

**УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И МЕТАЛЛОВ
В ДОННЫХ ОСАДКАХ ЧУКОТСКОГО МОРЯ**

А.С. Астахов, Е.А. Гусев^{1, 2}, А.Н. Колесник, Р.Б. Шакиров

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

¹ *ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 2, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, факультет географии и геоэкологии,
199178, Санкт-Петербург, 10 линия ВО, 33-35, Россия*

Изучен химический состав донных осадков Чукотского и частично Восточно-Сибирского морей. На юге и западе Чукотского моря выявлена зона накопления осадков с высоким содержанием органического углерода, повышенным фоновым содержанием и аномалиями металлов-сульфофилов (Mo, Zn, Hg, Ag, Au), металлов группы железа (V, Ni, Co) и некоторых платиноидов (Ru, Pt). Эта зона приурочена к неотектонически активной системе рифтогенных прогибов, протягивающейся от Берингова пролива и Восточной Чукотки до материкового склона, где она граничит с кайнозойским рифтогенным бассейном Чарли Канадской котловины. Геохимические особенности обогащенных углеродом осадков свидетельствуют о формировании их в условиях недостатка кислорода, а в отдельных случаях — в субоксидных и аноксидных обстановках вблизи водных и газовых эндогенных источников. Высокое содержание углерода и определенных металлов дают возможность рассматривать тонкозернистые осадки рифтогенных прогибов Чукотского моря как возможный аналог некоторых типов древних высокоуглеродистых отложений, относимых к черносланцевым.

Осадконакопление, органический углерод, металлы, рифтогенез, черные сланцы, Чукотское море.

**CONDITIONS OF THE ACCUMULATION OF ORGANIC MATTER AND METALS
IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE CHUKCHI SEA**

A.S. Astakhov, E.A. Gusev, A.N. Kolesnik, and R.B. Shakirov

The chemical composition of bottom sediments in the Chukchi and, partly, East Siberian Seas was studied. In the south and west of the Chukchi Sea, a zone has been detected with the accumulation of sediments rich in organic carbon, an increased background content and anomalies of sulfophile metals (Mo, Zn, Hg, Ag, Au), iron group metals (V, Ni, Co), and some PGE (Ru, Pt). This zone is confined to the neotectonic active system of rift troughs extending from Bering Strait and the eastern Chukchi Peninsula to the continental slope, where it is bounded by the Cenozoic Charlie rift basin of the Canadian hollow. The geochemical features of the carbon-enriched sediments evidence that they formed under oxygen-deficient conditions and, sometimes, in suboxic and anoxic environments near endogenic water and gas sources. The high carbon and metal contents suggest that the fine-grained sediments in the rift troughs of the Chukchi Sea are a possible analog of some types of ancient highly carbonaceous sediments belonging to black shales.

Sedimentation, organic carbon, metals, rifting, black shales, Chukchi Sea

ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь тектонических процессов с возникновением относительно коротких событий океанской аноксии, сопровождающихся накоплением обогащенных органикой отложений (черносланцевых толщ), является одной из наиболее обсуждаемых в современной геологической литературе. В масштабах геологического времени эта взаимосвязь достаточно очевидна: во время эпох рифтогенеза с сопутствующим спрединговым, трапповым и островодужным вулканизмом проявлены и основные события океанской аноксии [Хаин, Полякова, 2010]. Главной причиной их возникновения предполагается увеличение

первичной биопродуктивности в связи с активизацией вулканической и гидротермальной деятельности. Большинство современных аноксидных бассейнов нормальной солености с устойчивым сероводородным заражением также локализованы в пределах активных геологических структур: рифтовые зоны, островные дуги, задуговые и внутренние бассейны альпийской складчатости [Холодов, 2002]. В последнее десятилетие появились исследования, указывающие на вулканизм как на один из факторов, обычно предшествующий появлению аноксидных бассейнов и накоплению черносланцевых толщ [Larson, Erba 1999; Jones, Jenkyns, 2001; Хаин, Полякова, 2010]. Важным считается наложение иных палеоокеанологических и палеоклиматических событий. Во многих последних работах указывается повышенное содержание углекислого газа в атмосфере, что сопровождается парниковым эффектом и, соответственно, увеличением температуры вод, приводящим к снижению уровня насыщения их кислородом [Larson, Erba, 1999]. Имеются предположения о формировании глобальных аноксидных событий прошлого в результате массовой дестабилизации газовых гидратов донных осадков [Hesselbo, 2000], что можно рассматривать как один из механизмов тектонической инициации аноксии. При изучении же конкретных черносланцевых отложений многими авторами в качестве основных факторов их формирования, вне зависимости от геодинамических условий, указываются аноксидность придонных вод [Jones, Jenkyns, 2001], интенсивное поступление органического вещества [Pedersen, Calvert, 1990] и низкая скорость осадконакопления [Юдович, Кетрис, 1988].

Установленные на примере древних отложений принципы геодинамического контроля формирования черносланцевых толщ требуют проверки на примере современных отложений. Возможность этого определяется наличием современных морских бассейнов, где проявлены указанные выше факторы геодинамического контроля образования аноксидных бассейнов. Сложность заключается в невозможности прямого сопоставления по большинству параметров вещественного состава отложений современных аноксидных бассейнов и черносланцевых толщ, так как для последних многие из минералого-геохимических характеристик определяются постседиментационными изменениями. Кроме того, современные аноксидные бассейны имеют ограниченные размеры и по темпам накопления органического вещества не могут быть сопоставимы с типичными черносланцевыми бассейнами, например мезозоя, когда специфические климатические условия (парниковый климат) резко отличались от современных. Это указывает на то, что в современных условиях могут быть выявлены конседиментационные аналоги только некоторых типов древних углеродистых отложений, сформировавшихся главным образом в зонах геодинамической активности. Тем не менее имеются примеры удачного сопоставления по некоторым параметрам обогащенных углеродом отложений древних и современных бассейнов [Tyson, Pearson, 1991; Brumsack, 2006; Астахов и др., 2010а].

Для изучения влияния указанных геологических процессов на накопление органического вещества и металлов в тонкозернистых отложениях современных тектонически обусловленных бассейнов, сопоставления с фоновыми отложениями и отложениями древних и современных аноксидных бассейнов нами выбрано Чукотское море (рис. 1). Здесь в пределах локальных впадин, сформированных в результате позднекайнозойской активизации грабен-рифтовой системы, выявлены осадки с высоким содержанием планктоногенного органического вещества [Grebmeier et al., 2006], обогащенные благородными металлами [Астахов и др., 2010а,б]. В придонных водах установлено проявление сезонного дефицита кислорода [Обзор..., 2008], осадки, наряду с органическим углеродом, обогащены биогенным кремнеземом [Астахов и др., 2010б]. По условиям формирования и некоторым геохимическим особенностям эти осадки ранее были сопоставлены с черносланцевыми пермско-триасовыми отложениями северо-запада России [Астахов и др., 2010а].

В работе использованы пробы поверхностных донных осадков, отобранные дночерпателями и грунтовыми трубками в рейсах НИС «Профессор Хромов» в 2009 г., НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2008 г., морского буксира «Шуя» в 2006 г. (рис. 2). Подготовка и анализ проб, а также обработка данных проводились в соответствии с ранее отработанной методикой [Астахов и др., 2013], результаты анализов представлены на сайте <http://chukchi-sea.poi.dvo.ru/tables.php>. Используются также ранее опубликованные данные по химическому составу осадков Чукотского моря [Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003; Астахов и др., 2010б, 2013].

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Геодинамический план и локализация проявлений современной геологической деятельности в Чукотском море в общих чертах контролируются наличием здесь зоны современного растяжения земной коры (см. рис. 1), наряду с двумя другими, выделяемыми на северо-востоке Азии (Лаптевоморская и Байкальская) [Леви и др., 2009]. Следствием этого является современная активизация грабен-рифтовой системы субмеридиональных и субширотных рифтогенных структур (см. рис. 1) сформированных в мезозое—раннем кайнозое [Шпилов и др., 1989; Поляк и др., 2010; Тимофеев и др., 2012]. В общем плане

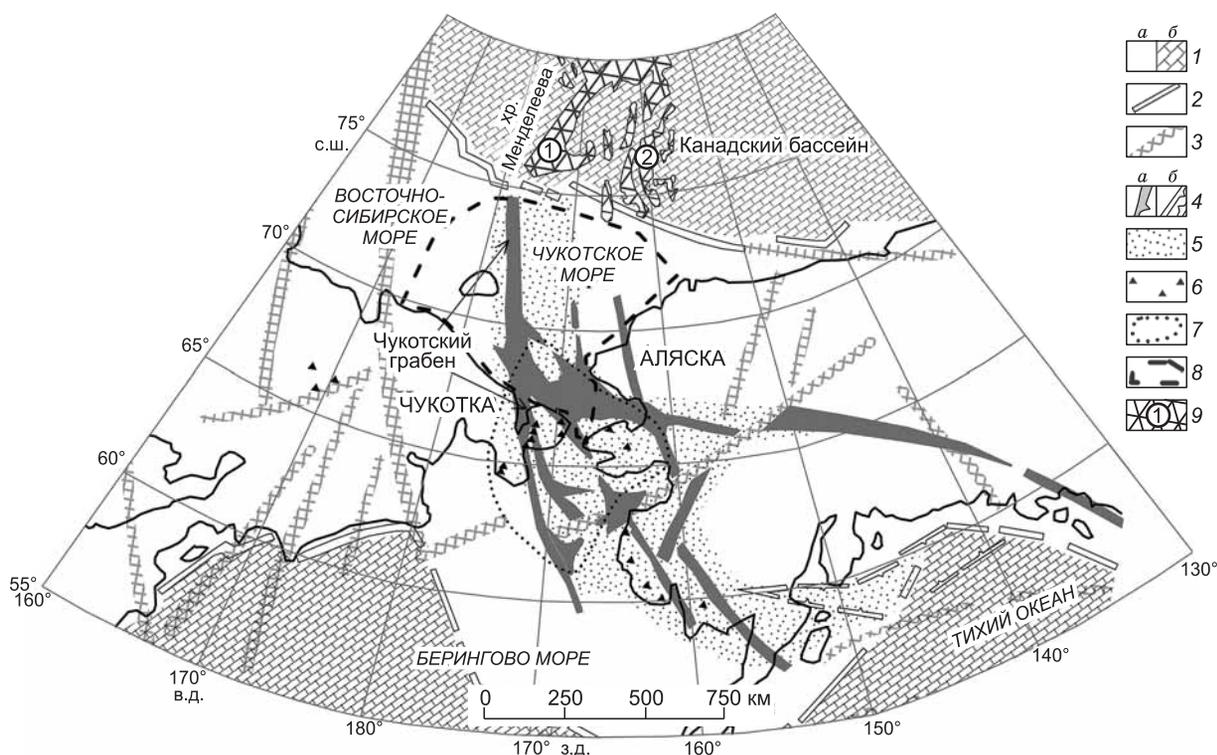


Рис. 1. Местоположение района работ и грабен-рифтовая система Чукотского моря в области взаимодействия Арктической и Тихоокеанской переходных зон [Шпилов и др., 1989].

