского климата при активном поступлении с суши терригенного материала различного петрографического и минералогического состава. В бассейне на рассортировку материала существенное влияние оказывают морфология дна (выположенная поверхность с отдельными положительными и отрицательными формами рельефа) и течения (основными являются Берингоморский поток и воды Восточно-Сибирского моря). Локальное влияние на процессы осадконакопления оказывают обстановки с дефицитом кислорода в придонных водах. Возможно влияние на геохимический облик осадков геодинамической активности, связанной с грабен-рифтовой системой Чукотского моря.*

## Глава 4 Общая характеристика современных осадков Чукотского моря

По результатам полевого описания, подавляющее большинство изученных проб донных осадков Чукотского моря относится к терригенным пелит-алевритовым с различной примесью песка, рассеянными гравием и галькой и незначительным количеством биогенного материала (на некоторых станциях подняты осадки, обогащенные битой или целой ракушей двустворчатых моллюсков). Основная площадь шельфа покрыта восстановленными серыми и темно-серыми осадками. Наиболее темноокрашенные разности зафиксированы в каньоне Геральд и восточной части Восточно-Сибирского моря. Для осадков этих районов характерен запах сероводорода и наличие уплотненных комков черного цвета с большим количеством аморфных сульфидов железа (гидротроилит), а также ЖМК. Окисленные коричневые и бурые осадки, типичные для глубоководной части Северного Ледовитого океана, появляются только у бровки шельфа.

### 4.1 Гранулометрический состав и минералогическая характеристика осадков

**Гранулометрический состав.** По результатам проведенного анализа, большинство частиц осадка имеет размеры, соответствующие фракциям  $P_{S_1}-P_{S_3}$  (1–0,1 мм),  $A_1$  (0,1–0,05 мм),  $A_2$  (0,05–0,01 мм) и  $P_{I_1}-P_{I_3}$  (0,01–0,001 мм и мельче). Для удобства некоторые фракции были объединены, и картирование проводилось по трем разностям: псаммит  $P_s$  (более 0,1 мм) алеврит  $A$  (0,1–0,01 мм) и пелит  $P_l$  (менее 0,01 мм). Относительно небольшое количество проанализированных проб (126) и неравномерность распределения станций пробоотбора по площади Чукотского моря не позволили получить карту с высоким разрешением. Однако даже на имеющейся видны определенные закономерности (рисунок 4).

Согласно полученным данным, песчаными осадками покрыты преимущественно районы прибрежного и островного мелководья, а также участки дна в центральной части моря, приуроченные к подводным возвышенностям (рисунок 4а). Районы с минимальным

содержанием псаммита в осадках (как на внутреннем, так и на внешнем шельфе) привязаны к отрицательным формам рельефа – Южно-Чукотской котловине, каньону Геральд и др.

Максимальные содержания частиц алевритовой фракции обнаружены в донных осадках, отобранных на вершине банки Геральд, в центральной части пролива Лонга и Беринговом проливе (рисунок 4б). Наименее заметную роль алеврит играет в гранулометрическом составе осадков континентального склона и более глубоководных районов Северного Ледовитого океана (Чукотское поднятие, Канадская котловина).

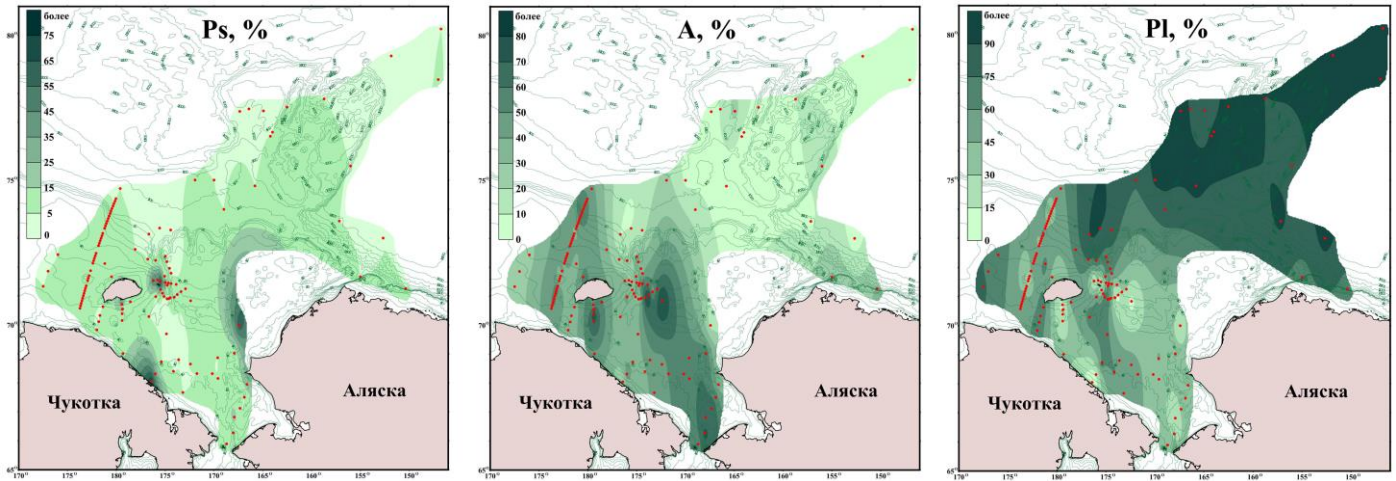


Рисунок 4 – Содержание основных гранулометрических фракций (псаммитовой Ps, алевритовой A, пелитовой Pl) в осадках Чукотского моря.

*Примечание* – Красные точки – станции пробоотбора.

В характере распределения пелитовой (глинистой) фракции отчетливо прослеживается увеличение содержания по мере удаления от берега в сторону открытого моря: см. рисунок 4в. Наибольшее количество пелита отмечено в осадках Чукотского поднятия и Канадской котловины, а также северной части каньона Геральд. Донные осадки внутреннего шельфа, если они находятся в пределах отрицательных форм рельефа (Южно-Чукотская котловина, каньон Геральд, безымянная впадина в проливе Лонга), тоже обогащены частицами глинистой размерности. И напротив, осадки положительных морфоструктур внутреннего шельфа (банка Геральд, безымянная возвышенность в Восточно-Сибирском море и др.), участки дна вблизи суши (континентальной и островной) характеризуются минимальной долей пелитовой фракции.

В целом распределение гранулометрических фракций в осадках Чукотского моря подчинено циркумконтинентальной (горизонтальной) и гипсометрической (вертикальной) зональностям. Полученные результаты не противоречат данным других исследователей [Белов, Огородников, 1976; Гусев и др., 2009; Кошелева, Яшин, 1999; Павлидис, 1982; Шуйский, Огородников, 1981].

**Минеральный состав.** Псаммит-алевритовая (0,25–0,05 мм) составляющая. Минералы легкой фракции представлены кварцем (28,0–85,2 %), плагиоклазами (до 8,8 %) и слюдами – биотитом, мусковитом (таблица 3). В некоторых пробах велика доля минеральных агрегатов (до 62,4 %).

Географически изученные осадки входят в полевошпат-кварцевую терригенно-минералогическую провинцию, выделенную по породообразующим минералам для верхнего ЛСК Чукотского моря [Кошелева, Яшин, 1999, с. 176, рис. 2.83]. Предполагается, что доминирование кварца над полевыми шпатами связано с довольно быстрым, без предварительной шлифовки, поступлением минералов в осадок [Кошелева, Яшин, 1999].

Выход тяжелой фракции варьируется от 0,07 до 3,16 %, из которых на группу эпидота приходится 24,8–45,8 %. Далее следуют ильменит (до 28 %), магнетит (до 11,2 %), минералы группы граната (стабильно высокие содержания 7,4–17,2 %) и группы амфиболов (3,0–15,6 %), сфен (стабильно высокие содержания 7,6–11,6 %): см. таблицу 3. Содержание лейкоксена и минералов группы пироксенов находится в пределах от 2 до 5–6 %. Доля других минералов редко превышает первые проценты.

По акцессорным минералам изученные осадки входят (географически) в три терригенно-минералогические провинции [Кошелева, Яшин, 1999, с. 184, рис. 2.89]. Амфибол-пироксеновая провинция с эпидотом, гранатом, цирконом, титанистыми минералами, иногда с касситеритом, монацитом, топазом и турмалином (осадки ст. G24, G71, G25, G26) «своим генезисом обязана, по-видимому, неогеновым рыхлым терригенным толщам, размывающимся на подводных возвышенностях... Кроме того, на формирование осадков заметное влияние оказывали изверженные гранитоидные породы Чукотского полуострова и пермско-мезозойские терригенные породы, развитые на севере данной провинции» [Кошелева, Яшин, 1999, с. 183]. Амфибол-эпидот-пироксеновая провинция с черными рудными минералами, гранатом, цирконом и сфеном (осадки ст. G57, G52) «образована, по-видимому, как терригенным материалом пермско-мезозойских пород, развитых на островах Врангеля и Геральд и северо-восточнее их, так и материалом рыхлых неогеновых толщ» [Кошелева, Яшин, 1999, с. 183]. Эпидот-пироксеновая провинция с черными рудными минералами, гранатом цирконом и титанистыми минералами (осадки ст. G48) «сформирована, по-видимому, как за счет нижнемеловых терригенных пород, широко развитых на данной площади, так и рыхлых палеогеновых отложений» [Кошелева, Яшин, 1999, с. 183].

Пелитовая (менее 0,005 мм) составляющая изученных осадков представлена главным образом глинистыми минералами: гидрослюдой, смектитом, хлоритом, каолинитом и др. (таблица 3). Все они с несовершенной структурой; смешаннослойные минералы имеют не все порядки отражений (неупорядоченные).

Таблица 3 – Минеральный состав осадков каньона Геральд и Южно-Чукотской котловины, Чукотское море

Минералы	Каньон Геральд, № станции/пробы			Южно-Чукотская котловина, № станции/пробы			
	G48 <sup>1</sup>	G57 <sup>2</sup>	G52	G25	G24	G26	G71
псаммит-алевритовая составляющая: легкая фракция, % (по данным минералогического анализа)							
выход легкой фракции, из которой (%):	98,99	99,23	99,80	99,79	96,84	99,77	99,93
кварц	85,2	42,8	28,4	28,0	77,6	31,6	30,8
плагиоклазы	5,6	2,4	0,8	1,6	8,8	2,0	3,6
калишпаты	0,8	0,4	0,8	0,8	2,0	0,4	0,4
биотит	0,8	2,0	8,8	4,0	2,8	3,2	6,4
мусковит	0,8	0,8	2,8	2,0	3,2	1,2	3,6
хлорит	–	–	–	–	редкие знаки	–	–
графит	–	–	–	редкие знаки	–	–	редкие знаки
обломки пород	2,4	4,4	знаки	0,4	2,4	0,8	0,8
агрегаты	4,4	44,8	56,0	62,4	2,8	58,4	53,6
углеф. растит. остатки	–	–	знаки	–	редкие знаки	0,4	знаки
углистый материал	–	–	знаки	–	–	редкие знаки	–
диатомовые	–	0,8	1,6	0,4	0,4	0,8	0,8
спикулы губок	–	0,4	0,8	знаки	знаки	0,4	знаки
карбонаты	знаки	1,2	знаки	0,4	знаки	0,8	знаки
псаммит-алевритовая составляющая: тяжелая фракция, % (по данным минералогического анализа)							
выход тяжелой фракции, из которой (%):	1,11	0,77	0,20	0,21	3,16	0,24	0,07
магнетит	2,2	11,2	2,8	5,6	1,6	4,4	4,4
ильменит	8,6	8,2	6,2	13,0	5,8	11,8	28,0
группа граната	7,8	8,2	7,8	8,2	7,4	17,2	14,8
циркон	2,0	0,4	0,8	0,6	1,2	1,4	2,2
сфен	11,6	8,2	7,6	10,4	9,0	11,0	8,8
лейкоксен	4,6	5,8	2,2	4,4	2,2	5,0	3,6
группа амфиболов	14,8	8,6	14	9,0	15,6	6,0	3,0
группа пироксенов	5,4	3,0	3,8	2,6	2,8	3,0	2,8
группа эпидота	30,8	33,4	39,6	36,2	45,8	32,6	24,8
апатит	3,0	2,2	1,6	1,2	1,0	0,2	–
пирит	0,4	0,2	0,2	0,2	–	–	0,2
гематит	1,0	0,8	0,8	2,2	0,8	1,6	2,6



Продолжение таблицы 3

Минералы	Каньон Геральд, № станции/пробы			Южно-Чукотская котловина, № станции/пробы			
	G48 <sup>1</sup>	G57 <sup>2</sup>	G52	G25	G24	G26	G71
гетит	–	3,6	3,8	1,8	0,6	1,2	1,6
турмалин	4,2	2,6	1,8	2,2	3,0	0,8	1,0
хлоритоид	1,4	1,6	3,2	1,2	2,4	2,4	0,8
рутил	0,2	0,2	0,8	–	0,2	0,4	0,6
брукит	–	–	0,4	–	0,2	–	0,2
оливин	–	0,4	–	0,2	–	0,2	–
ставролит	0,8	0,2	–	–	–	–	–
силлиманит	–	0,4	0,4	–	редкие знаки	0,2	0,2
андалузит	–	знаки	–	–	–	–	–
карбонаты	0,2	знаки	знаки	1,0	–	–	–
биотит	1,0	0,8	2,2	–	0,4	0,6	0,4
пелитовая составляющая, % (по данным рентгеноструктурного анализа)							
кварц	+	+	+	+	+	+	+
полевошпат	+	+	+	+	+	+	+
галит (d=2,82 Å)	±	–	–	–	±	–	–
доломит (d=2,88 Å)	±	–	–	–	–	–	–
родохрозит	–	–	±	–	–	–	–
пироксен	–	–	–	–	–	±	–
гидрослюда	+	+	+	+	+	+	+
смектит	+	+	+	+	+	+	+
хлорит	+	+	+	+	+	+	–
каолинит	+	+	±	–	–	+	±
хлорит-смектит	+	+	+	+	+	+	+
гидрослюда-смектит	+	+	следы	следы	–	следы	–
гидрослюда-хлорит	±	+	следы	следы	следы	следы	–
серпентин	±	–	–	–	–	–	–
гидробиотит (d=11,2 Å)	±	–	–	–	–	–	–

Примечание – <sup>1,2</sup> осадок, подстилающий железомарганцевые конкреции со станций 1 и 3 соответственно. Почерк – не обнаружено, + – минерал идентифицирован, ± – наличие минерала предполагается.

Координаты станций пробоотбора: G48 – 72°16,3' с.ш., 176°47,5' з.д. (пелит); G57 – 71°22,1' с.ш., 174°47,5' з.д. (пелит алевритовый); G52 – 71°47,3' с.ш., 174°23,7' з.д. (пелит алевритовый); G25 – 68°24,0' с.ш., 174°9,1' з.д. (пелит алевритовый); G24 – 67°26,4' с.ш., 169°34,4' з.д. (нет данных); G26 – 69°41,6' с.ш., 174°51,8' з.д. (пелит алевритовый); G71 – 67°51,5' с.ш., 172°33,5' з.д. (нет данных).

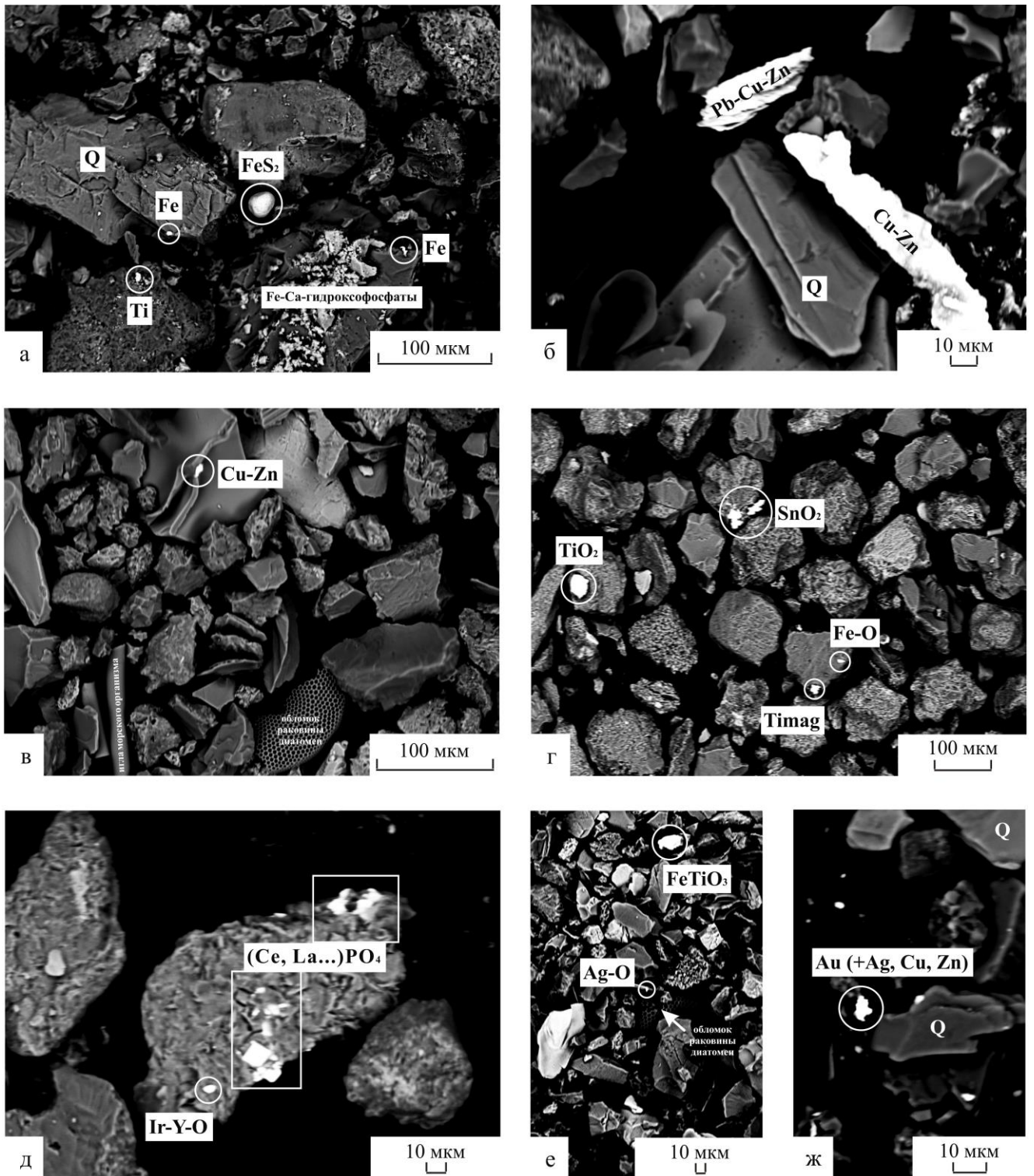
Отмечается повсеместное присутствие кварца и полевых шпатов. Много рентгеноаморфной фазы.

Полученные данные не противоречат имеющимся [Логвиненко, Огородников, 1980; Viscosi-Shirley et al., 2003 и др.]. По глинистым минералам изученные осадки принадлежат (географически) двум терригенно-минералогическим провинциям, выделенным В. А. Кошелевой для верхнего ЛСК Чукотского моря: каолинит-хлорит-гидрослюдистой (центральная часть бассейна) и монтмориллонит-хлорит-гидрослюдистой (западная часть бассейна и мелководье острова Врангеля) [Кошелева, Яшин, 1999: с. 82, рис. 2.27б; с. 185].

Согласно В. А. Кошелевой, «терригенно-минералогические провинции верхнего... ЛСК сформированы за счет терригенного материала ближайших областей сноса, будь то побережье материков, островов или размываемые участки дна бассейна. Состав осадков разбавлен материалом размываемых рыхлых четвертичных отложений» [Кошелева, Яшин, 1999, с. 183, с. 185].

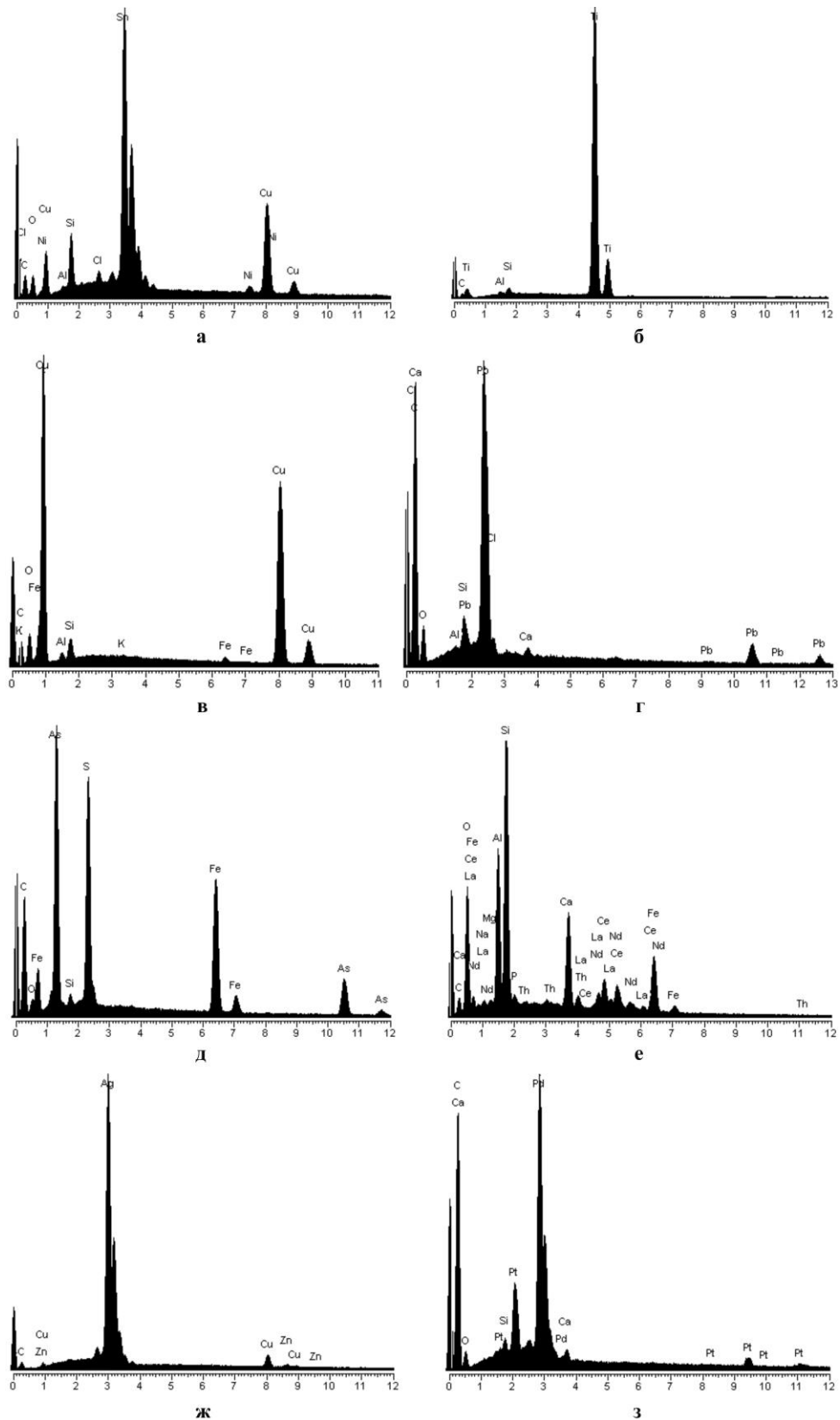
Минеральные зерна цветных, благородных, редкоземельных и других металлов. В результате электронно-микронного изучения псаммит-алевритовой составляющей осадков Чукотского моря (девять проб; координаты станций пробоотбора – см. примечание к таблице 5) обнаружены редкие минеральные выделения железозащитного состава с существенным (около 5 вес. %) содержанием кальция и кремния: рисунок 5а; таблица 4: строка 17. Возможно, это железозащитные гидроксофосфаты. В осадках юго-восточной части Чукотского моря (ст. G83) идентифицировано несколько зерен оксидов/гидроксидов (?) марганца удлиненной формы размером порядка 10–15 мкм (таблица 4: строка 23). Электронно-микронный анализ показал наличие в некоторых пробах обломков раковин диатомей и спикул губок (рисунок 5 – в, е).

В осадках содержится значительное количество минеральных зерен цветных (Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, As), благородных (Ag, Au, Pd, Ir, Pt) и редкоземельных (в основном La–Nd) металлов, а также железа, титана, хрома, циркония, иттрия, тория (рисунки 5, 6; таблицы 4–6). Большинство зерен обнаружено в осадках Чукотского моря впервые. Наиболее распространенные минеральные формы выделения металлов: интерметаллическая, оксидная, фосфатная (последнее – только для РЗЭ). Значительно реже встречаются самородные, сульфидно-сульфатные и некоторые другие, более экзотические для изученных осадков фазы. Из минералов цветных металлов чаще всего обнаруживаются цинкистая медь Cu-Zn и касситерит SnO<sub>2</sub>, из благородных и редкоземельных – окисленное серебро Ag-O и монацит (Ce, La...)PO<sub>4</sub>. Размер зерен, как правило, не превышает 1–5 мкм, однако попадаются отдельные частицы размером до 50 мкм, а иногда 100–150 мкм (рисунок 5б).



*а* – выделения железа, титана и предположительно железокальциевых гидроксофосфатов среди терригенных зерен, главным образом кварца (Q); *б* – крупные зерна цинкистой меди, интерметаллида Pb-Cu-Zn и кварца (Q); *в* – микрочастица цинкистой меди, обломок раковины диатомеи и игла морского организма среди нерудных терригенных зерен; *г* – микрочастицы касситерита SnO<sub>2</sub>, рутила TiO<sub>2</sub>, титаномагнетита (Timag) и оксида железа среди зерен кварца и полевых шпатов; *д* – монацит (Ce, La...)PO<sub>4</sub> и единичное выделение состава Ir-Y-O на поверхности полевого шпата; *е* – оксид серебра Ag-O, ильменит FeTiO<sub>3</sub> и обломок раковины диатомеи среди зерен различных нерудных минералов; *ж* – микрочастица золота с примесью серебра, меди и цинка среди зерен кварца (Q)

Рисунок 5 – Особенности распространения минеральных зерен цветных, благородных, редкоземельных и других металлов в осадках Чукотского моря (вид в отраженных электронах).



*a* – интерметаллид Sn-Cu с примесью никеля; *б* – титан, предположительно самородный; *в* – соединение меди и кислорода; *г* – карбонат (?) свинца; *д* – арсеницит FeAsS; *е* – минеральная фаза легких редких земель с примесью тория и существенным количеством железа, кальция, кремния и кислорода; *ж* – самородное серебро с примесью меди и цинка; *з* – минеральная фаза палладия и платины

Рисунок 6 – Энергодисперсионные рентгеновские спектры минеральных зерен цветных, благородных, редкоземельных и других металлов в осадках Чукотского моря.

Таблица 4 – Химический состав минеральных зерен цветных металлов, выделений железокальциевых гидроксофосфатов (?) и оксидов/гидроксидов марганца в осадках Чукотского моря (см. примечание к таблице 5)

В весовых процентах

№ участка поверхности /зерна	Cu	Zn	Sn	Ni	Pb	As	Bi	Cr	O	P	Si	Fe	Mn	Al	Ca	Na	Mg	K	S	Cl	Сумма
станция G28, юго-восточное мелководье острова Врангеля																					
1			93,33						12,30												105,63
2	1,78	0,84	38,93						35,21		0,54	1,01		3,20		0,90	0,31			8,70	91,41
3			68,37		7,05				33,37												108,80
4			12,00		24,01				31,14		28,50			0,53						4,01	100,19
5	31,63		53,21	1,62					14,71												101,16
станция G54, северное мелководье острова Геральд																					
6					63,23				19,95		1,88			0,71	0,51						86,28
7				79,67					1,94		0,33	1,89							0,25		84,09
станция B22, северный склон банки Геральд																					
8	81,12								13,18		2,03	0,88		1,03				0,21			98,45
9	39,52	3,18							10,90		1,35	0,16		0,48	0,14					0,93	56,66
10				4,30				6,27	28,61		29,07	26,66		0,43							95,34
станция B24, южный склон банки Геральд																					
11	59,34	36,19							3,02		2,21	0,46									101,21
12	31,24	14,37		10,18					9,57		2,04	1,43		2,87	4,20		0,89	0,74	0,31	0,33	78,18
13	35,80	21,85			4,57				5,09		1,87	0,49		0,31				0,28		1,41	71,76
14	17,10	11,85			22,89				6,19		1,00	0,51								0,43	59,98
15	1,30	1,25			32,32				33,31		15,93	4,63		5,33		0,49	1,38	2,49	3,61	1,33	103,34
16	1,30	1,00					2,53	77,68			0,28										82,79
станция B8, северная часть Южно-Чукотской котловины																					
17	1,09	0,61							40,33	10,02	5,15	40,76			5,20		1,47				104,64
станция B6, центральная часть Южно-Чукотской котловины																					
18	1,23	1,15					2,57	80,64			3,87	0,37		1,50	0,57	0,54		1,45			93,87
станция B27, южная часть Южно-Чукотской котловины																					
19	81,97	1,95							10,28		4,58	1,38		2,36	0,29		1,47				104,28
20	57,71	34,76							1,54		0,89	0,46									95,36
21	54,63	36,26			2,06				2,65		0,79	0,37		0,34	0,21						97,31
22	36,54	24,90			35,77				5,05		1,74	0,59		0,63							105,23
станция G83, юго-восточная часть Чукотского моря																					
23									10,29		0,68	2,11	86,27		0,17						99,52
24	47,95	30,11							0,44		0,30	0,30		0,20							79,31
25	68,91	16,91							7,16		5,50	0,48		0,25					3,06		102,26
26					67,13				11,44		4,78	0,76		0,96	0,25					1,46	86,78
27						33,52			8,07		0,84	23,28			0,20				14,41		80,32

Таблица 5 – Химический состав минеральных зерен благородных металлов в осадках Чукотского моря

В весовых процентах

№ зерна	Ag	Au	Pd	Ir	Pt	Rh	Y	Ti	Cu	Zn	Bi	Co	O	P	S	Si	Fe	Ca	Al	K	Mg	Cl	I	Сумма
станция G54, северное мелководье острова Геральд																								
1	76,69					0,69							17,93	0,99		0,41		2,54			0,42	0,49		100,14
2	4,81	40,48							18,81				7,18			0,81								72,08
3			38,74		12,51						2,06		6,11			0,54		0,68						60,64
4				32,17			16,49					0,48	42,35			4,91			4,34	1,82				102,54
станция B22, северный склон банки Геральд																								
5	37,36												37,81		0,39	15,68	0,55	1,65	0,95		1,90		5,32	101,59
станция B8, северная часть Южно-Чукотской котловины																								
6	93,72								8,46	2,17														104,34
7	5,95	85,65							5,07	3,56			0,50			1,99					0,25			102,96
станция B6, центральная часть Южно-Чукотской котловины																								
8	33,56								1,38	1,20			37,62			14,73	1,05	0,39	6,46	2,44	0,62	0,18		99,62
станция B27, южная часть Южно-Чукотской котловины																								
9	83,13								7,21	3,73			7,60		1,09	1,87	1,56		0,35		0,38	0,27		107,20
станция G83, юго-восточная часть Чукотского моря																								
10	54,26							0,36					16,21		0,18	3,15	0,64	1,53	1,95		0,65	0,25		79,17
11	72,18												19,12		9,39	1,08	0,53		0,46		0,52	0,42		103,70
12	1,83				78,96			3,04					15,27			1,21		0,26						100,57

Примечание к таблицам 4–6 – На качество (чистоту) полученных результатов повлиял чрезвычайно малый (первые мкм) размер зерен и их расположение непосредственно на углеродной ленте (содержание углерода, а также водорода в результатах анализа не учитывалось – специфика методики). Пустые ячейки – не обнаружено.

Координаты станций отбора проб осадков, для которых выполнены электронно-микронные исследования: G29 – 70°37,6' с.ш., 178°37,6' в.д.; G28 – 70°47,9' с.ш., 178°33,6' з.д.; G54 – 71°33,2' с.ш., 175°47,8' з.д.; B22 – 70°50,7' с.ш., 171°0,1' з.д.; B24 – 70°0,0' с.ш., 169°59,3' з.д.; B8 – 69°40,8' с.ш., 174°53,4' з.д.; B6 – 68°54,7' с.ш., 172°41,6' з.д.; B27 – 68°31,0' с.ш., 171°34,4' з.д.; G83 – 67°56,9' с.ш., 166°37,1' з.д.

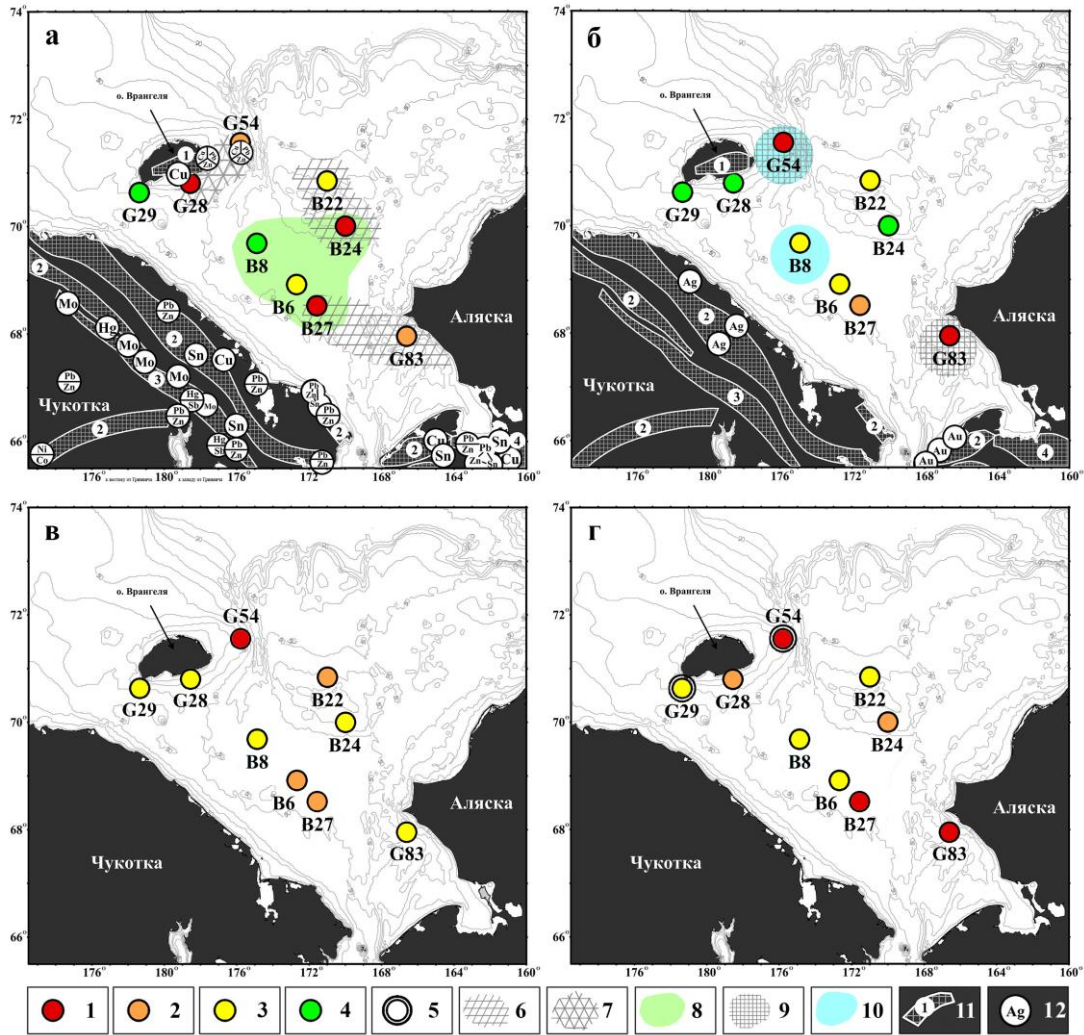
Таблица 6 – Химический состав минеральных зерен редких земель, иттрия и тория в осадках Чукотского моря (см. примечание к таблице 5)

В весовых процентах

№ зерна	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Tb	Dy	Ho	Yb	Y	Th	Zr	Cu	Zn	Ni	O	P	Si	Fe	Ca	Al	Na	K	Mg	Cl	F	Сумма	
станция G29, юго-западное мелководье острова Врангеля																													
1	2,83	10,23		6,90	1,02	0,78											46,30	7,80	25,42	0,95	0,33	0,55							103,12
2						2,71	1,28	5,14	1,31	2,46	25,27						34,75			0,80								73,72	
станция G28, юго-восточное мелководье острова Врангеля																													
3	10,24	20,87	1,74	6,39								3,48					30,12	9,34	7,03	0,84	0,40	1,83		0,23	0,46			93,51	
4											4,02		22,21				34,66		13,94	0,47	1,86		0,32		0,34	0,81		78,62	
станция G54, северное мелководье острова Геральд																													
5	15,45	27,00	2,35	7,95													24,17	11,45	0,84			0,25						89,48	
6		7,00		3,26								24,22					42,12	7,35	7,58	3,75	1,72	4,33		0,91	1,34	0,48		104,06	
7						1,33		3,99		2,05	21,89						41,02	14,66	5,04		0,22							90,20	
станция B22, северный склон банки Геральд																													
8	5,33	18,06		11,65	2,12							5,46					33,85	11,30	3,66	0,85	0,72	1,10						94,09	
9	2,43	5,58		2,25													45,29		17,17	8,58	9,24	11,59						102,14	
10						1,89	0,60	3,67	0,83	2,37	33,37		21,69				37,13		4,43			0,26						106,24	
станция B24, южный склон банки Геральд																													
11		5,46		2,74										0,49	0,64		49,02	4,19	28,58	1,03	0,26	1,12	3,42	0,25	0,55	6,19		103,94	
станция B8, северная часть Южно-Чукотской котловины																													
12	11,94	19,33	1,42	7,13	0,81									1,59	1,24		22,71		10,93	0,59	0,51	2,23		0,60		5,99		87,04	
станция B6, центральная часть Южно-Чукотской котловины																													
13	14,38	22,46	1,83	7,21	0,67									1,69	1,09	0,17	14,30	7,92	3,22		0,26	1,24						76,43	
14	5,51	11,80		4,01										1,25	1,10		43,43		15,82	0,90	7,61	4,90	2,92	0,16	0,48		7,85	107,74	
15	5,35	8,77		1,47								1,29		1,10	0,70		34,93		18,13	11,56	8,15	8,93			1,49			101,87	
станция B27, южная часть Южно-Чукотской котловины																													
16	13,43	20,63		5,40								4,54		1,93	1,78		31,02	10,01	4,70	0,87	1,33	2,59			0,38		0,75	99,36	
17						2,77		4,36		2,95	24,14			0,62	1,02		35,07		1,56		0,24	0,47						73,20	
станция G83, юго-восточная часть Чукотского моря																													
18	8,70	22,48		8,21								0,80					20,47	9,80	1,99	0,84	0,35							73,64	
19	3,48	7,92		2,99								1,06					40,49	0,51	16,11	10,26	6,60	9,86	0,73		0,35			100,36	

Выделения железа и титана, а также циркония характеризуются в целом более крупными размерами, чем зерна цветных, редкоземельных и особенно благородных металлов. Большинство рудных зерен округлые, изометричные, иногда попадаются угловатые, призматические, столбчатые, игольчатые, таблитчатые, пластинчатые, неопределенной формы (рисунок 5).

Микрозондовый анализ показал, что рудные зерна распределены в осадках чрезвычайно неравномерно. Варьируется не только количество зерен, но и сам набор металлов, а также образуемых ими минеральных фаз (рисунок 7).



1–5 – количество обнаруженных в осадках зерен, с указанием станций пробоотбора (буквенно-цифровое обозначение): 1 – большое, 2 – значительное, 3 – единичные зерна, 4 – зерна не обнаружены, 5 – максимальное или минимальное (в зависимости от цвета заливки) количество зерен; 6 – зона медно-цинковой специализации; 7 – зона оловянно-свинцовой специализации; 8 – постоянная примесь меди и цинка (около 1 вес. %); 9 – присутствие зерен платиноидов (Pt, Pd, Ir); 10 – присутствие зерен золота; 11 – металлогеническая зона/район суши с указанием ведущего полезного ископаемого (1–4), по [Металлогенические зоны..., 1984]: 1 – медь, 2 – олово, 3 – молибден, 4 – свинец и цинк; 12 – месторождение суши с указанием полезного ископаемого, по [Металлогенические зоны..., 1984]

Рисунок 7 – Особенности пространственного распределения зерен цветных (а), благородных (б) и редкоземельных (в) металлов, а также их суммарного количества (г) в осадках Чукотского моря.



Наиболее обогащенными в этом отношении следует считать, пожалуй, осадки северного мелководья острова Геральд (ст. G54), наименее – осадки юго-западного мелководья острова Врангеля (ст. G29). При микрозондовом изучении осадков Южно-Чукотской котловины (ст. В8, В6, В27) и прилегающего южного склона банки Геральд (ст. В24) постоянно фиксировалась примесь меди и цинка. Вероятно, это медно-цинковые частицы субколлоидной, менее 1 мкм, размерности (цинкистая медь?), снесенные в низину в результате литодинамических процессов. Источником зерен в осадках, по-видимому, являются металлоносные геологические формации суши – континентальной и островной; транспортировка в бассейн осуществлялась морскими течениями и льдами. Зерна могли поступить в осадок и во внутренней части моря в процессе местного размыва дна.

## **4.2. Аутигенные образования: морфологическая характеристика, минеральный состав**

**Морфологическая характеристика.** Железомарганцевые конкреции. Среди изученных ЖМК выделено три морфологических типа: дискоидальный, лепешковидный и плитчатый (рисунок 8) [Колесник, *Колесник*, 2013, 2015]. Такое разнообразие форм является, вероятно, естественным отражением специфичности условий среды, в которых происходило конкрециеобразование. Конкреции, как правило, имеют галечниковое ядро, которое частично или полностью покрывает маломощная (около 0,5 см) рудная оболочка. Верхняя часть ЖМК относительно гладкая, иногда (на ст. 1 и 5, в меньшей степени ст. 3) со следами жизнедеятельности морских организмов, нижняя – более шероховатая до бугристой, кавернозная с включениями песчано-алевритового материала из подстилающих донных осадков.