1 — области с континентальной и субконтинентальной (а) и океанической и субокеанической (б) корой; 2 — континентальная флексура; 3 — крупнейшие пояса разломов сдвигораздвиговой природы; 4 — раздвиговые структуры (а — Чукотско-Берингоморская и Аляскинская системы грабен-рифтов, б — рифтогенная зона залива Аляска); 5 — области непосредственного взаимодействия (сдвига-отрыва) переходных зон; 6 — районы кайнозойского вулканизма вне пределов островодужных систем [Имаев и др., 2000; Поляк и др., 2010]; 7 — зона современного растяжения земной коры [Леви и др., 2009]; 8 — район исследований; 9 — кайнозойские рифтогенные бассейны [Хаин и др., 2009]: 1 — Чарли, 2 — Нортвинд.

это весьма напоминает систему пул-апарт бассейнов. Среди неотектонических структур этой системы наиболее известен «Чукотский грабен» [Шпилов и др., 1989; Геология..., 2002], протягивающийся от Восточной Чукотки на юге через желоб Геральда до бровки шельфа Чукотского моря на севере. Он отличается повышенной мощностью мел-кайнозойских отложений, и как часть грабен-рифтовой системы в неоген-четвертичное время претерпел активизацию, сопровождавшуюся базальтовым вулканизмом и гидротермальной деятельностью [Чешко и др., 2004; Поляк и др., 2010]. В изученной сухопутной части его на Восточной Чукотке (Колючинско-Мечигментская зона) известны позднекайнозойские вулканы и многочисленные гидротермальные источники с температурой излияющихся вод до 97 °С [Чешко и др., 2004; Смирнов, 2012]. Гидротермальные источники этой зоны отличаются от других на Чукотском полуострове по составу газов с аномальным количеством признаков содержания мантийных компонент [Поляк и др., 2010]. К ней же 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. По геофизическим данным, в составе осадочного чехла прогибов предполагается наличие вулканогенных образований [Шпилов и др., 1989], а на сейсмоакустических профилях в пределах банки Геральда фиксируются разрывные нарушения субмеридионального простирания, нарушающие новейший чехол [Gusev et al., 2009]. В качестве косвенных признаков необходимо отметить установленное в пределах отдельных структур грабен-рифтовой системы интенсивное поступление метана в поверхностные донные осадки, в иловые и морские воды [Геология..., 2002; Яшин, Ким, 2007], а также очень высокую скорость метаногенеза (до 4410 нл/дм³ сут) и сульфатредукции (до 2590 мкгS/дм³ сут) при относительно низком содержании орга-

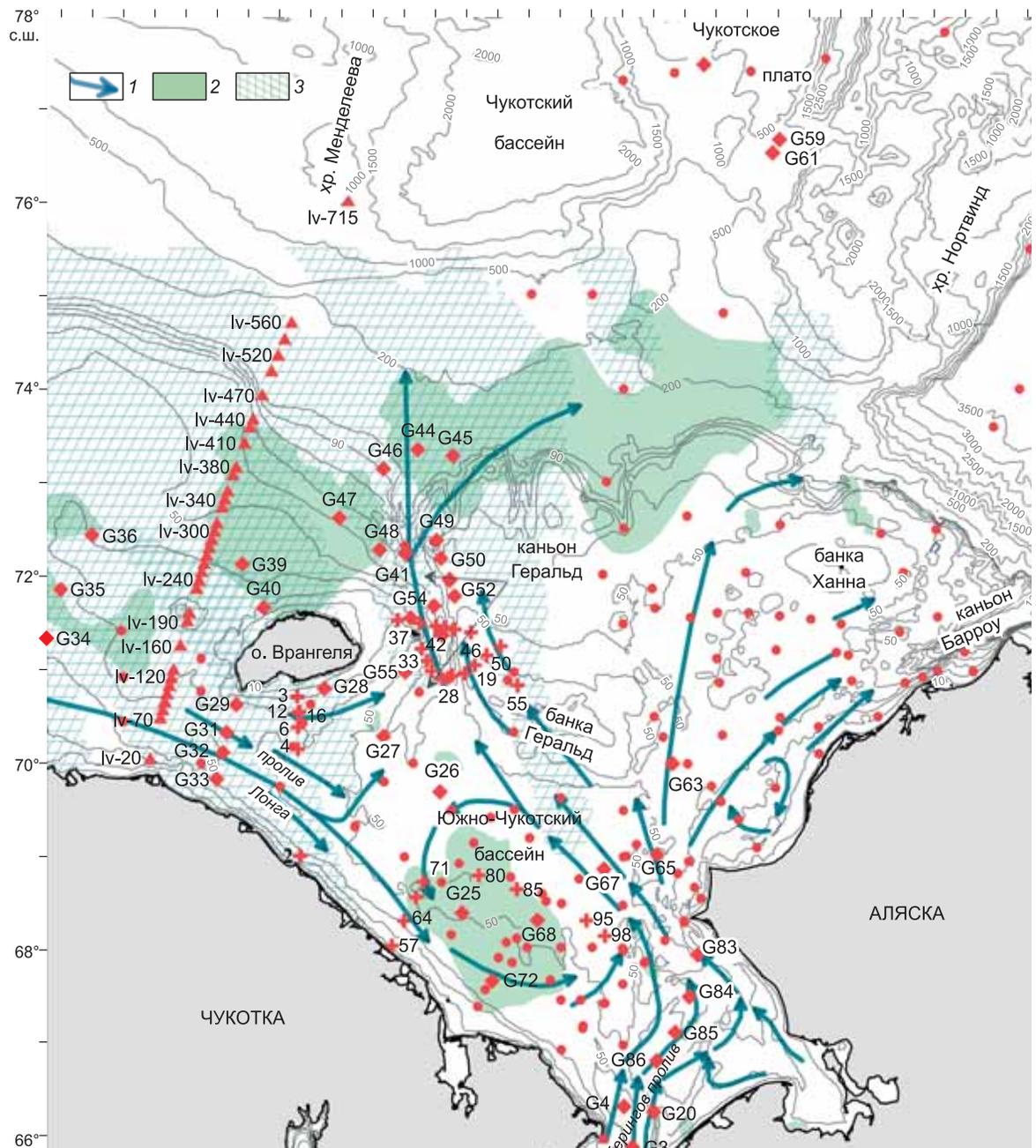


Рис. 2. Физико-географические условия района исследований и места отбора проб донных осадков (красные значки):

треугольники — станции НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 2008 г.; ромбы — станции м/б «Шуя» в 2006 г.; крестики — станции НИС «Профессор Хромов» 2009 г.; кружки — станции предыдущих исследователей [Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003; Астахов и др., 2010б; 2013]. 1 — направление преобладающих поверхностных течений [Grebmeier et al., 2006]; 2, 3 — распространение придонных вод с дефицитом кислорода (< 6 мл/л) [Обзор..., 2008]: 2 — летом, 3 — зимой.

нического углерода [Леин и др., 2007]. На севере грабен-рифтовая система Чукотского моря граничит с кайнозойским рифтогенным бассейном Чарли, хотя из-за слабой изученности региона их взаимоотношения неизвестны.

Геохимия современного осадконакопления в Чукотском море имеет много общих особенностей с другими морями арктического бассейна, обусловленных преимущественно терригенным его характером

в условиях относительно низкого поступления материала речного стока и невысокой скорости осадконакопления. Специфической особенностью Чукотского моря, в отличие от других краевых морей Северного Ледовитого океана, является локально высокая биопродуктивность фитопланктона, в результате чего в тонкозернистых осадках южной части моря отмечается высокое содержание биогенного кремнезема и на отдельных участках отмечена очень высокая продуктивность бентоса [Grebmeier et al., 2006]. Многие исследователи объясняют это проникновением относительно теплых тихоокеанских вод через Берингов пролив [Grebmeier et al., 2006]. Остатки диатомей, судя по содержанию аморфного кремнезема, составляют 5—12 % на всей выровненной поверхности Южно-Чукотской равнины. Там же установлены и достаточно высокие содержания органического углерода [Кошелева, Яшин, 1999; Астахов и др., 2013], причем, в отличие от Восточно-Сибирского моря, где в осадках преобладает терригенное органическое вещество, в Чукотском море преобладает морское планктоногенное [Grebmeier et al., 2006; Ветров и др., 2008].

Все указанное делает Чукотское море очень похожим на некоторые тектонически обусловленные черносланцевые бассейны прошлого с относительно низким содержанием органического вещества в осадках. Поэтому задачами данной работы явилось изучение распределения органического вещества и металлов относительно неотектонической позиции участков дна, выявление причин локального обогащения ими осадков, сопоставление с отложениями древних и современных аноксидных бассейнов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биогенные компоненты осадков. В распределении биогенных компонент донных осадков Чукотского моря проявляются специфические черты, характерные для всех арктических морей и только для этого моря. Первое — низкие содержания биогенных карбонатов, что типично для арктических шельфовых морей. Наши данные по содержанию неорганического углерода и имеющиеся литературные сведения по его распределению [Леин и др., 2007; Астахов и др., 2013] в поверхностном слое осадков свидетельствуют о почти полном отсутствии биогенного карбоната накопления в Чукотском море. В поверхностных осадках, а также в морских верхнечетвертичных отложениях, вскрытых трубками и скважинами [Леин и др., 2007; Gusev et al., 2009], содержание карбонатного (общего) углерода не превышает десятых долей процента. Продуктивность же бентосных и планктонных сообществ, в том числе организмов с карбонатными раковинами, относительно велика [Grebmeier et al., 2006]. Причиной этого несоответствия может быть растворение карбонатных биогенных остатков в придонных водах или на поверхности дна, что характерно для шельфов высокоширотных бассейнов.