Такие морфотипы ЖМО уже описаны как для Чукотского моря [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982], так и других арктических морей, например Лаптевых и Бофорта [Калягин и др., 2000; Naidu, 1974].

**Аутигенные карбонаты.** Достаточно крупный образец аутигенного карбоната, поднятый совместно с плитчатыми ЖМК на станции 4 в северо-восточной части Чукотского моря (см. рисунок 1, с. 24) [Астахов, Босин, *Колесник* и др., 2010б; Колесник, *Колесник*, Покровский, 2014], внешне напоминает брекчию и состоит из однородных агрегатов первичного комковатого осадка и плотного темно-серого цемента (рисунок 9). Карбонат

испещрен кавернами (рисунок 9 – в, г). Внутри отмечаются псевдоморфозы по раковинам двустворчатых моллюсков (рисунок 9д), сложенные веществом бежевого цвета.

Похожие по внешнему виду аутигенные карбонаты описаны для других районов океана [Леин, 2004].

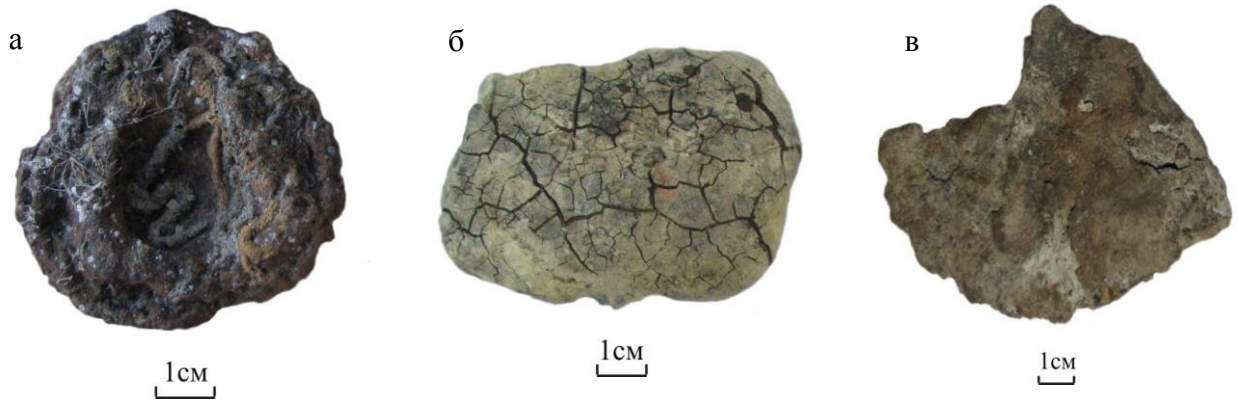
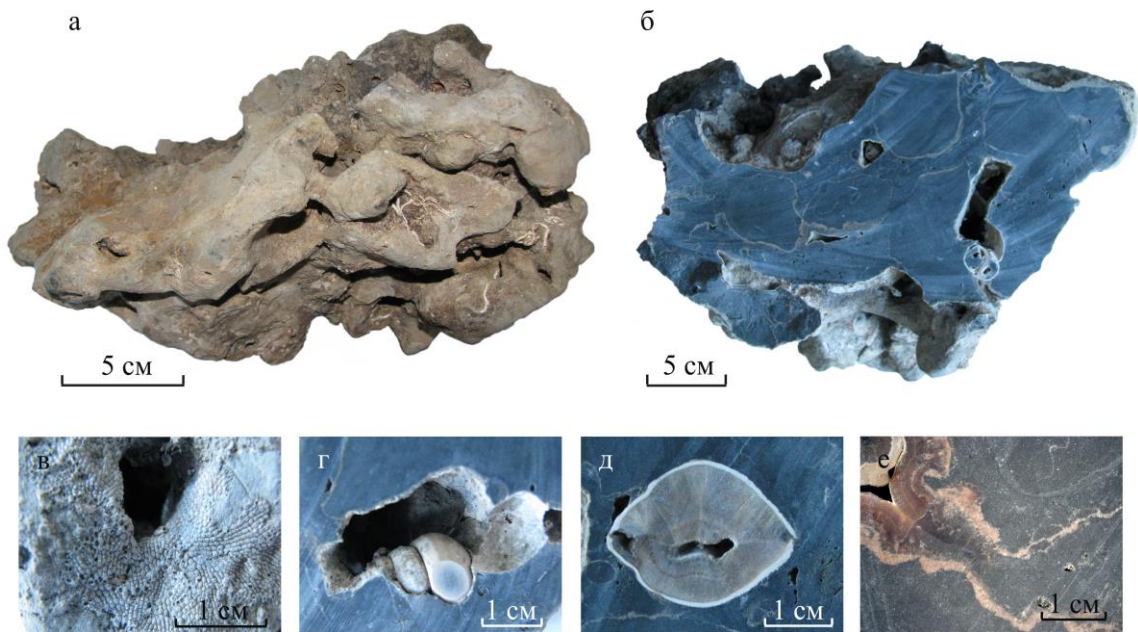


Рисунок 8 – Образцы железомарганцевых конкреций Чукотского моря:  
*а* – дискоидальный, *б* – лепешковидный, *в* – плитчатый морфотипы.



*а* – общий вид; *б* – плоскость спила; *в*, *г* – полости, сообщающиеся с поверхностью образца;  
*д* – псевдоморфоза арагонита по раковине двустворчатого моллюска; *е* – буровато-коричневый прожилок (арAGONIT) в основной Mg-кальцитовой массе

Рисунок 9 – Аутигенное карбонатное образование из северо-восточной части Чукотского моря.

**Минеральный состав.** Основные минералы железомарганцевых конкреций. По данным рентгеноструктурного анализа порошка, полученного из рудной части ЖМК, главным рудным минералом – вне зависимости от морфотипа конкреций –

является штрэнгит  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (рисунок 10а) [Колесник, *Колесник*, 2013]. Минералы марганца не обнаружены. Терригенная составляющая представлена главным образом кварцем и плагиоклазами, в меньшей степени глинистыми минералами и слюдами. Несколько повышенное (относительно других морфотипов ЖМК) количество глинистого вещества – отличительная черта плитчатых стяжений (обр. 4). Детальная электронно-микронзондовая съемка, как и рентгеноструктурный анализ, указала на наличие в ЖМК вещества железофосфатного состава, причем в некоторых случаях с довольно существенным содержанием кремния, кальция и/или марганца (рисунок 11 – а, г; таблица 7). Это вещество имеет состав, подобный выявленному нами в осадках (рисунок 5а; таблица 4: строка 17). Кроме железофосфатной матрицы, в конкрециях отмечаются участки другого химического состава. Так, диагностированы не обнаруженные в ходе рентгенофазового анализа аморфные гидроксиды марганца (рисунок 11б; таблица 7). Для марганцевых фаз характерно обособление в виде микропрожилков, пятен (нередко вдоль трещин, в зонах контакта основной массы ЖМК и зерен кварца, полевых шпатов и др.), чередование с прослоями железофосфатного и железисто-алюмосиликатного состава. Соотнести химический состав большинства участков с каким-либо определенным минералом (минералами) не удалось. Та же проблема возникла при обработке результатов электронно-микронзондового анализа отдельных зерен, отобранных из рудной части ЖМК (таблица 7). Вероятно, это полиминеральные агрегаты существенно железомарганцевого состава.

Полученные данные в значительной мере дополняют ранее опубликованные [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982]; при этом имеются разногласия по минеральному составу кристаллизованной части ЖМК [Батурин, Дубинчук, 2011; Колесник, *Колесник*, 2013].

Основные минералы аутигенных карбонатов. Цементом изученного образца, по данным рентгеноструктурного и электронно-микронзондового анализов, является магнезиальный кальцит (рисунок 10б). Псевдоморфозы по раковинам двустворок сложены арагонитом (рисунок 10в). Терригенная составляющая, как и в ЖМК, представлена кварцем, плагиоклазами, глинистыми минералами, слюдами. Широко распространены микроразмерные выделения сульфидного железа (видны под микроскопом).

Полученные результаты не противоречат данным, опубликованным по минеральному составу аутигенных карбонатов других районов океана (см. главу 1).

Минеральные зерна цветных, благородных, редкоземельных и других металлов в аутигенных образованиях. В ходе электронно-микронзондового анализа ЖМК и карбонатного образования обнаружено значительное количество минеральных зерен – в основном оксидных, интерметаллидных, самородных (для карбоната еще и сульфидных – пирит) – различных металлов: рисунки 11–14, таблицы 8–10.

Для ЖМК это медь, цинк, свинец, олово, никель, вольфрам, серебро, золото, иридий, редкие земли (La–Nd), железо, титан, хром, цирконий, иттрий [Колесник, Колесник, 2013, 2015], для карбоната – медь, цинк, никель, олово, свинец, сурьма, висмут, тантал, вольфрам, серебро, золото, редкие земли (La–Nd), железо, титан, хром, цирконий и иттрий.

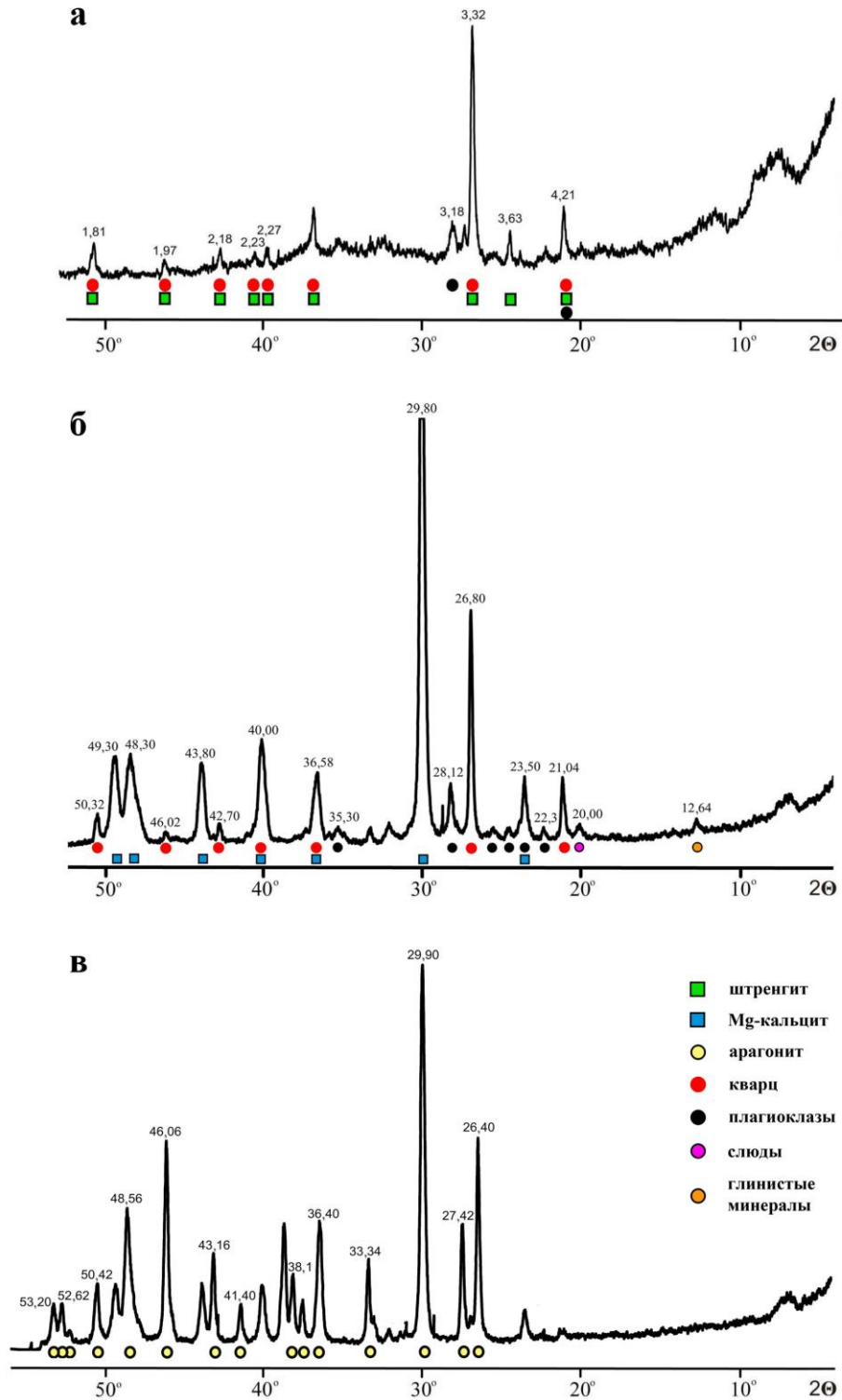
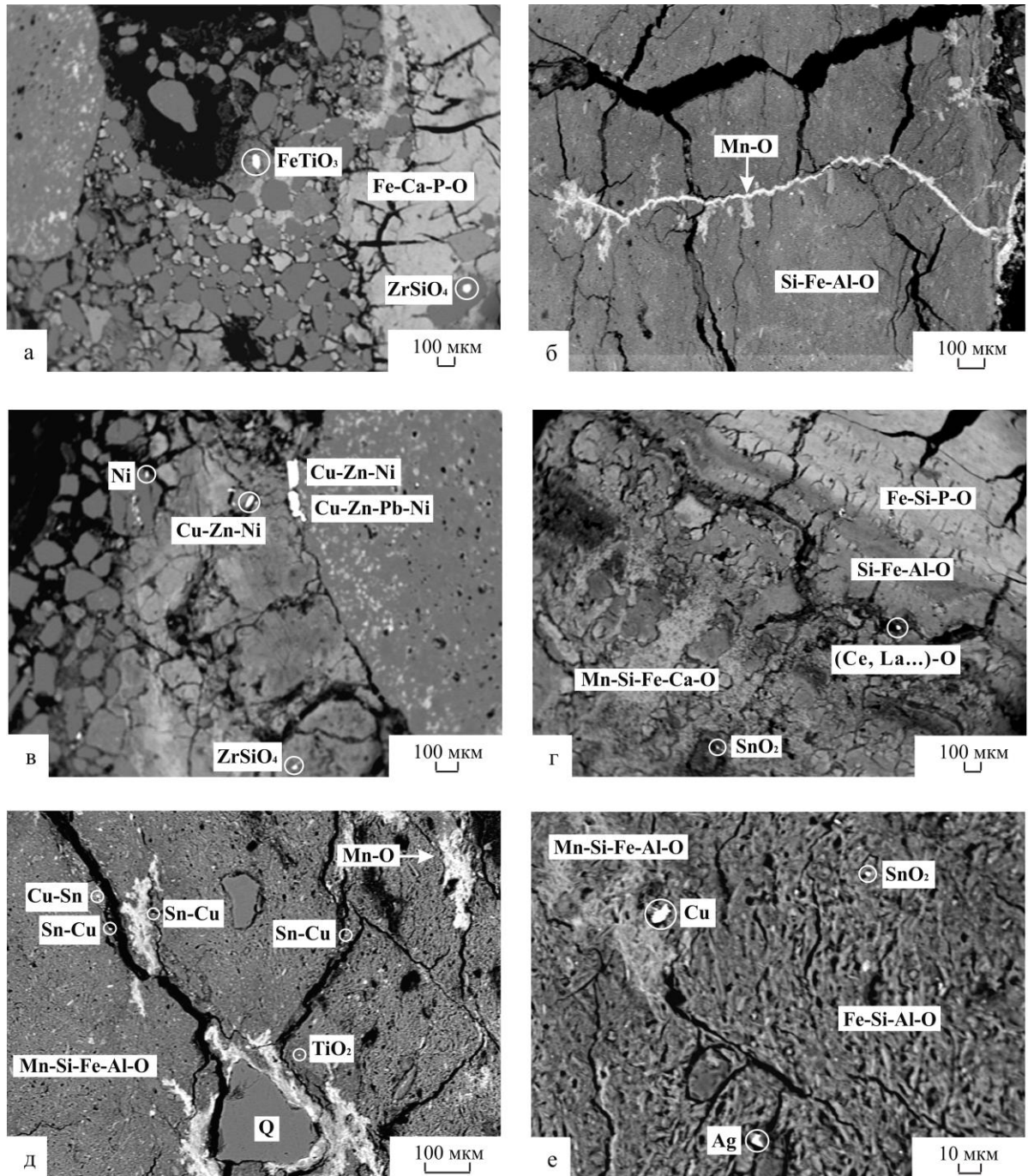


Рисунок 10 – Рентгенодифрактограммы вещества дискоидальной железомарганцевой конкреции (а) и аутигенного карбонатного образования (б – основная масса, в – псевдоморфоза по раковине двустворчатого моллюска), Чукотское море, с идентифицированными пиками минералов.



*a* – зерна кварца и алюмосиликатов, сцементированные веществом железофосфатного состава; включения ильменита и циркона; *б* – микропрожилковое внедрение в железистую алюмосиликатную матрицу марганцевого гидроксидного раствора; *в* – минеральные выделения никеля, интерметаллидов Cu-Zn-Ni, Cu-Zn-Pb-Ni и циркона в зоне трещиноватости; *г* – «взаимоотношение» различных по составу микрослоек; зерна касситерита и оксида редких земель; *д* – выделения гидроксидов марганца, локализованные по стенкам микротрещин, в зонах контакта существенно марганцевой матрицы сложного состава и зерен кварца (Q); включения в этой матрице медно-оловянных интерметаллидов и рутила; *е* – зерна меди и серебра, а также касситерита в железистой алюмосиликатной матрице, осложненной выделениями существенно марганцево-кремнистого состава

Рисунок 11 – Микростроение железомарганцевых конкреций Чукотского моря и особенности распространения в них минеральных зерен цветных, благородных, редкоземельных и других металлов (вид в отраженных электронах).

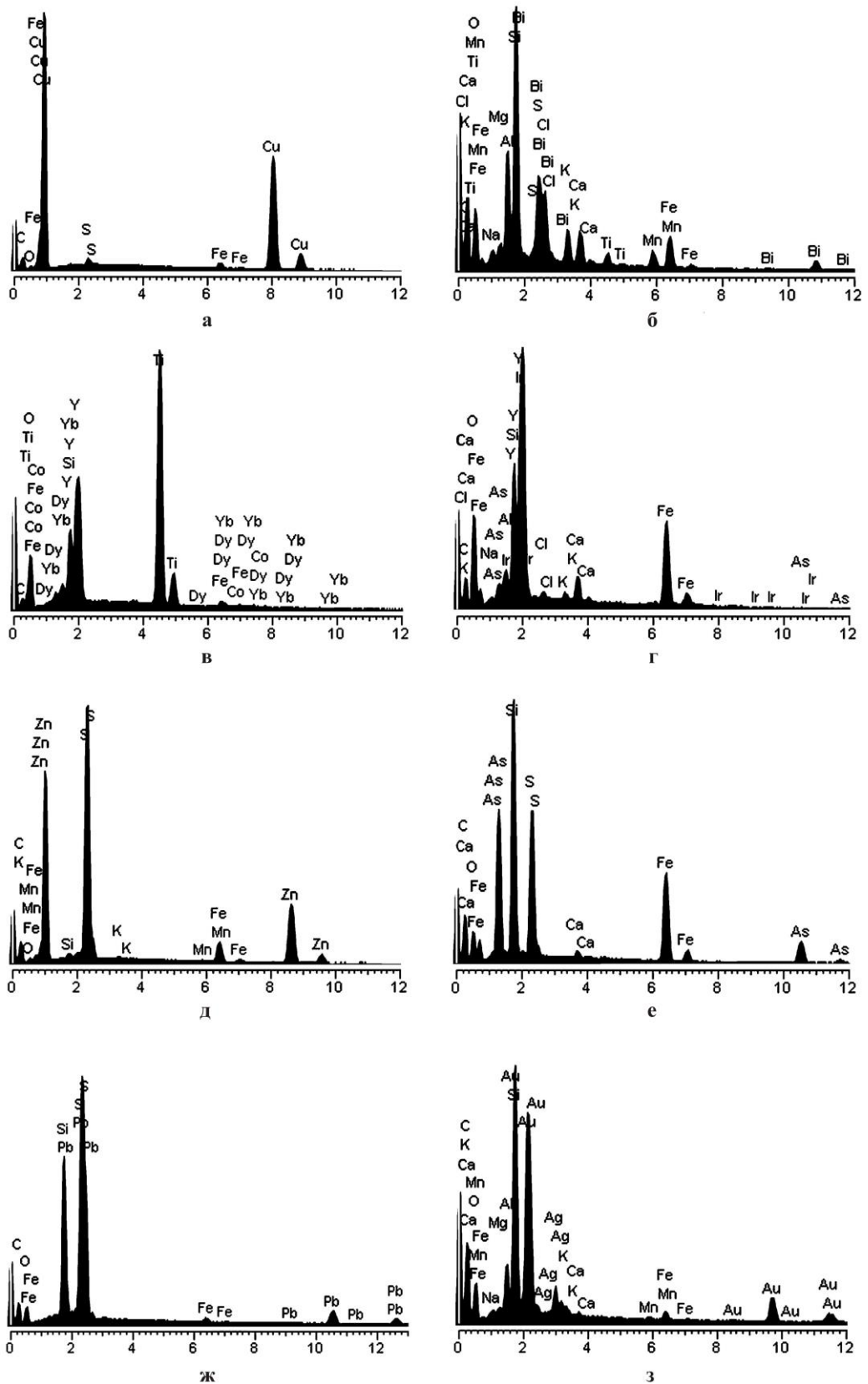
*Примечание* – На рисунке приведен упрощенный состав матрицы – от двух до пяти основных компонентов в порядке уменьшения содержания (полный состав – см. таблицу 7).

Таблица 7 – Химический состав матрицы и отдельных железомарганцевых зерен в железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Чукотского моря

В весовых процентах

№ участка поверхности	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Ti	Si	Al	O	Na	Mg	K	Ca	P	S	Cl	Сумма	Коэффициент нормализации							
матрица																											
образцы 1, 5 – дискоидальные ЖМК																											
1	22,54	0,34							2,32		38,49	1,30	0,71	3,04	6,57	9,36		0,35	85,02	нормализация не проводилась							
образец 3 – лепешковидная ЖМК																											
2	20,30								14,37	2,10	34,30	0,83	0,82	2,51	2,49	3,31		0,56	81,59		нормализация не проводилась						
3	8,32	0,26							18,82	7,09	32,77	3,30	0,54	1,74	2,63	1,99		0,83	78,30			нормализация не проводилась					
4	8,13	12,15							10,69	2,05	32,17	0,69	0,89	1,50	6,11	2,03		0,39	76,80				нормализация не проводилась				
образец 4 – плитчатая ЖМК																											
5	2,00	40,17							4,92	2,09	27,68	2,59	0,92	1,19	1,51			0,16	83,23					нормализация не проводилась			
6	34,07	0,49							7,19	1,29	38,91	1,35	0,92	0,53	2,14	4,81			91,71						нормализация не проводилась		
7	9,59	21,42							13,95	4,36	34,31	1,43	1,72	2,30	0,83			0,25	90,16							нормализация не проводилась	
8	14,52	0,32							17,66	6,27	31,33	0,75	1,88	2,06	0,70			0,36	75,83								нормализация не проводилась
отдельные железомарганцевые зерна																											
зерно 1																											
9	21,81	9,57	0,30	0,28	0,10				17,38	4,29	1,00	42,73	0,79		1,04	0,71			100,00	0,5510							
10	39,42	9,25							1,14	11,43	3,29	32,35	0,90		0,70	0,88	0,65		100,00	0,6206							
11	38,82	23,36								5,12	1,20	27,38		0,86	0,69	1,65	0,92		100,00	0,6566							
12	15,92	47,02								3,75	1,04	25,98		0,91	1,14	4,25			100,00	0,8821							
13	12,46	21,57							1,23	14,08	6,44	36,76		1,02	2,08	2,71	1,64		100,00	0,7138							
зерно 2																											
14	32,01	12,85							1,39	0,45	13,58			0,35	1,04		38,33		100,00	0,6172							
15		45,33							13,37	1,92	32,85		1,63	1,70	3,20				100,00	0,8083							
зерно 3																											
16	9,21	42,87							7,37	3,02	30,10		1,59	1,61	3,31	0,92			100,00	0,7576							
зерно 4																											
17	4,06	56,67	0,30	0,29		0,72	0,57		4,23	0,91	26,15		0,46	1,59	4,05				100,00	0,9338							
18		66,07							2,22	0,91	25,14		1,15		4,51				100,00	0,8970							

Примечание – Матрица ЖМК преимущественно рыхлая, поэтому сумма элементов часто не достигает 100 вес. %. Содержание водорода и углерода в результатах анализа не учитывалось (специфика методики). Пустые ячейки – не обнаружено.



*а* – самородная медь; *б* – минеральная фаза висмута; *в* – соединение состава Ti-Y-O (?) с примесью редких земель; *г* – преимущественно Ir-Y-O-содержащая минеральная фаза; *д* – сфалерит ZnS; *е* – арсенопирит FeAsS; *ж* – сульфат свинца; *з* – золото с примесью серебра и окружающей матрицы

Рисунок 12 – Энергодисперсионные рентгеновские спектры минеральных зерен цветных, благородных и других металлов в железомарганцевых конкрециях Чукотского моря.

Таблица 8 – Химический состав минеральных зерен цветных металлов в железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Чукотского моря

В весовых процентах

№ зерна	Cu	Zn	Sn	Ni	Pb	As	Sb	Ti	Mo	Cr	O	Si	Fe	Al	Ca	Mn	Na	Mg	K	P	S	Cl	Сумма
образец 1, дискоидальная ЖМК																							
1	48,51	34,55	0,53	2,43	11,44						4,29		1,52										103,27
2	39,42	33,26	0,76	21,99							2,59	0,33	1,67								0,24		100,26
3				51,94							17,07	23,69	1,57	0,30									94,57
4					16,45						26,45	9,69	5,72	4,20	0,70		3,15		0,31	1,03	2,61	0,50	70,81
образец 3, лепешковидная ЖМК																							
5	78,66		1,08							0,33	7,72	1,47	1,80	0,67	0,32	1,80				0,26		0,35	94,46
6	18,21		33,83					0,38		2,92	26,40	13,40	1,34	1,81	0,40								98,69
7	2,82		68,54								12,47	1,76	2,03	0,26						0,23			88,11
8					19,94						32,19	7,60	17,88	0,72	2,59		0,85	0,96	1,12	2,71	0,32	0,73	87,59
образец 4, плитчатая ЖМК																							
9	90,64										3,10	1,04	2,33	0,91		0,60						1,18	99,81
10	70,63									6,43	9,85	3,00	2,47	0,87		0,43						1,01	94,68
11	43,65		23,20								16,87	3,95	1,85	1,78	0,52	3,50		0,60		0,22	0,32	0,26	96,72
12	38,31	22,15									23,76	13,28	1,96	10,22		1,11		1,01	2,97				114,77
13	2,62		44,20							0,39	35,62	5,16	2,65	2,55	1,00	1,68		0,49			0,53	0,42	97,31
14	0,79		89,76								6,71	0,33	0,61	0,30	0,66	1,02							100,19
15		47,74									27,82	8,48	6,69	1,10	0,62	2,48		0,86	0,26	0,41	0,18	0,48	97,12
16				5,97					0,76	10,52	11,65	9,26	50,35	3,17		1,76	0,99	0,56	0,85			0,26	96,09
образец 5, дискоидальная ЖМК																							
17	92,95										1,82		1,94								0,99		97,71
18	48,59										12,28	3,12	11,25	0,33	2,75			0,34	0,60	3,66	5,68	0,23	88,83
19			50,41								20,94	3,55	11,04	0,88	2,31		0,78	0,31		1,82		1,44	93,49
20	21,23	2,80				9,43	2,87				17,88	7,34	11,43	4,64	1,08				1,88	1,08	13,48		95,16
21	4,63		94,90									1,06	1,81								0,61		103,01
22		55,11									2,11	0,53	7,33			0,35			0,16		33,40		98,99
23				52,94							11,87	6,74	8,36	1,02	2,59			1,50	0,37	2,01			87,41
24					61,57						17,32	13,73	1,32								9,20		103,15
25						26,73					19,19	21,11	21,51		0,68						12,74		101,97

Примечание – В ходе электронно-микронного анализа зерен, из-за их чрезвычайно малого размера (первые мкм), нередко захватывалась окружающая матрица. Это сказалось на качестве (чистоте) полученных результатов. Содержание водорода и углерода в результатах анализа не учитывалось (специфика методики). Пустые ячейки – не обнаружено.

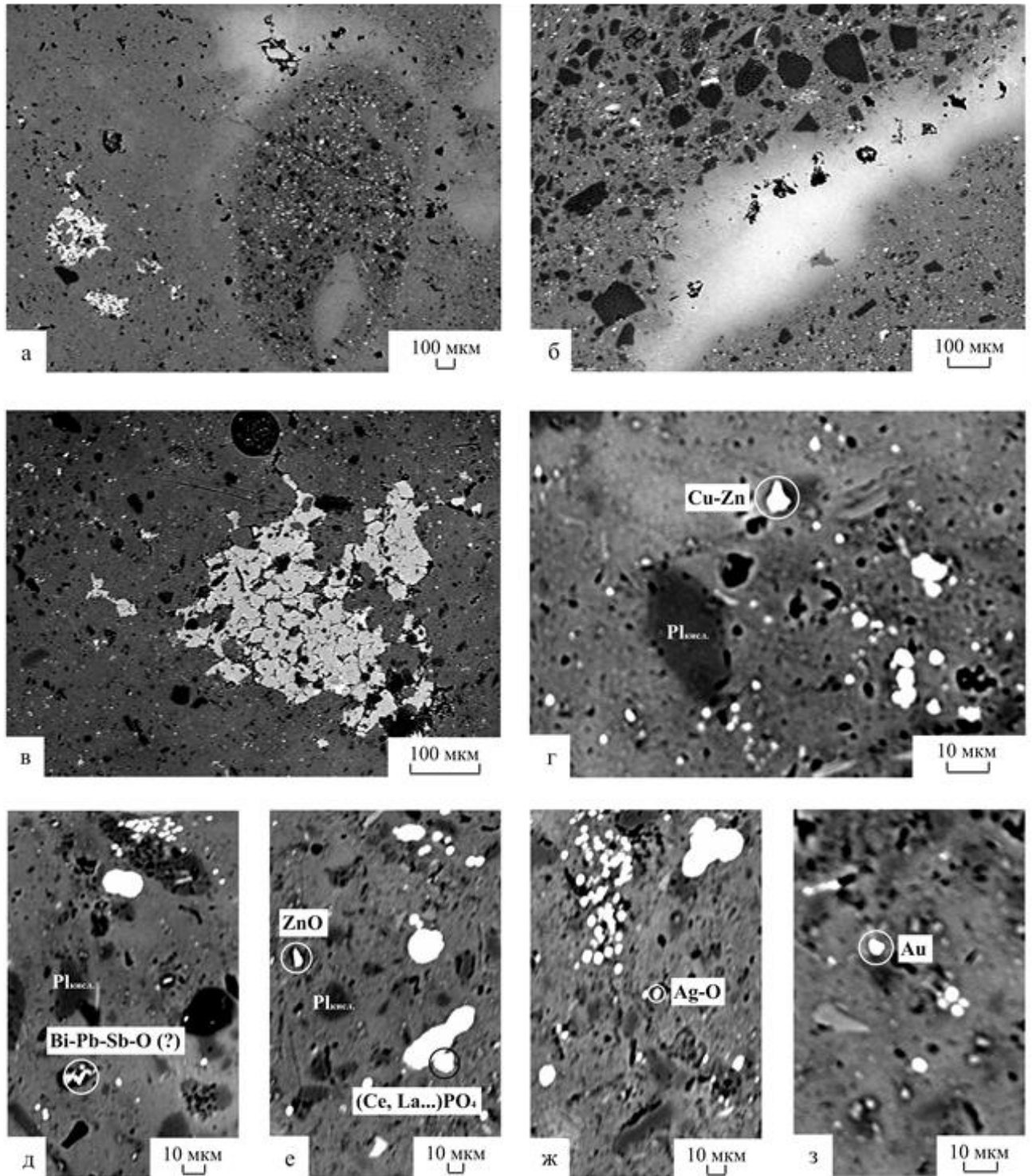


Таблица 9 – Химический состав минеральных зерен благородных металлов, редких земель и иттрия в железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Чукотского моря

В весовых процентах

№ зерна	Ag	Au	Ir	La	Ce	Pr	Nd	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Y	Ti	Zr	Cu	As	Sr	O	P	Si	Fe	Mn	Ca	Al	Na	K	Mg	Cl	Сумма
образец 1, дискоидальная ЖМК																														
1				17,15	37,59	3,19	8,04												13,48	0,34	1,25	1,00		0,26	0,96				0,28	83,54
2				10,67	21,66	2,01	4,72												15,27	0,25	1,56	1,13		0,26	12,37				0,51	70,42
3									1,48			1,88	12,76	32,39					44,33		3,97	1,07								97,88
образец 3, лепешковидная ЖМК																														
4	49,21																		17,23	0,20	3,90	2,62			3,03			0,36	1,24	77,78
5				17,21	35,71	3,56	8,19												15,17		0,71	0,49		0,42	2,66				0,46	84,58
6				9,52	18,42		3,60												15,36		1,64	1,68		0,52	13,55				0,57	64,86
образец 4, плитчатая ЖМК																														
7	95,71																				0,49	1,17	0,54					0,49		98,40
8	67,10																		22,03		4,39	2,04	1,75		2,60			0,62		100,54
9	5,24	41,60																	18,39		11,16	1,47	0,34	0,21	2,24	0,51	0,39	0,22		81,79
10				9,51	18,18	2,29	4,37												23,73		11,68	5,94		0,36	7,42	0,31	1,12	0,75	0,33	86,00
11				5,74	13,80		5,23												21,63	6,19	8,83	3,23			3,25		1,02	1,08		70,00
12				3,00	7,58	0,88	3,63											3,84	44,21	10,18	3,69	1,95		0,27	14,45		0,51	0,31		94,50
13								2,10	6,11	1,20	3,10	2,66	30,56						35,23	15,58	1,90	1,56								100,01
14									2,18	1,26	1,50	1,37	11,16		16,93				40,85	6,02	10,14	2,79	5,12	0,24	1,68	0,47	0,70	0,50		102,91
15				4,50	8,16		1,62									27,13			10,74		4,67	1,95	2,74	0,48	2,13	2,45	0,24	0,52	0,64	67,96
образец 5, дискоидальная ЖМК																														
16			24,70										9,41				0,21		38,03		5,07	14,91		1,87	0,91	0,48	0,47		0,43	96,50
17			5,31												27,12				32,64		11,71	7,24		2,16	0,43		0,54	0,18		87,33
18				8,41	15,42		2,45												26,80	1,20	11,95	15,51		1,24	2,83	1,09	0,54	0,68	0,36	88,49
19				7,27	14,61		4,64												34,63	7,56	17,34	2,37		0,24	2,89	0,87	0,58	0,67		93,67

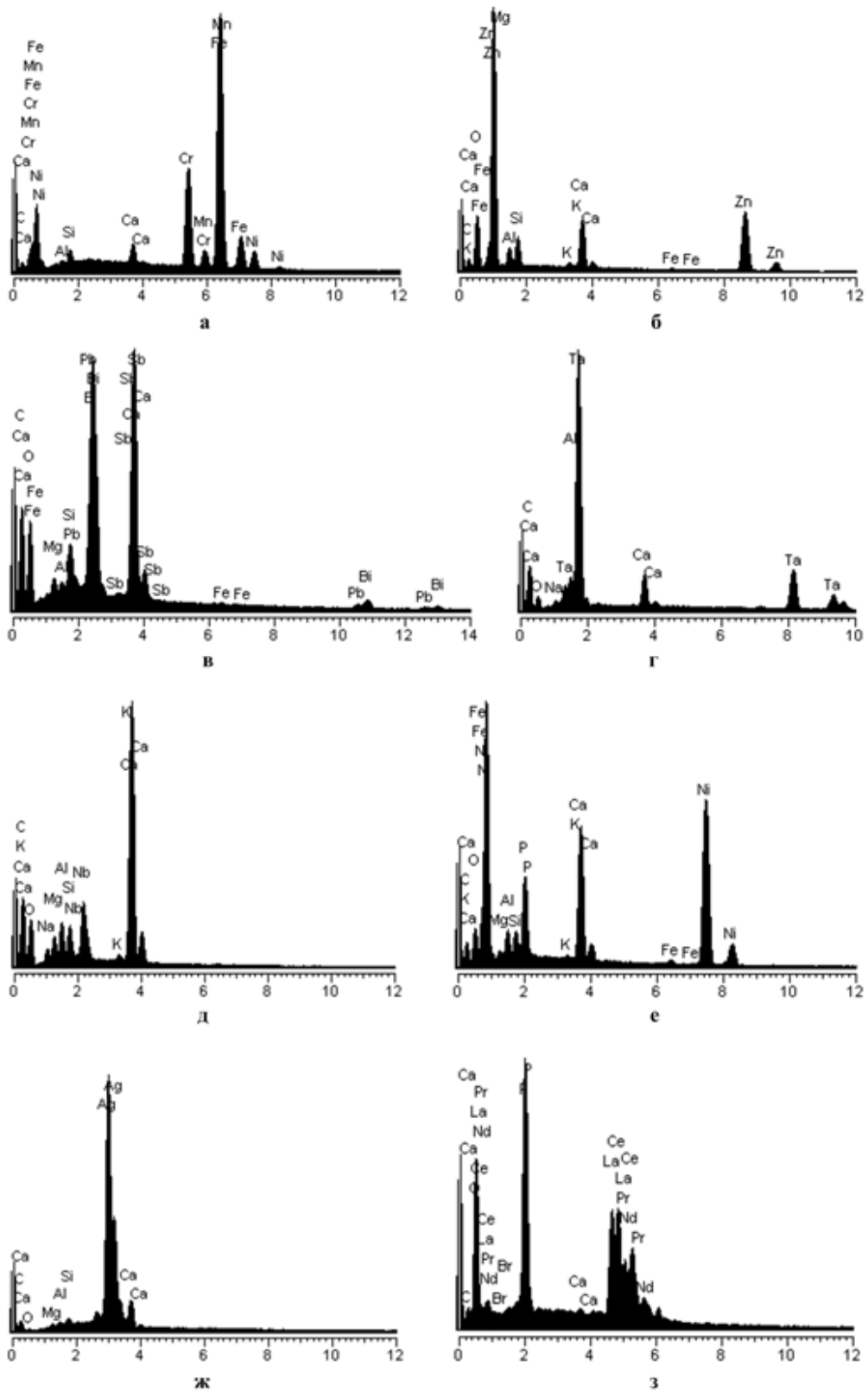
Примечание – В ходе электронно-микронного анализа зерен, из-за их чрезвычайно малого размера (первые мкм), нередко захватывалась окружающая матрица. Это сказалось на качестве (чистоте) полученных результатов. Содержание водорода и углерода в результатах анализа не учитывалось (специфика методики). Пустые ячейки – не обнаружено.



*a* – взаимоотношение участков разного химического состава (общий вид); *б* – арагонитовый прожилок (светлая область) в основной Mg-кальцитовой массе (серое) с включениями рудных (белые пятна) и нерудных (темные пятна) минералов; *в* – выделение барита (светло-серое) в Mg-кальците; *г* – цинкистая медь в Mg-кальците; *д* – минеральная фаза состава Bi-Pb-Sb-O в Mg-кальците; *е* – цинкит ZnO и монацит (Ce, La...)PO<sub>4</sub> в Mg-кальцитовой матрице; *ж* – мелкое зерно окисленного серебра в Mg-кальците; *з* – частица золота в Mg-кальците

Рисунок 13 – Микростроение, особенности состава и распространения минеральных зерен цветных, благородных и других металлов в карбонатном образовании из северо-восточной части Чукотского моря (вид в отраженных электронах).

*Примечание* – Все невыделенные на рисунках г–з рудные зерна (мелкие белые пятна), а также большинство таких зерен на рисунках а–в – пирит. *Pl<sub>кисл.</sub>* – кислый плагиоклаз.



*a* – интерметаллид Fe-Cr-Ni; *б* – цинкит ZnO; *в* – минеральная фаза висмута, свинца и сурьмы; *г* – минерал тантала; *д* – Nb-содержащая (7,57 вес. %) минеральная фаза; *е* – фосфид (?) никеля; *ж* – окисленное серебро; *з* – монацит (La, Ce...)PO<sub>4</sub>

Рисунок 14 – Энергодисперсионные рентгеновские спектры минеральных зерен цветных, благородных, редкоземельных и других металлов в карбонатном образовании из северо-восточной части Чукотского моря.

*Примечание* – Во всех спектрах – примесь Mg-кальцитовой матрицы.

Таблица 10 – Карбонатное образование из северо-восточной части Чукотского моря: химический состав минеральных зерен цветных и благородных металлов, редких земель, иттрия, железа и вмещающей матрицы

В весовых процентах

№ зерна	Cu	Zn	Sn	Ni	Pb	Bi	Sb	Cr	W	Ag	Au	La	Ce	Pr	Nd	Gd	Tb	Dy	Er	Yb	Y	Ta	Si	Fe	Al	Ca	Mg	P	O	Сумма	
матрица																															
1																								0,24		26,77	3,15		47,76	77,69	
2																							9,39		0,82	21,29	1,16		41,40	74,32	
рудные зерна																															
3	13,02	7,85		2,46																			0,58	0,43	0,64	16,49	2,08		33,39	76,93	
4		50,45																					3,48	0,35	2,91	6,63	0,72		30,97	95,51	
5				64,15																			2,57	0,54	3,11	8,42	1,43		15,78	95,99	
6				48,31																			1,50	0,61	2,30	10,07	1,04	5,54	12,70	82,06	
7				6,99				15,32															0,97	62,08	0,33	1,62				87,32	
8			14,89		1,25		14,87																2,44	0,40	1,94	17,67	1,73		33,46	88,64	
9					8,89	23,88	6,74																1,92	0,32	0,40	16,64	0,90		33,56	93,25	
10									13,35														3,31	0,75	6,04	19,30	1,39		39,41	83,57	
11										68,91													1,59		1,04	4,00	0,59		12,01	88,14	
12											31,81												1,35	0,59	1,40	16,75	0,75		21,76	74,40	
13												21,09	26,11	1,60	4,63											0,33	0,29		11,94	27,18	93,16
14																2,56	0,72	4,58	2,66	1,27	30,97						0,64		13,82	29,38	86,61
15																							49,31			0,60	8,33			13,70	71,93
16																								0,49	80,01	0,47	2,92			3,86	87,74

Примечание – В ходе электронно-микронного анализа зерен, из-за их малого размера (первые мкм), нередко захватывалась окружающая матрица (в таблице приведены упрощенные составы матрицы). Это сказалось на качестве (чистоте) полученных результатов. Содержание углерода и водорода не учитывалось (специфика методики). Последнее повлияло на суммарное содержание элементов в анализах, в первую очередь анализах состава карбонатной матрицы. Пустые ячейки – не обнаружено.

Размер минеральных выделений, как правило, не превышает нескольких мкм, однако встречаются отдельные частицы, например цветных металлов, размером до  $40 \times 100$  мкм. Форма чаще округлая, но встречается и вытянутая вплоть до палочковидной, сложная, угловатая (рисунки 11, 13). Кроме как в описанных выше типах матрицы (для ЖМК в основном железокремнистые комбинации, для карбоната – Mg-кальцитовая масса), рудные зерна обнаружены в зонах контакта участков разного химического состава, вдоль и внутри трещин. Зерна встречаются по одному или небольшими группами, иногда образуя скопления из нескольких десятков частиц. Комплекс металлов и образуемых ими в ЖМК и карбонате минеральных фаз в целом аналогичны таковым, выявленным в донных осадках (см. п. 4.1).

Почти все обнаруженные зерна металлов, за исключением частиц пирита, рутила и золота (см. главу 1, п. 1.2), описаны для аутигенных образований Чукотского моря впервые.

### 4.3 Выводы

*1. Современные осадки Чукотского моря преимущественно терригенные пелит-алевритовые, иногда с незначительным количеством биогенного материала. Аутигенные образования распространены в каньоне Геральд (дискоидальные и лепешковидные ЖМК) и в северо-восточной части бассейна (плитчатые ЖМК, брекчиевидный кавернозный фрагмент аутигенного карбоната).*

*2. Подтверждены результаты предыдущих исследований по распределению гранулометрических фракций в современных осадках Чукотского моря. В распределении гранулометрических фракций прослеживается циркумконтинентальная зональность, которая заключается в снижении доли терригенных псаммитовых частиц и увеличении пелитовых от внутреннего шельфа к внешнему. Гипсометрическая зональность проявлена в накоплении мелкозернистых алевритовых и тонкозернистых пелитовых частиц в котловинах и каньонах и более грубозернистого песчано-алевритового материала на подводных возвышенностях.*

*3. Основными породообразующими минералами поверхностных осадков Чукотского моря являются кварц и полевые шпаты; акцессорными – минералы группы эпидота, черные рудные минералы (ильменит, магнетит и др.), гранаты, амфиболы. Из глинистых минералов обнаруживаются гидрослюда, смектит, хлорит, каолинит, смешаннослойные минералы. Отмечается присутствие рентгеноаморфной фазы, иногда значительное. Впервые для осадков Чукотского моря описаны минеральные выделения железофосфатного состава с заметным содержанием кальция и кремния – железокальциевые гидроксофосфаты (?).*

*Основу рудной части ЖМК составляют дигидрофосфат железа (итренгит) и аморфные гидроксиды марганца; на микроуровне заметно чередование слоев железомарганцевого, марганцевого, железофосфатного состава и мелко-, тонкодисперсного обломочного материала. Цементом карбонатного образования является Mg-кальцит; псевдоморфозы по раковинам двустворок сложены арагонитом; в цементе широко распространены микроразмерные выделения сульфидного железа. Обломочная составляющая в аутигенных образованиях соответствует минеральному составу осадков.*

*4. Впервые в осадках и аутигенных образованиях Чукотского моря выявлены и изучены микрочастицы – минеральные зерна размером около 1–5 мкм – цветных, благородных и других металлов (Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, As, Sb, Bi, Ta, W, La–Nd, Y, Th, Fe, Ti, Cr, Zr, Ag, Au, Pd, Pt, Ir). Больше всего зерен выявлено в осадках, хотя и там они распространены неравномерно: максимум – на северном мелководье острова Геральд, минимум – у юго-западных берегов острова Врангеля. В аутигенные образования рудные частицы были включены вместе с терригенным материалом в процессе цементации и породообразования. Первоначально значительная часть рудных минералов попала в осадок в результате транспортировки их течениями и льдами с суши, в том числе островной, в составе продуктов разрушения горных пород. Часть их могла поступить в осадок и во внутренней части бассейна в процессе местного размыва дна.*

## Глава 5 Химический состав современных осадков Чукотского моря

### 5.1 Распределение химических элементов в осадках

Первичная обработка данных по химическому составу осадков Чукотского моря методами математической статистики (приложение А, таблицы А.1–А.4) показала, что распределение большинства химических элементов и биогенных компонентов подчинено закону нормального распределения (ЗНР). Наглядно это продемонстрировано на вероятностной бумаге на примере кремния и ванадия (рисунок 15). Весьма близко к ЗНР поведение марганца, бария, кобальта, меди, никеля и цинка.

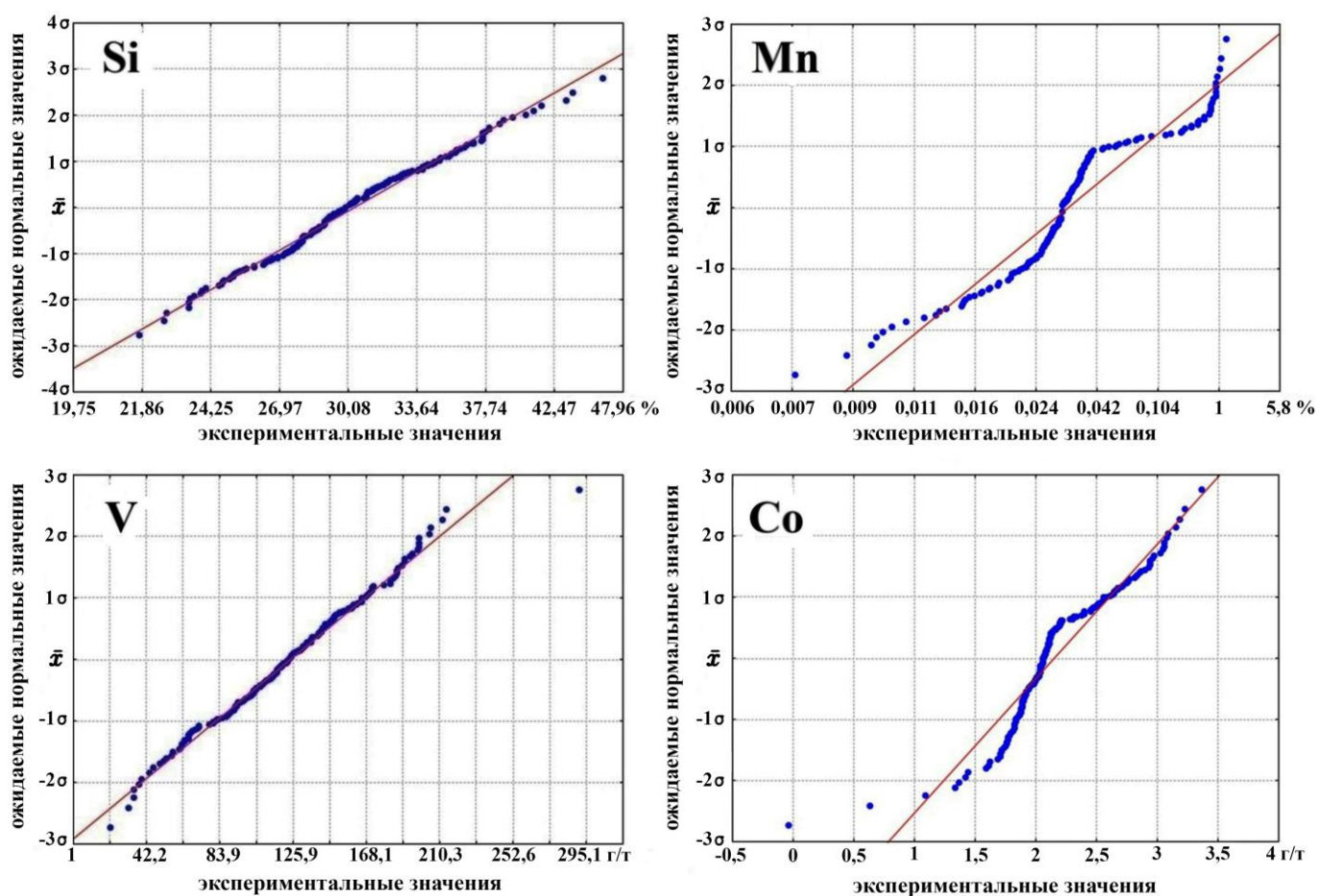


Рисунок 15 – Распределение химических элементов в осадках Чукотского моря, соответствующее закону нормального распределения (Si, V) и близкое к нему (Mn, Co).

То, что распределение большинства макро- и микрокомпонентов в осадках Чукотского моря подчинено ЗНР, позволяет использовать методы математической статистики для моделирования поведения этих компонентов в районах с близкими условиями седиментации.

**Макрокомпоненты.** В осадках Чукотского моря проанализировано содержание 12 макрокомпонентов. В результате дополнены и детализированы карты распределения кремния, алюминия, железа, марганца, магния, кальция, фосфора,  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ , полученные ранее [Астахов и др., 2008, 2009, 2013б; Белов, Огородников, 1976; Кошелева, Яшин, 1999; Огородников, Русанов, 1978; Романкевич, Ветров, 2001; Grebmeier et al., 2006; The Organic Carbon..., 2004 и др.]. Карты содержаний титана, калия и натрия построены впервые; карта содержаний титана опубликована [Астахов, Гусев, *Колесник*, Шакиров, 2013а].

**Кремний.** Согласно проведенным исследованиям, близкие к среднему (30,7 % – приложение А, таблица А.1) содержания кремния характерны для осадков внутреннего шельфа Чукотского моря (рисунок 16, Si). По мере удаления от материков, с ростом глубины пробоотбора, количество кремния в осадке постепенно уменьшается, достигая минимальных (21–23 %) значений в пределах Чукотского поднятия и Канадской котловины. Максимальными концентрациями элемента (более 41 %) отличаются осадки наиболее мелководных участков дна вблизи берегов Аляски, Чукотки, островов Врангеля и Геральд, банки Геральд, а также осадки Берингова пролива – района с интенсивным гидродинамическим режимом.

**Титан.** Большая часть внутреннего шельфа Чукотского моря и локальные участки внешнего покрыты осадками с близкими к среднему значению (0,348 %) содержаниями титана (рисунок 16, Ti; приложение А, таблица А.1). Значительно меньшие количества элемента (менее 0,245 %) наблюдаются в осадках самых мелководных участков дна – вблизи суши (Аляска, Чукотка, острова Врангеля и Геральд), банки Геральд в центральной части моря, в Беринговом проливе. Значения более 0,43 % зафиксированы в пробах из центральной части Южно-Чукотской котловины, на отдельных участках внешнего шельфа, в Канадской котловине. В целом для титана характерно плавное увеличение содержаний по мере удаления от суши, с ростом глубины.

**Алюминий.** Содержания алюминия, близкие к среднему значению 6,1 % (приложение А, таблица А.1), получены в пробах, отобранных преимущественно на внутреннем шельфе, чуть меньшие – в пробах со склонов Южно-Чукотской котловины, мелководья к северу от острова Врангеля и Чукотского полуострова, а также вытянутого вдоль суши участка морского дна, соответствующего интервалу глубин 50–60 м (рисунок 16, Al). Концентрации, несколько превышающие среднее, зафиксированы в пробах, отобранных в центральной части Южно-Чукотской котловины и каньоне Геральд, а также в осадках, распространенных вдоль материка в диапазоне глубин 60–100 м. Осадки банки Геральд в центральной части моря, Берингова пролива и мелководья вблизи Аляски (от мыса Хоп до мыса Барроу) содержат меньше 4 % алюминия. В отдельных пробах, поднятых на внешнем шельфе (Чукотское плато, Канадская котловина) содержание элемента превышает 8 %.



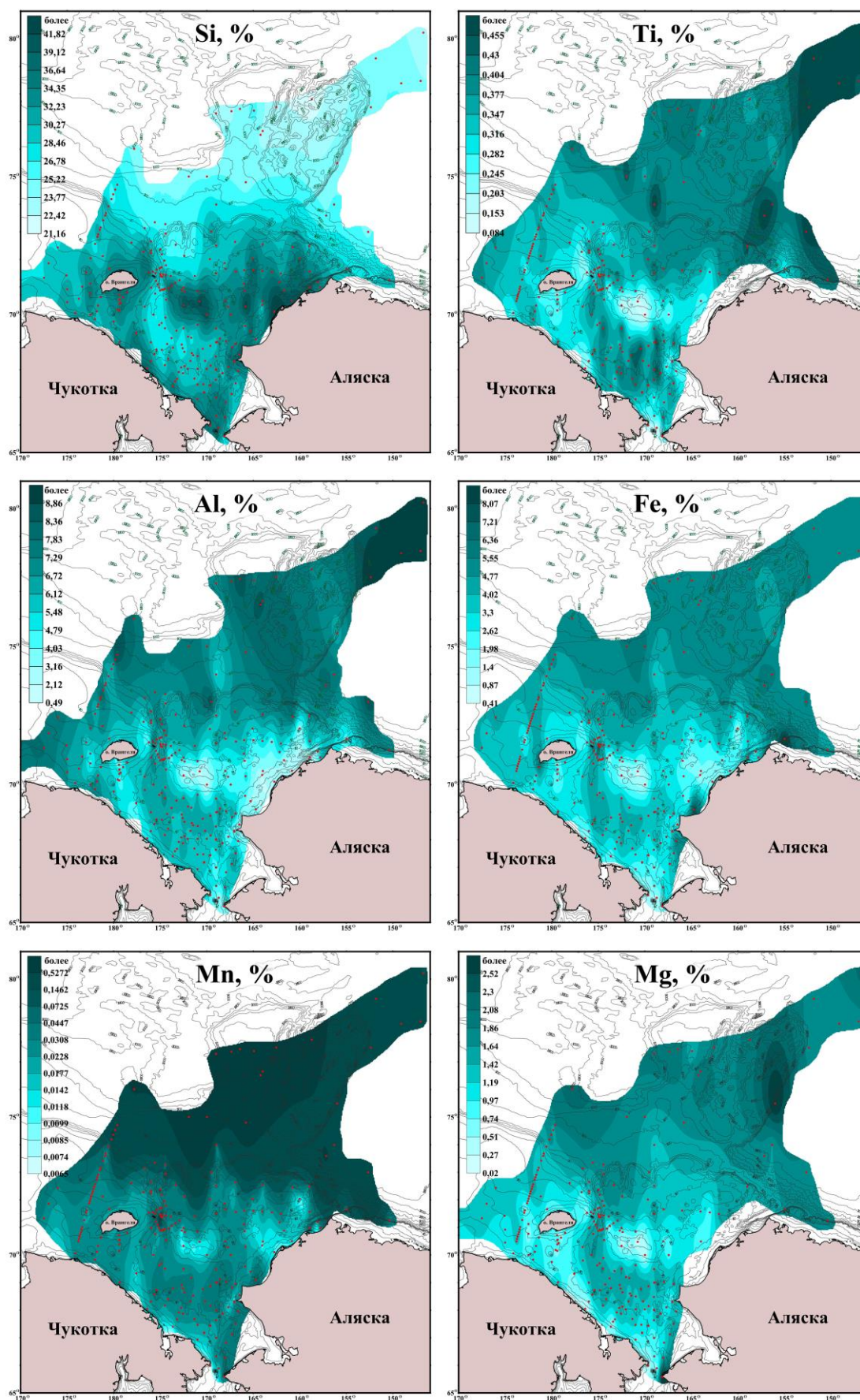


Рисунок 16 – Особенности распределения макроэлементов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg) в осадках Чукотского моря [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а].

Примечание – Красные точки на рисунках 16–21 – станции пробоотбора.

**Железо.** Для железа среднее арифметическое по выборке составляет 3,71 % (приложение А, таблица А.1). Осадки с близкими к этому значению содержаниями металла покрывают периферийные части Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, а также вытянутые вдоль берега участки дна, соответствующие диапазону глубин 50–70 м (рисунок 16, Fe). Менее 2 % железа содержат осадки наиболее мелководных и гидродинамически активных районов (участков дна) внутреннего шельфа – Берингова пролива, банки Геральд, мелководья у берегов Аляски (устье реки Утукок у мыса АЙСИ-КЕЙЛ) и Чукотки (устье реки Амгуэма). Свыше 7,5 % железа зафиксировано в пробах всего трех станций: в центральной части каньона Геральд, на аляскинском мелководье к северо-востоку от мыса Лисберн и в каньоне Барроу. В целом для элемента характерно уменьшение содержания по мере продвижения в глубь моря. В наиболее глубоководных районах (на Чукотском поднятии и в Канадской котловине) распространены содержания 4,5–5,5 %.

**Марганец.** Среди изученных макроэлементов марганец обладает самой ассиметричной выборкой за счет довольно большого количества значений, резко превышающих среднее. В результате наблюдается большой разброс между средним арифметическим и медианным показателями содержания (приложение А, таблица А.1). Для сглаживания эффекта экстремальных значений в качестве статистического центра (СЦ) для выборки использовано значение медианы 0,03 % (среднее арифметическое гораздо выше и равно 0,1011 %). Основная масса значений лежит в пределах медианы, по мере приближения к границам выборки встречаемость вариант снижается: довольно плавно в сторону минимального значения и резко – в сторону максимального (приложение А, таблица А.4). Пространственно это выражается в том, что близкими к СЦ содержаниями марганца характеризуются осадки периферийной части Южно-Чукотской котловины, каньона Геральд, а также остальной части внутреннего шельфа до 50-метровой изобаты (рисунок 16, Mn). Значительно меньшие содержания (менее 0,177 %) зафиксированы в осадках банки Геральд, у берегов Аляски (к северу и северо-западу от мыса АЙСИ-КЕЙЛ, а также у мыса Хоп) и Чукотки (от мыса Дежнева до устья реки Амгуэма и к западу от мыса Биллингса), в Берингове проливе. Начиная от 50-метровой изобаты, с увеличением глубины пробоотбора, происходит резкое нарастание содержания марганца в осадке. Так, у подножия материкового склона концентрации превышают медианное значение в два раза и более, а на Чукотском поднятии и в Канадской котловине – уже более чем в 17 раз, достигая в некоторых пробах 2–2,5 %.

**Магний.** Среднее значение магния в выборке составляет 1,3 % (медиана практически совпадает – 1,34 %), основная масса вариант сосредоточена в центральных классах (приложение А, таблицы А.1 и А.4). Близкие к среднему значению содержания элемента установлены в пробах, отобранных вдоль бортов Южно-Чукотской котловины и каньона

Геральд, а также на остальной части внутреннего шельфа в диапазоне глубин 40–60 м (рисунок 16, Mg). Менее 0,74 % магния заключено в осадках банки Геральд, мелководья у островов Врангеля и Геральд, вблизи берегов Чукотского полуострова (от мыса Дежнева на востоке до по крайней мере мыса Отто-Шмидта на западе). Для наиболее глубоководных районов Чукотского моря (Чукотское поднятие, Канадская котловина) характерны содержания 1,86 % и выше. Максимальное количество магния (более 2,5 %) зафиксировано в пробах двух станций: одна находится в Беринговом проливе у мыса Принца Уэльского, другая – на восточном склоне Чукотского поднятия.

**Кальций.** Среднее содержание кальция в осадках составляет 1,33 % при значительно меньшей медиане – 1,12 % (приложение А, таблица А.1). Поскольку большинство вариантов лежит в пределах медианного значения (приложение А, таблица А.4), именно оно выбрано в качестве СЦ. Распределение кальция в осадках подчинено своеобразной зональности: наибольшие содержания (более 2 %) характерны для северной части Чукотского моря, точнее Чукотского поднятия и южного склона хребта Менделеева, существенно более скромные – для внутреннего шельфа и Канадской котловины (рисунок 17, Са). Причем западный сектор моря (к западу от 175° з.д.) покрыт осадками с содержанием кальция ниже 1 % (это меньше СЦ); минимум отмечается вблизи островов Врангеля и Геральд, а также в отдельных пробах, отобранных у берегов Чукотки. В восточной части моря также имеются локальные участки пониженных относительно СЦ концентраций кальция: банка Геральд, отдельные станции к северу и востоку от банки, Канадская котловина. Вообще же восточная часть внутреннего шельфа отличается повышенными относительно СЦ содержаниями элемента – 1,5–1,7 % (в отдельных пробах, отобранных в пределах впадины Хоп и в Беринговом проливе, – более 2 %).

**Калий.** Содержание калия в осадках проанализировано главным образом для юго-западной части Чукотского моря (рисунок 17, К). Несмотря на относительно небольшую площадь исследований, в распределении элемента можно отметить некоторые особенности. Так, при совпадающих значениях среднего арифметического и медианы (1,75 %) большинство вариантов лежит в центральных классах, что подтверждает правильность выбора данного значения в качестве СЦ (приложение А, таблицы А.1 и А.4). Близкими к СЦ концентрациями калия характеризуются осадки Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, отмечается увеличение содержаний по мере приближения к периферийным частям морфоструктур. Аналогичные количества встречены в пробах, отобранных на некотором расстоянии от суши в интервале глубин 50–100 м. Менее 1 % калия зафиксировано в осадках банки Геральд и восточной части Берингова пролива у берегов полуострова Сьюард. По мере приближения к берегам Чукотки, а также при движении в сторону внешнего шельфа содержания элемента постепенно растут, достигая значений 2 % и выше.

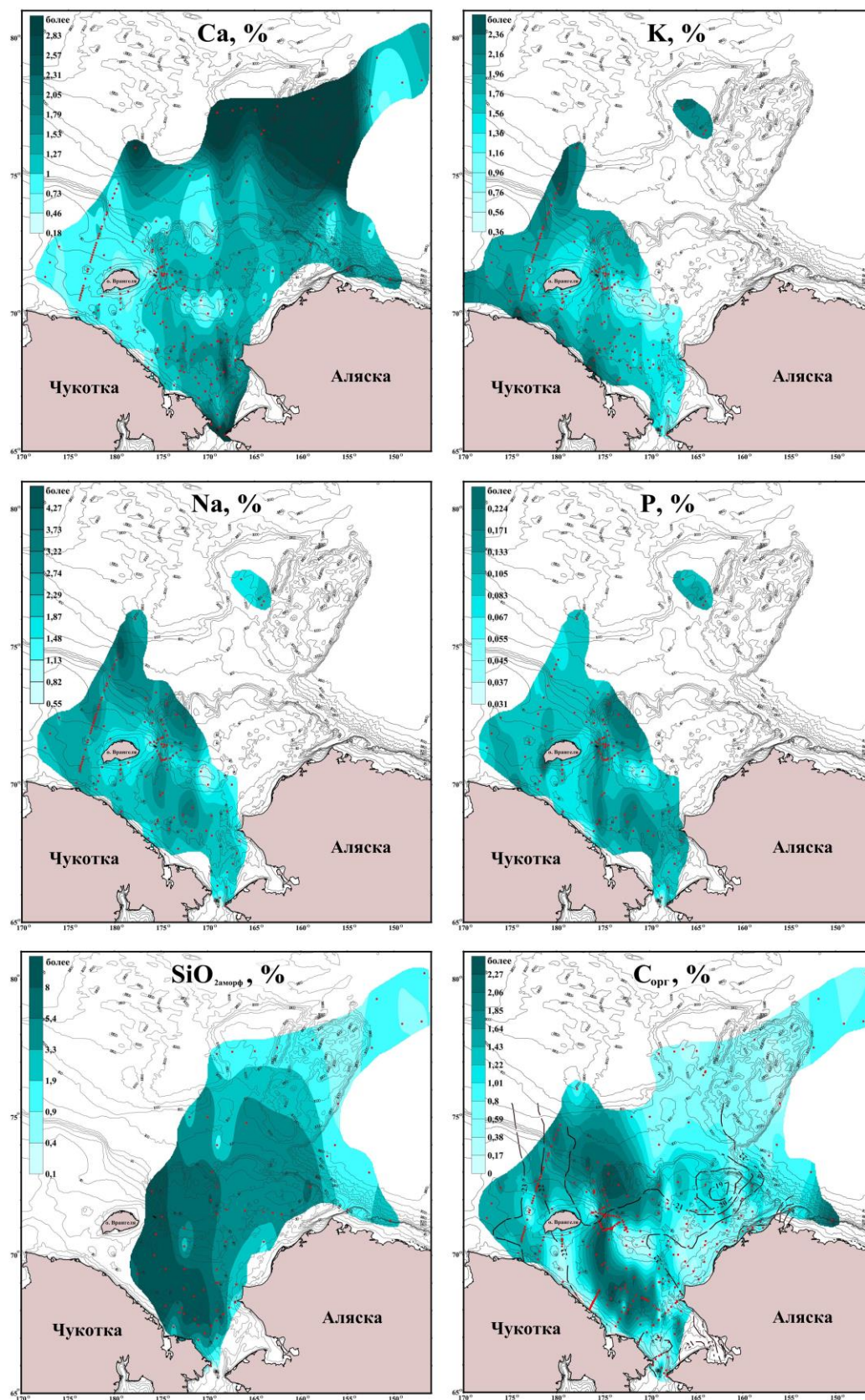


Рисунок 17 – Особенности распределения макрокомпонентов (Ca, K, Na, P, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>) в осадках Чукотского моря.

*Примечание* – Распределение кальция – [Астахов и др., 2008, 2013б], с дополнениями; аморфного кремнезема – [Астахов и др., 2009], с дополнениями; общего органического углерода – [Астахов и др., 2009; Колесник и др., 2010], с дополнениями. Черные изолинии на карте общего органического углерода – изотопный состав, % [Ветров и др., 2008; Grebmeier et al., 2006].

**Натрий.** Статистическая выборка, на основе которой построена карта распределения натрия (рисунок 17, Na), состоит из 123 значений. Большинство вариант сосредоточено около медианного значения 2,33 % (использовано как СЦ), очень близко к нему находится среднее арифметическое 2,37 % (приложение А, таблица А.1). Близкими к медианному значению содержаниями натрия характеризуются осадки большей части Южно-Чукотской котловины и частично каньона Геральд, а также шельфа в диапазоне глубин 50–70 м. Подобные содержания идентифицированы также на обширной площади мелководья Восточно-Сибирского моря, к западу от острова Врангеля. Значения меньше 1,5 % получены для проб, отобранных в пределах поднятия островов Врангеля и Геральд, банки Геральд, прибрежной зоны к западу и югу от мыса Хоп, а также в Беринговом проливе. В количествах, превышающих 3,37 %, натрий встречен в наиболее глубоководной центральной части Южно-Чукотской котловины, на внешнем шельфе, к северу от банки Геральд и острова Врангеля. В трех пробах, отобранных на Чукотском плато, содержание элемента варьируется от 1,5 до 2 %. В пределах внутреннего шельфа положительные морфоструктуры отличаются значительно более низкими концентрациями натрия, чем, например, Южно-Чукотская котловина или каньон Геральд.

**Фосфор.** Содержание фосфора определено в 103 пробах. Это довольно большая выборка, характеризующая тем не менее лишь часть Чукотского моря – западную и небольшой участок на севере. Медиана – 0,1 %; среднее арифметическое – 0,115 % (приложение А, таблица А.1). Поскольку медиана группирует вокруг себя основную массу вариант (приложение А, таблица А.4), именно она выбрана в качестве СЦ. На карте видно (рисунок 17, P), что осадками с наиболее распространенными в выборке концентрациями фосфора (приблизительно 0,1 %) покрыты участки внутреннего шельфа к северу от Берингова пролива, периферийные части Южно-Чукотской котловины и банки Геральд, а также участки дна к северу и западу от острова Врангеля. Аналогичные содержания зафиксированы в осадах у берегов Чукотки (недалеко от мысов Отто-Шмидта и Биллингса, к северу от Колючинской губы, в центральной части пролива Лонга). Наименьшие содержания отмечены в пробах из Берингова пролива, устьевой зоны реки Амгуэма и вершины банки Геральд. Концентрации, превышающие медианное значение в полтора раза и более, установлены для осадков центральной части Южно-Чукотской котловины, каньона Геральд, района к северу от банки Геральд, а также мелководного участка дна у острова Врангеля к югу от мыса Блоссом.

**Аморфный кремнезем.** Выборка для  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  состоит из 72 вариант. Это наименьшая для изученных макроэлементов выборка. Станциями пробоотбора покрыта часть Чукотского моря к востоку от 180° з.д. (рисунок 17,  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ ). Значения среднего арифметического (взято за СЦ) и медианы довольно близки – 5 и 4,6 % соответственно (приложение А, таблица А.1). При этом вариационные ряды показывают, что для  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$

нехарактерно сосредоточение основной массы вариант в центральных классах (приложение А, таблица А.4). Близкими к СЦ концентрациями  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  характеризуются осадки внутреннего шельфа восточнее  $170^\circ$  з.д. вплоть до Аляски, а также относительно небольшие участки дна в южной и северной частях моря. Содержания меньше 3 % отмечены в осадках Чукотского поднятия и Канадской котловины, прибрежного мелководья Чукотки и Аляски, а также вершины банки Геральд. В количествах, превышающих 8 %,  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  зафиксирован в пробах из Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд.

Общий органический углерод. При создании картографической модели распределения в осадках  $C_{\text{орг}}$  использована наибольшая для изученных элементов/компонентов выборка, включающая 299 вариант (рисунок 17,  $C_{\text{орг}}$ ; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое (использовано как СЦ) и медиана практически совпадают – 1,25 и 1,2 % соответственно. При этом вариационные ряды показывают, что в выборке нет явно выраженного статистического центра: довольно много классов – как по периферии, так и в центре – имеют примерно одинаковое количество вариант (приложение А, таблица А.4). Близкими к среднему значению содержаниями  $C_{\text{орг}}$  (1,01–1,43 %) характеризуются осадки периферийной зоны Южно-Чукотской котловины, банки Геральд, северного мелководья островов Врангеля и Геральд, некоторые участки дна вблизи берегов Чукотки (у мыса Биллингса) и Аляски (к западу от мыса Лисберн и к югу от мыса Хоп). Такие же концентрации встречены в отдельных пробах к югу от хребта Менделеева и Чукотского поднятия. Меньше 0,59 %  $C_{\text{орг}}$  содержится в осадках мелководных зон у берегов Чукотского полуострова (от мыса Отто-Шмидта на севере до мыса Дежнева на юге) и Аляски (недалеко от мыса Хоп, к северу от мыса Лисберн), а также банки Геральд и некоторых других безымянных подводных возвышенностей в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, Беринговом проливе, проливе Лонга. В существенном количестве (более 2 %)  $C_{\text{орг}}$  зафиксирован в пробах, отобранных в наиболее глубоководных центральных частях Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, на отдельных участках материкового склона и у его подножия в восточном, центральном и западном секторах Чукотского моря. В распределении  $C_{\text{орг}}$  заметна зональность, которая выражается в контрастных содержаниях компонента на внутреннем и внешнем шельфе, а также бóльших концентрациях в осадках западной части Чукотского моря по сравнению с восточной.

**Микроэлементы.** В осадках Чукотского моря проанализировано содержание 22 микроэлементов. В результате существенно дополнены карты распределения бария, кобальта, хрома, меди, никеля, свинца, ванадия, цинка, ртути [Астахов и др., 2008, 2013б]. Карты распределения стронция, иттрия, иттербия, циркония, лантана, молибдена, серебра, золота, платины, осмия, иридия, рутения и кадмия построены впервые; некоторые из построенных карт

опубликованы [Астахов, Гусев, *Колесник*, Шакиров, 2013а; Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, *Колесник*, 2010а].

**Барий.** Картографическая модель распределения в осадках Чукотского моря бария построена на основе выборки из 196 вариантов (рисунок 18, Ва; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое 665,2 г/т заметно превышает медианное значение 645,9 г/т. Судя по вариационным рядам (приложение А, таблица А.4), основная масса вариантов сосредоточена в пределах центральных классов, группируясь ближе к медиане, поэтому именно медиана принята за СЦ. Распределение бария в осадках Чукотского моря представляет собой довольно пеструю картину. Содержания элемента в пределах СЦ встречаются как на внутреннем, так и на внешнем шельфе с тяготением к западной части моря. Аналогичные количества бария получены при анализе осадков Берингова пролива, периферийных частей Южно-Чукотской котловины, осадков, отобранных к северу и северо-западу от банки и каньона Геральд, в каньоне Барроу и центральной части Чукотского поднятия. Значительно меньшие концентрации (менее 480 г/т) установлены в осадках Берингова пролива, банки Геральд, единичных станций на мелководье у острова Врангеля (к югу от острова) и Аляски (к западу от мыса Айси-Кейл). В центральной части Южно-Чукотской котловины, к северу от Колючинской губы, у мысов Хоп и Лисберн, а также в Канадской котловине отобраны пробы, содержание бария в которых значительно превышает значение СЦ (более 800 г/т).

**Кобальт.** Выборка, использованная для построения карты распределения кобальта, состоит из 223 вариантов (рисунок 18, Со; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое составляет 20,23 г/т. Медианное значение почти в два раза меньше – 12,9 г/т. Вариационные ряды показывают наиболее плотную группировку вариантов вокруг медианы, поэтому именно она выбрана в качестве СЦ (приложение А, таблица А.4). На картографической модели видно, что большая часть внутреннего шельфа Чукотского моря покрыта осадками, содержащими кобальт в количествах, приближенных к медианному значению (в основном это касается западной части моря). Меньше 6 % кобальта заключают в себе осадки, отобранные у берегов Чукотки (к северу от Колючинской губы) и Аляски (у полуострова Сьюард), в Беринговом проливе, на банке Геральд. С ростом глубины пробоотбора (по мере удаления от суши) происходит резкое увеличение концентраций элемента. Так, уже на материковом склоне содержания кобальта превышают медиану более чем в два раза (более 24 г/т), достигая максимальных значений (более 59,81 г/т) в центральной части Чукотского поднятия. Схожие концентрации получены для проб из восточного сектора внутреннего шельфа Чукотского моря к северу и северо-востоку от мыса Лисберн. Кроме того, отобраны две пробы с содержанием кобальта более 70 г/т: одна – в восточной части Южно-Чукотской котловины, другая – у берегов Аляски, к западу от мыса Айси-Кейл.

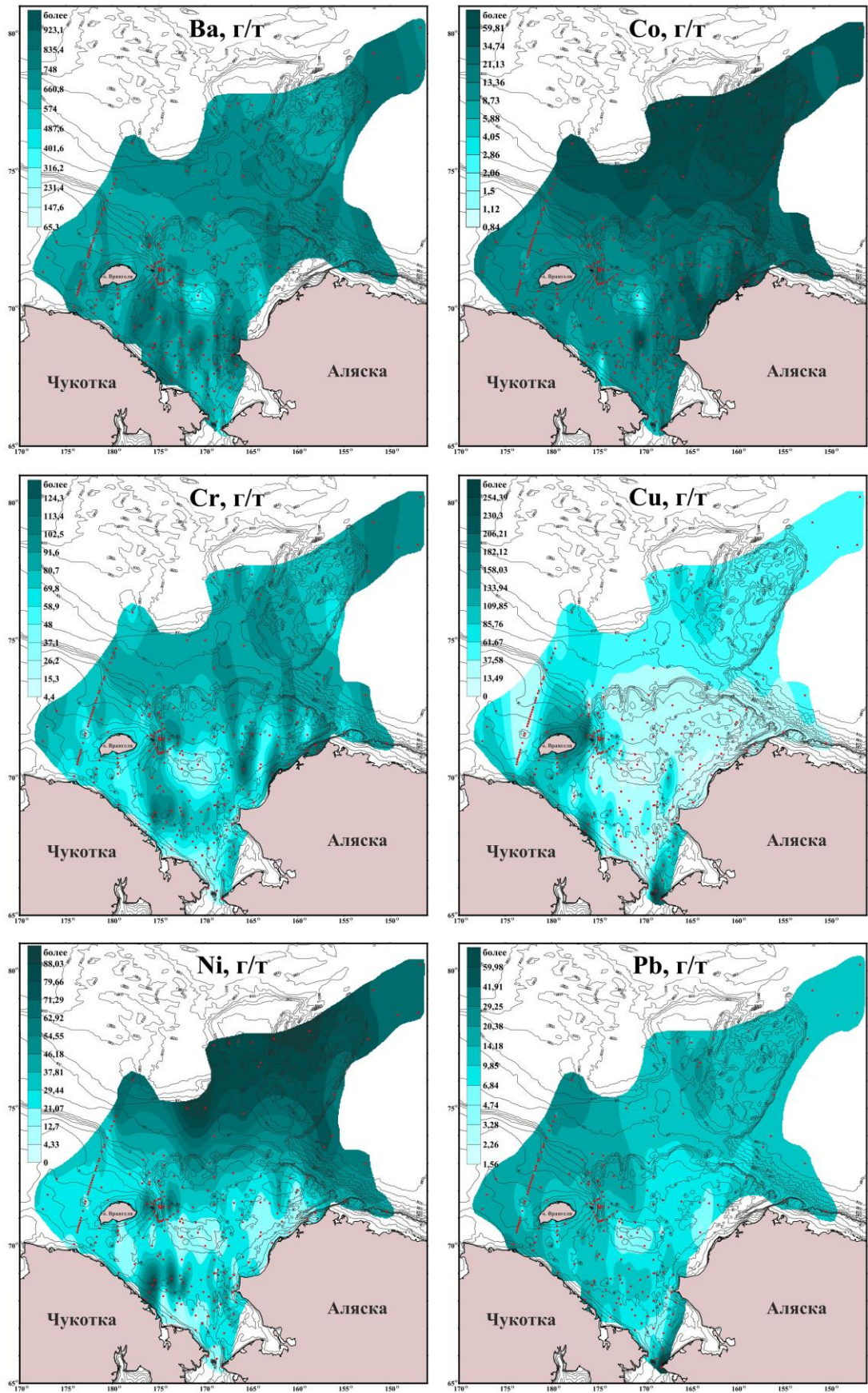


Рисунок 18 – Особенности распределения микроэлементов (Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb) в осадках Чукотского моря.

*Примечание* – Распределение бария, меди, свинца – [Астахов и др., 2008, 2013б], с дополнениями; кобальта, хрома, никеля – [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а].



Кобальт демонстрирует зональность распределения как в широтном направлении (выделяются зоны внутреннего и внешнего шельфа), так и в меридиональном (контраст между западным и восточным секторами Чукотского моря). В целом начиная с материкового склона происходит резкое увеличение содержания элемента в осадке. Обнаруживается сходство с распределением марганца (см. «Марганец», с. 66).

**Хром.** Карта распределения хрома построена на основе выборки из 223 значений (рисунок 18, Cr; приложение А, таблица А.1). Основная масса значений сгруппирована около среднего арифметического 74,5 г/т (использовано как СЦ), очень близкого к медиане 75,5 г/т (приложение А, таблицы А.1 и А.4). Примерно в таких же количествах металл зафиксирован в пробах из периферийных частей Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, на отдельных станциях у берегов Аляски (к югу от мыса Хоп) и Чукотки (у мыса Отто-Шмидта), в глубоководных районах (южный склон хребта Менделеева, центральная часть Чукотского поднятия). Близкими к СЦ содержаниями характеризуются и осадки зоны, которая выделяется на шельфе Чукотского моря в виде полосы, повторяющей очертания суши и ограниченной изобатами 50 и 100 м. Меньше 37,1 г/т хрома заключено в осадках банки Геральд, мелководья у Чукотского полуострова, Берингова пролива. Наибольшие концентрации (более 102,5 г/т) – специфика проб, отобранных в центральной части Южно-Чукотской котловины, на северо-западном склоне банки Геральд, аляскинском мелководье к западу и северу от мыса АЙСИ-КЕЙЛ, в Канадской котловине и на юге Чукотского плато.

**Медь.** Картографическая модель распределения меди в осадках Чукотского моря построена на основе данных по содержанию элемента в 223 пробах (рисунок 18, Cu; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое по выборке составляет 50,85 г/т – это почти в два раза больше медианы, равной 29,35 г/т (приложение А, таблица А.1). Такое различие объясняется присутствием в выборке значений, резко превышающих среднее. Это подтверждается вариационными рядами (приложение А, таблица А.4). Поскольку основная масса значений сосредоточена в пределах медианы, именно она выбрана в качестве СЦ. Близкие к СЦ концентрации меди зафиксированы в осадках большей части внутреннего шельфа (в основном западный сектор Чукотского моря). На востоке подобными количествами металла характеризуются осадки, распространенные к северу от мыса Биллингса в диапазоне глубин 40–100 м. Меньше меди содержится в осадках у Чукотского полуострова (северное мелководье) и Аляски (к северу и западу от мыса АЙСИ-КЕЙЛ), а также банки Геральд. По мере приближения точки пробоотбора к островам Врангеля и Геральд концентрации металла значительно возрастают, достигая значений, в два раза и более превышающих значение СЦ. Максимальные содержания (более 133,94 г/т) отмечены в пробах, отобранных между островами Врангеля и Геральд, а также в устьях рек Рывеем и Амгуэма и в восточной части Берингова пролива. На

внешнем шельфе медь присутствует в количествах от 40 до 115 г/т. В общей картине распределения элемента в осадках Чукотского моря слабо прослеживается широтная (внутренний и внешний шельф) и меридиональная (западный и восточный секторы моря) зональность.