В распределении органического углерода отчетливо выделяется зона повышенных содержаний в южной и западной частях Чукотского моря, которая может быть оконтурена изолинией 2 % $C_{орг}$ (рис. 3). Повышенные содержания выявлены также в полосе, которая направлена от Берингова пролива строго на север и в некоторых точках к северу от о. Врангеля. Имеющиеся данные по содержанию аморфного кремнезема в южной части моря [Астахов и др., 2010б, 2013] свидетельствуют о хорошей корреляции (0.79 для выборки 56 проб) между аморфным кремнеземом и органическим углеродом (рис. 4). Это предполагает поступление органического углерода в осадки совместно с остатками диатомовых водорослей, а высокие содержания $C_{орг}$ в осадках могут быть обусловлены либо увеличением первичной продуктивности в этом месте, либо сносом течениями биогенных остатков с окружающих участков дна. Тяжелый изотопный состав органического углерода из осадков этой зоны также свидетельствует о преобладающей роли планктогенного органического вещества в его формировании [Grebmeier et al., 2006; Ветров и др., 2008]. Содержания органического углерода более двух процентов отмечены также в ряде проб из Восточно-Сибирского моря, к северо-западу от о. Врангеля (см. рис. 3). Но эти участки отличаются легким изотопным составом органического углерода, что, по мнению А.А. Ветрова с соавторами [2008], указывает на преобладание терригенного органического вещества, поступающего при термоабразивном разрушении берегов материка, островов и подводных банок. Высокие содержания органического углерода (до 3.5 %) отмечены, например, в плиоцен-плейстоценовых аллювиальных и прибрежно-морских отложениях скважины, пробуренной вблизи о. Врангеля [Gusev et al., 2009].

Участки с высоким содержанием $C_{орг}$ и SiO_2 аморф. в осадках Чукотского моря очень хорошо совпадают с основными структурами грабен-рифтовой системы (см. рис. 1). Это может быть обусловлено различными факторами. Прежде всего, неотектонические структуры грабен-рифтовой системы определяют современный рельеф шельфа, наличие на нем впадин и долин, в том числе и существование самого Берингова пролива. По этим погруженным участкам дна и распространяются основные ветви течения из Берингова пролива, привнося теплые и богатые биогенами воды. Это увеличивает первичную продуктивность вод и, соответственно, поступление на дно органического углерода и аморфного кремнезема. В то же время пониженные участки дна, которыми являются указанные морфоструктуры, покрыты наиболее тонкозернистыми осадками, в которых скапливаются и органические остатки, в том числе и

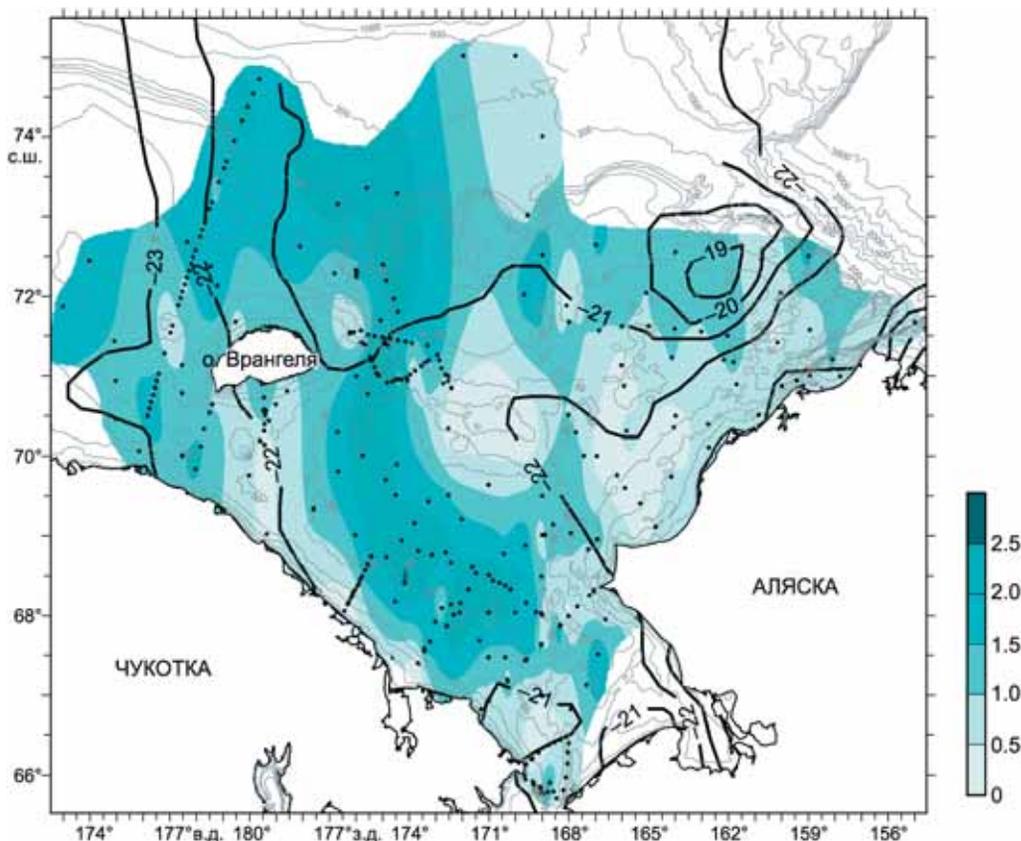


Рис. 3. Содержание органического углерода (%) в поверхностных осадках Чукотского моря и его изотопный состав (%_о, изолинии), по [Grebmeier et al., 2006; Ветров и др., 2008].

Точками обозначены места отбора проб осадков.

сносимые с окружающих возвышенных участков дна. В целом для района проявляется значимая положительная корреляция между содержаниями фракций < 0.01 мм и органического углерода, но разброс точек (см. рис. 4) очень велик, что свидетельствует о влиянии на накопление органического углерода и других процессов.

Одним из таких факторов может быть влияние эндогенных флюидов, поступающих из земной коры в донные осадки и придонные воды в зонах активных разломов. Они могут увеличить первичную продуктивность за счет поставки кремния, фосфора, железа и других элементов, участвующих в биохимических процессах планктона, а также увеличить продуктивность микро- и макробентоса. В указанных морфоструктурах отмечены интенсивная микробная деятельность [Леин и др., 2007; Иванов и др., 2010] и существуют участки с очень высокой продуктивностью макробентоса [Grebmeier et al., 2006].

Таким образом, формирование высоких содержаний органического углерода в донных осадках относительно узкой зоны, совпадающей с некоторыми структурами грабен-рифтовой системы, определяется несколькими причинами: повышенная первичная биопродуктивность из-за поступления богатых биогенами тихоокеанских вод; наличие замкнутых котловин и ложбин на шельфе, куда сносится тонкозернистый осадочный материал, в том числе остатки планктона; наличие эндогенных водных и газовых источников, активизирующих продуктивность бентосных и планктонных организмов. В самой западной части Чукотского и в Восточно-Сибирском морях накапливается преимущественно аллохтонное органическое вещество, поступающее с выносами рек или из эродируемых на побережье или морском дне более древних четвертичных отложений (см. рис. 3).

Общий химический состав осадков. По результатам полевого описания и изучения микроскопических препаратов все пробы донных осадков можно отнести к терригенным с незначительной примесью биогенного материала. По гранулометрическому составу они могут быть подразделены на разности от крупнозернистых песков до пелитов. Распределение их типов по площади в общем виде соответству-

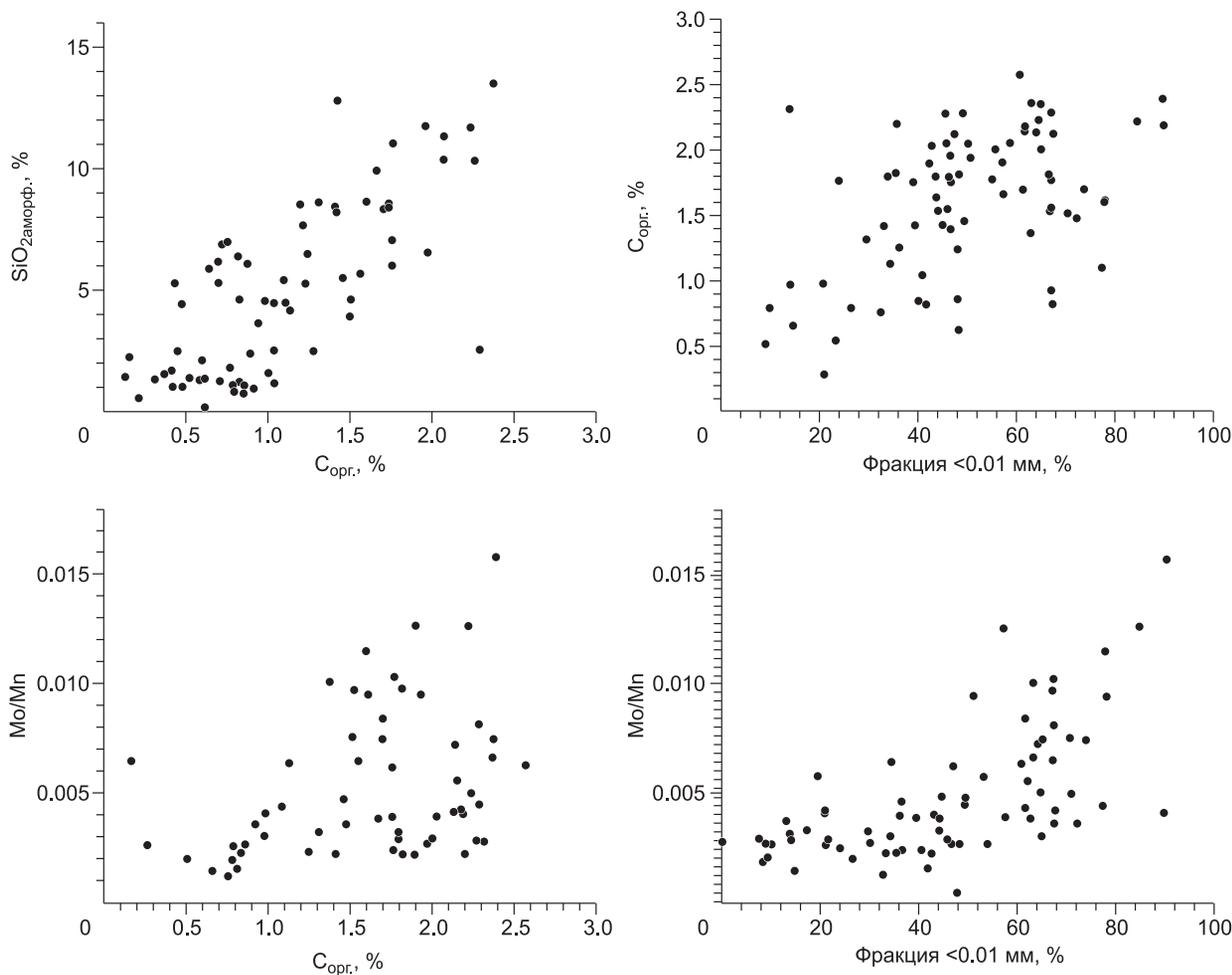


Рис. 4. Зависимость содержания органического углерода ($C_{орг}$) от содержаний аморфного (биогенного) кремнезема ($SiO_{2аморф.}$), пелитовой фракции (< 0.01 мм) и значения модуля Mo/Mn для донных осадков Чукотского моря.