**Н и к е л ь .** Содержание элемента определено в 223 пробах, отобранных по относительно равномерной сети станций, поэтому карта распределения никеля в осадках получилась достаточно детальной (рисунок 18, Ni). Среднее арифметическое и медиана составляют 33,84 и 28,88 г/т соответственно (приложение А, таблица А.1). Основная масса вариант сгруппирована в центральных классах ближе к медиане – она выбрана в качестве СЦ (приложение А, таблица А.4). Большая часть внутреннего шельфа покрыта осадками, содержащими металл в количествах, сопоставимых со значением СЦ. Меньше 21 г/т никеля зафиксировано в осадках банки Геральд, пролива Лонга, на мелководье у берегов Чукотки и Аляски, в Беринговом проливе. Аналогичные значения получены для отдельных проб, поднятых на станциях к западу от мысов Хоп и Лисберн, в каньоне Геральд, на безымянной банке в Восточно-Сибирском море, у берегов Чукотки к западу от мыса Биллингса. Начиная с материкового склона концентрации резко возрастают: у подножия они уже в два раза больше значения медианы. Максимум (до 100 г/т) зафиксирован на Чукотском поднятии. В пределах внутреннего шельфа также выделяются участки дна (к западу от острова Геральд, на северо-западном склоне одноименной банки, к северу от устья реки Амгуэма и Колючинской губы), покрытые осадками, содержания никеля в которых более чем в два с половиной раза превышают значение СЦ. В целом распределение никеля в осадках Чукотского моря имеет четко выраженную широтную зональность: внутренний и внешний шельф резко контрастируют по содержанию металла.

**С в и н е ц .** Карта распределения свинца в осадках Чукотского моря построена на основе данных по содержанию элемента в 196 пробах (рисунок 18, Pb; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое и медиана в составленной выборке довольно близки – 12,83 и 11,69 г/т соответственно. Вариационные ряды указывают на сконцентрированность основной массы вариант в центральных классах около медианы, которая и выбрана в качестве СЦ (приложение А, таблица А.4). Центральная часть внутреннего шельфа (Южно-Чукотская котловина, часть каньона Геральд, мелководье вокруг островов Врангеля и Геральд) и практически весь внешний шельф (за исключением центральной части Чукотского поднятия) покрыты осадками с содержанием свинца, близким к СЦ. В два раза меньше свинца в пробах, отобранных на банке Геральд, у берегов Аляски (к северо-западу от мыса АЙСИ-Кейл и к югу от мыса Хоп) и Чукотки (к северу от Колючинской губы и Берингова пролива). Больше 15 г/т свинца содержится в осадках западного сектора Чукотского моря (к западу и северу от острова Врангеля) и центральной части Чукотского поднятия. Максимальная концентрация (102,4 г/т – в девять раз

превышает значение СЦ) зафиксирована в пробе, отобранной у мыса Принца Уэльского в Беринговом проливе. В целом в распределении элемента видна меридиональная зональность: по содержанию свинца западный сектор Чукотского моря резко контрастируют с восточным.

**Стронций.** Содержание стронция определено в 237 пробах осадка из различных районов Чукотского моря (приложение А, таблица А.1). Сформированная выборка имеет близкие значения среднего арифметического и медианы – 181,94 и 178,55 г/т соответственно. Основная масса вариант сосредоточена в центральных классах ближе к медианному значению, которое и выбрано в качестве СЦ (приложение А, таблица А.4). Бóльшая часть внутреннего шельфа, в основном его западная и центральная части, покрыта осадками с содержанием стронция, близким к значению СЦ (рисунок 19, Sr). Концентрации меньше 155 г/т установлены в пробах, отобранных в Беринговом проливе, у островов Врангеля и Геральд (северное мелководье), на банке Геральд, вблизи Аляски (от мыса Хоп на юге до мыса Айси-Кейл на северо-западе), в Канадской котловине. В количествах, превышающих 210 г/т, стронций обнаружен в осадках Берингова пролива, Чукотского поднятия и южного склона хребта Менделеева. В пробах, отобранных у мысов Дежнева и Принца Уэльского в Беринговом проливе, содержание элемента превышает значение СЦ в два с половиной раза – это максимум. В общем распределении стронция достаточно хорошо прослеживается широтная зональность: виден контраст по содержанию элемента в осадках внутреннего и внешнего шельфа.

**Ванадий.** Карта распределения в осадках Чукотского моря ванадия построена по данным о содержании элемента в 223 пробах (рисунок 19, V; приложение А, таблица А.1). Выборка имеет очень близкие значения среднего арифметического и медианы – 118,65 и 118,1 г/т соответственно (приложение А, таблица А.1). Вариационные ряды показывают, что основная масса вариант тесно сгруппирована около среднего (приложение А, таблица А.4), поэтому именно оно использовано в качестве СЦ. Близкими к СЦ концентрациями элемента отличаются осадки внутреннего шельфа, распространенные в диапазоне глубин 20–100 м. Осадки с чуть бóльшим содержанием ванадия покрывают центральные части Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, а также часть внутреннего шельфа с глубинами 50–100 м. Чуть меньшие концентрации установлены в пробах периферийных частей обозначенных морфоструктур и относительно мелководных участков шельфа. Меньше 70 г/т ванадия содержится в осадках банки Геральд и безымянной возвышенности в Восточно-Сибирском море, у берегов Чукотки (от устья реки Амгуэма до Берингова пролива) и Аляски (от мыса Хоп до мыса Барроу), на отдельных станциях вблизи островов Врангеля и Геральд. Начиная с материкового склона – по мере увеличения глубин и удаления от суши – в осадке наблюдается довольно быстрый рост концентраций ванадия. Больше 200 г/т ванадия обнаружено в осадках к северу от каньона Геральд.

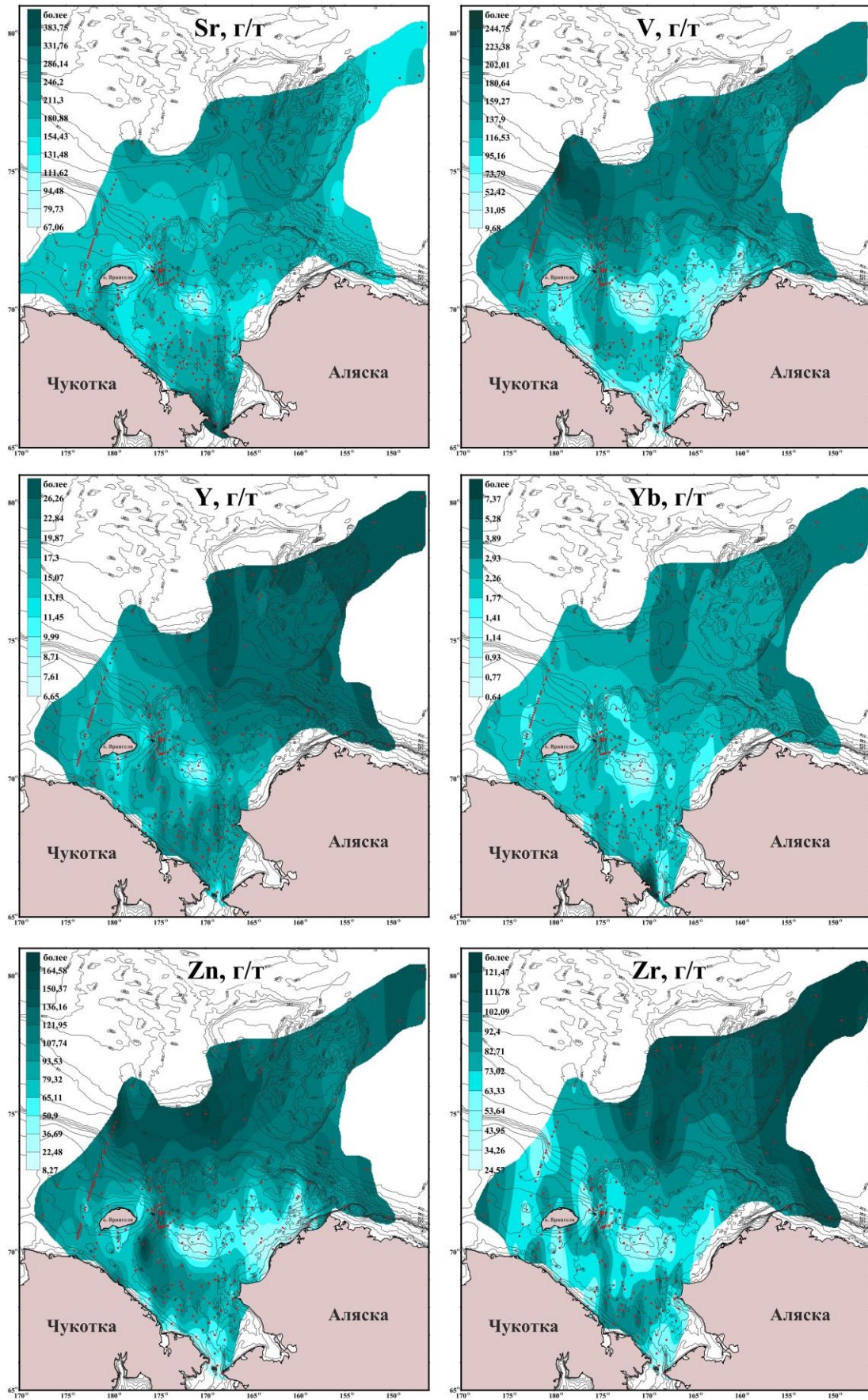


Рисунок 19 – Особенности распределения микроэлементов (Sr, V, Y, Yb, Zn, Zr) в осадках Чукотского моря.

Примечание – Распределение ванадия и цинка – [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а].

**Иттрий.** Содержание иттрия определено в 196 пробах осадка; среднее и медианное значения в полученной выборке довольно близки – 17,69 и 16,67 г/т соответственно (приложение А, таблица А.1). При этом, как показывают вариационные ряды (приложение А, таблица А.4), большинство вариантов находится ближе к медиане, которая и выбрана в качестве СЦ. Осадки, содержащие элемент в количествах, близких к значению СЦ, распространены на внутреннем шельфе, главным образом в его центральной и западной частях (рисунок 19, У). Меньше иттрия заключено в осадках банки Геральд, Берингова пролива, у берегов Чукотки, островов Врангеля и Геральд. К северу и северо-востоку от банок Геральд и Ханна, а также некоторых других безымянных подводных возвышенностей, расположенных рядом, концентрация элемента повышается приблизительно до 20 г/т. С ростом глубины пробоотбора и удалением от суши содержания продолжают увеличиваться, достигая максимальных (более 25 г/т) значений в осадках северной части Чукотского поднятия и Канадской котловины. На внутреннем шельфе (в центральной части Южно-Чукотской котловины и на мелководье у берегов Чукотки) также отобраны пробы с содержанием элемента более 20 г/т.

**Иттербий.** Карта распределения иттербия построена на основе данных о его содержании в 196 пробах осадка из различных районов Чукотского моря (рисунок 19, Ув; приложение А, таблица А.1). Довольно близкие значения среднего арифметического и медианы, а также вариационные ряды (приложение А, таблицы А.1 и А.4) указывают на то, что основная масса вариантов сосредоточена в центральных классах близи среднего арифметического (оно принято за СЦ). Осадки с близкими к СЦ содержаниями иттербия являются наиболее распространенными на внутреннем шельфе. Пробы с такими содержаниями отобраны в широком диапазоне глубин: от мелководья у берегов Чукотки, Аляски, островов Врангеля и Геральд до участков дна, соответствующих 100-метровой изобате. Меньше 1,4 г/т иттербия зафиксировано в осадках банки Геральд и северо-восточной части Берингова пролива; 2–3,5 г/т – у подножия материкового склона, на Чукотском поднятии и в Канадской котловине. Максимальное значение (13 г/т) установлено в пробе, отобранной у мыса Дежнева в Беринговом проливе. В характере распределения иттербия четко прослеживается широтная зональность: более низкие содержания элемента на внутреннем шельфе контрастируют с относительно высокими его концентрациями на внешнем.

**Цинк.** Содержание цинка определено в 223 пробах осадков, покрывающих относительно равномерной сетью всю площадь Чукотского моря, а также прилегающие районы Восточно-Сибирского моря и открытой части Северного Ледовитого океана (рисунок 19, Zn; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое значительно превышает медиану и составляет 114,78 г/т против 92,1 г/т (приложение А, таблица А.1). Такое различие объясняется присутствием в выборке экстремального значения 5251 г/т, которое заметно смещает среднее

относительно реального СЦ, медианы в данном случае. На это же указывают вариационные ряды (приложение А, таблица А.4). Их анализ говорит о том, что большинство вариант сгруппировано около медианы; к границам классов количество вариант постепенно уменьшается. По содержанию цинка выделяется четыре района Чукотского моря: см. рисунок 19, Zn. Первый – периферийные участки Южно-Чукотской котловины и мелководье внутреннего шельфа в диапазоне глубин 10–50 м (осадки с содержаниями цинка 80–93 г/т, что несколько ниже СЦ). Второй – центральная часть Южно-Чукотской котловины, а также участки дна, соответствующие изобатам 50–100 м (осадки содержат от 93 до 103 г/т цинка). Третий – осадки банки Геральд, Берингова пролива, мелководья у берегов Аляски и Чукотки, островов Врангеля и Геральд (содержание цинка в полтора раза ниже СЦ). Четвертый – северная часть Южно-Чукотской котловины, участок дна к северу от каньона Геральд, Канадская котловина (осадок содержит металл в количествах, превышающих значение СЦ в полтора раза и более: Zn – 137 г/т и выше).

Цирконий. Карта распределения циркония построена на основе данных по содержанию элемента в 181 пробе (рисунок 19, Zr; приложение А, таблица А.1). В полученной выборке среднее арифметическое немного больше медианы и составляет 76,54 против 74,32 г/т (приложение А, таблица А.1). Вариационные ряды демонстрируют симметричность выборки и скопление основной массы вариант в центральных классах (приложение А, таблица А.4), причем варианты, как правило, ближе к медиане, нежели к среднему. Именно поэтому для сравнительного анализа в качестве СЦ выбрана медиана. На карте видно (рисунок 19, Zr), что относительно небольшая часть внутреннего шельфа покрыта осадками с близкими к СЦ содержаниями элемента. Меньше 50 г/т циркония заключено в пробах, отобранных на вершине банки Геральд, в проливах Лонга и Беринговом, а также у островов Врангеля и Геральд. В количествах, превышающих СЦ, цирконий содержится в осадках, которые распространены у подножия материкового склона, на Чукотском поднятии, в Канадской котловине. Аналогично повышенные концентрации зафиксированы в некоторых пробах, отобранных у северных берегов Чукотского полуострова, в центральной части Южно-Чукотской котловины, на мелководье Восточно-Сибирского моря. Распределение циркония в осадках Чукотского моря характеризуется четко выраженной широтной зональностью: средние содержания элемента в осадках внутреннего и внешнего шельфа сильно разнятся.

Лантан. При построении карты использовались соответствующие данные по 237 пробам (рисунок 20, La; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое – 24,03 г/т. Медиана – 22,85 г/т. Вариационные ряды показывают, что большинство вариант сосредоточено вблизи медианного значения, которое и выбрано в качестве СЦ для сравнительного анализа (приложение А, таблица А.4). Согласно результатам этого анализа, для внутреннего шельфа

характерна весьма пестрая картина распределения лантана. Основная площадь внутреннего шельфа покрыта осадками с содержанием элемента, близким к значению СЦ. Самое низкое содержание фиксируется в осадках банки Геральд и Берингова пролива, а также осадках, распространенных отдельными пятнами к северо-западу от острова Врангеля. В относительно глубоководных районах Чукотского поднятия концентрация лантана превышает 32 г/т. В Канадской котловине содержание еще весомее – более 40 г/т. На внутреннем шельфе также обнаруживаются участки дна, покрытые осадками, в которых содержание элемента превышает значение СЦ (La – 26–32 г/т). В целом картину распределения лантана в осадках Чукотского моря отличает достаточно четко проявленная широтная зональность: выделяются районы внутреннего и внешнего шельфа.

**Молибден.** Карта распределения молибдена построена с использованием относительно небольшой выборки из 103 вариант (рисунок 20, Мо; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое (2,13 г/т) почти в полтора раза больше, чем медиана (1,46 г/т). Вариационные ряды показывают, что основная масса значений сгруппирована в центральных классах и тяготеет к медиане, которая и принята за СЦ (приложение А, таблица А.4). Близкие к СЦ концентрации молибдена обнаружены в осадках северо-западной части Южно-Чукотской котловины, каньона Геральд, мелководья внутреннего шельфа к западу от острова Врангеля в диапазоне глубин 40–60 м. Более низкие содержания (менее 1 г/т) установлены в пробах, отобранных в восточной части Южно-Чукотской котловины, на банке Геральд, в Беринговом проливе, у островов Врангеля и Геральд, в устье реки Амгуэма и некоторых других локальных участках дна вблизи Чукотского полуострова. Концентрации, в несколько раз превышающие медианное значение (СЦ), зафиксированы в пробах южной части каньона Геральд и севернее – у подножия материкового склона. На трех станциях, расположенных на Чукотском поднятии, концентрации элемента максимальны – 11 г/т и выше.

**Золото.** Используемая для построения карты выборка имеет малый объем – всего 21 значение (приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое значительно превышает медианное значение – 4 против 2,5 мг/т. Вариационные ряды указывают на несимметричность выборки (приложение А, таблица А.4). Наибольшее количество вариант сосредоточено в пределах медианного значения, которое выбрано в качестве условного СЦ (для сравнительного анализа). Согласно результатам этого анализа, большая часть Южно-Чукотской котловины и часть каньона Геральд покрыты осадками с содержанием золота, близким к значению СЦ (рисунок 20, Au). Меньше 2 мг/т металла содержится в осадках периферийных частей Южно-Чукотской котловины и банки Геральд. Пробы с содержанием золота более 6 мг/т отобраны у берегов Чукотки (северное побережье) и в юго-восточной части Южно-Чукотской котловины, а также на двух станциях в южной и центральной частях каньона Геральд.

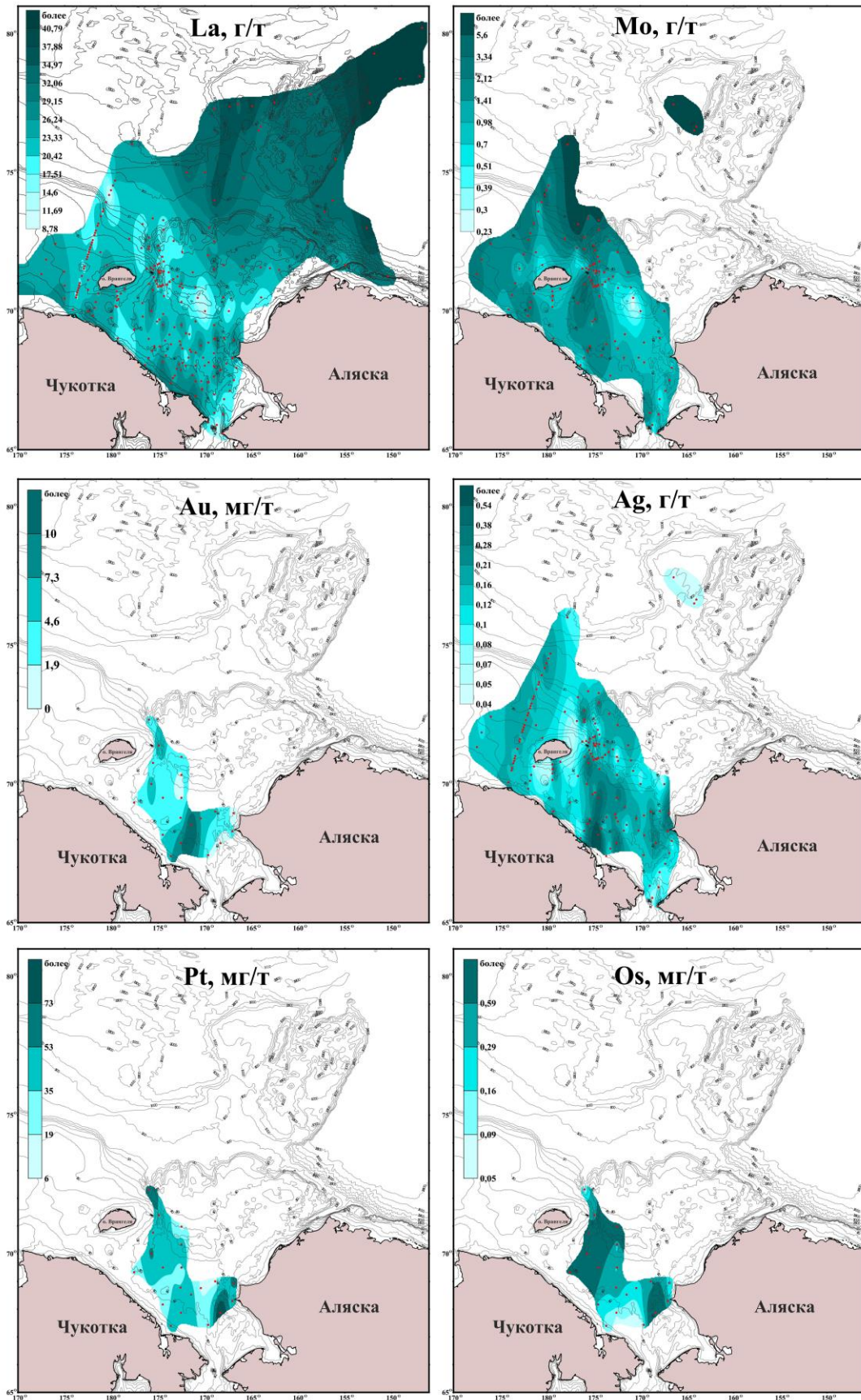


Рисунок 20 – Особенности распределения микроэлементов (La, Mo, Au, Ag, Pt, Os) в осадках Чукотского моря.

*Примечание* – Распределение молибдена – [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а]; золота, платины, осмия – [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а]; серебра – [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а], с дополнениями.



**Серебро.** Карта распределения серебра построена с использованием данных по содержанию элемента в 141 пробе осадка (рисунок 20, Ag; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое больше медианного значения и составляет 0,17 против 0,15 г/т (приложение А, таблица А.1). Из вариационных рядов видно (приложение А, таблица А.4), что большинство вариантов попадает в один класс с медианой (принята за СЦ), а не со средним арифметическим. Близкими к значению СЦ концентрациями серебра характеризуются осадки относительно небольшой части внутреннего шельфа (в основном это склоны подводных прогибов и впадин в центральной части моря). Минимальные содержания (менее 0,1 г/т) обнаружены в осадках у островов Врангеля и Геральд, в Беринговом проливе, на банке Геральд (центральная и восточная части) и Чукотском плато. В центральной части Южно-Чукотской котловины, на мелководье у берегов Чукотки (к северу от Колючинской губы) и Аляски (к западу от мысов Хоп и Лисберн), а также на отдельных станциях в северной части каньона Геральд отобраны пробы с содержанием серебра, которое в полтора раза и более превышает медианное значение (СЦ).

**Платина.** Содержание элемента определено в 21 пробе осадка из южной и западной частей Чукотского моря. Эта относительно небольшая выборка послужила основой для построения карты (рисунок 20, Pt). Среднее арифметическое и медиана в выборке практически совпадают – 40 и 39 мг/т соответственно (приложение А, таблица А.1). Большинство значений сгруппировано в центральном классе вблизи среднего, которое и принято за СЦ (приложение А, таблица А.4). На карте видно, что центральная часть Южно-Чукотской котловины покрыта осадками с содержанием платины, близким к значению СЦ. Гораздо более скромные содержания (менее 19 мг/т) зафиксированы в пробах, отобранных на северном склоне банки Геральд и к югу от нее, в Южно-Чукотской котловине. Повышенные концентрации – 60 мг/т – получены при анализе осадков из каньона Геральд (центральная и северная части) и впадины Хоп (западнее одноименного мыса).

**Осмий.** Выборка состоит из данных о содержании осмия в осадках южной и западной частей Чукотского моря – 21 проба (приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое практически в два раза превышает медианное значение – 0,61 и 0,31 мг/т соответственно (приложение А, таблица А.1). Вариационные ряды не позволяют однозначно судить о соответствии распределения вариантов закономерности Кетле [1911]. Тем не менее заметно скопление значений в классах, близких к центральным, – в пределах среднего или медианы (приложение А, таблица А.4). Для проведения сравнительного анализа за СЦ принято медианное значение. Согласно результатам анализа, осадки, содержащие осмий в количествах,

близких к медиане (СЦ), накапливаются в центральных частях Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд (рисунок 20, Os). Значительно меньше (менее 0,09 мг/т) зафиксировано в пробах, отобранных у Чукотского полуострова (северное мелководье) и в северной части каньона Геральд. Наиболее обогащенные осмием осадки (Os – 0,8 мг/т и выше) распространены в северо-западной части Южно-Чукотской котловины, на северо-западном склоне банки Геральд и в пределах впадины Хоп к юго-западу от одноименного мыса.

**И р и д и й.** Содержание иридия определено в осадках (21 проба) из южного и западного секторов Чукотского моря (рисунок 21, Ir; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое почти в два раза больше медианы – 0,56 и 0,3 мг/т соответственно (приложение А, таблица А.1). Наибольшее число вариант попадает в один класс с медианным значением, поэтому именно медиана выбрана в качестве СЦ (для сравнительного анализа). Картина распределения иридия практически полностью совпадает с таковой для осмия (рисунок 20, Os; рисунок 21, Ir). Концентрации иридия, близкие к значению СЦ, установлены в пробах, отобранных в центральных частях Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд, меньшие – в северной части каньона и на мелководье у северных берегов Чукотского полуострова. Так же, как и в случае с осмием, в северо-западной части Южно-Чукотской котловины и на северном склоне банки Геральд дно выстилают осадки с наибольшим (более 1 мг/т) содержанием элемента.

**Р у т е н и й.** Карта распределения рутения построена на основе данных по 21 пробе осадка из южной и западной частей Чукотского моря (рисунок 21, Ru; приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое – 6,7 мг/т. Медиана – 6,9 мг/т. Большинство вариант сгруппировано вблизи среднего арифметического, именно оно принято за СЦ (приложение А, таблица А.4). Периферийные части Южно-Чукотской котловины – восточная, южная, северная – выстланы осадками с содержанием рутения, близким к значению СЦ (рисунок 21, Ru). На склонах Южно-Чукотской котловины и банки Геральд содержания элемента в два-три раза ниже (менее 2 мг/т). Максимальное количество рутения (более 9 мг/т) зафиксировано в пробах осадков из центральных частей Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд.

**К а д м и й.** Карта распределения кадмия построена на основе данных по его содержанию в 103 пробах осадка преимущественно из западного сектора Чукотского моря (рисунок 21, Cd). Среднее арифметическое в сформированной выборке превышает медианное значение и составляет 0,22 против 0,19 г/т (приложение А, таблица А.1). Вариационные ряды показывают, что большинство вариант сгруппировано в классе, который включает медианное значение (приложение А, таблица А.4), поэтому для проведения сравнительного анализа в качестве СЦ

выбрана именно медиана. В результате сравнительного анализа выделено два участка морского дна, покрытых осадками с содержанием кадмия, сопоставимым с медианным значением. Первый участок в восточной части Чукотского моря протягивается от восточной части Берингова пролива вдоль склона Южно-Чукотской котловины до северного склона банки Геральд; второй, приуроченный к западному сектору моря, включает пролив Лонга, в том числе мелководье у берегов Чукотки и острова Врангеля, и обширную область внутреннего шельфа к западу от острова в интервале глубин 10–100 м (рисунок 21, Cd).

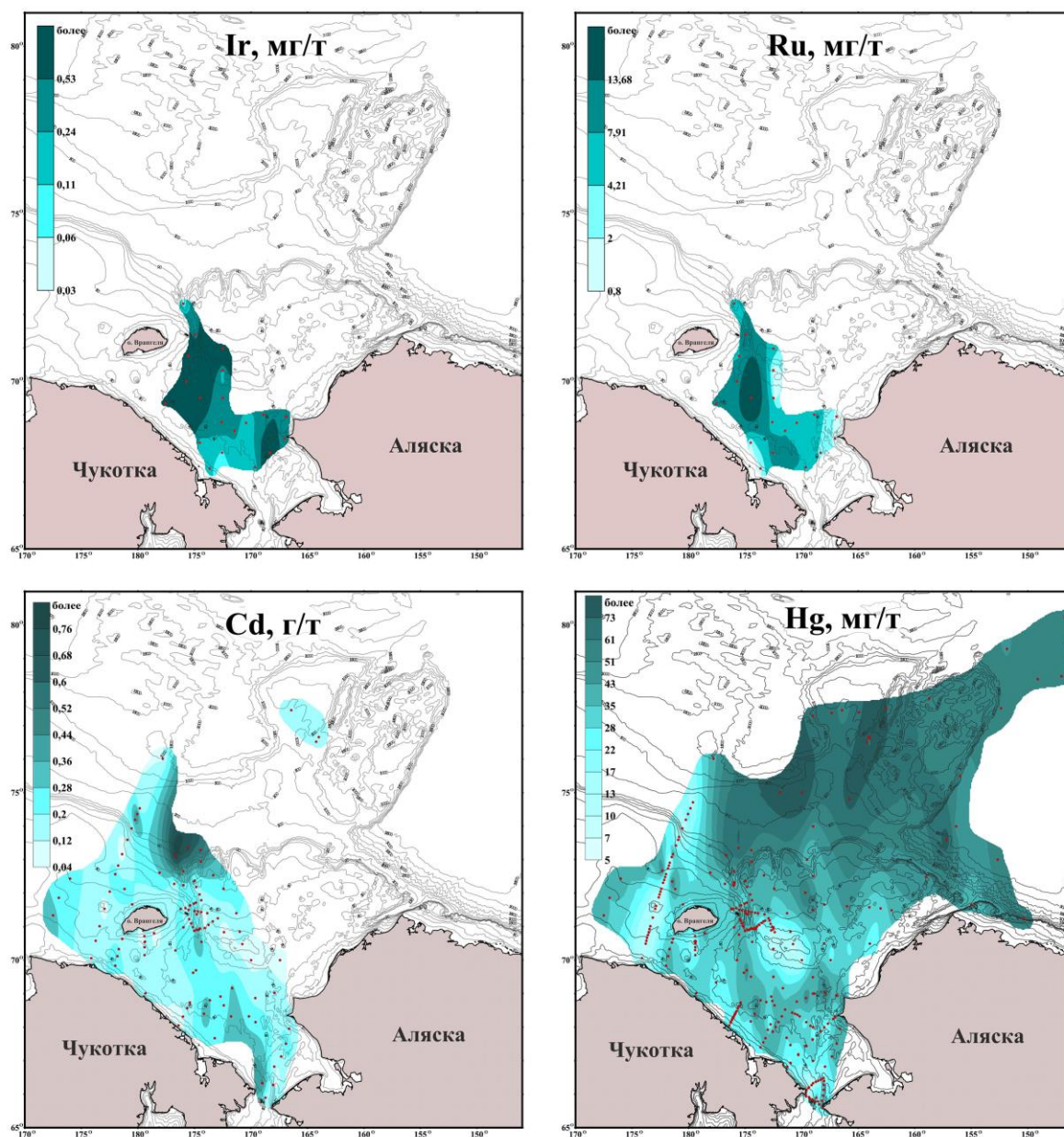


Рисунок 21 – Особенности распределения микроэлементов (Ir, Ru, Cd, Hg) в осадках Чукотского моря.

*Примечание* – Распределение иридия и рутения – [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010a]; ртути – [Астахов и др., 2008, 2013б], с дополнениями.

В аналогичных (близких к СЦ) количествах кадмий содержится в осадках южного склона хребта Менделеева и Чукотского плато. Минимальные концентрации – ниже 0,12 г/т – получены при анализе проб, отобранных на вершине банки Геральд и еще одной безымянной возвышенности к западу от острова Врангеля, на южном мелководье острова Врангеля, на отдельных станциях у берегов Чукотки (в устье реки Амгуэма, у мыса Биллингса), в Беринговом проливе. Обогащены кадмием осадки северной части каньона Геральд (Cd – до 0,828 г/т). Пробы с повышенным относительно СЦ содержанием металла (0,28–0,44 г/т) отобраны также у северных берегов Чукотского полуострова, на юге Южно-Чукотской котловины, в центральной части каньона Геральд и на двух станциях к северу от острова Врангеля.

Ртуть. Содержание ртути определено в 280 пробах осадка из различных районов Чукотского моря (приложение А, таблица А.1). Среднее арифметическое и медианное значения в полученной выборке достаточно близки: первое составляет 33 мг/т, второе – 31 мг/т (приложение А, таблица А.1). По вариационным рядам видно, что основная масса вариант сосредоточена в центральных классах около среднего и медианы, ближе к первому (приложение А, таблица А.4). Поэтому для сравнительного анализа в качестве СЦ выбрано значение именно среднего арифметического. Согласно результатам анализа, на основной площади внутреннего шельфа распространены осадки с содержанием ртути, приближенным к среднему: чуть бóльшие значения характерны для центральных частей прогибов и впадин, чуть меньшие – для их периферийных (склоновых) частей (см. рисунок 21, Нг). Самые низкие концентрации, менее 17 мг/т, зафиксированы в осадках западной части Берингова пролива (у мыса Дежнева), банки Геральд, у берегов Чукотки (к северо-востоку от мыса Биллингса) и к северу от острова Врангеля. В пробах, отобранных у подножия материкового склона, на Чукотском поднятии и в Канадской котловине содержания ртути превышают среднее значение в полтора раза и более (Hg – 50–70 мг/т). Максимальные количества металла зафиксированы в осадках южного склона Чукотской котловины и центральной части Чукотского поднятия – более 80 мг/т.

В целом анализ химического состава осадков Чукотского моря показал (подтвердил) [Астахов и др., 2008, 2013б; Белов, Огородников, 1976 и др.], что при движении от внутреннего шельфа к внешнему происходит планомерное уменьшение количества кремния с нарастанием содержания алюминия, магния, железа и особенно марганца, а также большинства микроэлементов. В центральной части бассейна на эту закономерность накладывается другая: повышение содержания кремния и уменьшение доли других элементов в осадках подводных возвышенностей при обратной картине распределения в отложениях отрицательных морфоструктур.

## 5.2. Полиэлементные ассоциации

Статистическая обработка данных по химическому и гранулометрическому составу осадков Чукотского моря позволила выделить несколько ассоциаций (групп) химических элементов и  $C_{org}$ : см. таблицу 11, рисунок 22.

Как типичный элемент песчаных осадков обособляется кремний (первая группа), имеющий значимую положительную корреляцию только с псаммитовой и алевритовой фракциями: коэффициент корреляции  $r = 0,57$  и  $0,69$  соответственно (таблица 11).

Элементы, обогащающие тонкозернистый осадок, локализуются в правой части кластерной дендрограммы (рисунок 22) и имеют значимые положительные корреляционные связи как между собой, так и с пелитовой фракцией (таблица 11). Среди этих элементов отчетливо выделяются две группы: вторая Ti-Ba-Y-Yb-Zr-La-Co-Hg и третья Al-Mg-Fe-Mn-Zn-V-Mo-Cr-Ni. Они характерны для обломочной и глинисто-аутигенной составляющих пелитовой фракции соответственно. Наиболее интересна третья группа. Видимо, она определяется наличием в осадках оксидов и/или сульфидов железа и марганца, накапливающих некоторые микроэлементы. Так как значительная часть железа и марганца находится в осадке в составе обломочных и глинистых минералов, наиболее тесные корреляционные связи в группе характерны для ванадия и элементов-сульфофилов цинка и молибдена.

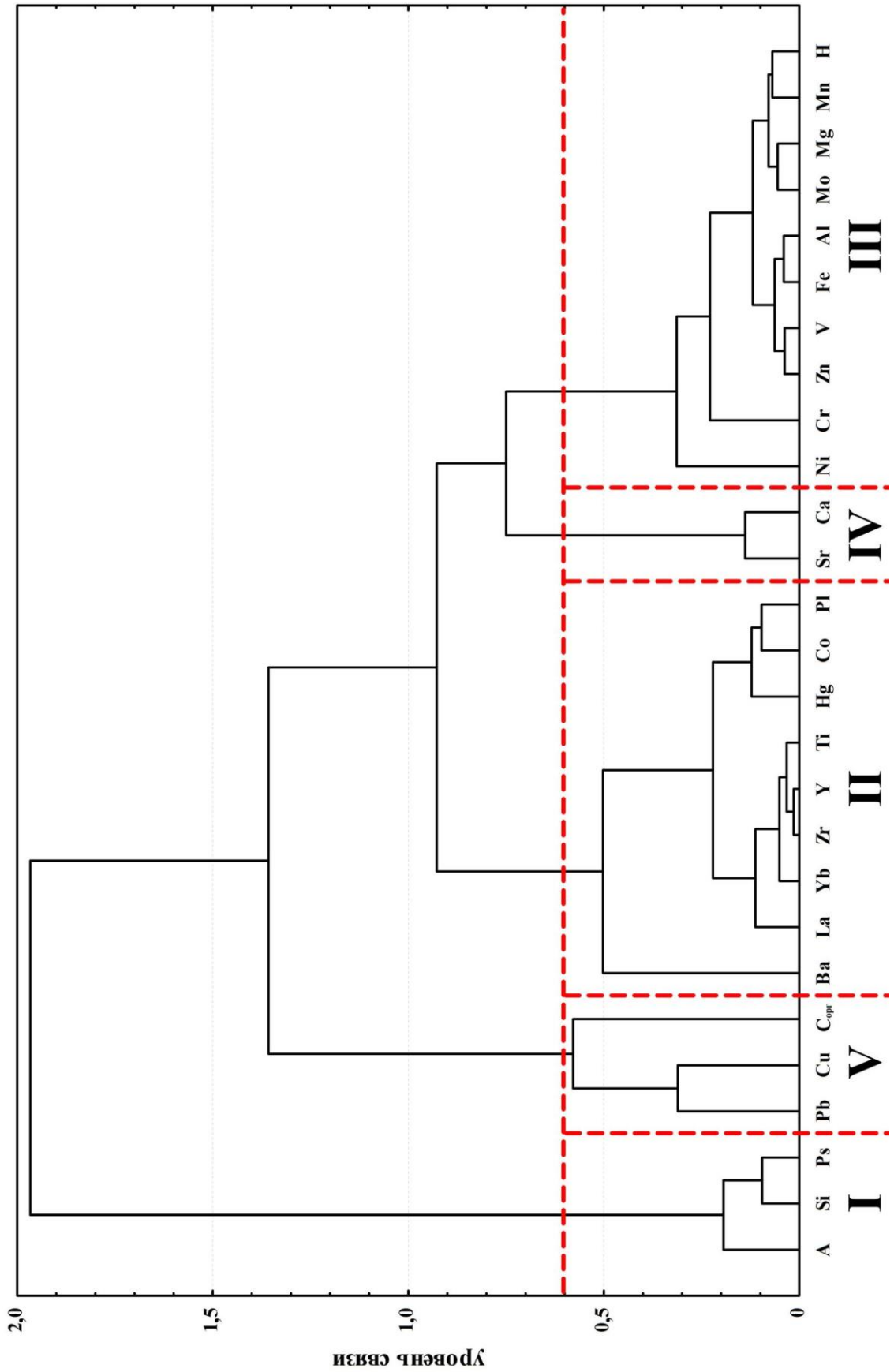
В четвертую группу входят кальций и стронций (содержание данных элементов определяется присутствием в осадке биогенных карбонатов) [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а], в пятую –  $C_{org}$ , свинец и медь.

Дополнительных разъяснений требует корреляция элементов/компонентов пятой и третьей групп, которые, как считается, осаждаются из водной среды гидроксидами железа, марганца или органическим веществом. Скорость их накопления во многом зависит от концентрации металлов в воде. Соответственно, они могут обогащать осадки в районах со специфическими гидрохимическими условиями, в частности в зоне влияния гидротермальных источников. При фоновых содержаниях в морской воде поведение обозначенных элементов может различаться. Считается, например, что ртуть и цинк осаждаются из водной толщи преимущественно планктогенным органическим веществом, в том числе накапливаются в морских осадках совместно с остатками диатомовых водорослей [Ellwood, Hunter, 2000]. Это, видимо, и определяет выявленную в осадках Чукотского моря корреляцию ртути и цинка с  $C_{org}$  (таблица 11).

Таблица 11 – Корреляционная матрица для химических элементов, биогенных компонентов, гранулометрических фракций (псаммитовой Ps, алевроитовой A, пелитовой Pl) и глубины пробоотбора (H) осадков Чукотского моря

	H	Ps	A	Pl	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	K	Na	P	SiO <sub>2ам</sub>	C <sub>орг</sub>	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	V	Y	Yb	Zn	Zr	La	Mo	Au	Ag	Pt	Os	Ir	Ru	Cd	Hg		
H	1																																							
Ps	-0,55	1																																						
A	-0,64	0,35	1																																					
Pl	0,61	-0,59	-0,66	1																																				
Si	-0,75	0,57	0,69	-0,61	1																																			
Ti	0,52	-0,50	-0,44	0,48	-0,65	1																																		
Al	0,66	-0,51	-0,60	0,53	-0,74	0,69	1																																	
Fe	0,54	-0,43	-0,53	0,48	-0,74	0,57	0,67	1																																
Mn	0,67	-0,39	-0,60	0,48	-0,76	0,49	0,70	0,76	1																															
Mg	0,68	-0,58	-0,48	0,50	-0,86	0,60	0,55	0,71	0,72	1																														
Ca	0,40	-0,38	-0,15	0,29	-0,42	0,37	0,11	0,18	0,25	0,56	1																													
K	0,33	-0,12	-0,37	0,22	-0,49	0,39	0,70	0,57	0,46	0,19	-0,09	1																												
Na	0,37	-0,41	0,05	0,16	-0,61	0,37	0,43	0,51	0,36	0,51	0,18	0,50	1																											
P	0,27	-0,09	-0,11	0,03	-0,48	0,30	0,26	0,65	0,36	0,40	0,24	0,22	0,50	1																										
SiO <sub>2ам</sub>	-0,57	0,20	0,11	0,10	0,15	0,13	-0,19	-0,01	-0,24	-0,05	-0,08	-	-	-	1																									
C <sub>орг</sub>	0,26	-0,29	0,23	-0,05	-0,35	0,13	0,27	0,32	0,16	0,32	0,00	0,19	0,65	0,44	0,72	1																								
Ba	0,21	-0,05	-0,36	0,24	-0,22	0,47	0,31	0,34	0,06	0,19	0,10	0,44	0,19	0,43	0,24	0,03	1																							
Co	0,44	-0,48	-0,67	0,60	-0,38	0,57	0,34	0,36	0,51	0,61	0,38	0,48	0,28	0,28	-0,41	-0,22	0,15	1																						
Cr	0,28	-0,36	-0,38	0,31	-0,38	0,57	0,46	0,48	0,48	0,66	0,07	0,42	0,39	0,46	0,01	0,33	0,23	0,45	1																					
Cu	0,22	0,15	-0,04	-0,06	-0,31	-0,04	0,32	0,37	0,45	0,15	-0,02	0,05	-0,36	-0,17	-0,24	0,19	-0,19	0,10	0,27	1																				
Ni	0,42	-0,23	-0,55	0,34	-0,42	0,16	0,41	0,37	0,54	0,31	0,04	0,50	0,24	0,36	-0,40	0,04	-0,22	0,49	0,37	0,37	1																			
Pb	0,19	-0,26	-0,23	0,26	-0,49	0,06	0,42	0,38	0,46	0,48	0,04	0,54	0,25	0,05	0,13	0,32	-0,14	0,21	0,43	0,48	0,23	1																		
Sr	0,18	-0,22	0,01	0,16	-0,33	0,23	0,16	0,18	0,20	0,32	0,68	0,04	0,11	0,28	0,14	0,04	0,02	0,28	0,09	0,16	0,14	0,21	1																	
V	0,63	-0,53	-0,43	0,46	-0,80	0,47	0,81	0,74	0,72	0,70	0,09	0,60	0,72	0,46	-0,14	0,47	0,16	0,30	0,55	0,26	0,44	0,54	0,07	1																
Y	0,62	-0,54	-0,64	0,61	-0,61	0,81	0,64	0,59	0,50	0,54	0,44	0,34	0,24	0,33	-0,18	-0,09	0,42	0,66	0,36	-0,09	0,22	-0,01	0,29	0,39	1															
Yb	0,56	-0,49	-0,61	0,53	-0,63	0,70	0,64	0,59	0,46	0,51	0,39	0,51	0,23	0,33	-0,25	0,02	0,40	0,61	0,50	0,19	0,29	0,15	0,48	0,41	0,75	1														
Zn	0,52	-0,51	-0,47	0,48	-0,71	0,55	0,67	0,70	0,61	0,62	0,17	0,61	0,65	0,52	0,21	0,46	0,36	0,23	0,45	0,29	0,32	0,38	0,09	0,74	0,48	0,53	1													
Zr	0,61	-0,60	-0,61	0,61	-0,65	0,78	0,70	0,59	0,53	0,53	0,30	0,28	0,29	0,25	-0,15	0,00	0,33	0,61	0,41	-0,06	0,19	0,10	0,15	0,51	0,89	0,68	0,53	1												
La	0,49	-0,32	-0,61	0,47	-0,43	0,69	0,58	0,42	0,38	0,30	0,34	0,38	-0,03	0,22	-0,28	-0,27	0,47	0,55	0,22	-0,12	0,17	-0,15	0,20	0,24	0,88	0,62	0,33	0,80	1											
Mo	0,72	-0,56	-0,57	0,54	-0,76	0,57	0,68	0,62	0,69	0,64	0,33	0,50	0,49	0,20	-	-0,38	0,42	0,76	0,62	0,13	0,45	0,45	0,30	0,81	0,49	0,64	0,77	0,54	0,25	1										
Au	0,28	-	-	-	-0,30	0,23	0,18	0,31	0,20	0,11	0,06	-	-	-	0,19	0,21	-0,11	0,07	0,15	0,16	-0,05	0,24	0,30	0,20	0,29	0,27	-0,05	0,30	0,33	-	1									
Ag	-0,04	0,07	0,31	-0,22	-0,18	0,31	0,03	0,17	-0,06	0,18	0,01	0,26	0,58	0,32	0,27	0,35	0,33	-0,19	0,12	-0,38	-0,25	-0,04	-0,10	0,16	0,13	0,16	0,31	0,12	0,05	0,02	-0,15	1								
Pt	0,19	-	-	-	-0,08	-0,03	0,00	0,15	0,13	0,00	-0,09	-	-	-	0,05	0,13	-0,22	0,12	0,00	-0,02	0,30	0,02	-0,05	0,03	0,02	0,04	0,01	-0,08	-0,08	-	-0,11	0,22	1							
Os	-0,01	-	-	-	-0,15	-0,06	0,06	0,11	0,04	0,17	0,11	-	-	-	0,14	0,20	0,19	0,04	0,27	0,13	0,19	0,14	0,19	0,24	0,14	0,12	0,24	-0,07	0,15	-	-0,28	-0,19	0,00	1						
Ir	0,04	-	-	-	-0,19	0,00	0,15	0,12	0,07	0,22	0,18	-	-	-	0,15	0,28	0,25	0,08	0,30	0,19	0,30	0,22	0,23	0,26	0,22	0,20	0,32	0,00	0,23	-	-0,31	-0,21	0,00	0,94	1					
Ru	0,40	-	-	-	-0,58	0,29	0,47	0,49	0,38	0,46	0,17	-	-	-	0,66	0,61	0,02	0,30	0,60	0,48	0,39	0,49	0,44	0,61	0,46	0,47	0,31	0,36	0,28	-	0,31	-0,03	-0,09	0,21	0,29	1				
Cd	0,48	-0,47	-0,31	0,41	-0,50	0,22	0,25	0,33	0,33	0,45	0,22	0,19	0,57	0,24	-	0,56	0,04	0,27	0,33	-0,10	0,15	0,20	0,03	0,57	0,20	0,19	0,48	0,30	-0,03	0,52	-	0,37	-	-	-	1				
Hg	0,62	-0,33	-0,60	0,49	-0,63	0,47	0,49	0,50	0,59	0,52	0,31	0,05	-0,04	0,28	-0,20	0,22	0,22	0,64	0,51	0,36	0,39	0,09	0,18	0,33	0,55	0,48	0,41	0,54	0,49	0,52	0,09	-0,13	0,23	-0,02	0,10	0,39	0,37	1		

Примечание – Значимость коэффициентов корреляции определялась по критерию Пирсона при вероятности ошибки  $p < 0,05$ . Цветом (и жирным шрифтом) отмечены коэффициенты корреляции: светло-зеленым – значимые положительные, зеленым – указывающие на наличие практически прямой связи между параметрами, желтым – значимые отрицательные, красным – указывающие на наличие практически обратной связи между параметрами. Прочерк – нет данных.



I–V – полиэлементные геохимические ассоциации; Ps, A и Pt – псаммитовая, алевролитовая и пелитовая гранулометрические фракции соответственно; H – глубина пробоотбора

Рисунок 22 – Кластерная дендрограмма, выполненная R-техникой.

Интенсивное накопление ванадия в современных и древних морских бассейнах характерно, как правило, для аноксидных условий и особенно для бассейнов с сероводородным заражением [Холодов, 2002; Холодов, Недумов, 1991]. Вместе с ванадием концентрируются элементы, обладающие близкими геохимическими свойствами: молибден, никель, хром, кобальт.

Итак, результаты статистической обработки данных подтвердили отмеченную ранее зависимость содержаний многих макро- и микроэлементов от гранулометрического состава осадков Чукотского моря [Астахов и др., 2008, 2013б; Viscosi-Shirley et al., 2003]. Вместе с тем отсутствие абсолютных коэффициентов корреляции указывает на существование не одного, а как минимум нескольких факторов, регулирующих седиментацию и закономерности дифференциации вещества (см. главу 6).

### 5.3 Химический и изотопный состав аутигенных образований

**Железомарганцевые конкреции.** Исследования показали [Колесник, Колесник, 2013, 2015], что ЖМК Чукотского моря отличает неизменное доминирование железа над марганцем ( $Fe - 12,40-18,88 \%$ ;  $Mn - 0,27-7,61 \%$ ;  $Mn/Fe - 0,02-0,42$ ), иногда при заметном количестве фосфора (таблица 12). На долю кремния приходится  $11,07-21,45 \%$ . Содержание других нерудных макроэлементов, как правило, составляет  $1-2 \%$ . Наибольшее суммарное содержание железа, марганца и фосфора отмечено в ЖМК станции 3 ( $26,39 \%$ ). Далее в порядке убывания следуют конкреции станций 1, 5 и 4 ( $25,52$ ;  $19,10$ ;  $16,99 \%$  соответственно). Суммарное содержание кремния, алюминия, титана, кальция, магния, калия и натрия уменьшается в обратной последовательности: от  $34,06 \%$  в ЖМК станции 4 до  $23,59 \%$  в ЖМК станции 3 (доля терригенной примеси в ЖМК Чукотского моря высока). То есть чем севернее находится станция отбора ЖМК, тем меньше в конкрециях этой станции доля рудных элементов и, соответственно, больше терригенной примеси. Содержание  $C_{org}$  колеблется от  $0,49$  до  $0,91 \%$ . Примечательны высокие –  $73,02-295,05$  – значения литохимического модуля  $(Mn+Fe)/Ti$ , особенно в ЖМК каньона Геральд. Об обилии в составе конкреций связанной воды свидетельствуют в целом большие – до  $14,78 \%$  – потери при прокаливании.

Содержание в ЖМК всех микроэлементов, за исключением бария и стронция, не превышает сотых долей процента: см. таблицу 12. Суммарное содержание наиболее ценных рудных компонентов – меди, никеля, кобальта, цинка и свинца – варьируется от  $0,2$  до  $0,7 \%$ . Содержания иттрия и редких земель приведены в таблице 12; составы РЗЭ, нормализованные на состав РЗЭ в Северо-Американском сланце (NASC), – на рисунке 23.



Таблица 12 – Химический состав железомарганцевых конкреций (ЖМК) и аутигенных карбонатов (АК) Чукотского моря

№ станции/ образца	Макроэлементы, %													Микроэлементы, г/т							
	Fe	Mn	Si	Al	Ti	Ca	C <sub>орг</sub>	Mg	Na	K	P	Mn/Fe	(Fe+Mn)/Ti	Ag*	As	Ba	Be	Cd*	Co	Cr	
ЖМК:																					
образец 1	18,88	6,18	18,46	2,07	0,08	2,28	0,83	0,87	1,37	1,34	0,46	0,33	295,05	1,83	–	732	1,89	2,82	170	52,28	
образец 3	18,20	7,61	11,07	2,89	0,10	4,65	0,91	1,29	1,32	2,27	0,58	0,42	257,73	3,06	–	974	2,80	1,17	212	77,12	
образец 4	12,40	4,49	21,45	6,17	0,23	0,63	0,49	1,56	1,56	2,46	0,10	0,36	73,02	1,15	–	540	3,60	1,76	109	109,55	
образец 5	15,80	0,27	21,29	2,56	0,07	2,49	0,76	0,77	1,88	1,56	3,03	0,02	229,57	0,27	5,59	1123	1,75	0,09	16,31	47,76	
АК:																					
основанная масса	1,37	0,06	10,01	2,27	0,11	29,40	0,81	1,97	0,57	0,67	0,05	0,04	12,49	0,04	11,64	196,6	0,70	0,03	4,71	22,27	
псевдоморфоза	0,05	0,01	1,37	0,05	<0,01	39,87	0,01	0,24	0,24	0,04	0,01	0,18	21,99	0,01	4,51	49,45	0,02	n/o	0,94	3,28	

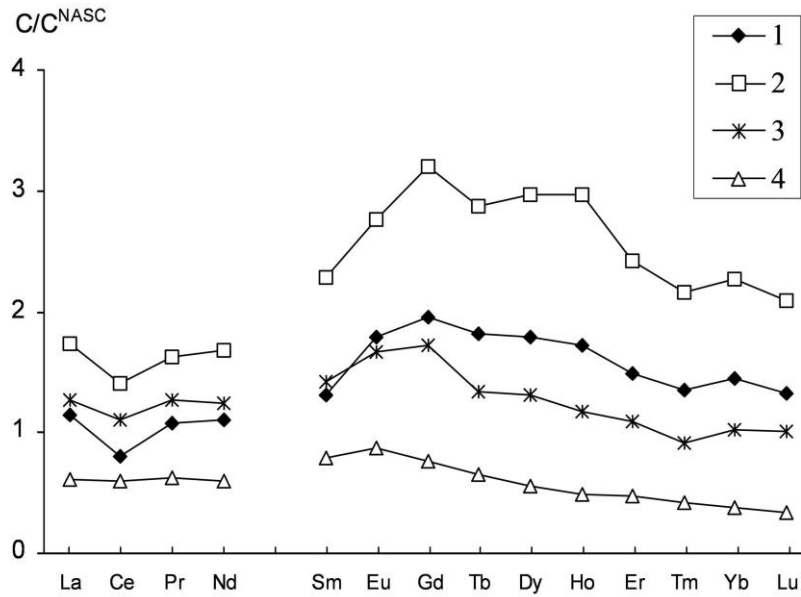
Продолжение таблицы 12

ЖМК:	Cs	Cu	Ga	Hg	Hf	Li	Mo	Ni	Pb	Rb	Sc	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Y	
	образец 1	2,96	250,1	10,45	≤0,165	1,21	33,04	91,48	67	75	57,39	4,94	–	1314	0,19	4,49	–	34,38	462,4	7,46	48,57
образец 3	5,90	130,5	14,90	≤0,159	1,45	51,89	41,39	83	142,8	96,31	9,72	–	1915	0,24	6,65	–	33,81	453,1	7,33	75,41	
образец 4	13,09	87,65	26,46	≤0,096	2,70	126,4	186,0	116	40,60	184,2	18,15	–	208	0,25	11,83	–	4,12	463,1	5,74	28,52	
образец 5	4,19	24,33	18,46	–	1,59	37,90	2,72	38,21	10,08	77,46	15,30	1,19	311,8	0,25	4,41	0,25	1,15	137,7	0,71	15,54	
АК:																					
основанная масса	2,05	188,5	5,09	0,039	0,57	25,50	4,63	10,33	4,47	29,63	5,62	16,36	1194	0,16	4,34	–	4,60	81,03	0,33	24,61	
псевдоморфоза	0,04	190,7	0,14	0,113	0,04	5,36	0,15	0,95	0,42	0,60	0,28	20,49	8870	0,02	0,13	–	1,16	7,60	0,03	2,09	

Продолжение таблицы 12

ЖМК:	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑(PЗЭ)	Ce <sub>an</sub> <sup>1</sup>	Eu <sub>an</sub> <sup>2</sup>	
	образец 1	151	51,90	37,11	59,44	8,56	36,67	7,49	2,23	10,17	1,55	9,32	1,80	5,09	0,68	4,49	0,64	185,26	0,73	1,10
образец 3	150	58,00	55,56	103,6	12,87	55,48	13,02	3,43	16,70	2,44	15,45	3,09	8,25	1,08	7,08	1,01	299,10	0,84	1,01	
образец 4	229	86,20	40,68	80,92	10,12	41,07	8,16	2,08	8,97	1,14	6,87	1,23	3,73	0,46	3,19	0,49	209,10	0,87	1,06	
образец 5	98,99	52,54	19,67	44,16	5,06	20,02	4,53	1,10	4,04	0,56	2,94	0,52	1,65	0,22	1,21	0,17	105,83	0,96	1,13	
АК:																				
основанная масса	21,38	25,70	19,11	41,59	5,18	21,67	5,04	1,23	5,30	0,76	4,60	0,90	2,39	0,32	2,04	0,27	110,39	не		
псевдоморфоза	4,93	2,90	1,84	3,18	0,43	1,76	0,32	0,08	0,36	0,04	0,31	0,06	0,18	0,02	0,16	0,02	8,75	рассчитывалось		

Примечание – Звездочка – содержание следует оценивать на уровне полуколичественного анализа. PЗЭ – редкоземельные элементы. Прочерк – нет данных, n/o – не обнаружено.  $Ce_{an}^1 = Ce/Ce^{NASC} / (0,5La/La^{NASC} + 0,5Pr/Pr^{NASC})$ ;  $Eu_{an}^2 = Eu/Eu^{NASC} / (0,5Sm/Sm^{NASC} + 0,5Gd/Gd^{NASC})$ , где NASC – Северо-Американский сланец [Gromet et al., 1984].



1 – образец 1, дискоидальная ЖМК; 2 – образец 3, лепешковидная ЖМК;  
3 – образец 4, плитчатая ЖМК; 4 – образец 5, дискоидальная ЖМК

Рисунок 23 – Составы редкоземельных элементов (РЗЭ) в железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Чукотского моря, нормализованные на состав РЗЭ в Северо-Американском сланце (NASC) [Колесник, Колесник, 2015].

Из представленных данных видно, что распределение иттрия характеризуется значительной неоднородностью: минимальное содержание элемента (15,54 г/т) отмечено в образце 5, максимальное (75,41 г/т) – в образце 3. Что касается РЗЭ, то их суммарное содержание в конкрециях невысокое и изменяется в пределах 105,83–299,10 г/т. Кроме церия, в суммарном содержании РЗЭ наиболее существенен вклад лантана и неодима. Все изученные образцы ЖМК характеризуются наличием более или менее выраженной отрицательной аномалии церия:  $Se_{an} = 0,73–0,96$ . На фоне низкого валового содержания РЗЭ это может свидетельствовать об образовании конкреций в процессе субокислительного диагенеза [Usui et al., 1997]. Европиевая аномалия отличается слабоположительными, практически нейтральными значениями:  $Eu_{an} = 1,01–1,13$ .

В результате проведенных исследований удалось существенно расширить представления о геохимии ЖМК Чукотского моря. Вариации содержаний химических элементов (иногда значительные), обнаруживаемые при сопоставлении наших и литературных данных [Батурин, Дубинчук, 2011; Калининко, Павлидис, 1982; Колесник, Колесник, 2013, 2015], связаны, вероятно, с различиями в представительности фактического материала, «географии» его отбора и/или использованных методов/методиках анализа. В целом химический состав изученных ЖМК, их внешние характеристики и минералогия (см. главу 4, п. 4.2) указывают на формирование за счет протекающих в осадках диагенетических реакций.

**Аутигенные карбонаты.** Химический состав изученного образца соответствует его минеральному составу (глава 4, п. 4.2). Доминируют кальций, кремний и  $C_{\text{общ}}$  (8,55 %, из них 0,81 % –  $C_{\text{орг}}$ ): см. таблицу 12. Содержание магния, алюминия и железа не превышает первых процентов, остальных макроэлементов (K, Na, Ti, Mn, P) – десятых и сотых долей процента. Содержание всех микроэлементов, за исключением стронция, низкое. Как правило, это десятки и единицы г/т.

В псевдоморфозах, судя по химическому составу одной из них, содержание кальция,  $C_{\text{общ}}$  (11,37 %) и стронция выше, чем в основной массе, остальных элементов, напротив, ниже (таблица 12). Исключение составляют только медь и олово. Их содержания в основной массе и в псевдоморфозе сопоставимы.

Для изученного образца карбоната характерен чрезвычайно легкий – до минус 63,6 ‰, V-PDB – изотопный состав углерода  $\delta^{13}\text{C}$ . При этом основная масса заметно «легче» псевдоморфоз, для которых получено значение минус 55,6 ‰. Не вызывает сомнений, что карбонат является продуктом окисления метана. Высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  (2,7–3,9 ‰, V-PDB) свидетельствуют о низких температурах карбонатообразования: по разным оценкам, до 5–6 °С. Использование в расчетах уравнений Эпштейна и Крейга [Craig, 1965; Epstein et al., 1953], «ориентированных» на кальцит, следует считать условным. Из-за отсутствия данных по изотопному составу кислорода воды непосредственно в зоне формирования карбоната сказать что-либо более определенное о температуре карбонатообразования не представляется возможным.

## **5.4 Накопление химических элементов в осадках и железомарганцевых конкрециях**

**Донные осадки.** Для получения дополнительных сведений о характере осадконакопления в Чукотском море проведено сопоставление содержаний химических элементов в изученных осадках с кларками для осадочных пород [Виноградов, 1962] и земной коры [Wedepohl, 1995]. Полученные коэффициенты концентрации (КК) приведены в таблице 13. Из таблицы видно, что по сравнению со средним составом земной коры осадки шельфа Чукотского моря обогащены серебром, кадмием, фосфором, медью, цинком, молибденом, золотом, ванадием, барием, кремнием (элементы перечислены в порядке уменьшения их КК). При сопоставлении со средним содержанием в глинах и сланцах особенно заметным становится

обогащение осадков золотом. Все это типично для морских бассейнов с дефицитом кислорода [Юдович, Кетрис, 2011].

Таблица 13 – Среднее содержание химических элементов (ХЭ) и биогенных компонентов в осадках Чукотского моря (до 200-метровой изобаты), статистические параметры ХЭ и биогенных компонентов и их коэффициенты концентрации (КК) в сопоставлении с кларковыми содержаниями [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а]

Элемент/ компонент	Содержание в осадках Чукотского моря				Среднее содержание для осадочных пород [Виноградов, 1962]	КК	Среднее содержание для земной коры [Wedepohl, 1995]	КК
	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$\bar{x}$	s				
Макроэлементы, %								
Si	46,3	25,39	30,41	1,05	23,8	<b>1,28</b>	28,8	<b>1,06</b>
Ti	0,487	0,122	0,343	1,026	0,45	0,76	0,401	0,86
Al	8,98	1,46	5,88	3,24	10,45	0,56	7,96	0,74
Fe	9,42	0,63	3,49	1,96	3,33	<b>1,05</b>	4,32	0,81
Mn	0,8383	0,0069	0,0276	0,1162	0,067	0,41	0,0716	0,39
Mg	2,8	0,15	1,26	1,36	1,34	0,94	2,2	0,57
Ca	10,1	0,32	1,08	1,49	2,53	0,43	3,85	0,28
K	2,66	0,46	1,7	0,34	2,28	0,75	2,14	0,79
Na	5,13	0,68	2,35	1,54	0,66	<b>3,56</b>	2,36	1,00
P	0,348	0,034	0,105	2,039	0,077	<b>1,36</b>	0,0757	<b>1,39</b>
Биогенные компоненты, %								
SiO <sub>2</sub> аморф	13,5	0,2	5,7	2,8	–	–	–	–
C <sub>орг</sub>	2,57	0,06	1,29	0,67	–	–	–	–
Микроэлементы: Ва–Ag – г/т, Au–Hg – мг/т								
Ba	1055,2	106,2	657,6	124,8	800	0,82	584	<b>1,13</b>
Co	150,5	0,97	12,77	1,44	20	0,64	24	0,53
Cr	141	9,8	72,9	21,3	100	0,73	126	0,58
Cu	290,54	1,45	32,78	2,56	57	0,58	25	<b>1,31</b>
Ni	86,4	0,15	24,23	2,09	95	0,26	56	0,43
Pb	102,4	1,88	11,58	1,56	20	0,58	14,8	0,78
Sr	475,38	73,15	174,86	1,4	450	0,39	333	0,53
V	276,8	20,36	113,67	38,63	130	0,87	98	<b>1,16</b>
Y	30,98	7,11	15,87	1,23	30	0,53	24	0,66
Yb	13	0,7	1,94	1,25	3	0,65	2	0,97
Zn	5251*	15,37	82,86	1,66	80	<b>1,04</b>	65	<b>1,27</b>
Zr	134,33	29,41	70,07	1,28	200	0,35	203	0,35
La	37,4	10,23	22,09	1,22	40	0,55	30	0,74

## Продолжение таблицы 13

Элемент/ компонент	Содержание в осадках Чукотского моря				Среднее содержание для осадочных пород [Виноградов, 1962]	КК	Среднее содержание для земной коры [Wedepohl, 1995]	КК
	$x_{max}$	$x_{min}$	$\bar{x}$	$s$				
Mo	10,08	0,26	1,31	1,96	2	0,66	1,1	<b>1,19</b>
Cd	0,83	0,08	0,19	2,35	0,13	<b>1,46</b>	0,1	<b>1,90</b>
Ag	1,02	0,05	0,15	2,58	0,1	<b>1,50</b>	0,07	<b>2,14</b>
Au	13,9	0,6	2,9	2,3	1	<b>2,90</b>	2,5	<b>1,16</b>
Pt	106	12	19	9	–	–	–	–
Os	2,11	0,07	0,34	4,02	–	–	–	–
Ir	1,91	0,04	0,33	3,29	–	–	–	–
Ru	27,7	1,3	5,6	3	–	–	–	–
Hg	73	6	28	3	400	0,07	40	0,70

*Примечание* –  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  – варианты с максимальным и минимальным значением,  $\bar{x}$  – среднее арифметическое,  $s$  – стандартное отклонение. *Жирным шрифтом* выделены значения КК > 1, указывающие на накопление элемента в осадках Чукотского моря по отношению к кларку. *Прочерк* – нет данных. *Звездочка* – экстремальное значение.

**Железомарганцевые конкреции.** Степень подвижности – накопления, рассеяния – химических элементов и  $S_{орг}$  в процессе конкрециеобразования (диагенеза) оценивалась по их содержанию в ЖМК относительно подстилающего осадка (КК). Расчеты и выводы сделаны только для ЖМК каньона Геральд (ст. 1, 3, 5), так как для конкреций из северо-восточной части Чукотского моря (ст. 4) осадок получить не удалось. Согласно проведенным расчетам, наиболее ярко выраженной способностью к концентрированию большинства элементов отличаются конкреции станции 1, наименьшей – станции 5. Интенсивнее всего в ЖМК, если смотреть в целом, накапливается марганец: КК – до 266,2 (таблица 14). Далее в порядке убывания следуют молибден, серебро, кадмий, кобальт: их КК практически во всех случаях, если не считать образца 5, больше 10. Для стронция, железа, свинца, ртути, фосфора КК может достигать 5–10. Относительно слабо выраженная способность к концентрированию у ванадия, никеля, иттрия, иттербия, кальция, цинка, а также лантана: КК в основном от 2 до 4. Значения КК меди и бария еще ниже – 1,2–1,9 и 1,3–1,8 соответственно. Содержание хрома, магния, калия, циркония в ЖМК остается практически на том же уровне, что и в осадке (КК в обр. 1, 3 – около 1; в обр. 5 – всегда меньше). Элементами/компонентами, испытывающими заметное разбавление в процессе конкрециеобразования, являются натрий,  $S_{орг}$ , кремний, алюминий: КК меньше 1. Наименьшими значениями КК характеризуется титан.

Таблица 14 – Поведение химических элементов и общего органического углерода ( $C_{орг}$ ) в процессе образования железомарганцевых конкреций (ЖМК) каньона Геральд, Чукотское море

Элемент/ компонент	Коэффициент концентрации относительно осадка		
	Образец 1, дискоидальная ЖМК	Образец 3, лепешковидная ЖМК	Образец 5, дискоидальная ЖМК
Si	0,5	0,4	0,7
Ti	0,3	0,3	0,2
Al	0,4	0,5	0,4
Fe	7,3	4,3	4,0
Mn	266,2	230,7	6,8
Mg	0,9	0,9	0,6
Ca	2,8	4,3	2,4
K	1,0	1,4	0,8
Na	0,8	0,6	0,7
P	5,4	3,7	22,3
$C_{орг}$	0,8	0,4	0,4
Ba	1,3	1,7	1,8
Co	17,3	17,3	1,4
Cr	0,9	0,9	0,7
Cu	1,9	1,2	1,2
Ni	3,5	2,8	1,3
Pb	6,3	10,3	0,6
Sr	8,3	10,5	1,9
V	4,5	3,5	0,8
Y	3,4	4,9	1,0
Yb	2,8	3,8	0,7
Zn	2,2	1,5	0,9
Zr	0,9	0,9	0,7
La	1,9	3,0	1,0
Mo	90,6	30,2	0,9
Ag	24,9	34,7	1,2
Cd	23,5	6,5	0,2
Hg	5,9	3,5	2,1

Приведенные данные в целом хорошо согласуются с ранее опубликованными [Батурин, Дубинчук, 2011; Калиненко, Павлидис, 1982] и дополняют их. Ряды подвижности элементов во многом сходны с таковыми, полученными для ЖМК ближайших морей – Восточно-Сибирского и Бофорта [Батурин, Дубинчук, 2011; Naidu, 1974].

## 5.5 Аномальные содержания металлов в осадках

Большой интерес при изучении геохимических особенностей осадконакопления в Чукотском море вызвали аномальные содержания в осадках некоторых элементов ассоциации III Al-Mg-Fe-Mn-Zn-V-Mo-Cr-Ni (см. п. 5.2). (За аномальные приняты значения, превышающие величину, равную сумме двойного стандартного отклонения и среднего арифметического.)

Обычно накопление железа, марганца, ванадия, цинка, молибдена и некоторых других металлов в тонкозернистых осадках связывается с осаждением из морских или иловых вод, в аномальных и резко повышенных количествах – с существованием локальных участков со специфическими гидрохимическими условиями, в том числе определяемыми эндогенной активностью. На рисунке 24 показано положение станций с аномальными содержаниями металлов – в основном полиэлементной ассоциации III, а также некоторых других. Из последних в аномальных количествах, судя по результатам исследований [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, *Колесник*, 2010а], содержатся серебро, рутений и платина.

Чукотский грабен. Из рисунка 24 следует, что пробы с аномальными концентрациями металлов локализуются главным образом в зоне Чукотского грабена (параллелограмм) и некоторых других структур грабен-рифтовой системы (красный контур). Аномальные концентрации металлов характерны здесь для тонкозернистых осадков с высоким содержанием  $C_{орг}$  и  $SiO_{2аморф}$  (рисунок 17, с. 68). По характеру и локализации аномалий можно предполагать, что большинство из них сформировалось за счет интенсивного осаждения металлов из придонных или иловых вод в особой гидрохимической обстановке, созданной при участии эндогенных источников различного типа. Гидротермальные источники в состоянии увеличивать концентрацию и стимулировать накопление железа, цинка, никеля и, вероятно, золота. Источники различного типа, в том числе наиболее распространенные холодные газовые, могут создать субоксидные и аноксидные условия в придонных или иловых водах и стимулировать интенсивное накопление  $C_{орг}$ , молибдена, ванадия, серебра, кадмия и рутения. Именно эти элементы/компоненты в наибольшей степени аккумулируются в донных осадках Чукотского грабена (рисунок 24). Пространственное совпадение структур грабен-рифтовой системы и районов распространения осадков с высоким содержанием  $C_{орг}$  и аномалий различных металлов свидетельствует о значительной роли современных геодинамических процессов в накоплении микроэлементов ассоциации III, серебра и рутения в донных осадках Чукотского моря.

Аномалии хрома связаны, вероятно, с поставкой в бассейн осадконакопления продуктов разрушения основных (по составу) пород суши и с местным размывом дна в пределах склонов/бортов положительных и отрицательных морфоструктур.

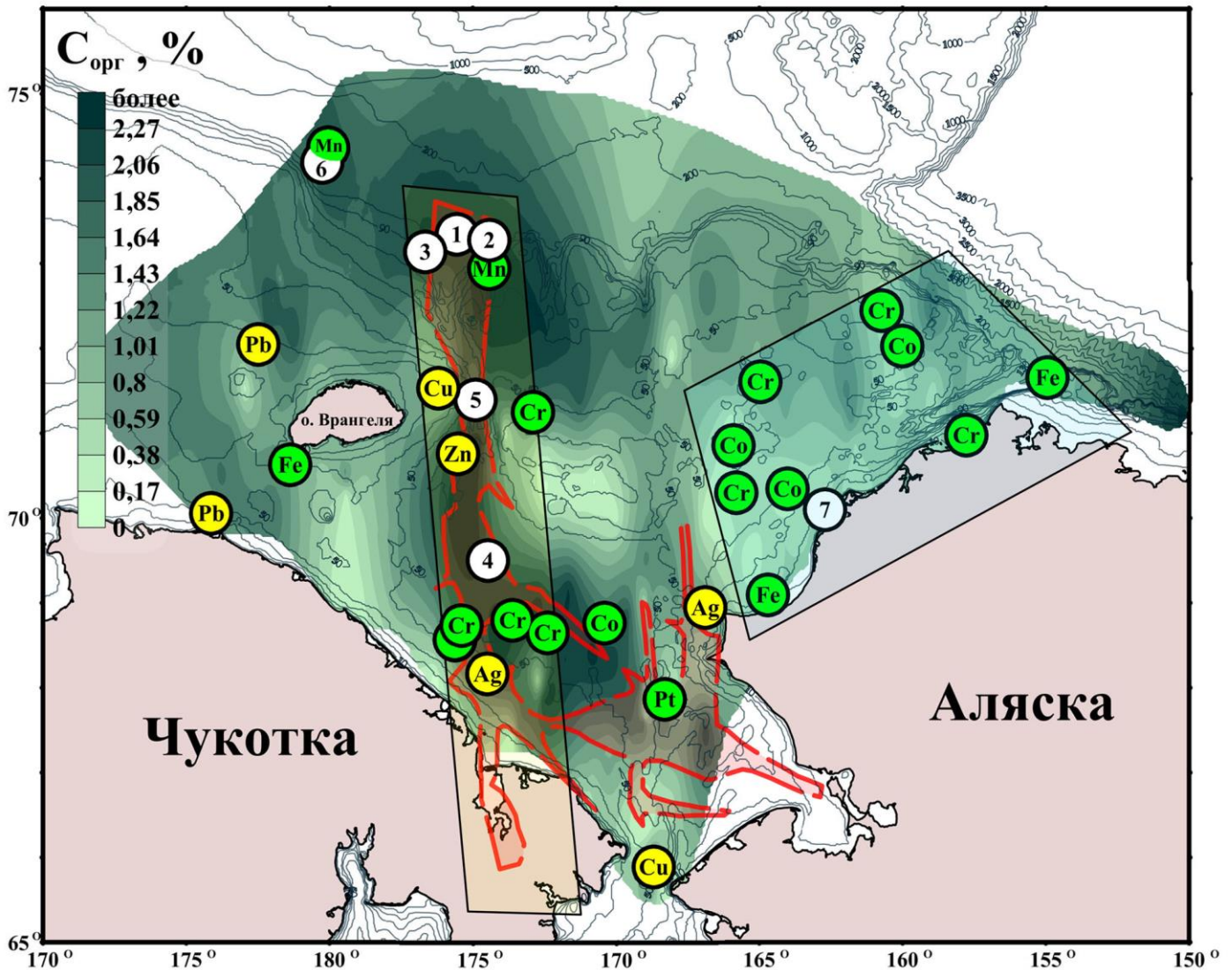


Рисунок 24 – Общий органический углерод и аномальные содержания металлов (кружки) в осадках Чукотского моря, по [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а], с изменениями.

*Примечание* – Зеленым выделены аномалии металлов-сидерофилов, желтым – халькофилов, белым – мультианомалии: 1 – Mn, V, Cd, Hg; 2 – V, Mo, Cd; 3 – V, Mo, Cd, Hg; 4 – Ag, Ru; 5 – Fe, Mn; 6 – V, Mo, Mn; 7 – Co, Cr. Красной линией околнурены основные структуры мезозойско-кайнозойской грабен-рифтовой системы [Шипилов и др., 1989]. В параллелограмме – Чукотский грабен, в трапеции – «зона Барроу».

В «зоне Барроу» (рисунок 24, трапеция), протягивающейся от одноименного каньона вдоль побережья Аляски, а также к западу от острова Врангеля отмечаются аномальные содержания железа и некоторых микроэлементов (Co, Cr, Pb). Эти аномалии приурочены преимущественно к песчаным осадкам и образуются, вероятно, за счет



поступления обломочного материала с высоким содержанием металлов при размыве горных пород на побережье или морском дне.

К северо-западу от Чукотского грабена имеются еще две аномалии (рисунок 24). Особенности вмещающих осадков (тонкозернистые, обогащенные  $C_{орг}$ ) и набор элементов с аномальным (Mn, Mo, V) и повышенным (Zn, Ni) содержанием свидетельствуют о возможном влиянии на геохимию осадконакопления эндогенных источников. На это же указывает и повышенная в три-четыре раза относительно фона концентрация метана на станции с аномальным содержанием молибдена в придонной воде [Шакиров и др., 2010]. Согласно некоторым тектоническим моделям [Богданов и др., 1995; Шипилов и др., 1989], в данном районе предполагается наличие рифтогенной структуры субширотного простирания, пересекающей Чукотский грабен либо являющейся его продолжением. Район относят к высокоперспективному Северо-Чукотскому нефтегазоносному бассейну [Виноградов и др., 2004; Грецкая, Савицкий, 2010; Добрецов и др., 2013; Каминский и др., 2011; Конторович и др., 2010; Хаин, Полякова, 2007], поэтому нельзя исключать здесь дефлюидизацию углеводородных залежей. В прошлом разгрузка на дно метаносодержащих флюидов произошла, видимо, на бровке шельфа в северо-восточной части Чукотского моря, где был обнаружен фрагмент аутигенного метанопродуктивного карбоната [Астахов, Босин, Колесник и др., 2010б; Колесник, Колесник, Покровский, 2014]. В более глубоководной открытой части Северного Ледовитого океана – на Чукотском плато (это примерно в 300 км к северо-востоку от станции отбора карбоната) – зафиксировано поле покмарков, формирование которых связывается с действием пульсирующих флюидных потоков; последний этап активной дефлюидизации имел место 35–20 тыс. лет назад [Астахов, Босин, Колесник и др., 2010б; Астахов, Маркевич, Колесник и др., 2014; Логвина и др., 2011; Mayer et al., 2008].

## 5.6 Выводы

*1. Изучено распределение 34 химических элементов и биогенных компонентов в осадках Чукотского моря. В результате впервые построены карты содержаний титана, калия, натрия, стронция, иттрия, иттербия, циркония, лантана, молибдена, серебра, золота, платины, осмия, иридия, рутения и кадмия. Дополнены и детализированы существующие карты распределения кремния, алюминия, железа, марганца, магния, кальция, фосфора,  $SiO_{2аморф}$ ,  $C_{орг}$ , бария, кобальта, хрома, меди, никеля, свинца, ванадия, цинка и ртути. Подтверждена установленная ранее закономерность уменьшения содержаний кремния в*

сторону открытой части Чукотского моря при общем нарастании количества алюминия, магния, железа и особенно марганца, а также микроэлементов. В центральной части бассейна на эту закономерность накладывается другая, связанная с рельефом дна и заключающаяся в повышении содержаний кремния и уменьшении доли других элементов в осадках подводных возвышенностей с обратной картиной распределения в осадках впадин.

2. На большом массиве геохимических данных показано, что распределение химических элементов и биогенных компонентов в осадках Чукотского моря подчинено (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, P, SiO<sub>2</sub><sub>аморф</sub>, C<sub>орг</sub>, Cr, Pb, Sr, V, Y, Yb, Zr, La, Mo, Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru, Cd, Hg) или весьма близко (Mn, Ba, Co, Cu, Ni, Zn) к закону нормального распределения. Последнее позволяет применять методы математической статистики для моделирования поведения химических элементов и биогенных компонентов в районах со схожими условиями осадконакопления.

3. Выделенные для осадков Чукотского моря полиэлементные ассоциации: Si (I), Ti-Ba-Y-Yb-Zr-La-Co-Hg (II), Al-Mg-Fe-Mn-Zn-V-Mo-Cr-Ni (III), Ca-Sr (IV), C<sub>орг</sub>-Pb-Cu (V) – во многом объясняются зависимостью химического состава от гранулометрии и частично минералогии. При этом показано, что коррелирующие между собой элементы/компоненты ассоциаций V и III могут обогащать осадки районов со специфическими гидрохимическими условиями, в частности в зоне влияния гидротермальных источников.

4. Химический состав аутигенных образований Чукотского моря (диагенетические ЖМК, метанопроизводный карбонат) в целом соответствует их минеральному составу (см. главу 4, п. 4.2).

В химическом составе рудной (аутигенной) части ЖМК преобладает железо; роль марганца и фосфора второстепенна. Общее содержание элементов не превышает 16,99 %; Mn/Fe – 0,02–0,42; (Mn+Fe)/Ti – до 295,05. Суммарное содержание меди, никеля, кобальта, цинка и свинца (наиболее ценные микрокомпоненты) низкое – не более 0,7 %. То же можно сказать о редких землях:  $\sum(PЗЭ)$  – 105,83–299,10 г/т. Ce<sub>ан</sub> – 0,73–0,96; Eu<sub>ан</sub> – 1,01–1,13.

В карбонатном образовании – в основной Mg-кальцитовой массе и арагонитовых псевдоморфозах по раковинам двустворок – доминируют кальций (до 39,87 %), кремний (до 10,01 %) и C<sub>общ</sub> (до 11,37 %). Содержание магния, алюминия и железа – до первых процентов, остальных макроэлементов – еще ниже. Содержание микроэлементов, кроме стронция, невысокое, обычно десятки и единицы г/т. Для изученного образца характерен чрезвычайно легкий (до минус 63,6 ‰, V-PDB) изотопный состав углерода  $\delta^{13}C$  при высоких значениях  $\delta^{18}O$  (2,7–3,9 ‰, V-PDB).