ет имеющимся картам донных осадков [Кошелева, Яшин, 1999]. Пески распространены на прибрежном шельфе и на банках Геральд и Ханна. Пелитовые глинистые осадки покрывают внешний шельф, материковый склон и всю глубоководную часть изученного района. Значительную часть шельфа покрывают смешанные осадки преимущественно алевритового состава с примесью как тонкозернистого глинистого материала, так и песка, гравия и гальки ледового разноса.

Большая часть шельфа Чукотского и Восточно-Сибирского морей покрыта восстановленными серыми, темно-серыми или черными осадками. Наиболее темноокрашенные разности встречены в желобе Геральда и почти на всех станциях Восточно-Сибирского моря. Здесь же на многих станциях в осадках отмечен запах сероводорода и уплотненные комки осадков черного цвета с большим количеством аморфных сульфидов железа (гидротроилит). Окисленные коричневые и бурые осадки, характерные для всей глубоководной части Северного Ледовитого океана, появляются лишь в районе бровки шельфа.

Средние содержания химических элементов и статистические параметры их распределения приведены в таблице. По сравнению со средним составом земной коры [Wedepohl et al., 1995] осадки Чукотского моря обогащены Ag-Mo-Zn-P-V-Ba-Si. При сопоставлении со средним содержанием в глинах и сланцах проявляется также резкое обогащение осадков золотом. В то же время по отношению к фоновым концентрациям в древних черносланцевых толщах [Юдович, Кетрис, 1988, табл. 5] осадки Чукотского моря значительно обеднены золотом, хотя по содержаниям большинства изученных макро- и микроэлементов (Mn, P, Co, Cr, V, Cu, Zn, Pb, Sr, Yb, Y, La, Ti, Zr) они соответствуют им. Средние содержания же Mo, Ag, Cd, Ni в осадках Чукотского моря оказались несколько меньше, чем нижний предел фоновых содержаний в древних черносланцевых толщах.

Средние содержания химических элементов в донных осадках Чукотского моря, статистические параметры их распределения и коэффициенты концентрации (k_k) в сопоставлении с кларковыми содержаниями (жирным шрифтом выделены)

Элемент	Ед. изм.	Содержание				Среднее для осадочных пород [Виноградов, 1962]		Среднее для земной коры [Wedepohl, 1995]	
		макс.	мин.	среднее	ст. откл. (δ)	содержание	k_k	содержание	k_k
Si	%	46.30	24.99	31.43	3.67	23.8	1.32	28.80	1.09
Ti	»	0.49	0.14	0.34	0.06	0.45	0.76	0.40	0.86
Al	»	8.98	1.60	5.80	1.26	10.45	0.56	7.96	0.73
Fe	»	9.42	0.70	3.58	1.23	3.33	1.07	4.32	0.83
Mn	»	2.45	0.01	0.07	0.23	0.067	0.97	0.07	0.91
Mg	»	2.80	0.30	1.26	0.35	1.34	0.94	2.20	0.57
Ca	»	10.1	0.44	1.23	0.82	2.53	0.48	3.85	0.32
K	»	2.66	0.98	1.71	0.33	2.28	0.75	2.14	0.80
Na	»	2.99	1.05	2.09**	0.45	0.66	3.17	2.36	0.89
P	»	0.35	0.04	0.11	0.05	0.08	1.40	0.08	1.42
SiO ₂ заморф.	»	13.52	0.20	5.97	3.33	—	—	—	—
C _{орг.}	»	2.57	0.06	1.25	0.63	—	—	—	—
Ba	10 ⁻⁴ %	1055	106	666	135	800	0.83	584	1.14
Cd	»	0.83	0.08	0.21	0.13	0.13	1.62	0.1	2.10
Co	»	151	1	17	16	20	0.86	24	0.71
Cr	»	141	10	74	21	100	0.74	126	0.58
Cu	»	291	1	53	50	57	0.93	25	2.12
Ni	»	101	0.2	30	18	95	0.32	56	0.54
Pb	»	102	2	12	9	20	0.58	15	0.78
Sr	»	475	101	182	38	450	0.41	333	0.55
V	»	277	31	113	38	130	0.87	98	1.16
Y	»	31	8	17	4	30	0.56	24	0.71
Yb	»	13	1	2	1	3	0.70	2	1.05
Zn	»	186	20	88	31	80	1.10	65	1.36
Zr	»	134	29	73	17	200	0.37	203	0.36
La	»	37	10	23	4	40	0.57	30	0.76
Mo	»	10	0.5	2	2	2	0.91	1.1	1.66
Ag*	»	1.57	0.05	0.17	0.11	0.1	1.70	0.07	2.57
Au*	10 ⁻⁷ %	14	1	4	3	1	4.01	2.5	1.60
Pt*	»	106	12	40	22	—	—	—	—
Os*	»	2.11	0.07	0.61	0.65	—	—	—	—
Ir*	»	1.91	0.04	0.56	0.57	—	—	—	—
Ru*	»	28.0	1.3	6.7	5.7	—	—	—	—
Hg	»	90	6	30	14	400	0.07	10	3.00

* По данным [Астахов и др., 2010б].

** Значения завышены из-за большой водонасыщенности илов.

Для обобщения полученных данных по химическому составу, содержанию органического углерода и гранулометрии осадков была выполнена статистическая обработка их с использованием пакета стандартных программ STATISTICA-8: корреляционный, R -факторный (рис. 5) и Q -факторный анализы. Результаты их применялись для обоснования взаимоотношений между металлами и их группами, а также с литологическими особенностями осадков.

Анализ полученных данных в первую очередь подтверждает известную для морского терригенного осадконакопления и подтвержденную ранее для Чукотского моря [Viscosi-Shirley et al., 2003; Астахов

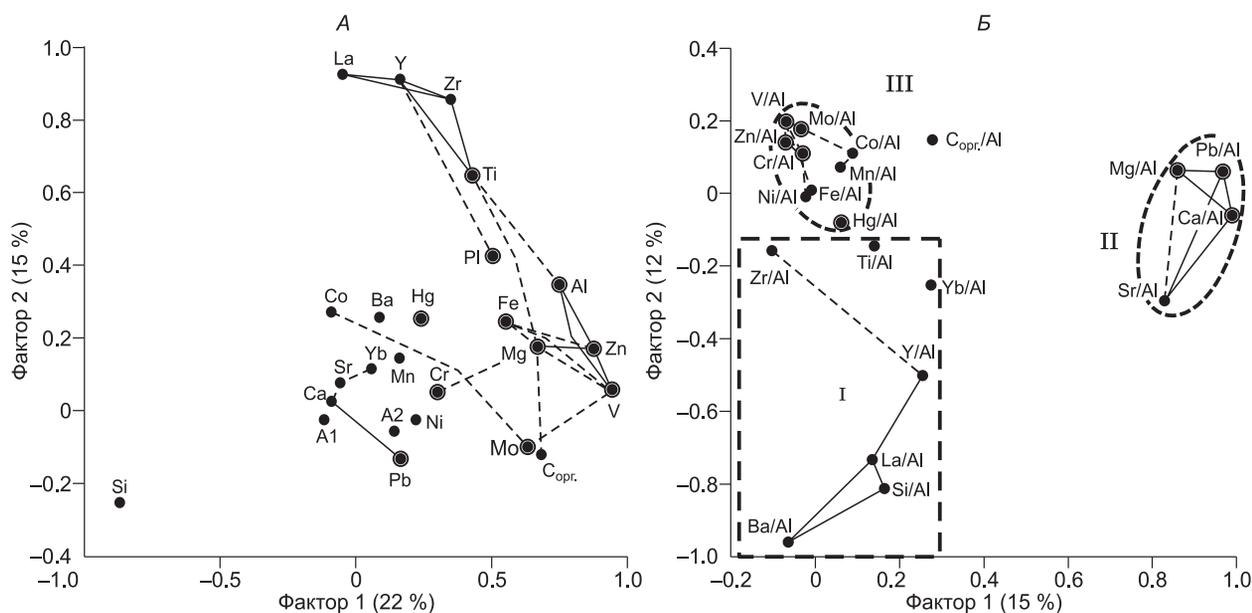


Рис. 5. Результаты R-факторного анализа с вращением веримакс химического состава проб Чукотского моря:

диаграммы в пространстве 1-го и 2-го R-факторов для содержаний элементов и гранулометрических фракций (А) и нормированных по алюминию содержаний химических элементов (Б). Кругами выделены элементы, имеющие значимую положительную корреляцию с содержанием органического углерода или $C_{орг.}/Al$, линии — наиболее значимые корреляционные связи (сплошная — > 0.7 , штриховая — $0.6-0.7$). I—III — полиэлементные ассоциации.

и др., 2008, 2013] зависимость химического состава осадков от их гранулометрии. Гранулометрический состав отражает главным образом минералогию осадков — соотношение глинистой (пелитовой) и обломочной (песчано-алевритовой) составляющих терригенных отложений. По высокому содержанию кремния (рис. 6) хорошо выделяются участки распространения песчаных и песчано-алевритовых осадков. Они сложены обломочным терригенным материалом, в котором основную часть составляет кварц. Это также демонстрируется положительной корреляцией (0.26) кремния с содержанием крупноалевритовой фракции и отрицательной с содержанием пелитовых и мелкоалевритовой фракций осадков. На диаграмме в пространстве 1-го и 2-го R-факторов кварц обособляется отдельно от всех других химических элементов (см. рис. 5, А).

В обогащении осадков алюминием, магнием и, частично, железом и калием отмечается зависимость с содержанием пелитового (глинистого) материала в осадках, что обычно для терригенного осадконакопления [Astakhov et al., 1995; Viscosi-Shirley et al., 2003]. Указанные элементы являются минералообразующими в гидрослюдах (Al, K), хлорите, каолините (Al), смектитах (Fe, Mg). В распределении марганца и, частично, железа (см. рис. 6) сказывается накопление аутигенных минералов (сульфидов, оксидов) железа и марганца в тонкозернистых осадках районов с активными геологическими условиями [Астахов и др., 2008, 2010б].