5. Поэлементное сопоставление шельфовых (до 200-метровой изобаты) осадков Чукотского моря с кларками для земной коры и осадочных пород выявило относительное

*обогащение первых серебром, кадмием, фосфором, медью, цинком, молибденом, золотом, ванадием, барием и кремнием (элементы перечислены в порядке уменьшения их коэффициентов концентрации), что типично для морских бассейнов с недостатком кислорода в придонных водах.*

*При сравнении химического состава ЖМК каньона Геральд и подстилающих осадков выделены элементы/компоненты: 1) существенно накапливающиеся в конкрециях (Mn, Mo, Ag, Cd, Co, Sr, Fe, Pb, Hg, P); 2) накапливающиеся слабо и очень слабо (V, Ni, Y, Yb, Ca, Zn, La, Cu, Ba); 3) не накапливающиеся (Cr, Mg, K, Zr); 4) рассеивающиеся (Ti, Al, Si, C<sub>орг</sub>, Na).*

*б. С помощью методов математической статистики выделены районы Чукотского моря, в первую очередь район Чукотского грабена, с аномальными и повышенными содержаниями металлов в осадках. (Большинство этих металлов входит в полиэлементную ассоциацию III – см. вывод 3). По характеру и локализации аномалий предположено, что некоторые из них сформировались за счет интенсивного осаждения металлов из придонных или иловых вод в особой гидрохимической обстановке, созданной при участии эндогенных источников различного типа.*

## **Глава 6 Обстановки седиментации и факторы, определяющие накопление химических элементов в современных осадках Чукотского моря**

### **6.1 Обстановки седиментации (по данным химического и гранулометрического состава осадков)**

Для систематизации данных по химическому и гранулометрическому составу осадков Чукотского моря выполнена их статистическая обработка (кластерный анализ Q-техникой). В результате выделено 15 кластеров (рисунки 25, 26; таблица 15). Разделение на кластеры определяется преимущественно гранулометрическим и частично минеральным составом донных отложений.

Песчаные и алевритовые обломочные осадки без заметной примеси глинистого материала составляют кластеры 13–15. Они отличаются максимальным содержанием кремния (за счет обломочного кварца) и в целом минимальными концентрациями всех остальных макро- и микроэлементов. Кластер 14 наиболее грубозернистый. Особенностью кластера 13 является максимальное для осадков Чукотского моря содержание кальция, магния и свинца при повышенных концентрациях стронция и меди, кластера 15 – повышенное содержание меди (таблица 15).

Типичные глинистые осадки, распространенные в примыкающей к Чукотскому морю открытой части Северного Ледовитого океана (материковый склон, Чукотское поднятие, Канадская котловина), относятся к кластерам 1–5. Осадки отличаются наименьшими содержаниями кремния и наибольшими – алюминия, магния, железа, марганца, кальция и титана при повышенных концентрациях почти всех микроэлементов. Эти особенности химического состава определяются преобладанием в осадках глинистых минералов (гидрослюды, смектиты, хлориты, каолинит), обогащенных алюминием, железом, магнием, калием, а также присутствием тонкодисперсных гидроксидов железа и марганца, характерных для пелагических отложений. Большие по сравнению с шельфовыми осадками содержания кобальта, меди, ванадия, цинка, никеля, ртути и других микроэлементов объясняются высокой сорбционной способностью/активностью глинистых минералов, гидроксидов железа и марганца. Разделение на этом фоне кластеров 1, 3 и 2, 4, 5 связано с более существенным содержанием магния и особенно кальция в осадках кластеров 1 и 3.

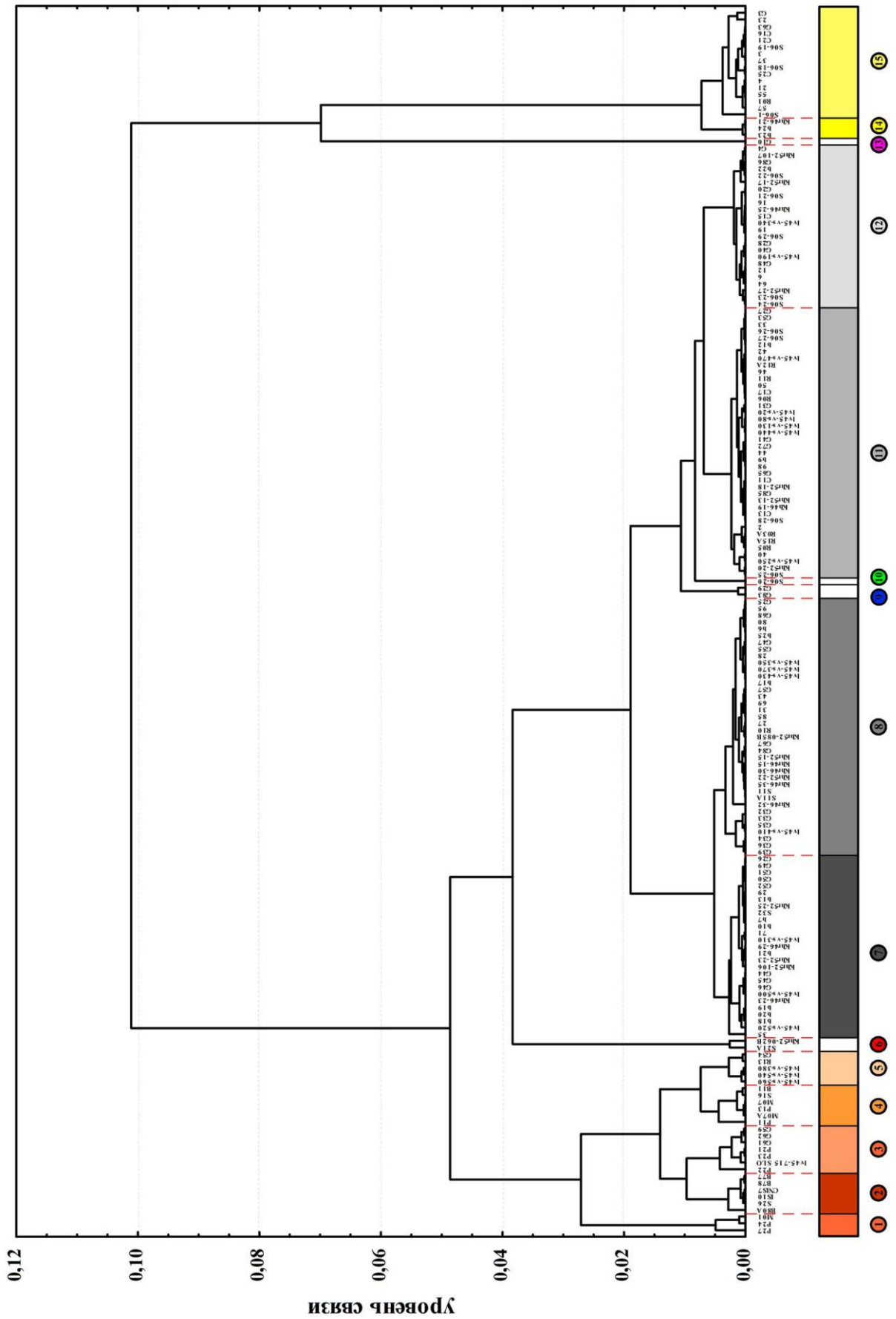


Рисунок 25 – Кластерная дендрограмма, выполненная Q-техникой:  
 1–15 – кластеры для осадков Чукотского моря (описание кластеров – см. текст).

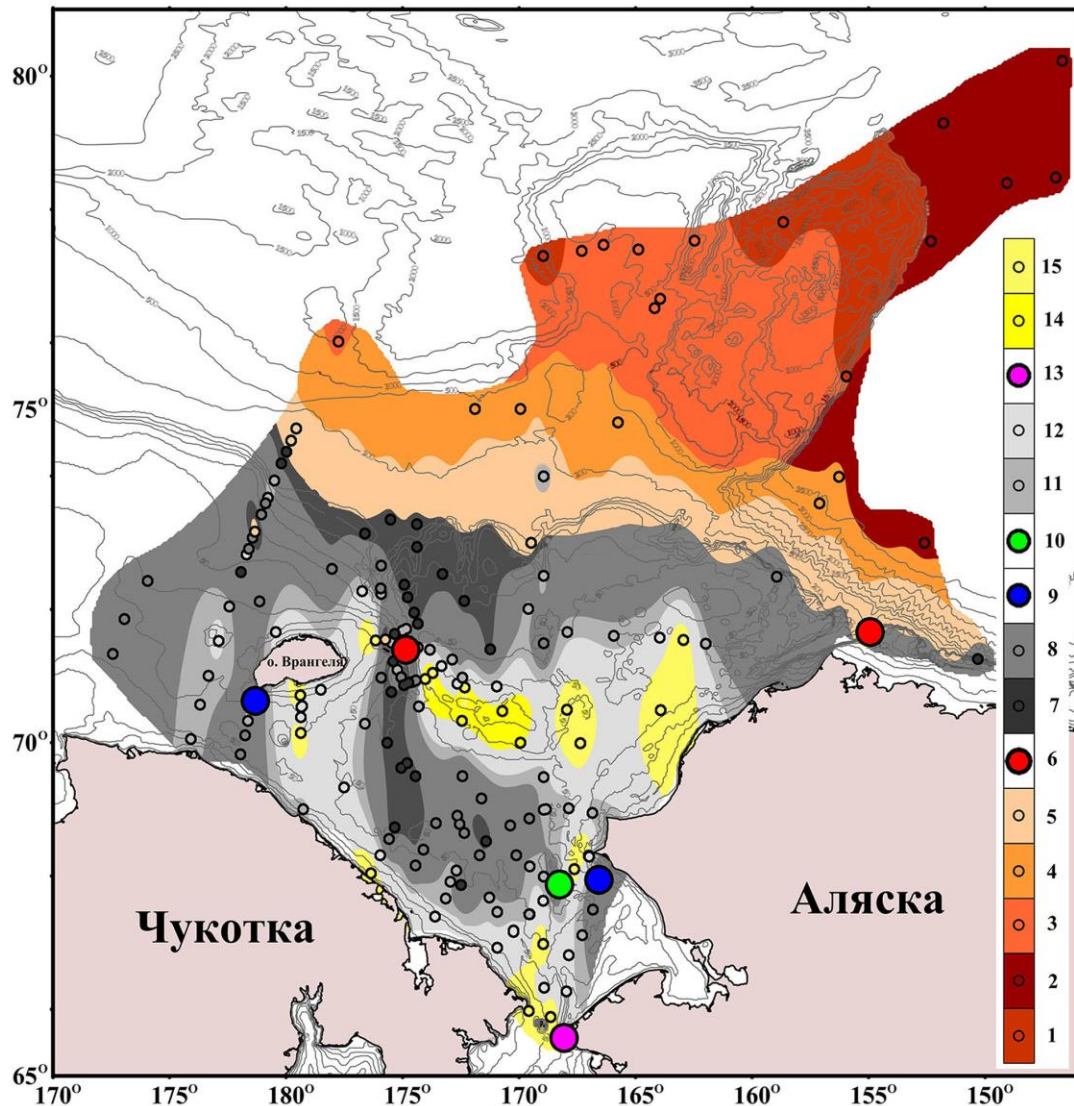


Рисунок 26 – Расположение кластеров (Q-техника) в Чукотском море (описание кластеров – см. текст).

Они покрывают поверхность Чукотского плато и хребта Нортвинд, где из-за ограниченного поступления терригенного материала в осадках увеличена доля биогенных карбонатов. Особо следует отметить две станции, входящие в «глубоководный» кластер 5 и при этом локализованные на внутреннем шельфе. Химический состав осадков, отобранных на этих станциях, нехарактерен для внутреннего шельфа и может рассматриваться как атипичный для него (получается, что осадки, отобранные на глубине до 55 м, содержат элементы в количествах, свойственных гораздо более глубоководным районам – 100–200 м). В географической зоне, выделенной в кластер 5, отобраны плитчатые диагенетические ЖМК и образец метанопродуктивного карбоната (см. рисунок 1, с. 24) [Астахов, Босин, Колесник и др., 2010б; Колесник, Колесник, 2013, 2015; Колесник, Колесник, Покровский, 2014].

Специфические глинистые осадки с максимальным (более 9 %) содержанием железа отнесены к кластеру 6.

Таблица 15 – Усредненные показатели содержания химических элементов, биогенных компонентов, гранулометрических фракций (псаммитовой Ps, алевритовой A, пелитовой Pl) и глубины (H) в точке пробоотбора для кластеров, выделенных в Чукотском море в результате кластерного анализа Q-техники

Параметр	Кластеры														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N	3	6	7	6	5	2	27	38	2	1	40	24	1	3	16
H	2132	3675	852	1282	104	73	79	56	51	57	55	51	38	36	42
Ps	0	0	0	025	13,69	0	2,91	1,06	11,93	–	6,86	7,16	–	–	26,03
A	12,69	2,22	10,2	10,96	31,88	32,32	31,67	40,83	33,3	–	44,64	47,86	–	–	53,71
Pl	87,31	97,78	89,8	88,79	53,49	67,68	64,23	56,58	54,78	–	46,04	40,03	–	–	14,63
Si	23,28	24,4	24,01	24,98	29,01	27,7	27,26	28,99	32,13	28,09	30,29	31,51	26,69	41,84	36,64
Ti	0,374	0,469	0,406	0,432	0,375	0,318	0,355	0,372	0,248	0,396	0,366	0,351	0,207	0,134	0,237
Al	6,82	9,19	8,25	7,69	8,66	5,24	6,6	6,61	4,95	5,5	6,06	5,83	3,43	2,03	4,11
Fe	4,56	5,41	5,06	5,79	5,17	9,21	4,43	4,03	6,06	3,21	3,58	3,23	1,71	0,9	2,08
Mn	0,5202	0,2549	0,7039	1,1123	0,1128	0,2432	0,0799	0,0322	0,0321	0,0243	0,0319	0,0291	0,0312	0,0123	0,0206
Mg	2,23	1,82	1,93	1,7	1,46	1,56	1,62	1,47	1,07	1,25	1,32	1,19	2,8	0,27	0,7
Ca	4,83	1,05	3,08	1,01	0,66	1,53	1,13	1,26	0,98	3,81	1,27	1,23	10,1	0,46	1,1
K	–	–	2,13	–	2,38	–	1,82	1,75	1,5	–	1,7	1,62	0,98	0,53	1,37
Na	–	–	1,97	–	2,61	–	2,93	2,53	1,36	–	2,31	2,18	1,05	0,82	1,49
P	–	–	0,104	–	0,092	–	0,146	0,126	0,246	–	0,107	0,1	0,06	0,052	0,072
SiO <sub>2</sub> аморф	1	1,1	1,2	2,9	6,1	4,9	10,2	8,7	–	6,2	5,8	5,4	–	1,5	2,3
C <sub>орг</sub>	0,39	0,87	0,56	0,8	1,4	1,01	2,22	1,86	0,87	0,69	1,39	1,17	0,23	0,2	0,81
Ba	581,1	829,7	674,9	780,3	639	704	683,3	690,4	773,5	500,5	667	656,8	288,2	529,4	605,7
Co	77,4	39,84	73,65	64,75	19,77	21,24	14,33	15,89	11,33	15,13	13,03	12,23	7,6	3,31	8,56
Cr	70,4	102,4	85,7	88,7	85,7	68,3	85,8	83,1	62,6	54,9	74,1	67,1	39,6	23,8	42,7
Cu	48,8	45,99	76,89	47,47	54,8	20,5	48,53	57,41	111,34	18,55	54,63	57,95	172,19	2,33	91,33
Ni	79,13	68,64	82,1	85,94	42,79	26,12	33,08	33,77	24,02	35,15	30,14	27,88	15,7	8,71	27,84
Pb	11,85	10,98	17,81	10,98	18,59	15,43	14,82	12,98	13,74	8,55	12,18	11,27	102,4	4,01	8,12
Sr	221,84	156,19	237,39	195,61	163,51	230,41	174,94	189,09	196,38	313,38	186,97	185,6	354,9	90,53	177,14
V	131,69	175,79	171,25	160,4	158,63	118,14	151,96	131,88	108,98	99,05	115,66	104,53	54,4	30,5	62,56
Y	25,84	30,14	24,55	26,23	18,56	25,23	16,75	17,34	14,64	18,25	17,82	17,09	11,55	8,66	13,34
Yb	2,81	3,47	2,89	3,03	2,34	3,03	2,11	2,14	1,73	2,05	2,14	2,03	1,45	0,81	2,22
Zn	106,26	134,43	128,41	147,77	126,73	104,69	<b>308</b>	103,83	77,19	78,1	94,87	84,1	41,9	21,69	50,49
Zr	104,77	123,48	102,8	103,59	78,3	108,21	77,15	75,93	62,92	81,95	75,9	73,24	33,82	37,13	52,56
La	32,88	43,26	33,49	33,78	23,59	29,01	21,16	23,22	20,64	25,33	23,41	23,39	15,67	14,18	19,71
Mo	–	–	11,36	–	1,46	–	3,09	1,82	0,74	–	1,66	1,41	0,65	0,32	0,69
Au	–	–	–	–	–	6,6	6,9	3	–	–	2,7	3	–	1,8	–
Ag	–	–	0,06	–	0,1425	0,13	0,2019	0,2037	0,075	–	0,1567	0,1509	0,12	0,1067	0,1044
Pt	–	–	–	–	–	53	47	43	–	–	28	30	–	48	–
Os	–	–	–	–	–	0,5	0,78	0,5	–	–	0,69	0,67	–	0,23	–
Ir	–	–	–	–	–	0,42	0,82	0,36	–	–	0,69	0,66	–	0,13	–
Ru	–	–	–	–	–	9,3	12,7	4,7	–	–	5,5	4,9	–	1,3	–
Cd	–	–	0,15	–	0,11	–	0,32	0,25	0,14	–	0,19	0,18	0,18	0,1	0,13
Hg	57	54	69	76	28	36	41	37	33	29	33	30	20	9	26

Примечание – N – количество станций в кластере. Единицы изменения: H – м, Ps–C<sub>орг</sub> – %; Ba–Mo, Ag и Cd – г/т; Au, Pt–Ru и Hg – мг/т. Прочерк – отсутствие данных. Зеленым цветом выделены наибольшие (самый темный) и наименьшие (самый светлый) усредненные значения изученных параметров, розовым – «аномальные» кластеры. Жирным курсивом отмечено усредненное содержание цинка, резко завышенное за счет присутствия в выборке единичного экстремального значения 5251 г/т.

Он представлен всего двумя пробами пелит-алевритовых осадков с днища каньонов Геральд и Барроу. По формальным признакам, например по значениям литохимического модуля  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  (см. рисунок 27), эти осадки могут быть отнесены к металлоносным [Батурин, 1993; Гурвич, 1998].

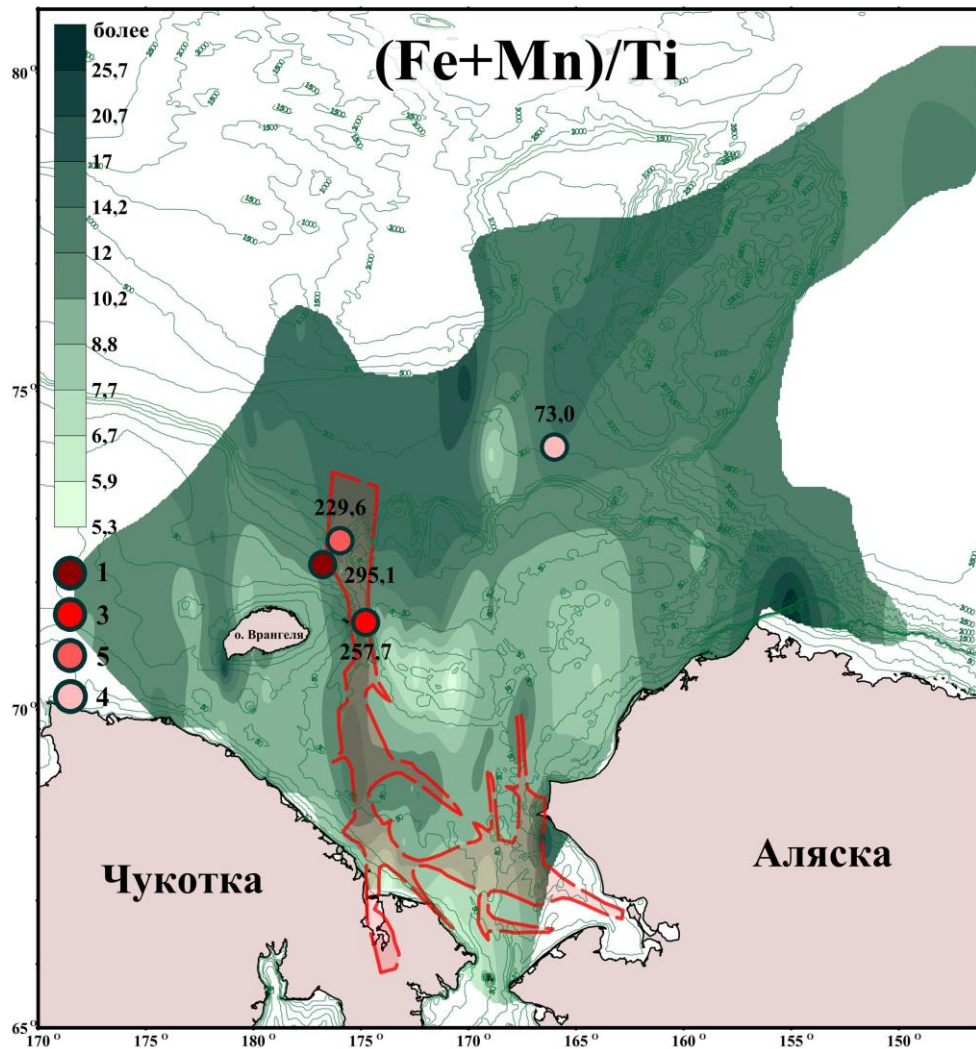


Рисунок 27 – Распределение значений литохимического модуля  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  в осадках и железомарганцевых конкрециях (ЖМК) Чукотского моря, по [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а], с дополнениями.

*Примечание* – Зеленая заливка –  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  в осадках, кружки –  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  в ЖМК (цифры в условных обозначениях соответствуют номеру станции, на карте – значению модуля). Красной линией оговорены основные структуры мезозойско-кайнозойской грабен-рифтовой системы [Шипилов и др., 1989].

Ранее на тех же станциях – как в каньоне Геральд, так и в каньоне Барроу [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а; Батурин, Дубинчук, 2011; Whitley, 2005, устное сообщение] – были подняты ЖМК. Изучение конкреций каньона Геральд позволило выявить в них единичные микрочастицы самородного золота, повышенное содержание ртути, молибдена и лития [Батурин, Дубинчук, 2011], высокое – платины [Астахов и др., 2010в; Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а]. В первом случае говорится о возможной «поставке рудного



материала из глубинных разломов, которые продолжаются на континентальном блоке, где имеются рудные месторождения» [Батулин, Дубинчук, 2011, с. 98], во втором – о том, что условия формирования «определены влиянием флюидодинамических процессов, характерных для современной стадии развития грабен-рифтовой системы» [Астахов и др., 2010в, с. 215].

Кластеры 7–12 объединяют пробы осадков, которые занимают промежуточное положение между типичными обломочными и типичными глинистыми. Территориально эти осадки распространены по всему шельфу, за исключением некоторых прибрежных его частей и районов подводных возвышенностей с наиболее активным гидродинамическим режимом. Осадки, обогащенные биогенными кремнистыми остатками, входят преимущественно в кластеры 7 и 8. Пробы кластера 7 образуют достаточно компактное поле в пределах Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд. На двух станциях кластера 8 и одной станции кластера 12 в пределах каньона Геральд обнаружены диагенетические ЖМК. В первом случае это лепешковидные и одна дискоидальная конкреции, во втором – только дискоидальные [Колесник, Колесник, 2013, 2015]. В кластер 9 включены всего две станции, расположенные на значительном удалении друг от друга: одна – в западной части моря на южном мелководье острова Врангеля, другая – в восточном секторе, вблизи мыса Хоп (Аляска). Химический состав проб, отобранных на этих станциях, отличается повышенными относительно средних для Чукотского моря концентрациями железа (около 6 %), фосфора (0,144–0,348 %), бария (750–800 г/т), меди (95 г/т и более).

В целом исследования показали, что в Чукотском море господствует терригенное осадконакопление и разделение на кластеры определяется преимущественно механической дифференциацией обломочного материала. Вместе с тем по содержанию в осадках  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$  выделена зона (Южно-Чукотская котловина, каньон Геральд) с достаточно ярко проявленной биогенной седиментацией. Что касается химических и биохимических процессов, то их развитие на небольших участках дна стимулируется, вероятно, геодинамической активностью. Остановимся более подробно на факторах, контролирующих процесс осадконакопления, и оценим характер и силу их влияния на седиментационный процесс в Чукотском море (см. пп. 6.2–6.6).

## **6.2 Механическая дифференциация осадочного материала**

Механическая сортировка осадочного материала является для Чукотского моря главным фактором осадконакопления, практически полностью контролирующим гранулометрию,

минеральный и химический состав донных отложений. Под его мощным влиянием происходит постепенное – в сторону открытого моря – уменьшение крупности осадка и облегчение его минерального состава, связанное с ограничениями в перемещении от источника питания (в данном случае суши) различных по плотности минералов. Определенные изменения наблюдаются и в химическом составе осадка: общее уменьшение доли кремния при повышении содержания алюминия, железа и особенно марганца, увеличение концентрации большинства микроэлементов. При этом нельзя не учитывать роли таких факторов, как гидродинамика, «внутрибассейновый» петрофонд (местный размыв пород дна и островной суши), рельеф дна и тектоника/геодинамика. Под их влиянием циркумконтинентальная зональность осадконакопления в Чукотском море несколько нарушается (искажается).

Результатами проведенных исследований подтверждена сильнейшая зависимость химического состава осадков Чукотского моря от гранулометрии (таблица 11, с. 86). Такая зависимость уже отмечалась как для Чукотского моря [Астахов и др., 2008, 2013б; Viscosi-Shirley et al., 2003], так и для других морских бассейнов с терригенным осадконакоплением. Гранулометрический состав отражает соотношение главных составляющих осадка – глинистой (пелитовой) и обломочной (песчано-алевритовой).

По высокому содержанию кремния в Чукотском море оконтуриваются участки дна, покрытые песчаными и песчано-алевритовыми осадками (п. 6.1, кластеры 13–15). Последние, как уже упоминалось, сложены обломочным терригенным материалом преимущественно полевошпат-кварцевого состава. Закономерность подтверждается значимой положительной корреляцией кремния с содержанием в осадках псаммита ( $r = 0,57$ ) и алеврита ( $r = 0,69$ ) и значимой отрицательной – с содержанием пелита ( $r = -0,61$ ): см. таблицу 11, с. 86. На R-кластерной дендрограмме группа кремния (Si, Ps, Al) находится в стороне (обособляется) от всех других химических элементов: рисунок 22, группа I, с. 87.

В обогащении осадков Чукотского моря алюминием, магнием, частично железом и калием обнаруживается связь с содержанием пелитового (глинистого) материала [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а]. Перечисленные элементы являются минералообразующими в гидрослюдах, смектитах, хлоритах, каолините. На распределении марганца и частично железа (рисунок 16, с. 65) сказывается накопление аутигенных минералов (сульфидов, оксидов) железа и марганца в тонкозернистых осадках районов с активными геодинамическими условиями [Астахов и др., 2008; Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а].

Многие микроэлементы (Co, Cr, Pb, V, Y, Yb, Zn, Zr, Mo и др.: таблица 11, с. 86) обогащают тонкозернистые осадки, что характерно для терригенных отложений, содержащих потенциальные компоненты-концентраторы: глинистые минералы, органическое вещество,

гидроксиды железа и марганца, тонкодисперсные сульфиды железа [Astakhov et al., 1995; McMurtry et al., 1991].

Механическая сортировка осадочного материала в соответствии с особенностями петрофонда, гидродинамики и рельефа дна наглядно проявляется в характере пространственного распределения микроразмерных минеральных зерен цветных, благородных и других металлов (Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, As, W, Sb, Bi, Ta, Ag, Au, Pd, Pt, Ir, La–Nd, Th, Fe, Ti, Cr, Zr, Y), выявленных в осадках и аутигенных образованиях Чукотского моря (см. главу 4, п. 4.1, п. 4.2). В целом комплекс металлов и их минеральные формы выделения отражают минерагенические особенности региона: см. главу 3. Наиболее значительная концентрация зерен отмечена вблизи островов Врангеля и Геральд, у берегов Аляски и подножия подводной банки Геральд, в южной части Южно-Чукотской котловины на пути следования в Чукотское море Берингоморского течения (рисунок 7, с. 48; рисунок 3, с. 34). Судя по небольшой (около 1 вес. %), но постоянной примеси меди и цинка в осадках Южно-Чукотской котловины, в пределах этой морфоструктуры происходит накопление рудного вещества субколлоидной размерности. В общих чертах описанная картина соответствует известной закономерности, когда тяжелые минералы, например золото и касситерит (основные россыпеобразующие минералы в Чукотоморском регионе), а также платиноиды, образуют россыпи ближнего сноса, удаленные от источников на незначительные (от первых сотен метров до первых километров) расстояния. Согласно нашим данным и имеющимся литературным сведениям [Геология..., 2002, 2004; Патык-Кара и др., 1997], наиболее перспективными являются: 1) прибрежные участки дна, где орогенные системы (с коренными источниками минералов) близки к береговой линии; 2) участки «внутри» бассейна на сочленении морфоструктур воздымания (с коренными источниками) и опускания – «тектонические уступы»; 3) депрессии, где длительно накапливалось кластогенное рудное вещество.

### **6.3 Роль биоты**

Биогенный фактор, влияющий, а иногда и определяющий ход и результаты седиментации в морских и океанических бассейнах [Виноградов, Лисицын, 1981; Лисицын, 1977, 2004; Лисицын, Виноградов, 1982; Романкевич, 1977; Савенко, 1984 и др.], для Чукотского моря, как и для других арктических морей, имеет подчиненное значение. И все же наиболее ярко его действие в Чукотском море проявляется в Южно-Чукотской котловине (см. рисунок 28).

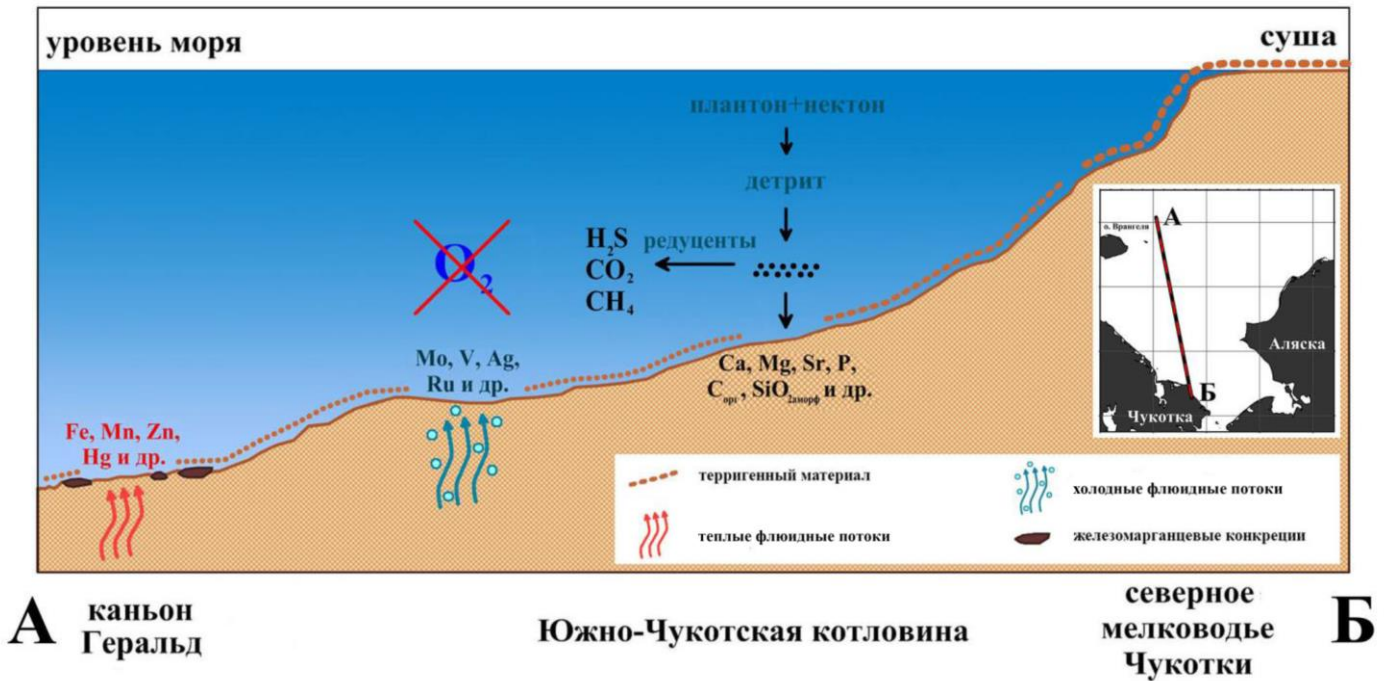


Рисунок 28 – Схема процесса осадконакопления в Чукотском море по профилю Южно-Чукотская котловина – каньон Геральд (см. карту-врезку) с учетом биогенного, гидрохимического и флюидодинамического факторов.

Наши данные и имеющиеся литературные сведения [Астахов и др., 2013б; Леин и др., 2007 и др.] указывают на почти полное отсутствие в Чукотском море биогенного карбоната накопления. В поверхностных осадках, а также в морских верхнечетвертичных отложениях, вскрытых трубками и скважинами [Леин и др., 2007; Gusev et al., 2009], содержание карбонатного углерода не превышает десятых долей процента. Продуктивность же бентосных и планктонных сообществ, в том числе организмов с карбонатными раковинами, относительно велика [Сиренко, Гагаев, 2007; Grebmeier et al., 2006 и др.]. Причиной этого несоответствия может быть растворение карбонатных биогенных остатков в придонных водах или на поверхности дна, что типично для шельфов высокоширотных бассейнов.

Примесь биогенного карбоната определяет содержание в осадках кальция и стронция. Судя по корреляции с мелкоалевритовой фракцией, эта примесь представлена остатками раковин фораминифер, что характерно для глубоководных районов Северного Ледовитого океана (см. п. 6.1, кластеры 1, 3). Обогащение осадков кальцием и стронцием отмечено также в Беринговом проливе (п. 6.1, кластер 13; рисунок 17, с. 68; рисунок 19, с. 76), через который в Чукотское море поступают относительно теплые и богатые биогенными компонентами тихоокеанские воды (см. рисунок 3, с. 34).

В распределении  $C_{org}$  отчетливо выделяется зона повышенных содержаний в южной и западной частях Чукотского моря; зона может быть оконтурена изолинией 2 % (рисунок 26, кластер 7, с. 102; рисунок 17, с. 68). Повышенные (около 1,5 %) содержания выявлены также в

полосе, которая направлена от Берингова пролива строго на север, и в некоторых точках к северу от острова Врангеля. Данные, имеющиеся по содержанию  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  в южной части моря [Астахов и др., 2009, 2013б; Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, Колесник, 2010а], свидетельствуют о наличии практически прямой связи между содержаниями  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$  и  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,72$  для выборки из 72 проб): рисунок 29а; таблица 11, с. 86.

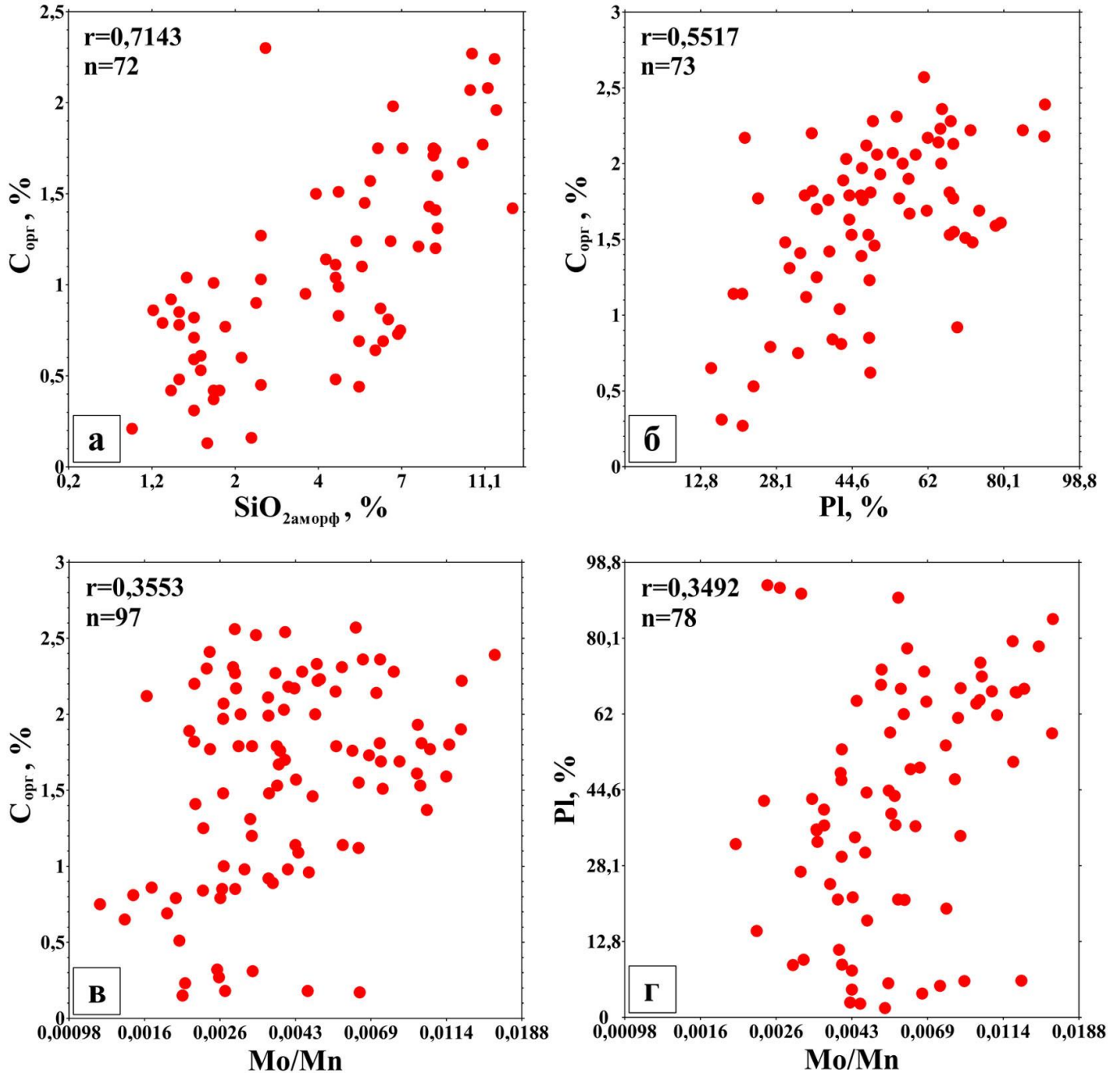


Рисунок 29 – Графики корреляционных связей для общего органического углерода, аморфного (биогенного) кремнезема, пелитовой фракции Pl (менее 0,001 мм) и модуля Mo/Mn в осадках шельфа Чукотского моря, по [Астахов, Гусев, Колесник, Шакиров, 2013а], с изменениями.

Это предполагает поступление  $C_{\text{орг}}$  в осадки совместно с остатками диатомовых водорослей; его высокие содержания могут быть обусловлены либо увеличением в этом районе первичной

продуктивности, либо сносом течениями биогенных остатков с окружающих участков дна. Тяжелый изотопный состав  $C_{орг}$  также свидетельствует о преобладающей роли планктогенного органического вещества в его формировании (рисунок 17, с. 68). Содержания  $C_{орг}$  более 2 % отмечены и в ряде проб из Восточно-Сибирского моря, к северо-западу от острова Врангеля. Но эти участки отличаются легким изотопным составом  $C_{орг}$ , что, по мнению А. А. Ветрова с соавторами [2008], указывает на преобладание терригенного органического вещества, поступающего при термоабразионном разрушении берегов материка, островов и подводных банок.

Участки с высоким содержанием  $C_{орг}$  и  $SiO_{2аморф}$  в осадках Чукотского моря (рисунок 17, с. 68; п. 6.1, кластер 7) в целом совпадают с основными структурами грабен-рифтовой системы (рисунок 3, с. 34) [Шипилов и др., 1989]. Этому может быть несколько объяснений. Прежде всего, неотектонические структуры грабен-рифтовой системы определяют современный рельеф шельфа, наличие впадин и долин, в том числе и существование самого Берингова пролива. По этим погруженным участкам дна и распространяются основные ветви теплого Берингоморского течения, несущего богатые биогенами воды, что увеличивает первичную продуктивность вод и, как следствие, поступление на дно  $C_{орг}$  и  $SiO_{2аморф}$ . В то же время пониженные участки дна покрыты наиболее тонкозернистыми осадками, в которых, помимо прочего, скапливаются органические остатки, в том числе сносимые с окружающих возвышенных участков дна. В целом для внутреннего шельфа проявляется значимая положительная корреляция между содержаниями пелитовой фракции и  $C_{орг}$ , но разброс точек велик (рисунок 29б), что свидетельствует о влиянии на накопление  $C_{орг}$  и других процессов. Такое влияние могут оказывать, например, флюиды, поступающие из земной коры в донные осадки и придонные воды в зонах активных разломов. При этом вероятно увеличение первичной продуктивности за счет поставки кремния, фосфора, железа и других элементов, участвующих в биохимических процессах планктона, а также увеличение продуктивности микробиоты и макробентоса. В пределах структур грабен-рифтовой системы отмечена интенсивная микробиальная деятельность [Иванов и др., 2010; Леин и др., 2007; Саввичев, 2007], существуют участки с очень высокой продуктивностью макробентоса [Сиренко, Гагаев, 2007; Grebmeier et al., 2006].

Таким образом, высокие содержания  $C_{орг}$  в донных осадках относительно узкой зоны (см. п. 6.1, кластер 7), совпадающей с некоторыми структурами грабен-рифтовой системы Чукотского моря, объясняются несколькими причинами (факторами):

- повышенной первичной продуктивностью в результате поступления в бассейн богатых биогенами тихоокеанских вод (биогенный, гидродинамический факторы);

- наличием на шельфе котловин и ложбин, куда сносится тонкозернистый осадочный материал, в том числе остатки планктона (морфоструктурный, гидродинамический факторы);
- возможным присутствием на дне эндогенных водных и газовых источников, «функционирование» которых способствует увеличению продуктивности бентосных и планктонных организмов (флюидный/геодинамический фактор).

В Чукотском (самая западная часть) и Восточно-Сибирском морях накапливается преимущественно аллохтонное органическое вещество, поступающее сюда с выносами рек или из эродированных на побережье или морском дне более древних четвертичных отложений (процесс в рамках шельфового полярного литогенеза).

## 6.4 Окислительно-восстановительные условия

Окислительно-восстановительный потенциал  $E_h$  (в зарубежной литературе чаще используется термин redox – от англ. reduction/oxidation), отвечая за все окислительные и восстановительные процессы, протекающие в наддонных и поровых водах, в значительной мере сказывается на характере осадконакопления – минеральном (аутигенном) и химическом составе осадков, а также постседиментационных процессах. Определенное влияние редокс-фактор оказывает и на седиментацию в Чукотском море (см. рисунок 28, с. 108).

В результате кластеризации осадков Чукотского моря в отдельную группу выделились  $S_{org}$ , медь и свинец (элементы связаны значимой положительной корреляцией как между собой, так и с некоторыми другими микроэлементами – Mo, V, Zn: см. таблицу 11, с. 86). Вероятно, обособление связано с существованием в бассейне участков с сезонным (круглогодичным?) дефицитом кислорода, возникающим в обстановках гало-, пикно- и/или термоклина, то есть в условиях контакта водных масс разной солености, плотности и/или температуры [Юдович, Кетрис, 2011]. Предположение подтверждается данными по гидрохимии придонных вод Чукотского моря (рисунок 3, с. 34) [Обзор..., 2008]. Содержания кислорода на участках с гипотетическим дефицитом кислорода (4–6 нл/л) намного выше, чем в типично субоксидных/аноксидных условиях [Tyson, Pearson, 1991], но для Северного Ледовитого океана с низкими температурами вод и, как следствие, большой величиной насыщения кислородом они минимальны. В придонных водах залива Буор-Хая моря Лаптевых при таких же, как в Чукотском море, фоновых содержаниях кислорода существуют аноксия и сероводородные обстановки [Обзор..., 2008]. Этому, скорее всего, способствуют потоки метана из осадков в придонную воду. По мнению Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [1988, 2011], сероводородные

(эвксинные) обстановки являются вариантом аноксидных и могут существовать только при условии постоянного привноса сероводорода из подстилающих осадков. Судя по относительно низким – меньше 0,017 – значениям коэффициента  $Mo/Mn$  (рисунок 29 – в, г), который при значениях более 0,02 считается индикатором сероводородного заражения [Холодов, Недумов, 1991], типичные сероводородные условия для Чукотского моря нехарактерны. В то же время значения коэффициента для отдельных проб осадков (особенно тонкозернистых, обогащенных  $S_{org}$ ) достаточно высоки, что не исключает существования субоксидных и аноксидных условий на локальных участках дна. На это же может указывать повышенное содержание ванадия, молибдена и цинка в осадках внешнего шельфа и Южно-Чукотской котловины – кластер 7 (см. п. 6.1, рисунок 26, с. 102; рисунок 19, с. 76; рисунок 20, с. 80). Типичные элементы аноксидных обстановок, они коррелируют с  $S_{org}$ , что говорит об их совместном накоплении: см. таблицу 11, с. 86. Значимую положительную корреляционную связь с элементами аноксидных обстановок имеют и некоторые другие элементы (Fe, Mn, Cr, Cd, Hg). Небольшие значения коэффициентов корреляции для последних указывают на наличие и других факторов, контролирующих их распределение: обогащение тяжелыми минералами песчаных осадков, гидротермальная деятельность, раннедиагенетическое перераспределение. При изучении минерального и химического состава осадков Чукотского моря выявлены многочисленные минеральные зерна железа (главным образом ильменит, магнетит, гематит, гетит, пирит) и значительно менее распространенные – марганца и хрома; кадмий и ртуть не обнаружены даже в качестве примеси в других минералах (см. главу 4, п. 4.1). Что касается поведения перечисленных элементов в процессе диагенеза, то сопоставление их содержаний в ЖМК и осадках каньона Геральд показало: все они, за исключением хрома, аккумулируются в конкрециях (см. главу 5, п. 5.4). Верхний предел КК для марганца – 226,2; кадмия – 23,5; железа – 7,3; ртути – 5,9; хрома – 0,9. Конкреции активно накапливают молибден (КК – до 90,6), чего не скажешь о ванадии и цинке (КК – до 4,5 и 2,2 соответственно).

ЖМК, которые образуются только в окислительной среде [Покровский, 1996; Савенко, 1984; Чугунный и др., 1976; Kindle, 1932; Manheim, 1961 и др.], являются характерным минеральным индикатором кислородных фаций [цит. по: Юдович, Кетрис, 2011, с. 243]. Разница Eh-pH параметров в осадках и наддонных водах вызывает диффузионный переток растворенных в поровых водах  $Mn^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ , а также других редокс-чувствительных элементов к поверхности осадка, где они окисляются и осаждаются в виде малорастворимых соединений (на гидроксидах железа и марганца сорбируется целый «шлейф» элементов-примесей) вокруг любого подходящего субстрата, например гальки [цит. по: Юдович, Кетрис, 2011, с. 243, с. 406]. Действие редокс-фактора находит отражение и в морфологии конкреций. Так, сфероидальные (шаровидные) ЖМК образуются в соленых окислительных водах в слое



окисленных осадков; плоские, дискоидальные, лепешковидные – в более распресненных водах, близко к границе восстановленных и окисленных осадков [Тарновский, Лабзин, 1969; Ingrid, Pontér, 1987 и др.].

Аутигенный карбонат, крупный фрагмент которого был обнаружен на бровке шельфа в северо-восточной части Чукотского моря [Астахов, Босин, *Колесник* и др., 2010б; Колесник, *Колесник*, Покровский, 2014], тоже продукт окислительно-восстановительных реакций. Судя по изотопному составу углерода  $\delta^{13}\text{C}$  и кислорода  $\delta^{18}\text{O}$ , карбонат образовался при микробиальном окислении метана, мигрировавшего к поверхности дна из осадочной толщи [Колесник, *Колесник*, Покровский, 2014]; основным источником кислорода при этом стал бикарбонат морских и/или иловых вод. Фрамбоиды пирита, широко распространенные в основной массе породы, образовались в результате сульфатредукции – биогеохимического процесса восстановления сульфатов (сульфат-ионы морских и/или иловых вод) до сульфидов.

## 6.5 Геодинамические условия

Проведенные исследования показали, что в масштабах всего Чукотского моря влияние на седиментацию геодинамических условий незначительно. Вместе с тем на локальных участках дна роль геодинамики может существенно возрастать, принимая при этом различные формы (см. рисунок 28, с. 108).

На шельфе Чукотского моря, как уже отмечалось [Астахов, Гусев, *Колесник*, Шакиров, 2013а], известны и предполагаются газовые и водные источники различного происхождения. Выходы углеводородных газов выявлены по аномалиям в придонных водах; некоторые из этих аномалий достаточно стабильны [Геология..., 2002; Яшин, Ким, 2007]. Наличие гидротермальных источников предполагается исходя из их существования на сухопутных участках структур, продолжающихся на шельфе [Поляк и др., 2010; Чешко и др., 2004]. Одной из таких структур, наиболее известной, является Чукотский грабен. Он прослеживается от Восточной Чукотки на юге до как минимум каньона Геральд на севере и, вероятно, имеет продолжение на внешнем шельфе (рисунок 3, с. 34) [Шипилов и др., 1989]. Каньон повсеместно трассируется небольшими впадинами, осадки которых обогащены  $\text{C}_{\text{орг}}$  (рисунок 17, с. 68), железом и магнием (рисунок 16, с. 65), цинком, ванадием, молибденом, иногда никелем и хромом (рисунок 18, с. 72, Cr, Ni; рисунок 19, с. 76, V, Zn; рисунок 20, с. 80, Mo). Показана приуроченность к этой структуре повышенных содержаний серебра и рутения [Астахов, Колесов, Дударев, Иванов, *Колесник*, 2010а]. Только они среди изученных благородных

металлов (Au, Ag, Pt, Os, Ir и Ru) имеют значимую положительную корреляцию с  $C_{\text{орг}}$ : см. таблицу 11, с. 86. По-видимому, в пределах локальной неотектонической структуры происходит накопление (вплоть до аномальных содержаний) органического вещества и металлов-сульфофилов, что типично для аноксидных/сероводородных обстановок. При учете достаточно высокой средней концентрации кислорода в водной толще [Обзор..., 2008] можно предполагать, что более «глубокая» аноксия возникает точечно – под действием эндогенных источников в районах с относительным дефицитом кислорода. Металлы в таком случае обогащают осадок за счет ускоренного осаждения из иловых или придонных вод, а  $C_{\text{орг}}$  – за счет его лучшей сохранности в условиях недостатка кислорода (увеличение степени fossilization органического вещества в осадке). В этой связи интересным представляется обнаружение в осадке кластера 7 (см. п. 6.1) вещества железофосфатного состава (+Si, Ca) – предположительно гидроксифосфатов Fe-Ca (глава 4, п. 4.1). Такое же вещество, но уже в качестве матрицы, отмечено во всех изученных образцах ЖМК: в дискоидальных конкрециях железофосфатная матрица является основной, в плитчатых – уходит на второй план. По мнению А. В. Дубинина, изучавшего океанские осадки и ЖМК, железокальциевые гидроксифосфаты «могут образоваться [в осадках] в процессе сорбции/соосаждения фосфат-иона океанских вод взвесью гидротермального оксигидроксида железа... В процессе диагенетических реакций в осадках гидроксифосфаты Fe-Ca могут попадать в Fe-Mn оксигидроксидные образования (конкреции и микроконкреции)... С течением времени в ходе диагенетических преобразований они [гидроксифосфаты] распадаются на апатит и оксигидроксид железа» [Дубинин, 2001, с. 655, с. 656].

В пределах Чукотского грабена (см. п. 6.1, кластер 6) выделяются небольшие участки с повышенными значениями литохимического модуля  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  – рисунок 27, с. 104. (Этот модуль часто используется в качестве индикатора гидротермальной поставки металлов в осадки [Бутузова, 1998; Гурвич, 1998; Лисицын, 1993 и др.].) На внешнем шельфе Чукотского моря по такому же «признаку» отмечается более обширное поле, примыкающее к выходу на материковый склон кайнозойских рифтогенных структур Чарли и Нортвинд. Кроме того, локализуются участки с повышенными значениями модуля в каньоне Барроу (см. п. 6.1, кластер 6.), у мыса Хоп и к югу от острова Врангеля (кластер 9). Некоторые из этих аномалий определяются, вероятно, концентрацией в осадках магнетита и других обломочных нетитанистых и малотитанистых минералов железа. Высокие – до 295,1 – значения  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$  отмечаются в ЖМК, особенно каньона Геральд: кластеры 8, 12 (рисунок 27, с. 104). Считается, что при величине более 70–80 модуль указывает на наличие в составе ЖМО гидротермального вещества [Батурин, Дубинчук, 2010].

## 6.6 Факторы, определяющие аномальные содержания химических элементов в осадках

Согласно результатам проведенных исследований, районы распространения аномальных и повышенных содержаний  $C_{\text{орг}}$  и металлов в осадках Чукотского моря (см. главу 5, п. 5.5) совпадают с теми участками дна, где отмечаются или предполагаются специфические условия осадконакопления. Последние возникают под действием ряда факторов.

1. Проникновение через Берингов пролив относительно теплых и богатых питательными веществами (биогенами) тихоокеанских вод, которые уменьшают ледовитость акватории и стимулируют продуцирование органического вещества с накоплением в осадках биогенных компонентов и некоторых металлов ( $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ , P, Ca, Mg, Sr, Pb).

2. Наличие долин и изолированных впадин на шельфе, где накапливаются тонкозернистые осадки, обогащенные (по сравнению с более грубозернистыми отложениями окружающих участков) биогенными остатками и многими металлами.

3. Развитие сезонных обстановок с дефицитом кислорода. Это обуславливает общее обогащение осадков элементами группы железа и сульффилами (Fe, V, Ag, Mo, Zn, Cd).

4. Наличие газовых и водных эндогенных источников в пределах активных структур грабен-рифтовой системы, что определяет:

- увеличение продуктивности планктонных и бентосных, в том числе микробиальных, сообществ за счет поставки эндогенными источниками элементов, участвующих в биохимических процессах (углерод/метан, P, Si, Fe), и ускоренное накопление биогенных остатков в донных осадках;

- развитие бескислородных обстановок и, возможно, сероводородное заражение придонных и иловых вод на локальных участках вблизи эндогенных источников с формированием аномальных содержаний ряда элементов, в том числе на стадии раннего диагенеза (Mo, Zn, V, Ni и, вероятно, Ag, Ru);

- поставку гидротермальными источниками металлов или изменение ими физико-химических условий придонных и иловых вод; это ведет к формированию аномальных и повышенных содержаний в осадках ряда элементов (Fe, Mn, Pt, Hg) и активному диагенезу, в ходе которого образуются ЖМК.

Следует отметить, что проявление отмеченных выше процессов на поверхности дна возможно только при относительно невысоких скоростях осадконакопления.

Учитывая, что наличие долин и изолированных впадин на шельфе Чукотского моря является следствием тектонической активизации грабен-рифтовой системы, более очевидной становится основная роль геодинамических условий в формировании тонкозернистых осадков, обогащенных  $C_{\text{орг}}$  (более 2 %), благородными металлами (Ag, Pt, Ru) и металлами ассоциации III (Mo, V, Ni, Cr, Zn, Fe, Mn). Обогащение этими элементами типично для древних черносланцевых толщ [Юдович, Кетрис, 1988, таблица 5], но некоторые металлы концентрируются в черносланцевых толщах в значительно большей степени, чем в осадках Чукотского моря. В связи с этим важным становится факт накопления современных углеродистых осадков Чукотского моря в пределах тектонически активной структуры с развитыми флюидодинамическими процессами. Как и черносланцевые толщи, углеродистые осадки Чукотского моря содержат большое количество реакционноспособных компонентов (слабопреобразованное органическое вещество,  $SiO_{2\text{аморф}}$ , аморфные сульфиды железа). Это определяет возможность дополнительного привноса, перераспределения и концентрирования металлов при последующих постседиментационных, в том числе гидротермальных, процессах. Нельзя исключать и возможность дополнительного накопления углерода в результате микробияльного преобразования эндогенного метана и углекислого газа, как это происходит в настоящее время на геохимическом барьере морская вода – дно [Иванов и др., 2010].

## 6.7 Выводы

*1. Показано (подтверждено с помощью методов математической статистики), что в Чукотском море при доминировании терригенного осадконакопления существует зона (Южно-Чукотская котловина, каньон Геральд), где осадочный материал накапливается при участии биогенных и/или хемогенных процессов (биогенное, хемогенное осадконакопление), в некоторых случаях стимулируемых геодинамической активностью.*

*2. На большом массиве геохимических данных подтверждено, что основным фактором, контролирующим современное осадконакопление в Чукотском море, является механическая сортировка осадочного материала, действующая в связке с такими факторами, как петрофонд области питания осадочным материалом, гидродинамика, рельеф дна, тектоника/геодинамика. Распределение гранулометрических фракций (гранулометрический состав) осадков подчиняется циркумконтинентальной и вертикальной зональностям осадконакопления. Гранулометрический состав отражает главным образом отношение в осадках глинистой (пелитовой) и обломочной (песчано-алевритовой) составляющих, определяя*

тем самым химический состав отложений. Глинистая составляющая, доля которой наиболее значительна в тонкодисперсных отложениях пониженных форм рельефа центральной части бассейна и на внешнем шельфе, во многом контролирует содержание алюминия, магния, частично железа, калия и некоторых других элементов, являющихся минералообразующими в гидрослюдах, смектитах, хлоритах, каолините – основных глинистых минералах осадков Чукотского моря (следует учитывать и сорбционные свойства глинистых минералов). Обломочная составляющая, максимальная доля которой характерна для крупнозернистых осадков континентального и островного мелководья, а также подводных возвышенностей центральной части бассейна, представлена преимущественно полевыми шпатами и кварцем, которые в первую очередь контролируют содержание в осадках кремния.

3. Биогенный фактор в масштабах всего Чукотского моря играет второстепенную роль. В южной и западной частях моря, действуя совместно с гидро- и геодинамическим факторами, он приобретает большое значение. Наиболее ярко действие фактора отражается на характере распределения биогенных компонентов. Так, высокие содержания  $C_{орг}$  и  $SiO_{2аморф}$  в осадках Южно-Чукотской котловины и каньона Геральд объясняются: 1) повышенной первичной продуктивностью в результате поступления в бассейн богатых биогенами тихоокеанских вод; 2) наличием на шельфе котловин и ложбин, куда сносится тонкозернистый осадочный материал, в том числе остатки планктона; 3) возможным присутствием на дне эндогенных водных и газовых источников и, вследствие этого, более активным воспроизведением биомассы морских организмов.

4. Действие редокс-фактора сезонно, локально и связано с более или менее выраженным дефицитом кислорода в придонных и/или иловых водах Чукотского моря. Наибольшее влияние фактор оказывает на характер распределения в осадках  $C_{орг}$ , меди, свинца, молибдена, ванадия, цинка. Важную роль окислительно-восстановительные условия среды играют в постседиментационных процессах (образование ЖМК, карбонатообразование).

5. Границы влияния на седиментацию геодинамического фактора контролируются расположением в Чукотском море некоторых структур грабен-рифтовой системы. На участках дна, где зафиксирована или предполагается геодинамическая активность, осадочный материал может накапливаться при участии биогенных и/или хемогенных процессов. В результате создаются локальные обстановки с недостатком кислорода, происходит обогащение осадков органическим веществом ( $C_{орг}$ ) и металлами (Mo, V, Ag, Ru и др.), активизируются диагенетические процессы с образованием ЖМК и обогащением осадков железом, марганцем и некоторыми микроэлементами (Hg, Zn, Co и др.).

6. Основными центрами накопления в Чукотском море осадков с аномальными и повышенными содержаниями металлов (Fe, Mn, Zn, V, Mo, Cr, Ni, Pb, Ag, Ru и др.) являются

*Чукотский грабен и «зона Барроу». В первую очередь на обогащение шельфовых отложений металлами, в том числе цветными и благородными, влияют: 1) металлоносность геологических формаций окружающей суши и акватории (проявляется в находках микроразмерных минеральных зерен металлов – Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, As, W, Sb, Bi, Ta, Ag, Au, Pd, Pt, Ir, La–Nd, Th, Fe, Ti, Cr, Zr, Y – в донных осадках, железомарганцевых и карбонатных стяжениях); 2) специфичность процессов в пределах отдельных структур грабен-рифтовой системы, где формируются обогащенные  $C_{орг}$  илы с повышенным содержанием некоторых металлов (Mo, V, Ni, Cr, Co, Fe, Ag, Ru и др.).*

## Заключение

В результате проведенных исследований расширены представления о геохимии современных седиментационных и постседиментационных процессов, протекающих в Чукотском море.

1. Показано, что осадки шельфа Чукотского моря формируются в условиях преимущественно терригенного осадконакопления. Основным контролирующим фактором является механическая дифференциация вещества. Биогенная седиментация, фиксируемая в высоких и повышенных содержаниях  $C_{орг}$ ,  $SiO_{2аморф}$  и частично кальция, магния, стронция, фосфора, характерна главным образом для южной части Чукотского моря. Хемогенное/биохемогенное осадконакопление (отложение Fe и Mn, постседиментационные преобразования с формированием ЖМК) связано в основном с особенностями гидрохимического режима в каньоне Геральд и северных глубоководных районах моря.

Согласно результатам сопоставления со средним составом земной коры и осадочных пород, осадки Чукотского моря (шельф) отличаются повышенными содержаниями серебра, кадмия, фосфора, меди, цинка, молибдена, золота, ванадия, что в целом типично для морских бассейнов с дефицитом кислорода.

2. Установлено, что осадки шельфа Чукотского моря, обогащенные  $C_{орг}$  и металлами (относительно фоновых содержаний по бассейну), накапливаются в пределах Чукотского грабена и некоторых других структур грабен-рифтовой системы. Геохимические особенности осадков указывают на различные причины формирования аномалий. Аномальные содержания молибдена, ванадия, серебра и рутения образуются, вероятно, вблизи холодных газовых или водно-газовых источников – на локальных участках с аноксидными придонными или иловыми водами; железа, марганца, цинка, ртути, никеля и золота – вблизи водных (в том числе термальных) источников, поставляющих металлы или создающих благоприятные физико-химические условия для осаждения металлов различными способами из придонных или иловых вод. Очевидно, что важную роль при этом играют биохимические процессы, и часть аномалий обусловлена раннедиагенетическими преобразованиями осадков. Не исключено, что активный диагенез, в результате которого образуются ЖМК, стимулируется действием тех же флюидных источников. На вероятность последнего указывают, кроме прочего, некоторые минералогическо-геохимические особенности самих конкреций, а также пространственная совмещенность основных районов их распространения с зоной Чукотского грабена. Аутигенное карбонатообразование, установленное в северо-восточной части Чукотского моря, также

является результатом активности (в прошлом) холодных метаносодержащих флюидов; поступая на дно, метан окислялся при участии микроорганизмов.

Формирование в Чукотском море осадков, обогащенных органическим веществом и металлами происходит при определенных геодинамических условиях. Последние выражаются в длительном растяжении земной коры, формировании выраженных в рельефе дна систем прогибов (грабенов) и современной флюидной активности. Важным для формирования обогащенных органическим веществом и металлами осадков представляется относительно невысокая скорость осадконакопления.

Установлено локальное обогащение шельфовых отложений Чукотского моря металлами (минеральные зерна Cu, Zn, Sn, Pb, Ag, Au, Pd, Pt, Ir и др.), связанное в первую очередь с металлоносностью геологических формаций окружающей суши и, вероятно, самой акватории.

3. На примере Чукотского моря показана возможность использования методов многокомпонентной статистики для изучения осадочных отложений, сформированных в условиях преимущественно терригенного осадконакопления, а также моделирования поведения в таких условиях различных химических элементов. В Чукотском море закону нормального распределения подчинены содержания в осадках кремния, титана, алюминия, железа, магния, кальция, калия, натрия, фосфора,  $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ , хрома, свинца, стронция, ванадия, иттрия, иттербия, циркония, лантана, молибдена, золота, серебра, платины, осмия, иридия, рутения, кадмия, ртути. Весьма близки к этому содержания марганца, бария, кобальта, меди, никеля, цинка.



## Список литературы

- Аксенов, А. А.* Арктический шельф Евразии в позднечетвертичное время / А. А. Аксенов, Н. Н. Дунаев, А. С. Ионин [и др.]. – М.: Наука, 1987. – 277 с.
- Аникиев, В. В.* Влияние литодинамических факторов на распределение благородных металлов во взвеси и донных отложениях морской части эстуария р. Анадырь / В. В. Аникиев, О. В. Дударев, Г. М. Колесов [и др.] // *Геохимия*. – 1997. – № 5. – С. 535–551.
- Астахов, А. С.* Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря / А. С. Астахов, Е. А. Гусев, **А. Н. Колесник**, Р. Б. Шакиров // *Геология и геофизика*. – 2013а. – Т. 54. – № 9. – С. 1348–1365.
- Астахов, А. С.* Благородные металлы в донных осадках Чукотского моря / А. С. Астахов, Г. М. Колесов, О. В. Дударев, М. В. Иванов, **А. Н. Колесник** // *Геохимия*. – 2010а. – № 12. – С. 1289–1301.
- Астахов, А. С.* Возможные условия и время формирования покмарков Чукотского плато / А. С. Астахов, В. С. Маркевич, **А. Н. Колесник** [и др.] // *Океанология*. – 2014. – Т. 54. – № 5. – С. 665–678.
- Астахов, А. С.* Геологические исследования в Чукотском море и примыкающих районах Северного Ледовитого океана в экспедиции RUSALCA-2009 / А. С. Астахов, А. А. Босин, **А. Н. Колесник** [и др.] // *Тихоокеанская геология*. – 2010б. – Т. 29. – № 6. – С. 110–116.
- Астахов, А. С.* Геохимия осадконакопления в Чукотском море и примыкающем секторе Арктического бассейна: химическая типизация, роль биоседиментации, влияние эндогенной активности / А. С. Астахов, Р. Ван, М. В. Иванов // *Геология полярных областей земли: материалы XLII Тектонического совещания*. – М.: ГЕОС, 2009. – Т. 1. – С. 28–32.
- Астахов, А. С.* Литохимическая типизация обстановок полярного осадконакопления (Чукотское море) методами многокомпонентного статистического анализа / А. С. Астахов, Рудзян Ван, К. Крэйи [и др.] // *Геохимия*. – 2013б. – № 4. – С. 303–325.
- Астахов, А. С.* Литохимические признаки современной геологической активности Чукотского моря / А. С. Астахов, Рудзян Ван, А. Гао, М. В. Иванов // *ДАН*. – 2008. – Т. 422. – № 5. – С. 683–687.
- Астахов, А. С.* Об условиях формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на примере пермских и современных морских отложений Северо-Востока Азии) / А. С. Астахов, Н. А. Горячев, Т. И. Михалицына // *ДАН*. – 2010в. – Т. 430. – № 2. – С. 212–217.
- Атлас Арктики. – М.: ГУГиК при СМ СССР, 1985. – 204 с.
- Атлас грунтов Северного Ледовитого океана / Отв. ред. Е. С. Короткевич, Б. Х. Егизаров, В. И. Фалеев. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1981. – 104 с.
- Атлас океанов. Т. 1. Северный Ледовитый океан. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1980. – 184 с.

*Бабкин, П. В.* Ртутное оруденение Северо-Востока СССР / П. В. Бабкин. – М.: Наука, 1969. – 184 с.

Баренцевская шельфовая плита / Под ред. И. С. Грамберга, М. Л. Вербы, Б. К. Остистого [и др.]. – Л.: Недра, 1988. – 264 с.

*Батурин, Г. Н.* Вариации состава железомарганцевых конкреций Карского моря / Г. Н. Батурин // *Океанология*. – 2011. – Т. 51. – № 1. – С. 153–161.

*Батурин, Г. Н.* О составе железомарганцевых конкреций Чукотского и Восточно-Сибирского морей / Г. Н. Батурин, В. Т. Дубинчук // *ДАН*. – 2011. – Т. 440. – № 1. – С. 93–99.

*Батурин, Г. Н.* О составе железомарганцевых корок Атлантического океана / Г. Н. Батурин, В. Т. Дубинчук // *ДАН*. – 2010. – Т. 433. – № 5. – С. 652–657.

*Батурин, Г. Н.* Руды океана / Г. Н. Батурин. – М.: Наука, 1993. – 304 с.

*Безродных, Ю. П.* Железо-марганцевые конкреции Чаунской губы (Восточно-Сибирское море) / Ю. П. Безродных, А. П. Агарков, А. П. Валпетер [и др.] // *Проблемы морских минеральных ресурсов*. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – С. 116–121.

*Белов, Н. А.* Особенности современного осадкообразования и некоторые вопросы геохимии донных осадков шельфа Чукотского моря / Н. А. Белов, В. И. Огородников // *Вестник Ленинградского ун-та. Серия геология, география*. – 1976. – Т. 24. – Вып. 4. – С. 52–61.

*Богданов, Н. А.* Система кайнозойских рифтов Восточной Арктики и ее возможное значение / Н. А. Богданов, В. Е. Хаин, Э. В. Шипилов // *ДАН*. – 1995. – Т. 345. – № 1. – С. 84–86.

*Богданов, Ю. А.* Железо-марганцевые конкреции Карского моря / Ю. А. Богданов, А. И. Горшков, Е. Г. Гурвич [и др.] // *Океанология*. – 1994. – Т. 34. – № 5. – С. 789–800.

*Боцул, А. И.* Лазерный измеритель размеров частиц «ANALYSETTE 22»: достоинства, недостатки и некоторые особенности использования при анализе донных осадков / А. И. Боцул // *Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях*. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – С. 114–118.

*Бродская, Н. Г.* Карбонатные конкреции в третичных отложениях острова Сахалин / Н. Г. Бродская // *К познанию диагенеза осадков*. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 25–31.

*Брукс, К.* Применение статистических методов в метеорологии / К. Брукс, Н. Карузерс. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 416 с.

*Бутузова, Г. Ю.* Гидротермально-осадочное рудообразование в рифтовой зоне Красного моря / Г. Ю. Бутузова. – М.: ГЕОС, 1998. – 312 с.

*Ветров, А. А.* Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря / А. А. Ветров, И. П. Семилетов, О. В. Дударев [и др.] // *Геохимия*. – 2008. – Т. 48. – № 2. – С. 183–195.

*Виноградов, А. П.* Среднее содержание химических элементов в горных породах / А. П.

Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.

*Виноградов, В. А.* Возраст и структура осадочного чехла Восточно-Арктического шельфа России / В. А. Виноградов, Е. А. Гусев, Б. Г. Лопатин // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. – Вып. 5. – С. 202–212.

*Виноградов, М. Е.* Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. 1. Закономерности распределения планктона и бентоса в океане / М. Е. Виноградов, А. П. Лисицын // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1981. – № 3. – С. 5–28.

*Волков, А. В.* Месторождения золота и серебра Чукотки / А. В. Волков, В. И. Гончаров, А. А. Сидоров. – Москва – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. – 221 с.

Геология и полезные ископаемые России. Т. 5. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. Арктические моря / Под ред. И. С. Грамберга, В. Л. Иванова, Ю. Е. Погребницкого. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 468 с.

Геология и полезные ископаемые шельфов России / Под ред. М. Н. Алексеева. – М.: ГЕОС, 2002. – 422 с.

Геология СССР. Т. 26. Острова Советской Арктики. – М.: Недра, 1970а. – 547 с.

Геология СССР. Т. 30. Северо-Восток СССР. – М.: Недра, 1970б. – Кн. 1. (548 с.). – Кн. 2 (536 с.).

Геология СССР. Т. 9. Моря Советской Арктики / Под ред. И. С. Грамберга, Ю. Е. Погребницкого. – Л.: Недра, 1984. – 280 с.

*Грабецкая, Н. А.* Опыт применения комплексного литолого-минералогического анализа для установления условий формирования осадков пролива Лонга (Чукотское море) / Н. А. Грабецкая, Ю. А. Павлидис // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. – М.: Наука, 1982. – С. 76–92.

*Грецкая, Е. В.* Строение и углеводородный потенциал нефтяной системы Северо-Чукотского прогиба / Е. В. Грецкая, А. В. Савицкий // Геология нефти и газа. – 2010. – № 6. – С. 44–53.

*Гурвич, Е. Г.* Металлоносные осадки Мирового океана / Е. Г. Гурвич. – М.: Научный Мир, 1998. – 340 с.

*Гуревич, В. И.* Железомарганцевые конкреции и корки Западно-Арктического шельфа / В. И. Гуревич, А. В. Яковлев // Полезные ископаемые континентальных шельфов. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2005. – С. 158–161.

*Гусев, Е. А.* Стратиграфия позднекайнозойских осадков Чукотского моря по результатам неглубокого бурения / Е. А. Гусев, И. А. Андреева, Н. Ю. Аникина [и др.] // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. – Вып. 1. – М.: ГЕОС, 2009. – С. 89–103.

*Данилов, И. Д.* Полярный литогенез / И. Д. Данилов. – М.: Недра, 1978. – 238 с.

*Добрецов, Н. Л.* Динамика нефтегазоносных бассейнов в Арктике и сопредельных территориях

как отражение мантийных плюмов и рифтогенеза / Н. Л. Добрецов, О. П. Полянский, В. В. Ревердатто, А. В. Бабичев // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1145–1161.

*Добровольский, А. Д.* Моря СССР / А. Д. Добровольский, Б. С. Залогин. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.

*Додин, Д. А.* Минерагения Арктики / Д. А. Додин // Литосфера. – 2009. – № 5. – С. 15–35.

*Додин, Д. А.* Проблемы минерагении Арктики / Д. А. Додин, А. Н. Вишневецкий, С. А. Гулин // Геология и геофизика. – 1994. – № 9. – С. 78–90.

*Дубинин, А. В.* Геохимия гидроксофосфатов Fe-Sa в пелагических осадках: генезис и эволюция состава в процессе диагенеза / А. В. Дубинин // Геохимия. – 2001. – № 6. – С. 645–657.

*Иванов, М. В.* Влияние фитопланктона и микроорганизмов на формирование изотопного состава углерода органического вещества морей Российской Арктики / М. В. Иванов, А. Ю. Леин, А. С. Саввичев // Микробиология. – 2010. – Т. 79. – № 5. – С. 579–594.

*Иванова, А. М.* Кайнозойский рудогенез в шельфовых областях России / А. М. Иванова, А. Н. Смирнов, В. И. Ушаков; под ред. В. Л. Иванова. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2005. – 167 с.

*Имаев, В. С.* Сейсмотектоника Якутии / В. С. Имаев, Л. П. Имаева, Б. М. Козьмин. – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с.

*Ирдли, А.* Структурная геология Северной Америки; пер. с англ. / А. Ирдли. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 666 с.

*Калиненко, В. В.* Железистые конкреции Чукотского моря / В. В. Калинин, Ю. А. Павлидис // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. – М.: Наука, 1982. – С. 115–129.

*Калиненко, В. В.* Погребенные конкреции в отложениях арктических морей / В. В. Калинин // Геология океанов и морей: тезисы докладов 6-й Всесоюзной школы по морской геологии. – М.: ИО РАН. – 1984. – Т. 3. – С. 63–64.

*Калягин, А. Н.* Новые типы железо-марганцевой минерализации на шельфе моря Лаптевых / А. Н. Калягин, П. Я. Тищенко, А. Ю. Гуков [и др.] // Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Труды Арктического регионального центра. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 81–89.

*Калягин, А. Н.* О природе железомарганцевых образований моря Лаптевых / А. Н. Калягин, П. Я. Тищенко, А. Ю. Гуков [и др.] // Тихоокеанская геология. – 2001. – Т. 2. – № 2. – С. 87–96.

*Каминский, В. Д.* Континентальный шельф Российской Арктики: состояние изучения и освоения нефтегазовых ресурсов / В. Д. Каминский, О. И. Супруненко, В. В. Суслова // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 977–985.

*Кетле, А.* Социальная физика, или Опыт о развитии способностей человека / А. Кетле. – Киев, 1911. – Т. 1. – С. 38–39.

*Колесник, А. Н.* Условия накопления органического вещества в донных осадках шельфа

Чукотского моря / А. Н. Колесник, А. А. Босин, А. А. Марьяш // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 138–146.

*Колесник, О. Н.* О находке аутигенного метанопродуктивного карбоната в Чукотском море / О. Н. Колесник, **А. Н. Колесник**, Б. Г. Покровский // ДАН. – 2014. – Т. 458. – № 3. – С. 330–332.

*Колесник, О. Н.* Особенности химического и минерального состава железомарганцевых конкреций Чукотского моря / О. Н. Колесник, **А. Н. Колесник** // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 7. – С. 853–866.

*Колесник, О. Н.* Редкие земли и иттрий в железомарганцевых конкрециях Чукотского моря / О. Н. Колесник, **А. Н. Колесник** // Литология и полезные ископаемые. – 2015. – № 3 (в печати).

*Конторович, А. Э.* Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения / А. Э. Конторович, М. И. Эпов, Л. М. Бурштейн [и др.] // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 1. – С. 7–17.

*Коучмен, Л. К.* Берингов пролив / Л. К. Коучмен, К. Огорд, Р. Б. Трипп; пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 199 с.

*Кошелева, В. А.* Донные осадки арктических морей России / В. А. Кошелева, Д. С. Яшин. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. – 286 с.

*Кошелева, В. А.* Особенности вещественного состава неоплейстоцен-голоценовых отложений арктических морей России / В. А. Кошелева // Литология и полезные ископаемые. – 2002. – № 2. – С. 160–171.

*Кошелева, В. А.* Строение и вещественный состав плейстоценовых и голоценовых отложений Карского моря: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: ДСП / Кошелева Вера Алексеевна. – Л.: ПГО «Севморгеология», 1988. – 22 с.

*Кузнецова, А. И.* Межлабораторное сравнение результатов определения кларковых содержаний серебра в стандартных образцах состава горных пород атомно-эмиссионным и атомно-абсорбционным методами / А. И. Кузнецова, М. Г. Кажарская, О. В. Зарубина, Н. Л. Чумакова // Аналитика и контроль. – 2004. – Т. 8. – № 4. – С. 370–378.

*Кузнецова, А. И.* Оценка результатов атомно-эмиссионного анализа почв и донных грунтов по критериям качества, принятым в исследованиях в прикладной геохимии / А. И. Кузнецова, О. В. Зарубина // Аналитика и контроль. – 2004. – Т. 8. – № 2. – С. 144–151.

*Кузьмин, Н. М.* Концентрирование следов элементов / Н. М. Кузьмин, Ю. А. Золотов. – М.: Наука, 1988. – 230 с.

*Лапина, Н. Н.* Полярный тип литогенеза / Н. Н. Лапина, Г. А. Значко-Яворский, Н. Н. Куликов [и др.] // Доклады совещания геологов на Международном геологическом конгрессе. XXIII сессия. Проблема № 8. – М.: Наука, 1968. – С. 212–217.

*Леви, К. Г.* Современная геодинамика Азии: карты, принципы составления, геодинамический

анализ / К. Г. Леви, С. И. Шерман, В. А. Саньков // Геотектоника. – 2009. – № 2. – С. 78–93.

*Леин, А. Ю.* Аутигенное карбонатообразование в океане / А. Ю. Леин // Литология и полезные ископаемые. – 2004. – № 1. – С. 3–35.

*Леин, А. Ю.* Аутигенные карбонаты на метановых сипах в Норвежском море: минералогия, геохимия, генезис / А. Ю. Леин, А. И. Горшков, Н. В. Пименов [и др.] // Литология и полезные ископаемые. – 2000. – № 4. – С. 339–354.

*Леин, А. Ю.* Биогеохимические процессы в Чукотском море / А. Ю. Леин, А. С. Саввичев, И. И. Русанов [и др.] // Литология и полезные ископаемые. – 2007. – № 3. – С. 247–266.

*Леин, А. Ю.* Биогеохимические процессы раннего диагенеза в современных отложениях морей Российской Арктики / А. Ю. Леин // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: материалы VII Всероссийского литологического совещания. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Т. 2. – С. 163–165.

*Лисицын, А. П.* Гидротермальные системы Мирового океана – поставка эндогенного вещества / А. П. Лисицын; под ред. А. П. Лисицына // Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. – М.: Наука, 1993. – С. 147–245.

*Лисицын, А. П.* Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. 2. Образование и распространение биогенных осадков / А. П. Лисицын, М. Е. Виноградов // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1982. – № 4. – С. 5–24.

*Лисицын, А. П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» / А. П. Лисицын // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 1. – С. 15–48.

*Лисицын, А. П.* Процессы современного осадкообразования в Беринговом море / А. П. Лисицын. – М.: Наука, 1966. – 155 с.

*Лисицын, А. П.* Терригенная седиментация, климатическая зональность и взаимодействие терригенного и биогенного материала в океанах / А. П. Лисицын // Литология и полезные ископаемые. – 1977. – № 6. – С. 3–22.

*Логвина, Е. А.* Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато / Е. А. Логвина, Т. В. Матвеева, В. А. Гладыш, А. А. Крылов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2011. – № 2 (88). – С. 45–54.

*Логвиненко, Н. В.* Современные донные осадки шельфа Чукотского моря / Н. В. Логвиненко, В. И. Огородников // Океанология. – 1980. – Т. 20. – Вып. 4. – С. 681–687.

Металлогенические зоны Тихоокеанского рудного пояса (объяснительная записка к Металлогенической карте Тихоокеанского рудного пояса масштаба 1 : 10 000 000) / Под ред. Е. А. Радкевич. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – 192 с. + карта.

Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане с 2007 г. / Под ред. И. Е. Фролова. – СПб.: ААНИИ, 2008. – 85 с.

*Огородников, В. И.* Органическое вещество в донных осадках шельфа Чукотского моря / В. И. Огородников, В. П. Русанов // Труды ААНИИ. – 1984. – Т. 368. – С. 53–57.

*Огородников, В. И.* Условия накопления и распределения аморфного кремнезема в донных осадках Чукотского моря / В. И. Огородников, В. П. Русанов // Океанология. – 1978. – Т. 18. – Вып. 6. – С. 1049–1052.

Океанографическая энциклопедия. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 632 с.

Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А. П. Лисицына, М. Е. Виноградова, Е. А. Романкевича. – М.: Научный мир, 2001. – 625 с.

Особенности формирования рельефа и современных осадков прибрежной зоны дальневосточных морей СССР. – М.: Наука, 1971. – 183 с.

*Павлидис, Ю. А.* Лавинная седиментация в Чукотском море / Ю. А. Павлидис, А. С. Ионин, В. С. Медведев // Литология и полезные ископаемые. – 1983. – № 6. – С. 70–78.

*Павлидис, Ю. А.* Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментационные зоны его шельфа / Ю. А. Павлидис // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. – М.: Наука, 1982. – С. 47–76.

*Патык-Кара, Н. Г.* Россыпные месторождения России и других стран СНГ / Н. Г. Патык-Кара, Б. И. Беневольский, Л. З. Быховский [и др.]. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.

*Петелин, В. П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков / В. П. Петелин. – М.: Наука, 1967. – 128 с.

*Петров, О. М.* Стратиграфия и фауна морских моллюсков четвертичных отложений Чукотского полуострова / О. М. Петров // Труды ГИН АН СССР. – Вып. 155. – М.: Наука, 1966. – 252 с.

*Пипко, И. И.* Карбонатные характеристики вод материкового склона Северного Ледовитого океана / И. И. Пипко, С. П. Пугач, И. П. Семилетов, А. Н. Салюк // ДАН. – 2011. – Т. 438. – № 5. – С. 699–704.

*Плахотник, А. Ф.* О водообмене Берингова моря / А. Ф. Плахотник // Труды ВНИРО. – 1962. – Т. 46. – С. 185–189.

*Покровский, О. С.* Окислы марганца как один из окислительно-восстановительных буферов природных вод / О. С. Покровский // Геохимия. – 1996. – № 4. – С. 338–344.