Вариации содержаний кальция в осадках определяются, прежде всего, примесью биогенного карбоната. Судя по корреляции их с мелкоалевритовой фракцией осадков, она представлена остатками раковин фораминифер, что характерно и для глубоководных районов Северного Ледовитого океана [Астахов и др., 2013]. Обогащение осадков кальцием (см. рис. 6) отмечено также вблизи Берингова пролива, куда поступают относительно теплые и богатые биогенными компонентами тихоокеанские воды (см. рис. 2).

Многие микроэлементы (Co, Cr, Pb, V, Y, Yb, Zn, Zr, Mo), судя по результатам корреляционного и факторного анализов (см. рис. 4), также накапливаются в тонкозернистых осадках, что характерно для терригенных отложений, содержащих возможные компоненты-концентраторы: глинистые минералы, органическое вещество, гидроксиды железа и марганца, тонкодисперсные сульфиды железа [McMurtry et al., 1991; Astakhov et al., 1995]. Распределение некоторых микроэлементов (Sr, Cd, Pb), накапливающихся в мелкоалевритовой фракции, так же как кальций, определяется примесью биогенных карбонатов. Выделяется группа микроэлементов (Cu, Ni, La, Ag, Co), а также Au и Pt [Астахов и др., 2010б], которые, так же как марганец, не коррелируют с содержаниями гранулометрических фракций и органи-

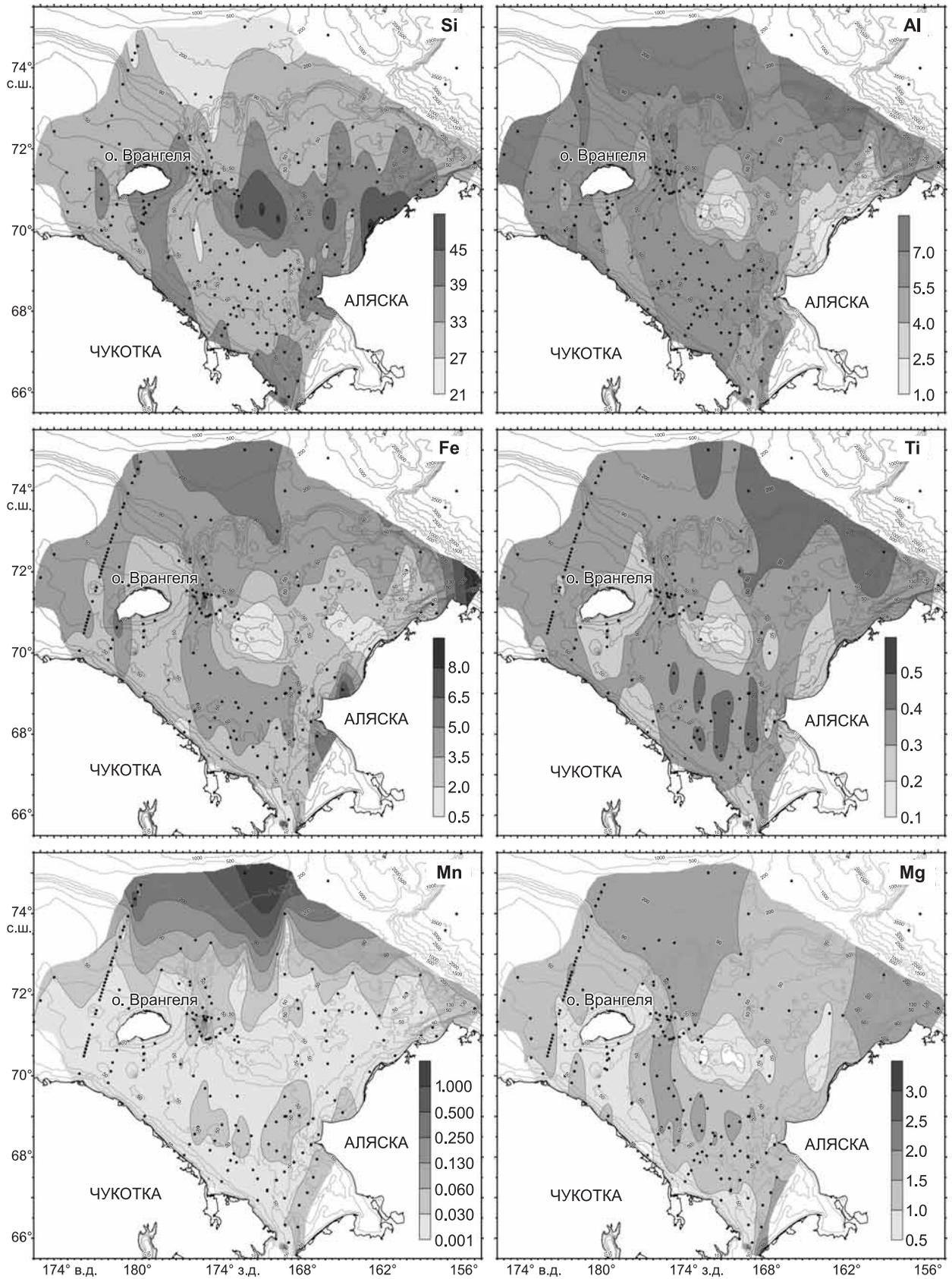


Рис. 6. Содержания (%) макроэлементов в донных осадках Чукотского моря.

Точки — места отбора проб осадков.

ческого углерода. Большие содержания их в тонкозернистых осадках отдельных участков ранее объяснялись специфическими локальными гидрохимическими условиями [Астахов и др., 2008, 2010a].

Полиэлементные геохимические ассоциации. Результаты факторного анализа иллюстрируют ранее указанную зависимость содержаний многих макро- и микроэлементов от гранулометрического состава осадков. На диаграмме (см. рис. 5, А) выделяются три группы элементов, концентрирующиеся в различных гранулометрических типах осадков и коррелирующие с определенными гранулометрическими фракциями. В этом же направлении располагаются и точки гранулометрических фракций по уменьшению крупности: крупный алеврит—мелкий алеврит—пелит. Отдельно обособляется кремний как типичный элемент песчаных осадков, имеющий значимую положительную корреляцию только с крупноалевритовой фракцией. Большая группа элементов, обогащающих тонкозернистые осадки, обособляется в верхней и правой частях диаграмм (большие положительные значения 1-го и 2-го факторов). Они имеют между собой хорошие корреляционные связи и значимую положительную корреляцию с содержанием пелитовой фракции. Условно эта группа может быть подразделена на две полиэлементные ассоциации, характерные для обломочной (Ti-Y-Yb-Zr-La) и глинисто-аутигенной (Al-Mg-Fe-Zn-V-Mo- $C_{орг.}$) компонент пелитовой фракции. Выделяется также группа элементов с близкими к нулю значениями 1-го и 2-го факторов, включающая элементы, коррелирующие с содержанием мелкоалевритовой фракции (Ca, Sr), не имеющие корреляции с гранулометрическими фракциями (Mn, Ni) и коррелирующие с содержанием пелитовой фракции, но парагенетически тесно связанные с другими элементами этой группы (Mn-Co-Cr-Ni; Ca-Sr-Pb в биогенных карбонатах).

Для устранения различий в химическом составе, связанных с преобладанием глинистого или обломочного терригенного материала и проявляющихся через их гранулометрический состав, было использовано нормирование по алюминию, часто применяемое при геохимических исследованиях осадочных толщ [McKay, Pedersen, 2008]. Для матрицы, включающей отношения содержания элементов к содержанию алюминия в каждой пробе, был выполнен корреляционный и R-факторный анализы. В общем виде эти результаты приведены на рис. 5, Б. На диаграмме выделяются три полиэлементные ассоциации, в которых химические элементы связаны практически линейными или значимыми корреляционными связями, и определенной литохимической принадлежностью. Ассоциация I (Si-La-Ba-Y-Zr-Ti-Yb) обусловлена вариациями состава терригенного материала осадков, ассоциация II (Ca-Mg-Sr-Pb) определяется присутствием в осадке биогенных карбонатов.

Наибольший интерес для наших построений представляет ассоциация III, включающая железо, марганец и ряд микроэлементов. Она определяется наличием в осадках минералов (оксиды или сульфиды) железа и марганца, которые накапливают определенные микроэлементы. Так как значительная часть железа и марганца находится в осадке в составе обломочных и глинистых силикатов, наиболее тесные корреляционные связи в этой ассоциации характерны для ванадия и элементов сульфобфилов V-Zn-Mo. Железо и марганец коррелируют с ними, между собой и с органическим углеродом значительно хуже (см. рис. 5, Б). Органический углерод ($C_{орг.}/Al$) не входит ни в одну из указанных ассоциаций, так как имеет значимые положительные корреляционные связи как с элементами ассоциации II, так и с элементами ассоциации III (см. рис. 5, Б). Для элементов биогенных карбонатов (в данном случае Ca, Mg, Sr, Pb) корреляция с органическим углеродом вполне очевидна, так как все они поступают в осадки совместно в составе биогенных остатков планктонных организмов. Корреляция $C_{орг.}$ с элементами ассоциации III (Hg, V, Mo, Zn, Cr) требует дополнительных разъяснений.

Считается, что все эти элементы осаждаются из водной среды гидроксидами железа, марганца или органическим веществом. Скорость накопления их во многом зависит от концентрации металлов в воде, соответственно, они могут обогащать донные осадки в районах гидротермальных источников и в других специфических гидрохимических условиях, где по разным причинам образуются их повышенные концентрации. При фоновых содержаниях в морской воде поведение их различается. Считается, что ртуть и цинк осаждаются из водной толщи преимущественно планктогенным органическим веществом, в том числе накапливается в донных осадках водных бассейнов совместно с остатками диатомовых водорослей [Ellwood, Hunter, 2000]. Это и определяет выявленную корреляцию их с органическим веществом в донных осадках Чукотского моря. Интенсивное накопление ванадия в современных и древних морских бассейнах обычно характерно для аноксидных условий и особенно для бассейнов с сероводородным заражением [Холодов, Недумов, 1991; Холодов, 2002]. В осадках ванадий накапливается в основном в трехвалентной форме. Вместе с ним концентрируются элементы, обладающие близкими геохимическими свойствами: молибден, никель, хром, кобальт, серебро.