*Поляк, Б. Г.* Новейшая тектоно-магматическая активизация Колючинско-Мечигменской зоны Чукотского полуострова (по данным о составе газов и гидротерм) / Б. Г. Поляк, В. Ю. Лаврушин, А. Л. Чешко [и др.] // Геотектоника. – 2010. – № 6. – С. 99–110.

*Полякова, Е. И.* Арктические моря Евразии в позднем кайнозое / Е. И. Полякова. – М.: Научный мир, 1997. – 145 с.

*Полякова, Е. И.* Стратиграфия донных осадков и палеогеографические условия их накопления

в Чукотском море (по данным диатомового анализа) / Е. И. Полякова // Геология континентальной террасы окраинных и внутренних морей. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – С. 135–148.

*Романкевич, Е. А.* Геохимия органического вещества в океане / Е. А. Романкевич. – М.: Наука, 1977. – 256 с.

*Романкевич, Е. А.* Цикл углерода в арктических морях России / Е. А. Романкевич, А. А. Ветров. – М.: Наука, 2001. – 302 с.

Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология / Под ред. Д. А. Додина, В. С. Суркова. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. – 960 с.

*Саввичев, А. С.* Микробные процессы циклов углерода и серы в Чукотском море / А. С. Саввичев, И. И. Русанов, Н. В. Пименов [и др.] // Микробиология. – 2007. – Т. 76. – № 5. – С. 682–693.

*Савенко, В. С.* Биогенная седиментация, диагенез и генезис пелагических железомарганцевых конкреций / В. С. Савенко // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 276. – № 2. – С. 431–434.

*Саидова, Х. М.* Экология шельфовых сообществ фораминифер и палеосреда голоцена Берингова и Чукотского морей / Х. М. Саидова. – М.: Наука, 1994. – 94 с.

*Семенов, Ю. П.* О некоторых особенностях формирования донных отложений Восточно-Сибирского и Чукотского морей / Ю. П. Семенов // Антропогенный период в Арктике и Субарктике. Труды НИИГА. – Т. 143. – М.: Недра, 1965. – С. 350–352.

*Сенин, Б. В.* Тектоника арктической зоны перехода от континента к океану / Ю. В. Сенин, Э. В. Шипилов, А. Ю. Юнов. – Мурманск: Кн. изд-во, 1989. – 176 с.

*Сиренко, Б. И.* Необычное обилие макробентоса и тихоокеанские вселенцы в Чукотском море / И. Б. Сиренко, С. Ю. Гагаев // Биология моря. – 2007. – Т. 33. – № 6. – С. 399–407.

Справочник по литологии / Под ред. Н. Б. Вассоевича, В. Л. Либровича, Н. В. Логвиненко, В. И. Марченко. – М.: Недра, 1983. – 509 с.

*Страхов, Н. М.* Основы теории литогенеза. Т. 1 / Н. М. Страхов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 212 с.

*Страхов, Н. М.* Проблемы геохимии современного океанского литогенеза / Н. М. Страхов. – М.: Наука, 1976. – 299 с.

*Страхов, Н. М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 535 с.

*Стрекопытов, С. В.* К геохимии железистых стяжений Баренцева моря / С. В. Стрекопытов, А. В. Дубинин // Океанология. – 2001. – Т. 41. – № 3. – С. 386–393.

*Тарновский, А. А.* Некоторые геохимические особенности поверхностного слоя донных отложений Финского залива / А. А. Тарновский, Л. А. Лабзин // Северо-Запад Европейской части СССР. – Вып. 7. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. – С. 142–154.

*Тимофеев, В. Т.* Водные массы Арктического бассейна / В. Т. Тимофеев. – Л.:



Гидрометеиздат, 1960. – 191 с.

*Томпсон, М.* Руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно-связанной плазмой / М. Томпсон, Д. Н. Уолш. – М.: Недра, 1988. – 96 с.

*Федоров, П. И.* Новые данные о раннекайнозойском вулканизме Колючинско-Мечигменского грабена (Чукотский полуостров) / П. И. Федоров, В. Н. Смирнов // ДАН. – 2014. – Т. 458. – № 4. – С. 446–451.

*Флеров, И. Б.* Геологические предпосылки богатых россыпей золота на шельфе Чукотского моря / И. Б. Флеров, О. П. Дундо, Е. А. Гусев, В. Л. Сухорослов // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. – С. 165–166.

*Хаин, В. Е.* Седиментационные бассейны и перспективы нефтегазоносности шельфа Восточной Арктики / В. Е. Хаин, И. Д. Полякова // Океанология. – 2007. – Т. 47. – № 1. – 116–128.

*Холодов, В. Н.* О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов / В. Н. Холодов, Р. И. Недумов // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1991. – № 12. – С. 74–82.

*Холодов, В. Н.* О роли сероводородных бассейнов в осадочном рудообразовании / В. Н. Холодов // Литология и полезные ископаемые. – 2002. – № 5. – С. 451–473.

*Чайковская, Н. А.* Биометрия: курс лекций / Н. А. Чайковская. – Гродно: ГрГУ, 2012. – Ч. 1. – 56 с.

*Чешко, А. Л.* Первые данные об изотопном составе водорода и кислорода в термоминеральных водах Восточной Чукотки / А. Л. Чешко, Е. О. Дубинина, Е. А. Вакин [и др.] // ДАН. – 2004. – Т. 395. – № 5. – С. 676–680.

*Чугунный, Ю. Г.* Особенности состава, структуры и закономерности распространения железо-марганцевых конкреций Карибского моря / Ю. Г. Чугунный, В. Х. Геворкьян, В. И. Мельник, Д. П. Деменко // Рудные конкреции и конкреции рудоносных формаций: тезисы докладов III Всесоюзного семинара «Конкреции и конкреционный анализ». – Л.: ВСЕГЕИ, 1976. – С. 28–29.

*Чухров, Ф. В.* Ферроксигит – новая модификация FeOОН / Ф. В. Чухров, Б. Б. Звягин, А. И. Горшков [и др.] // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1976. – № 5. – С. 5–24.

*Шакиров, Р. Б.* Геохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря / Р. Б. Шакиров, А. В. Сорочинская, А. И. Обжиров, Н. В. Зарубина // Вестник ДВО РАН. – 2010. – № 6. – С. 101–108.

*Шипилов, Э. В.* Осадочный чехол и фундамент Чукотского моря по сейсмическим данным / Э. В. Шипилов, Б. В. Сенин, А. Ю. Юнов // Геотектоника. – 1989. – № 5. – С. 99–109.

*Шнюков, Е. Ф.* Железо-марганцевые конкреции морей СССР / Е. Ф. Шнюков, В. И. Огородников, К. С. Красовский // Геологический журнал. – 1987. – Т. 47. – № 1. – С. 32–43.

*Шуйский, Ю. Д.* Условия осадконакопления и основные закономерности формирования

гранулометрического состава терригенных осадков Чукотского моря / Ю. Д. Шуйский, В. И. Огородников // Литология и полезные ископаемые. – 1981. – № 2. – С. 11–25.

*Юдович, Я. Э.* Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия) / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.

*Юдович, Я. Э.* Геохимия черных сланцев / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Л.: Наука, 1988. – 210 с.

*Яшин, Д. С.* Геохимические признаки нефтегазоносности Восточно-Арктического шельфа России / Д. С. Яшин, Б. И. Ким // Геология нефти и газа. – 2007. – № 4. – С. 25–29.

*Andresen, K. J.* “Bulls-eye” pockmarks and polygonal faulting in the Lower Congo Basin: relative timing and implications for fluid expulsion during shallow burial / K. J. Andresen, M. Huuse // Marine Geology. – 2011. – Vol. 279. – P. 111–127.

*Astakhov, A. S.* Mineral-geochemical association in bottom sediments of the East China Sea / A. S. Astakhov, A. I. Beloglazov, A. V. Mozherovskiy // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. – 1995. – Vol. 6. No. 1. – P. 91–102.

*Carsola, A. J.* Recent marine sediments from Alaskan and Northwest Canadian Arctic / A. J. Carsola // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1954. – Vol. 38. – No. 7. – P. 1552–1586.

*Craig, H.* The measurement of oxygen isotope paleotemperatures / H. Craig; E. Tongiorgi (ed.) // Proceedings of the Spoleto Conference on Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. – Pisa: Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1965. – P. 161–182.

*Creager, J. S.* Pleistocene drainage patterns on the floor of the Chukchi Sea / J. S. Creager, D. A. McManus // Marine Geology. – 1965. – Vol. 3. – No. 4. – P. 279–290.

*Diets, R. S.* Sediments and topography of the Alaskan shelves / R. S. Diets, A. J. Carsola, E. C. Buffinaton, C. J. Shipek; R. L. Miller (ed.) // Papers in Marine Geology. Shepard Commemorative Volume. – N. Y.: MacMillan, 1964. – P. 241–256.

*Ellwood, M. J.* Variations in the Zn/Si record over the last interglacial glacial transition / M. J. Ellwood, K. A. Hunter // Paleoceanography. – 2000. – Vol. 15. – No. 5. – P. 506–514.

*Epstein, S.* Revised carbonate-water isotopic temperature scale / S. Epstein, R. Buchsbaum, H. A. Lowenstam, H. C. Urey // Geol. Soc. Am. Bull. – 1953. – Vol. 64. – P. 1315–1326.

*Feder, H. M.* The northeastern Chukchi Sea: benthos-environmental interactions / H. M. Feder, A. S. Naidu, S. C. Jewett [et al.] // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 1994. – Vol. 111. – P. 171–190.

*Fujita, K.* Seismicity of Chukotka, northeastern Russia / K. Fujita, K. G. Mackey, R. C. McCaleb [et al.] // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. – 2002. – Vol. 360. – P. 259–272.

*Grantz, A.* Geology of the continental margin of Alaska / A. Grants, S. D. May, P. E. Hart; A. Grantz, L. Johnson, J. F. Sweeny (eds.) // The Geology of North America. Vol. L. The Arctic Ocean Region. – The Geol. Soc. of America, 1990. – P. 257–288.

*Grebmeier, J. M.* Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic / J. M. Grebmeier, L. W. Cooper, H. M. Feder, B. I. Sirenko // *Progress in Oceanography*. – 2006. – Vol. 71. – No. 2–4. – P. 331–361.

*Gromet, L. P.* The “North American shale composite”: its compilation, major and trace element characteristics / L. P. Gromet, R. F. Dymek, L. A. Haskin, R. L. Korotev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – Vol. 48. – No. 12. – P. 2469–2482.

*Gusev, E. A.* Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: new results from shallow drilling and seismic-reflection profiling / E. A. Gusev, I. A. Andreeva, N. Y. Anikina // *Global and Planetary Change*. – 2009 – Vol. 68. – No. 1–2. – P. 115–131.

*Hustoft, S.* Three-dimensional seismic analysis of the morphology and spatial distribution of chimneys beneath the Nyegga pockmark field, offshore mid-Norway / S. Hustoft, S. Bünz, J. Mienert // *Basin Research*. – 2010. – Vol. 22. – P. 465–48.

*Ingri, J.* Rare earth abundance patterns in ferromanganese concretions from the Gulf of Bothnia and the Barents Sea / J. Ingri, C. Pontér // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1987. – Vol. 51. – No. 1. – P. 155–161.

*Judd, A.* Seabed Fluid Flow: the impact on geology, biology and the marine environment / A. Judd, M. Hovland. – London: Cambridge University Press, 2007. – 475 p.

*Keigwin, L.* Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea / L. Keigwin, J. Donnelly, M. Cook [et al.] // *Geology*. – 2006. – Vol. 34. – No. 10. – P. 861–864.

*Kindle, E. M.* Lacustrine concretions of manganese / E. M. Kindle // *Amer. J. Sci.* – 1932. – Ser. 5. – Vol. 24. – No. 144. – P. 496–504.

*Kolesov, G. M.* Neutron activation determination of noble metals in samples of terrestrial and cosmic origin using microfire assay concentration / G. M. Kolesov, D. Yu. Sapozhnikov // *Analyst*. – 1995. – Vol. 120. – No. 5. – P. 1461–1464.

*Manheim, F. T.* A geochemical profile in the Baltic Sea / F. T. Manheim // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1961. – Vol. 25. – No. 1. – P. 52–70.

*Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas* / Y. Herman (ed.). – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1974. – 397 p.

*Mayer, L. A.* Recent mapping and sampling on the Chukchi Borderland and Alpha/Medelev Ridge / L. A. Mayer, K. Brumley, A. Andronikov [et al.] // *EOS Transactions of the American Geophysical Union*. – Vol. 89 (53). – Fall Meet. Suppl., 2008. – Abstract C11C-0516.

*McCulloch, D. S.* Quaternary geology of the Alaskan shore of Chukchi Sea / D. S. McCulloch; D. M. Hopkins (ed.) // *The Bering Land Bridge*. – Stanford, California: Stanford Univ. Press, 1967. – P. 91–120.

*McMurtry, G. M.* Accumulation rates, chemical partitioning, and Q-mode factor analysis of metalliferous sediments from the North Fiji Basin / G. M. McMurtry, E. H. DeCarlo, Kee Hyun Kim //

Marine Geology. – 1991. – Vol. 98. – P. 271–295.

*Mortlock, R. A.* A simple method for the rapid determination of biogenic opal in the pelagic marine sediments / R. A. Mortlock, P. N. Froelich // Deep-Sea Research. – 1989. – Vol. 36. – No. 9. – P. 1415–1426.

*Naidu, A. S.* Sedimentation in the Beaufort Sea: a synthesis / A. S. Naidu; Y. Herman (ed.) // Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1974. – P. 173–190.

*Schubert, C. J.*  $^{13}\text{C}$  isotope depletion in ikaite crystals: evidence for methane release from the Siberian shelves / C. J. Schubert, D. Nürnberg, N. Scheele [et al.] // Geo-Marine Letters. – 1997. – Vol. 17. – No. 2. – P. 169–174.

*Sholupov, S.* Zeeman atomic spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples / S. Sholupov, S. Pogarev, V. Ryzhov [et al.] // Fuel Processing Technology. – 2004. – Vol. 85. – P. 473–488.

*Smith, P. S.* Areal Geology of Alaska / P. S. Smith // U. S. Geological Survey Professional Paper 192. – 1939. – 100 p.

*Stax, R.* Long-term changes in the accumulation of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java Plateau / R. Stax, R. Stein; W. H. Berger, L. W. Kroenke, L. W. Mayer [et al.] (eds.) // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. – College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1993. – Vol. 130. – P. 573–584.

*Suess, E.* Calcium carbonate hexahydrate from organic-rich sediments of the antarctic shelf: precursors of glendonites / E. Suess, W. Balzer, K.-F. Hesse [et al.] // Science. – 1982. – Vol. 216. – No. 4. – P. 1128–1131.

Tectonic Evolution of the Bering Shelf – Chukchi Sea – Arctic Margin and Adjacent Landmasses / E. L. Miller, A. Grantz, and S. L. Klemperer (eds.). – Special Paper 360. – Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2002. – 387 p.

The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / R. Stein, R. W. MacDonald (eds.). – Berlin: Springer, 2004. – 363 p.

*Thurston, D. K.* Geologic report for the Chukchi planning area / D. K. Thurston, L. A. Theiss // U. S. Minerals Management Service OCS Report 87-0046. – Anchorage, Alaska, 1987. – 193 p.

*Tyson, R. V.* Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview / R. V. Tyson, T. H. Pearson; R. V. Tyson, T. H. Pearson. (eds.) // Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. – Geol. Soc. London Spec. Publ., 1991. – No. 58. – P. 1–24.

*Usui, A.* Manganese microchimneys buried in the Central Pacific pelagic sediments: evidence for intraplate water circulation? / A. Usui, M. Bau, T. Yamazaki // Marine Geology. – 1997. – Vol. 141. – P. 269–285.

*Viscosi-Shirley, C.* Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the

Siberian-Arctic's Chukchi and Laptev shelves / C. Viscosi-Shirley, N. Pias, K. Mammone // *Continental Shelf Research*. – 2003. – Vol. 23. – P. 1201–1225.

*Wang, R.* Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean / R. Wang, W. Xiao, W. Li, Y. Sun // *Chinese Science Bulletin*. – 2010. – Vol. 55. – No. 4–5. – P. 432–440.

*Wang, R.* Late Quaternary paleoenvironmental changes revealed in multi-proxy records from the Chukchi Abyssal Plain, western Arctic Ocean / R. Wang, W. Xiao, C. März, Q. Li // *Global and Planetary Change*. – 2013. – Vol. 108. – P. 100–118.

*Wedepohl, K. H.* The composition of the continental crust / K. H. Wedepohl // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – Vol. 59. – P. 1217–1232.

*Weingartner, T.* Circulation on the north central Chukchi Sea shelf / T. Weingartner, K. Aagaard, R. Woodgate [et al.] // *Deep-Sea Research Part II*. – 2005. – Vol. 52. – P. 3150–3174.

## Приложение А (обязательное)

### Статистические параметры геохимической базы данных по осадкам Чукотского моря

На основе данных по химическому составу поверхностного (0–3 см) слоя донных осадков Чукотского моря, восточной части Восточно-Сибирского моря и примыкающей открытой части Северного Ледовитого океана (далее по тексту – осадки Чукотского моря), полученных при участии автора (большая часть) и литературных [Астахов и др., 2013а; Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003], сформирована макровыборка, состоящая из числовых значений содержания 34 химических элементов и биогенных компонентов (далее по тексту – элементы) более чем в 300 пробах осадка. В макровыборку добавлены также сведения о глубине в точке пробоотбора и содержании в осадках основных гранулометрических фракций. Статистические показатели исследуемых признаков (элементов), полученные на первом этапе обработки макровыборки, приведены в таблице А.1. Из макровыборки по каждому элементу были сформированы микровыборки (далее по тексту – выборки).

Таблица А.1 – Основные статистические параметры для выборок химических элементов и биогенных компонентов, гранулометрических фракций и глубины пробоотбора осадков Чукотского моря

Элемент/ компонент	N	$\bar{x}$	Me	$x_{\min}$	$x_{\max}$	R	s	Cv	As	Ex
Глубина пробоотбора, м										
H	334	177	49	16	3850	3834	589	333	5	27
Гранулометрический состав, %										
Ps	114	5,39	0,26	0	74,48	74,48	14,07	261,04	3,29	10,67
A	114	38,35	38,35	0,01	81,4	81,39	18,71	48,79	–0,07	–0,38
Pl	114	53,3	49,89	0	99,99	99,99	24,57	46,1	0	–0,7
Макроэлементы, %										
Si	249	30,7	30	21,78	46,3	24,52	4,05	13,19	0,75	0,96
Ti	195	0,348	0,35	0,122	0,491	0,369	0,068	19,54	–0,658	1,097
Al	249	6,1	6,2	1,46	9,58	8,12	1,44	23,61	–0,56	1,17
Fe	223	3,71	3,73	0,63	9,42	8,79	1,26	33,96	0,64	2,79
Mn	223	0,1011	0,03	0,0069	2,4508	2,4439	0,2534	250,6429	5,3496	37,481
Mg	237	1,3	1,34	0,15	2,85	2,7	0,4	30,77	0,02	1,31
Ca	196	1,33	1,12	0,32	10,1	9,78	0,94	70,68	5,33	40,94
K	163	1,75	1,75	0,46	2,7	2,24	0,37	21,14	–0,07	1,18

Продолжение таблицы А.1

Элемент/ компонент	N	$\bar{x}$	Me	$x_{\min}$	$x_{\max}$	R	s	Cv	As	Ex
Na	123	2,37	2,33	0,68	5,13	4,45	0,69	29,11	0,59	1,53
P	103	0,115	0,1	0,0336	0,3476	0,314	0,052	45,217	2,235	6,606
Биогенные компоненты, %										
SiO <sub>2</sub> аморф	72	5	4,6	0,2	13,5	13,3	3,5	70	0,6	-0,6
C <sub>орг</sub>	299	1,25	1,2	0,06	2,57	2,51	0,67	53,6	0,1	-1,12
Микроэлементы: Ba–Ag – г/т, Au–Hg – мг/т										
Ba	196	665,2	645,9	106,2	1055,2	949	132	19,8	0,2	1,8
Co	223	20,23	12,9	0,97	150,5	149,53	20,15	99,6	3,01	11,22
Cr	223	74,5	75,5	9,8	141	131,2	21,2	28,5	-0,1	0,5
Cu	223	50,85	29,35	1,45	290,54	289,09	46,9	92,23	1,81	4,18
Ni	223	33,84	28,88	0,15	100,63	100,48	21,27	62,85	1,32	1,15
Pb	196	12,83	11,69	1,88	102,4	100,52	7,82	60,95	7,77	87,22
Sr	237	181,94	178,55	73,15	475,38	402,23	38,44	21,13	2,39	15,72
V	223	118,65	118,1	20,36	276,8	256,44	40,03	33,74	0,12	0,4
Y	196	17,69	16,67	7,11	32,4	25,29	4,75	26,85	0,93	0,92
Yb	196	2,16	2,05	0,7	13	12,3	0,94	43,52	7,99	90,81
Zn	223	114,78	92,1	15,37	5251	5235,63	346,15	301,58	14,75	219,29
Zr	181	76,54	74,32	29,41	135,98	106,57	20,15	26,33	0,49	0,41
La	237	24,03	22,85	10,23	45,2	34,97	5,82	24,22	1,04	2,16
Mo	103	2,13	1,46	0,26	14,25	13,99	2,41	113,15	3,28	11,87
Cd	103	0,22	0,19	0,08	0,83	0,75	0,12	54,55	2,43	8,6
Ag	141	0,17	0,15	0,0492	1,02	0,9708	0,11	64,71	4,21	26,89
Au	21	4	2,5	0,6	13,9	13,3	3,3	82,5	1,5	2,2
Pt	21	40	39	12	106	94	21	53	1	3
Os	21	0,61	0,31	0,07	2,11	2,04	0,63	103,28	1,44	0,73
Ir	21	0,56	0,3	0,04	1,91	1,87	0,55	98,21	1,2	0,09
Ru	21	6,7	6,9	1,3	27,7	26,4	5,6	83,6	2,5	9
Hg	280	33	31	6	92	86	16	48	1	1

Примечание – N – количество вариантов в выборке,  $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение, Me – медиана,  $x_{\min}$  – варианта с минимальным значением,  $x_{\max}$  – варианта с максимальным значением, R – размах вариации, s – стандартное отклонение, Cv – коэффициент вариации, As – коэффициент асимметрии, Ex – коэффициент эксцесса. Ps – псаммитовая фракция, A – алевритовая фракция, Pl – пелитовая фракция.

Объем выборки (N). В первом столбце указано количество проб. По данному параметру элементы разбиваются на три группы:

- имеющие малые выборки (N = 21: Au, Pt, Os, Ir, Ru);
- имеющие средние выборки (60 < N < 150: Na, P, SiO<sub>2</sub>аморф, Mo, Ag, Cd);
- имеющие большие выборки (N > 150: все остальные элементы).

Структурные средние величины: среднее арифметическое ( $\bar{x}$ ), медиана (Me). Эти статистические характеристики позволяют наметить центр

распределения – цифровое значение, вокруг которого группируются все остальные варианты (в хорошо упорядоченных выборках среднее арифметическое и медиана совпадают или весьма близки). По величине данных параметров все рассматриваемые элементы можно разделить на три группы:

- среднее арифметическое и медиана совпадают ( $\bar{x} = Me$ : только K);
- среднее арифметическое и медиана очень близки ( $\bar{x}/Me \approx 1$ : Si, Ti, Al, Fe, Mg, K, Na, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>, Ba, Cr, Pb, Sr, V, Y, Yb, Zr, La, Pt, Ru, Hg);
- среднее арифметическое значительно превышает медиану ( $\bar{x}/Me > 1,1$ : Mn, Ca, P, Co, Cu, Ni, Zn, Mo, Au, Ag, Os, Ir, Cd).

Показатели вариации: размах вариации (R), стандартное отклонение (s), коэффициент вариации (Cv). Первый показатель является наиболее простым и представляет собой разницу между максимальной и минимальной вариантами. На его основе выделены группы элементов:

- слабоварьирующие (R < 10: Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K, Na, P, C<sub>орг</sub>, Ag, Os, Ir, Cd);
- со средней вариацией (10 < R < 50: Si, SiO<sub>2</sub>аморф, Y, Yb, La, Mo, Au, Ru);
- сильноварьирующие (R > 50: Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Zr, Pt, Hg).

На основе величины стандартного отклонения – оно позволяет оценить разброс значений относительно среднего арифметического – выделены три группы элементов:

- характеризующиеся скомпонованным распределением значений ( $s < \bar{x}/5$ : Si, Ti, Ba);
- с небольшим разбросом значений ( $s < \bar{x}/2$ : Al, Fe, Mg, K, Na, P, Cr, Sr, V, Y, Yb, Zr, La, Hg,);
- с большой вариацией значений ( $s \approx \bar{x}$ : Mn, Ca, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Mo, Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru, Cd).

По коэффициенту вариации – он дает возможность сравнить изменчивость признаков (элементов), выраженных в разных единицах, – выделены группы элементов:

- с небольшой вариацией содержаний (10 < Cv < 25: Si, Ti, Al, K, Ba, Sr, La);
- со средней вариацией содержаний (25 < Cv < 50: Fe, Mg, Na, P, Cr, V, Y, Yb, Zr, Hg);
- с большой вариацией содержаний (Cv > 50: Mn, Ca, SiO<sub>2</sub>аморф, C<sub>орг</sub>, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Mo, Au, Ag, Pt, Os, Ir, Ru, Cd).

Анализ величин статистических характеристик позволяет предположить, что распределение большинства элементов в осадках Чукотского моря (первая группа элементов) соответствует широко распространенной в природе закономерности: «в массе относительно однородных единиц, составляющих статистическую совокупность (выборку), большинство членов оказывается среднего или близкого к нему размера» [Кетле, 1911, с. 38–39]. На это указывают близкие значения среднего арифметического и медианы. Относительно



небольшая (вторая) группа элементов (Mn, Ca, P, Co, Cu, Ni, Zn, Mo, Au, Ag, Os, Ir, Cd) закономерности не соответствует (только по указанным параметрам). Последнее может быть вызвано как наличием экстремальных значений в выборках, объясняемых различными факторами (от аналитических ошибок до сугубо локальных проявлений каких-либо уникальных природных или техногенных условий), так и подчиненностью распределения содержаний данных элементов другим закономерностям. В любом случае для каждого элемента из первой и второй групп проведено построение вариационных рядов. Построение особенно важно для элементов второй группы, так как позволяет воссоздать закономерность априори в виде математической модели. Это дает возможность с определенной степенью вероятности и оцениваемой ошибкой предугадывать свойства изучаемого объекта на основе его свойств, в данном случае химических элементов. Ширина классового интервала рассчитана согласно методике, приведенной в работе [Чайковская, 2012]; число классов определено по формулам Стерджеса и Брукса [Брукс, Карузертс, 1963]. Результаты расчетов представлены в таблице А.2. Для большинства элементов характерна самая распространенная в природе закономерность [Кетле, 1911]: варианты накапливаются в центральных классах, и их численность постепенно убывает по мере удаления от центра ряда (таблица А.2). В наименьшей степени этому правилу соответствует распределение частот встречаемости вариант для  $C_{орг}$ , в наибольшей – для марганца, кальция, свинца, иттербия, цинка и серебра. Скопление или, наоборот, рассеяние вариант в классах, близких к среднему значению, оценивалось по коэффициенту эксцесса (см. таблицу А.1,  $E_x$ ); наличие в выборке вариант, резко превышающих среднее значение или значительно уступающих ему, – по коэффициенту асимметричности. Из таблицы А.1 видно, что наиболее упорядочены выборки кремния, ванадия, иттрия и циркония, что означает практически полное отсутствие в них вариант, резко превышающих среднее значение. Это подтверждается и очень близким к среднему значением медианы. Вариационные графики данных элементов являются наиболее симметричными. Абсолютное большинство элементов обладает положительными асимметричностью и эксцессом, что свидетельствует о накоплении вариант в пределах центральных классов и наличии в выборках значений, резко превышающих среднее (таблица А.2). Наибольшими положительными показателями коэффициента эксцесса и асимметричности отличаются марганец, кальций, фосфор, кобальт, свинец, стронций, иттербий, цинк, молибден, серебро и кадмий. Некоторые элементы, такие как титан, алюминий, калий и хром, обладают левосторонней асимметрией при положительном значении эксцесса, что указывает на присутствие в соответствующих выборках значений, значительно меньших среднего. Для выборок  $SiO_{2аморф}$  и  $C_{орг}$  характерна примерно равная встречаемость вариант во всех классах. В первом случае отрицательный эксцесс относительно невелик, частота встречаемости вариант в целом соответствует закономерности Кетле [Кетле, 1911].



## Продолжение таблицы А.2

Элемент/ компонент	K	$\lambda$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zn	12	436,3	202,78	233,52	669,82	1106,12	1542,42	1978,72	2415,02	2851,32	3287,62	3723,92	4160,22	4596,52
			222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zr	11	9,69	24,57	34,26	43,95	53,64	63,33	73,02	82,71	92,4	102,09	111,78	121,47	
			3	5	9	34	27	45	26	10	10	7	5	
La	12	2,91	8,78	11,69	14,6	17,51	20,42	23,33	26,24	29,15	32,06	34,97	37,88	40,79
			3	4	4	45	77	40	31	12	8	5	3	5
Mo	10	1,4	-0,44	0,96	2,36	3,76	5,16	6,56	7,96	9,36	10,76	12,16		
			32	44	18	2	0	3	0	1	1	2		
Au	5	2,7	-0,8	1,9	4,6	7,3	10							
			7	7	5	1	1							
Ag	11	0,09	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	
			23	81	27	4	3	1	1	0	0	0	1	
Pt	5	19	3	22	41	60	79							
			5	7	7	1	1							
Os	5	0,41	-0,14	0,27	0,68	1,09	1,5							
			10	5	2	1	3							
Ir	5	0,37	-0,15	0,22	0,59	0,96	1,33							
			8	7	0	3	3							
Ru	5	5,3	-1,4	3,9	9,2	14,5	19,8							
			7	10	3	0	1							
Cd	10	0,08	0,04	0,12	0,2	0,28	0,36	0,44	0,52	0,6	0,68	0,76		
			20	38	28	9	3	2	1	0	1	1		
Hg	12	7	3	10	17	24	31	38	45	52	59	66	73	80
			19	29	44	51	50	42	20	9	4	4	3	5

Примечание – K – число классов, рассчитанное по [Брукс, Карузерс, 1963],  $\lambda$  – ширина классового интервала, рассчитанная по [Чайковская, 2012]. В столбцах 1–12 для каждого элемента/компонента указаны границы соответствующего числа классов (первая строка) и количество вариантов, попадающих в соответствующий класс (вторая строка). Цветом выделены границы рядов, наиболее близкие к значению статистического центра.

Во втором случае (для  $C_{орг}$ ) вариационный ряд не имеет выраженной вершины, большинство классов характеризуется примерно одинаковым объемом.

Судя по результатам анализа основных статистических характеристик выборок элементов, а также их вариационных графиков, многие элементы имеют схожие черты варьирования своих числовых показателей – содержаний в осадках. Для проверки соответствия исследуемых вариант закону нормального распределения (ЗНР) использовался критерий Колмогорова – Смирнова. В случаях несоответствия ЗНР применялись определенные преобразования (логарифмирование выборок, подбор числовой константы  $\lambda$ ). Некоторые результаты преобразований, а также проверки соответствия ЗНР по критерию Колмогорова – Смирнова приведены в таблице А.3.

Таблица А.3 – Приведение выборок химических элементов и биогенных компонентов к нормальному или близкому к нему распределению с указанием формул приведения

Элемент/ компонент	Объем выборки	Формула приведения к закону нормального распределения (ЗНР)	$\lambda$	s	$E_x$	$A_s$	$D_{\text{эксп}}$	$D_{\text{крит}} (0,01)$
Si	249		-0,23	0,06	0,26	0,21	0,0603	0,1035
Ti	195		1,768	0,029	0,21	-0,05	0,0743	0,117
Al	249		1,62	4,21	0,7	0,1	0,0912	0,1035
Fe	223	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	0,74	0,91	1,76	0,14	0,0568	0,1094
Mn	223		-0,6282	5,7421	1,94	-0,13	0,1844	0,1094
Mg	237		1,04	0,4	1,39	0,08	0,0759	0,1061
Ca	196		-0,43	0,4	2,13	-0,12	0,0897	0,1167
K	163	без преобразования		0,37	1,18	-0,07	0,0682	0,1281
Na	123		0,61	0,49	0,98	0,097	0,0853	0,1476
P	103	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	-0,231	0,644	2,471	-0,18	0,1364	0,1614
SiO <sub>2</sub> аморф	72		0,3	1,3	-1,1	-0,12	0,1107	0,1934
C <sub>орг</sub>	299	без преобразования		0,67	-1,12	0,1	0,0668	0,0944
Ba	196	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	0,97	109,2	1,9	0,2	0,118	0,1167
Co	223		-0,17	0,43	3,42	-0,07	0,1744	0,1094
Cr	223	без преобразования		21,2	0,5	-0,1	0,0576	0,1094
Cu	223	$\log_{10}C_3$		0,39	-0,13	-0,097	0,1415	0,1094
Ni	223			0,34	12,2	-2,4	0,1378	0,1094
Pb	196	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	0,01	0,43	4,8	0,01	0,0662	0,1167
Sr	237		0,11	0,35	5,17	0,26	0,0815	0,1061
V	223	без преобразования		40,03	0,4	0,12	0,0313	0,1094
Y	196	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	-0,02	0,24	0,78	-0,002	0,0796	0,1167
Yb	196		-0,28	0,23	5,48	-0,15	0,0759	0,1167
Zn	223			0,22	20,5	1,7	0,1205	0,1094
Zr	181	$\log_{10}C_3$		0,12	0,85	-0,46	0,0787	0,1215
La	237			0,1	1,92	-0,16	0,0832	0,1061
Mo	103	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	-0,26	0,68	0,07	0,01	0,0535	0,1614
Au	21	$\log_{10}C_3$		0,37	-0,8	0,024	0,1367	0,3645
Ag	141		-0,33	0,88	0,93	-0,1	0,0814	0,1378
Pt	21		1	8	1	0,7	0,1121	0,3645
Os	21	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	-0,19	1,22	-0,72	-0,05	0,0999	0,3645
Ir	21		-0,07	1,14	-0,45	-0,09	0,135	0,3645
Ru	21		0,2	1,2	0,3	0,2	0,1904	0,3645
Cd	103	$\log_{10}C_3$		0,2	0,46	0,43	0,0476	0,1614
Hg	280	$(C_3^\lambda - 1)/\lambda$	0,32	2	-0,18	-0,016	0,059	0,0976

Примечание –  $C_3$  – содержание элемента/компонента,  $\lambda$  – числовая константа (использование  $\lambda$  в соответствующей формуле позволяет получить нормальное распределение или наиболее близкое к нему),  $s$  – стандартное отклонение в выборке после соответствующего преобразования,  $E_x$  – коэффициент эксцесса для выборки после соответствующего преобразования,  $A_s$  – коэффициент асимметрии для выборки после соответствующего преобразования,  $D_{\text{эксп}}$  – экспериментальное значение критерия Колмогорова – Смирнова для проверки соответствия распределения ЗНР,  $D_{\text{крит}} (0,01)$  – критическое (эталонное) значение критерия Колмогорова – Смирнова с уровнем ошибочности результата 1 % ( $p < 0,01$ ) для проверки соответствия распределения ЗНР.

Из таблицы видно, что только для калия,  $C_{орг}$ , хрома и ванадия исходные данные без каких-либо преобразований соответствуют ЗНР. Для меди, никеля и цинка при вычислении десятичного логарифма получено распределение, наиболее точно соответствующее ЗНР, для циркония, лантана, золота и кадмия – полностью соответствующее ЗНР. Для большинства оставшихся элементов понадобилась специальная трансформация исходных данных (выполнена программно с помощью функции Box-Cox Transformation, Statistica 8, StatSoft Inc., США). В результате трансформации и проведения соответствующих расчетов получена новая база данных, определены интервалы, наиболее полно характеризующие распределение вариант в выборках в соответствии с ЗНР (см. таблицу А.4).

Таблица А.4 – Границы вариационных рядов для выборок по химическим элементам и биогенным компонентам (их содержаниям) в осадках Чукотского моря

Элемент/ КОМПОНЕНТ	Классы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Si	21,16 1	22,42 6	23,77 12	25,22 14	26,78 41	28,46 58	30,27 48	32,23 25	34,35 22	36,64 15	39,12 4	41,82 3	
Ti	0,084 3	0,153 4	0,203 9	0,245 8	0,282 23	0,316 40	0,347 50	0,377 21	0,404 16	0,43 11	0,455 10		
Al	0,49 4	2,12 6	3,16 10	4,03 18	4,79 18	5,48 58	6,12 65	6,72 34	7,29 12	7,83 9	8,36 9	8,86 6	
Fe	0,41 2	0,87 7	1,4 7	1,98 27	2,62 34	3,3 58	4,02 56	4,77 19	5,55 10	6,36 0	7,21 0	8,07 3	
Mn	0,0065 1	0,0074 1	0,0085 3	0,0099 2	0,0118 4	0,0142 10	0,0177 20	0,0228 79	0,0308 64	0,0447 9	0,0725 5	0,1462 10	0,5272 15
Mg	0,02 2	0,27 4	0,51 17	0,74 26	0,97 27	1,19 68	1,42 57	1,64 25	1,86 7	2,08 2	2,3 0	2,52 2	
Ca	0,18 3	0,46 16	0,73 49	1 57	1,27 33	1,53 19	1,79 5	2,05 0	2,31 2	2,57 2	2,83 10		
Na	0,55 1	0,82 3	1,13 8	1,48 13	1,87 35	2,29 35	2,74 12	3,22 11	3,73 4	4,27 1			
P	0,031 2	0,037 1	0,045 0	0,055 3	0,067 13	0,083 44	0,105 16	0,133 14	0,171 7	0,224 3			
SiO <sub>2</sub> аморф	0,1 1	0,4 3	0,9 18	1,9 7	3,3 13	5,4 13	8 17						
$C_{орг}$	0 7	0,17 26	0,38 26	0,59 32	0,8 36	1,01 25	1,22 23	1,43 28	1,64 32	1,85 18	2,06 27	2,27 19	
Ba	65,3 1	147,6 0	231,4 1	316,2 1	401,6 5	487,6 28	574 70	660,8 53	748 12	835,4 14	923,1 11		
Co	0,84 1	1,12 0	1,5 1	2,06 0	2,86 1	4,05 4	5,88 18	8,73 98	13,36 45	21,13 25	34,74 15	59,81 15	
Cr	4,4 1	15,3 4	26,2 5	37,1 15	48 20	58,9 40	69,8 60	80,7 35	91,6 22	102,5 15	113,4 14	124,3 2	
Cu	0 23	13,49 94	37,58 35	61,67 29	85,76 19	109,85 10	133,94 4	158,03 5	182,12 1	206,21 1	230,3 1	254,39 1	
Ni	0 6	4,33 13	12,7 35	21,07 68	29,44 47	37,81 14	46,18 3	54,55 5	62,92 9	71,29 9	79,66 8	88,03 6	

## Продолжение таблицы А.4

Элемент/ компонент	Классы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Pb	1,56 1	2,26 1	3,28 2	4,74 10	6,84 45	9,85 77	14,18 51	20,38 8	29,25 0	41,91 0	59,98 1		
Sr	67,06 1	79,73 1	94,48 3	111,62 5	131,48 30	154,43 86	180,88 77	211,3 27	246,2 3	286,14 2	331,76 1	383,75 1	
V	9,68 2	31,05 10	52,42 19	73,79 27	95,16 48	116,53 51	137,9 31	159,27 22	180,64 11	202,01 1	223,38 0	244,75 1	
Y	6,65 1	7,61 2	8,71 1	9,99 5	11,45 9	13,13 43	15,07 55	17,3 26	19,87 30	22,84 9	26,26 15		
Yb	0,64 1	0,77 3	0,93 0	1,14 5	1,41 46	1,77 76	2,26 47	2,93 17	3,89 0	5,28 0	7,37 1		
Zn	8,27 2	22,48 10	36,69 13	50,9 20	65,11 25	79,32 44	93,53 42	107,74 34	121,95 13	136,16 12	150,37 4	164,58 4	
Zr	24,57 3	34,26 5	43,95 9	53,64 34	63,33 27	73,02 45	82,71 26	92,4 10	102,09 10	111,78 7	121,47 5		
La	8,78 3	11,69 4	14,6 4	17,51 45	20,42 77	23,33 40	26,24 31	29,15 12	32,06 8	34,97 5	37,88 3	40,79 5	
Mo	0,23 1	0,3 1	0,39 3	0,51 11	0,7 17	0,98 15	1,41 27	2,12 18	3,34 3	5,6 7			
Au	0 7	1,9 7	4,6 5	7,3 1	10 1								
Ag	0,04 4	0,05 5	0,07 5	0,08 17	0,1 22	0,12 37	0,16 30	0,21 11	0,28 4	0,38 4	0,54 2		
Pt	6 4	19 5	35 8	53 3	73 1								
Os	0,05 2	0,09 2	0,16 6	0,29 5	0,59 6								
Ir	0,03 1	0,06 1	0,11 6	0,24 7	0,53 6								
Ru	0,8 6	2 1	4,21 9	7,91 4	13,68 1								
Cd	0,04 20	0,12 38	0,2 28	0,28 9	0,36 3	0,44 2	0,52 1	0,6 0	0,68 1	0,76 1			
Hg	5 1	7 18	10 13	13 16	17 32	22 42	28 47	35 60	43 24	51 12	61 7	73 8	

*Примечание* – Выборки приведены к закону нормального распределения (или близкому к нему) с помощью соответствующих преобразований: см. таблицу А.3. В первой строке указаны границы классов, во второй – количество вариантов, попадающих в соответствующий класс.

Интервалы использовались для построения карт распределения химических элементов и биогенных компонентов в осадках Чукотского моря: см. главу 5, п. 5.1.