Возможная аноксия и роль геодинамических условий. Имеющиеся данные по гидрохимии придонных вод (см. рис. 2, А) свидетельствуют, что на фоне общего для Северного Ледовитого океана высокого содержания кислорода в придонных водах в Чукотском море существуют участки с его сезонным либо круглогодичным дефицитом [Обзор..., 2008]. Измеренные содержания кислорода на этих участках достаточно высоки (4—6 нл/л), что намного больше, чем в типичных аноксидных или даже

субоксидных условиях [Tyson, Pearson, 1991], но для Северного Ледовитого океана с низкими температурами вод и, соответственно, большой величиной насыщения кислородом, они минимальны. Можно предполагать, что на ограниченных участках при наложении дополнительных факторов в пределах этих зон возникают и аноксидные условия. При таких же фоновых содержаниях в придонных водах залива Буор-Хая моря Лаптевых существуют аноксия и сероводородные обстановки [Обзор..., 2008], что, скорее всего, стимулируется аномально высокими потоками метана из донных осадков в придонную воду. По мнению Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [1988], сероводородные (эвксинные) обстановки являются вариантом аноксидных и могут существовать только при условии постоянного привноса сероводорода из подстилающих осадков. Судя по относительно низким (< 0.017) значениям коэффициента Mo/Mn в донных осадках (см. рис. 4), который при значениях более 0.02 считается индикатором сероводородного заражения [Холодов, Недумов, 1991], типичные сероводородные условия для Чукотского моря не характерны. В то же время значения этого коэффициента достаточно высоки, особенно в тонкозернистых, обогащенных органическим углеродом осадках (см. рис. 4), что не исключает существование субоксидных и аноксидных условий на локальных участках.

В пользу эпизодического существования субоксидных или даже аноксидных придонных вод в районах распространения сезонных вод с пониженным содержанием кислорода (см. рис. 2) можно отметить приуроченность к ним повышенных содержаний V, Mo, Zn в осадках внешнего шельфа и на Южно-Чукотской равнине (рис. 7). Это типичные элементы аноксидных обстановок, и они коррелируют с органическим углеродом (см. рис. 5, Б) из-за совместного накопления. Значительно хуже это проявлено для Fe, Mn, Ni и, особенно, Co, распределение которых контролируется еще некоторыми факторами (обогащение тяжелыми минералами песчаных осадков, гидротермальная деятельность, раннедиагенетическое перераспределение).

Как отмечалось выше, на шельфе Чукотского моря известны и предполагаются газовые и водные источники различного происхождения. Выходы углеводородных газов здесь закартированы по аномалиям в придонных водах, некоторые из которых достаточно стабильны и проявляются при повторном картировании [Геология..., 2002; Яшин, Ким, 2007]. Наличие гидротермальных источников предполагается исходя из существования их на сухопутных участках структур, продолжающихся на шельфе. Наиболее известной из них является Чукотский грабен, продолжающийся от Восточной Чукотки через желоб Геральда на внешний шельф (см. рис. 1). Он повсеместно трассируется локальными впадинами, в которых осадки обогащены органическим углеродом (см. рис. 3), Fe Mg (см. рис. 6), Zn, V, Mo, и, локально, Ni, Cr (см. рис. 7). Как было показано ранее [Астахов и др., 2010б], к этой локальной структуре приурочены и повышенные содержания серебра и рутения. Последний, единственный среди изученных благородных металлов, имеет значимую положительную корреляцию с органическим углеродом. Таким образом, в пределах локальной неотектонической структуры происходит накопление органического вещества и металлов-сульфофилов с формированием аномальных содержаний, что типично для аноксидных и даже сероводородных обстановок. Учитывая относительно высокие содержания кислорода в водной толще [Обзор..., 2008], можно предполагать, что более глубокая аноксия возникает под действием эндогенных источников в отдельных точках на участках с дефицитом кислорода. При этом металлы обогащают осадки за счет их ускоренного осаждения из иловых или придонных вод, а органический углерод накапливается за счет его лучшей сохранности в условиях недостатка кислорода — увеличения степени фоссилизации органического вещества в осадке.

По значениям литохимического модуля $(Fe + Mn)/Ti$ (рис. 8), часто применяемого в качестве индикатора гидротермальной поставки металлов в осадки, в пределах Чукотского грабена выделяются лишь локальные участки с повышенными значениями. На внешнем шельфе Чукотского моря выделяется более обширное поле, примыкающие к выходу на материковый склон кайнозойских рифтогенных структур Чарли и Норсвинд. Кроме того, выделяются локальные участки с повышенным значением коэффициента в каньоне Барроу, у мыса Хоуп, к югу от о. Врангеля. Некоторые из этих аномалий определяются, вероятно, концентрацией в осадках магнетита и других обломочных минералов железа.

Аномальные содержания металлов. Признаком существования локальных участков со специфическими гидрохимическими условиями, в том числе определяемых эндогенной активностью, может быть наличие аномальных содержаний элементов (особенно микроэлементов) ассоциации III (см. рис. 5, Б), накопление которых в тонкозернистых осадках обычно связано с осаждением из морских или иловых вод. Для выделения аномалий использовалась величина экстремальных аномальных содержаний, превышающая граничное значение, равное среднему содержанию элемента плюс тройная величина среднеквадратического отклонения [Юдович, Кетрис, 1988]. На рис. 9 показано положение станций с аномальными содержаниями в осадках металлов полиэлементной ассоциации III и некоторых благородных элементов. Из последних аномальные содержания образуют серебро, рутений, золото и платина (см. рис. 9), распределение которых было изучено только в южной части Чукотского моря [Астахов и др., 2010б]. Как следует из рис. 9 пробы с аномальными концентрациями металлов локализируются в трех зонах:

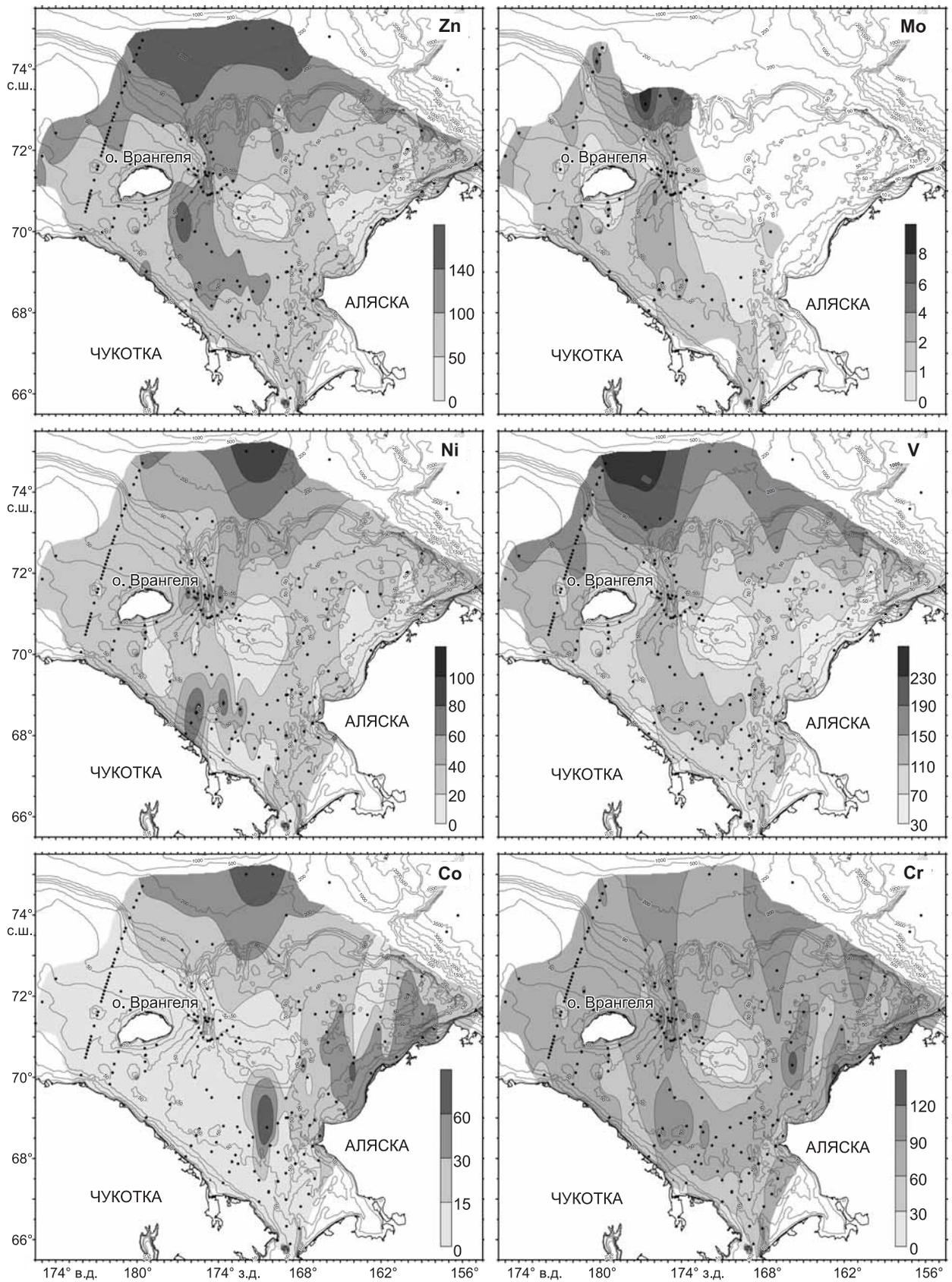


Рис. 7. Содержания (10^{-4} %) микроэлементов полиэлементной ассоциации III в донных осадках Чукотского моря.

Рис. 8. Значения литохимического модуля $(Fe + Mn)/Ti$ для поверхностных донных осадков Чукотского моря и примыкающей части Северного Ледовитого океана.

Красная штриховка — упрощенные контуры кайнозойских рифтогенных бассейнов Чарли (1) и Нортвинд (2), по [Хаин и др., 2009].

- в самой северной части изученного района, где распространены окисленные осадки и предполагается продолжение на материковый склон и шельф кайнозойских рифтогенных структур Чарли и Нортвинд;

- в Чукотском грабене и некоторых других структурах грабен-рифтовой системы, где они ассоциируют с высокими содержаниями органического углерода;

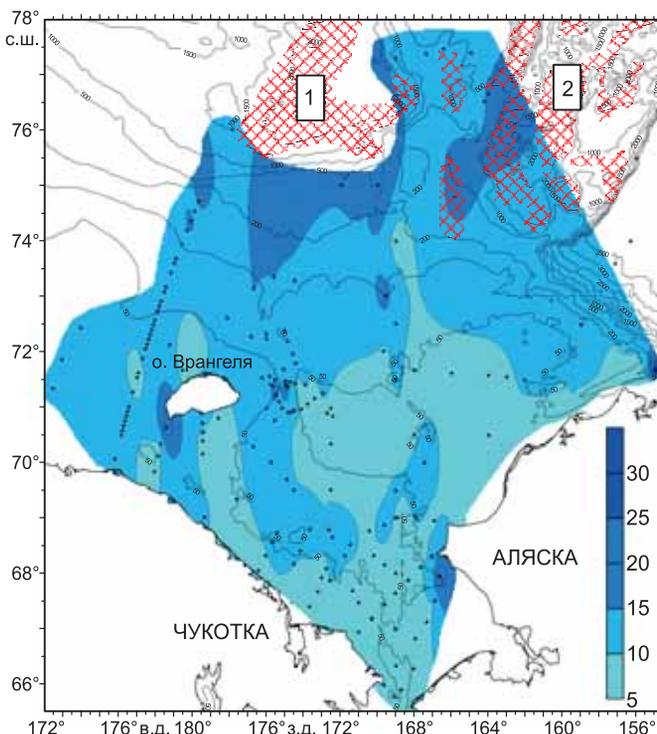
- в песчаных осадках у северо-западного побережья Аляски (зона Барроу).

В зоне Барроу, протягивающейся от одноименного каньона вдоль материкового побережья Аляски, отмечены аномальные содержания железа и некоторых микроэлементов ассоциации III (Co, Cr, V). Эти аномалии существуют преимущественно в песчаных осадках и образуются, вероятно, за счет поступления обломочного материала с высоким содержанием металлов при размыве каких-то геологических тел на побережье или морском дне. В то же время аномалии выявлены и в смешанных илисто-песчаных осадках на Южно-Чукотской равнине и в каньоне Барроу, что дает основания предполагать существование здесь эндогенной флюидной деятельности. Вполне очевидна приуроченность этой зоны к неотектонической, а возможно, и более древней разломной структуре, которая определяет существование каньона Барроу и долины, отделяющей банки Геральд и Ханна от материкового побережья Аляски.

На внешнем шельфе Чукотского моря на продолжении кайнозойского рифтогенного бассейна Чарли в окисленных тонкозернистых осадках с низким содержанием органического углерода появляются аномалии марганца и ряда микроэлементов. Ранее здесь по соотношению комплекса макроэлементов, повышенным содержаниям многих микроэлементов и марганца были выявлены специфические условия осадконакопления, обусловленные, предположительно, поступлением эндогенных флюидов [Астахов и др., 2008, 2013].

Большая часть проб с аномальными содержаниями металлов находится в пределах Чукотского грабена — наиболее геологически активной в кайнозое части грабен-рифтовой системы Чукотского моря. Здесь аномальные концентрации металлов характерны для тонкозернистых осадков с высоким содержанием органического углерода и биогенного кремнезема. По характеру аномалий и их локализации можно предполагать, что большинство из них обусловлено интенсивным накоплением металлов из придонных или иловых вод в специфических гидрохимических условиях, возникающих под действием эндогенных источников различного типа. Гидротермальные источники могут увеличивать концентрацию металлов в придонных или иловых водах и стимулировать интенсивное накопление Fe, Zn, Ni и, вероятно, Au. 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 органического углерода, Mo, V, Ag, Cd и Ru. Именно эти металлы в наибольшей степени концентрируются в донных осадках Чукотского моря (см. таблицу). Почти идеальное совпадение структур грабен-рифтовой системы, осадков с высоким содержанием органического углерода и аномалий различных металлов свидетельствует о ведущей роли современных геодинамических процессов в накоплении микроэлементов ассоциации III, серебра, рутения и золота в донных осадках Чукотского моря.

К северо-западу от Чукотского грабена имеются еще три аномалии в тонкозернистых осадках, обогащенных органическим углеродом (см. рис. 9). Особенности вмещающих осадков и набор элементов с аномальным (Mo, Mn) и повышенным (Zn, Ni, V) содержанием также свидетельствуют о влиянии эндогенных источников на геохимию осадконакопления. Это подтверждается тем, что на станции с ано-



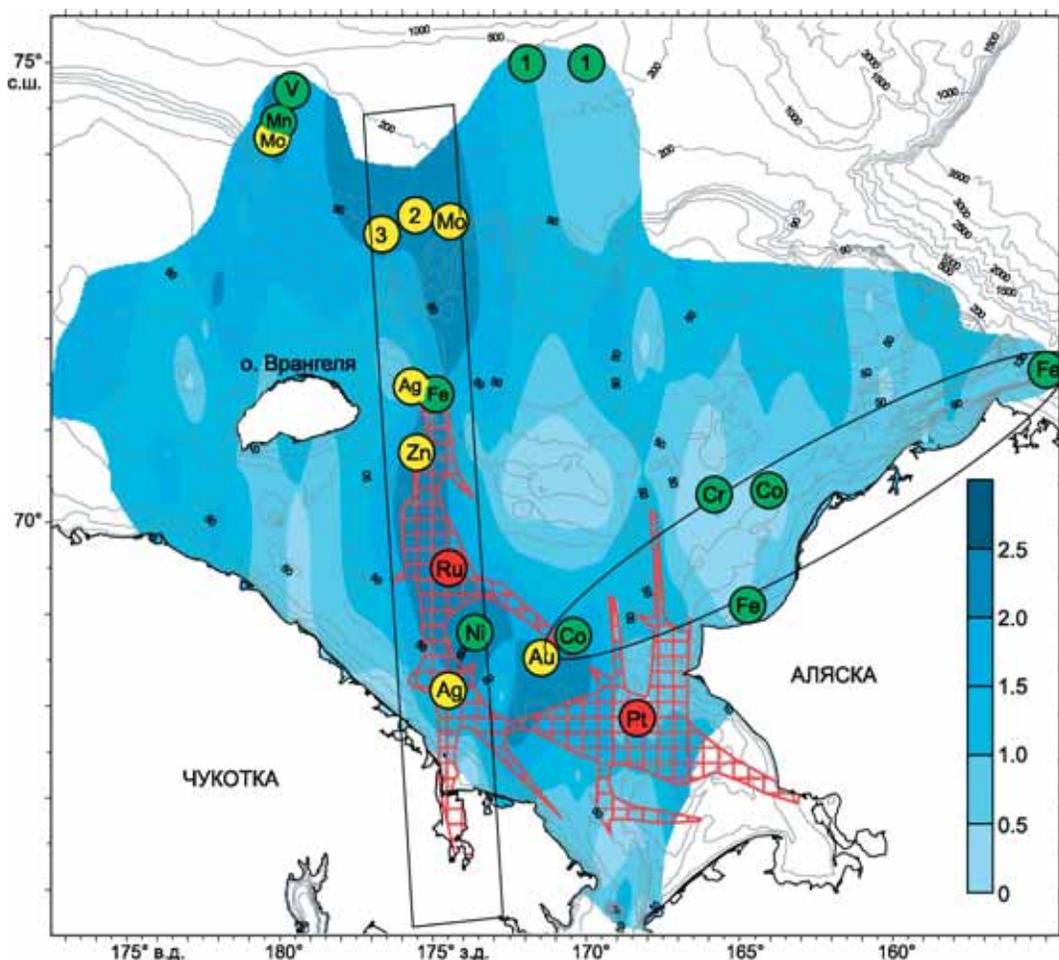


Рис. 9. Содержание органического углерода (%) в донных осадках Чукотского моря, местоположение проб с аномальными содержаниями металлов:

сидерофилов — зеленые кружки (в том числе: 1 — Mn, Co, Ni, Hg); халькофилов — желтые кружки (в том числе: 2 — Cd, Hg; 3 — Cd, Mo); платиноидов — красные кружки.

Красной штриховкой показаны основные структуры мезозойско-кайнозойской грабен-рифтовой системы в южной части Чукотского моря, по [Шипилов и др., 1989]; овал — зона Барроу, прямоугольник — Чукотский грабен.

мальным содержанием молибдена в придонной воде отмечено повышенное в 3—4 раза относительно фона содержание метана [Шакиров и др., 2010]. Некоторые тектонические модели для региона предполагают наличие в этом районе рифтогенной структуры субширотного простирания, пересекающей Чукотский грабен или являющейся его продолжением [Шипилов и др., 1989; Богданов и др., 1995]. Этот район также относится к высокоперспективному Северо-Чукотскому нефтегазоносному бассейну [Каминский и др., 2011] и нельзя исключать дефлюидизацию углеводородных залежей.

Основные факторы накопления металлов. Проведенные исследования показали, что накопление органического вещества и металлов в Чукотском море определяется сочетанием ряда факторов.

1. Проникновение через Берингов пролив относительно теплых и богатых биогенными веществами тихоокеанских вод, которые уменьшают ледовитость акватории и стимулируют первичную продуктивность с накоплением в осадках биогенов и некоторых металлов ($C_{орг.}$, SiO_2 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. Широкое развитие сезонных обстановок с дефицитом кислорода, что определяет общее обогащение осадков элементами группы железа (Fe, V) и сульффилами (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;

– усиление аноксидности и, возможно, сероводородное заражение придонных и иловых вод на локальных участках вблизи эндогенных источников с формированием аномальных содержаний в осадках элементов, характерных для этих условий, в том числе на стадии раннего диагенеза (Mo, Zn, V, Ni и, вероятно, Ag, Ru);

– поставка гидротермальными источниками металлов или изменение ими физико-химических условий придонных и иловых вод с формированием аномальных и повышенных содержаний в осадках ряда элементов (Fe, Mn, Au, Pt, Hg).

Проявление отмеченных выше процессов на поверхности дна возможно только в условиях относительно невысоких скоростей осадконакопления. В Чукотском море это обусловлено малой площадью водосборного бассейна и отсутствием устьев крупных рек на побережье.

Учитывая, что наличие долин и изолированных впадин на шельфе является следствием тектонической активизации грабен-рифтовой системы в кайнозой, более очевидной становится основная роль геодинамических условий в формировании в Чукотском море тонкозернистых осадков, обогащенных органическим углеродом (более 2 %), благородными металлами (Ag, Au, Pt, Ru) и металлами ассоциации III (Mo, V, Ni, Cr, Co, Fe). Обогащение этими элементами типично для древних черносланцевых толщ [Юдович, Кетрис, 1988, табл. 5], но некоторые металлы, например золото, концентрируются в последних 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. Они также содержат большое количество реакционноспособных компонент — малопреобразованное органическое вещество, аморфный кремнезем, аморфные сульфиды железа. Все это определяет возможность дополнительного привноса, перераспределения и концентрирования металлов при последующих постседиментационных, в том числе гидротермальных, процессах. Нельзя исключать возможность дополнительного накопления углерода в результате микробиального преобразования эндогенного метана и углекислого газа, как это происходит в настоящее время на геохимическом барьере морская вода—дно [Иванов и др., 2010]. Ранее [Астахов и др., 2010а] указывалось на наличие в пределах Чукотского грабена железомарганцевых конкреций с высоким содержанием платины. Металлы, содержащиеся в них, при постседиментационных преобразованиях также могут сохраняться в осадках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Донные осадки Чукотского моря характеризуются повышенными относительно средних для земной коры и осадочных пород содержаниями Ag, Mo, Cd, Zn, Cu, P, V, Au, Ba, что типично для морских бассейнов с недостатком кислорода. Осадки, обогащенные относительно фоновых органическим углеродом, накапливаются в узкой зоне неотектонической структуры Чукотский грабен и некоторых других структур грабен-рифтовой системы. По макроэлементному составу они отличаются значительно меньшим содержанием кремния и повышенными Fe, Al, Mg и в еще большей степени концентрируют Mo, Zn, V, Au. Анализ данных с использованием многокомпонентной статистики позволил выделить в качестве основных факторов фонового накопления указанных металлов гранулометрический состав осадков и содержание органического углерода. При устранении влияния гранулометрического состава путем нормирования по алюминию установлена корреляция органического углерода как с элементами-биогенами (в данном случае Ca, Mg, Sr, Pb), так и с металлами (Hg, Mo, Zn, V, Cr).

Кроме того, в пределах неотектонически-активных структур, в которых накапливаются донные осадки, обогащенные органическим веществом, имеются точки с аномальным содержанием металлов-сульфофилов, в том числе благородных. Геологические условия, в которых накапливаются обогащенные органическим углеродом осадки с аномальным содержанием металлов, их литологические и геохимические особенности свидетельствуют о различных причинах формирования аномалий. Аномальные содержания Mo, V, Ag, Ru образуются, вероятно, на локальных участках с аноксидными придонными или иловыми водами, возникающими вблизи холодных газовых или водно-газовых источников. Аномальные же содержания Fe, Mn, Zn, Hg, Ni, Au формируются, очевидно, 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. Вполне очевидно, что важную роль при этом имеют биохимические процессы, и часть аномалий может быть обусловлена раннедиагенетическими преобразованиями осадков. Ускоренный диагенез осадков, в свою очередь, может быть инициализирован действием тех же флюидных источников.

Таким образом, формирование в Чукотском море донных осадков, обогащенных органическим веществом и металлами, является, прежде всего, следствием специфических геодинамических условий:

достаточно длительное растяжение земной коры с формированием системы прогибов (грабен), выраженных в рельефе дна, и современная флюидная активность. Важным представляется также отсутствие интенсивного поступления терригенного материала и растворение биогенных карбонатов, что определяет невысокую скорость осадконакопления. Благоприятные океанологические условия, к которым можно отнести поступление относительно теплых тихоокеанских вод через Берингов пролив и стратификацию водных масс, являются второстепенным и, очевидно, необязательным условием.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 12-05-91167-ГФЕН_а) и ДВО РАН (грант 12-П-СО-07-021).

Авторы выражают благодарность К. Крэйну, Г.А. Черкашеву, Г.И. Иванову, А.Г. Мочалову, А.А. Мережко, А.А. Босину, Е.А. Логвиной, Д.А. Коршунову за помощь в организации и проведении экспедиционных работ, Н.В. Зарубиной, Г.И. Горбач, М.В. Иванову, Т.А. Коровину, А.А. Марьяш, Н.В. Хуркало за помощь в аналитических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

Астахов А.С., Ван Р., Гао А., Иванов М.В. Литохимические признаки современной геологической активности Чукотского моря // ДАН, 2008, т. 422, № 5, с. 683—687.

Астахов А.С., Горячев Н.А., Михалицына Т.И. Об условиях формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на примере пермских и современных морских отложений северо-востока Азии) // ДАН, 2010а, т. 430, № 2, с. 212—217.

Астахов А.С., Колесов Г.М., Дударев О.В., Иванов М.В., Колесник А.Н. Благородные металлы в донных осадках Чукотского моря // Геохимия, 2010б, № 12, с. 1289—1301.

Астахов А.С., Ван Рудзян, Крэйн К., Иванов М.В., Гао Айгуо. Литохимическая типизация обстановок полярного осадконакопления (Чукотское море) методами многокомпонентного статистического анализа // Геохимия, 2013, т. 51, № 4, с. 303—325.

Богданов Н.А., Хаин В.Е., Шипилов Э.В. Система кайнозойских рифтов Восточной Арктики и ее возможное значение // ДАН, 1995, т. 345, № 1, с. 84—86.

Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В., Пересыпкин В.И., Чаркин А.Н. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия, 2008, т. 48, № 2, с. 183—195.

Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // Геохимия, 1962, № 7, с. 555—571.

Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас) / Ред. М.Н. Алексеев. М., ГЕОС, 2002.

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

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. М., ГЕОС, 2000, 227 с.

Каминский В.Д., Супруненко О.И., Суслова В.В. Континентальный шельф Российской Арктики: состояние изучения и освоения нефтегазовых ресурсов // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (8), с. 977—985.

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

Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.А. Современная геодинамика Азии: карты, принципы составления, геодинамический анализ // Геотектоника, 2009, № 2, с. 78—93.

Леин А.Ю., Савичев А.С., Русанов И.И., Павлова Г.А., Беляев Н.А., Крейн К., Пименов Н.В., Иванов М.В. Биогеохимические процессы в Чукотском море // Литология и полезные ископаемые, 2007, № 3, с. 247—266.

Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане с 2007 г. / Ред. И.Е. Фролов. СПб., АНИИ, 2008, 85 с.

Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. Новейшая тектономагматическая активизация Колочинско-Мечигментской зоны Чукотского полуострова (по данным о составе газов и гидротерм) // Геотектоника, 2010, № 6, с. 99—110.

Смирнов В.Н. Верхоянско-Чукотская область новейшего горообразования: зональность и основные этапы формирования // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 610—620.

Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Соловьев В.М., Шибая С.В., Петров А.Ф., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. Межплитные границы Дальневосточного региона России по результатам GPS измерений, сейсморазведочных и сейсмологических данных // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (4), с. 489—507.

- Хаин В.Е., Полякова И.Д.** События океанской аноксии и глобальные ритмы эндогенной активности в фанерозойской истории Земли // ДАН, 2010, т. 432, № 4, с. 506—509.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И.** Тектоника и нефтегазоносность Восточной Арктики // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (4), с. 443—460.
- Холодов В.Н.** О роли сероводородных бассейнов в осадочном рудообразовании // Литология и полезные ископаемые, 2002, № 5, с. 451—473.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И.** О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // Известия АН СССР, Серия геологическая, 1991, № 12, с. 74—82.
- Чешко А.Л., Дубинина Е.О., Вакин Е.А., Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г.** Первые данные об изотопном составе водорода и кислорода в термоминеральных водах Восточной Чукотки // ДАН, 2004, т. 395, № 5, с. 676—680.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И., Зарубина Н.В.** Геохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря // Вестник ДВО РАН, 2010, № 6, с. 101—108.
- Шпилов Э.В., Сенин Б.В., Юнов А.Ю.** Осадочный чехол и фундамент Чукотского моря по сейсмическим данным // Геотектоника, 1989, № 5, с. 99—109.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Геохимия черных сланцев. Л., Наука, 1988, 210 с.
- Яшин Д.С., Ким Б.И.** Геохимические признаки нефтегазоносности восточно-арктического шельфа России // Геология нефти и газа, 2007, № 4, с. 25—29.
- Astakhov A.S., Beloglazov A.I., Mozherovskiy A.V.** Mineral-geochemical association in bottom sediments of the East China Sea // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1995, v. 6, № 1, p. 91—102.
- Brumsack H.-J.** The trace metal content of recent organic-rich sediments: implications for Cretaceous black shale formation // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, v. 232, p. 344—361.
- Ellwood M.J., Hunter K.A.** Variations in the Zn/Si record over the last interglacial—glacial transition // Paleoceanography, 2000, v. 15, № 5, p. 506—514.
- Feder H.M., Naidu A.S., Jewett S.C., Hameedi J.M., Johnson W.R., Whitley T.E.** The northeastern Chukchi Sea: benthos-environmental interactions // Mar. Ecol. Prog. Ser., 1994, v. 111, p. 171—190.
- Fujita K., Mackey K.G., McCaleb R.C., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Smirnov V.N.** Seismicity of Chukotka, northeastern Russia // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 2002, v. 360, p. 259—272.
- Grebmeier J.M., Cooper L.W., Feder H.M., Sirenko B.I.** Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic // Progress in Oceanography, 2006, № 71, p. 331—361.
- Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y.** Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: new results from shallow drilling and seismic-reflection profiling // Global and Planetary Change, 2009, № 68, p. 115—131.
- Hesselbo S.P.** Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event // Nature, 2000, v. 406, p. 392—395.
- Jones C.E., Jenkyns H.C.** Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous // Amer. J. Sci., 2001, v. 301, p. 112—149.
- Larson R.L., Erba E.** Onset of the Mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: igneous events and the biological, sedimentary, and geochemical responses // Paleoceanography, 1999, № 14(6), p. 663—678.
- McKay J.L., Pedersen T.F.** The accumulation of silver in marine sediments: a link to biogenic Ba and marine productivity // Global Biogeochem. Cycles, 2008, 22, GB4010, doi:10.1029/2007GB003136.
- McMurtry G.M., DeCarlo E.H., Kee Hyun Kim** Accumulation rates, chemical partitioning, and Q-mode factor analysis of metalliferous sediments from the North Fiji Basin // Mar. Geol., 1991, v. 98, p. 271—295.
- Pedersen T.F., Calvert S.E.** Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 1990, v. 74, p. 454—466.
- Tyson R.V., Pearson T.H.** Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview // Eds. R.V. Tyson, T.H. Pearson, Modern and ancient continental shelf anoxia // Geol. Soc. London Spec. Publ., 1991, № 58, p. 1—24.
- Viscosi-Shirley C., Piasias N., Mammone K.** Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian-Arctic's Chukchi and Laptev shelves // Continental Shelf Research, 2003, v. 23, p. 1201—1225.
- Wedepohl K.H.** The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, v. 59, p. 1217—1232.