

ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЧУКОТСКОМ МОРЕ

А.С. Астахов, А.Н. Колесник, И.С. Олейников

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток,
astakhov@poi.dvo.ru*

Реконструкция геодинамических условий бассейна осадконакопления является обычной задачей формационного анализа осадочных толщ. Для более коротких временных отрезков и на меньшем пространстве в рамках фациального анализа такая реконструкция не выполняется из-за недостаточного теоретического обоснования. В последние десятилетия появились разработки, позволяющие реконструировать некоторые косвенные признаки геодинамических процессов уже на уровне осадочно-рудно-породных ассоциаций, например, флюидный седиментогенез (Беленицкая, 2008; Юдович, Кетрис, 2011). Широко обсуждается взаимосвязь тектонических процессов с возникновением относительно коротких событий океанской аноксии, сопровождающихся накоплением обогащенных органикой отложений (черносланцевых толщ) (Larson, Erba 1999; Jones, Jenkyns, 2001).

Развитие этих идей требует более широкого привлечения данных по современному седиментогенезу. Влияние геодинамических условий на вещественный состав современных осадков может проявляться опосредованно через морфоструктурный контроль, когда рельеф дна и конфигурация береговой линии формируются неотектоническими процессами, и активную флюидодинамику, когда холодные и термальные водно-газовые источники существенно изменяют физико-химические условия придонных и иловых вод. Для проведения таких исследований выбрано Чукотское море (рис. 1), в пределах которого в последние годы выявлены активные геологические структуры. Значительная часть его относится к зоне современного растяжения земной коры (рис. 1) (Леви и др., 2009). Следствием этого является позднекайнозойская активизация грабен-рифтовой системы субмеридиональных и субширотных рифтогенных структур (рис. 1), сформированных в мезозое – раннем кайнозое (Шипилов и др., 1989; Поляк и др., 2010). Среди неотектонических структур этой системы наиболее известен «Чукотский грабен» (Шипилов и др., 1989; Геология..., 2002), протягивающийся от Восточной Чукотки на юге через желоб Геральда до, по крайней мере, бровки шельфа Чукотского моря на севере. В изученной сухопутной части его на Восточной Чукотке известны позднекайнозойские вулканы и многочисленные гидротермальные источники с температурой изливающихся вод до 97°C (Поляк и др., 2010). Анализ фокальных механизмов сильнейших землетрясений и сейсмостектонических дислокаций позволил выделить здесь современную рифтовую зону (Fujita et al., 2002). В пределах Чукотского моря современная активизация грабен-рифтовой системы

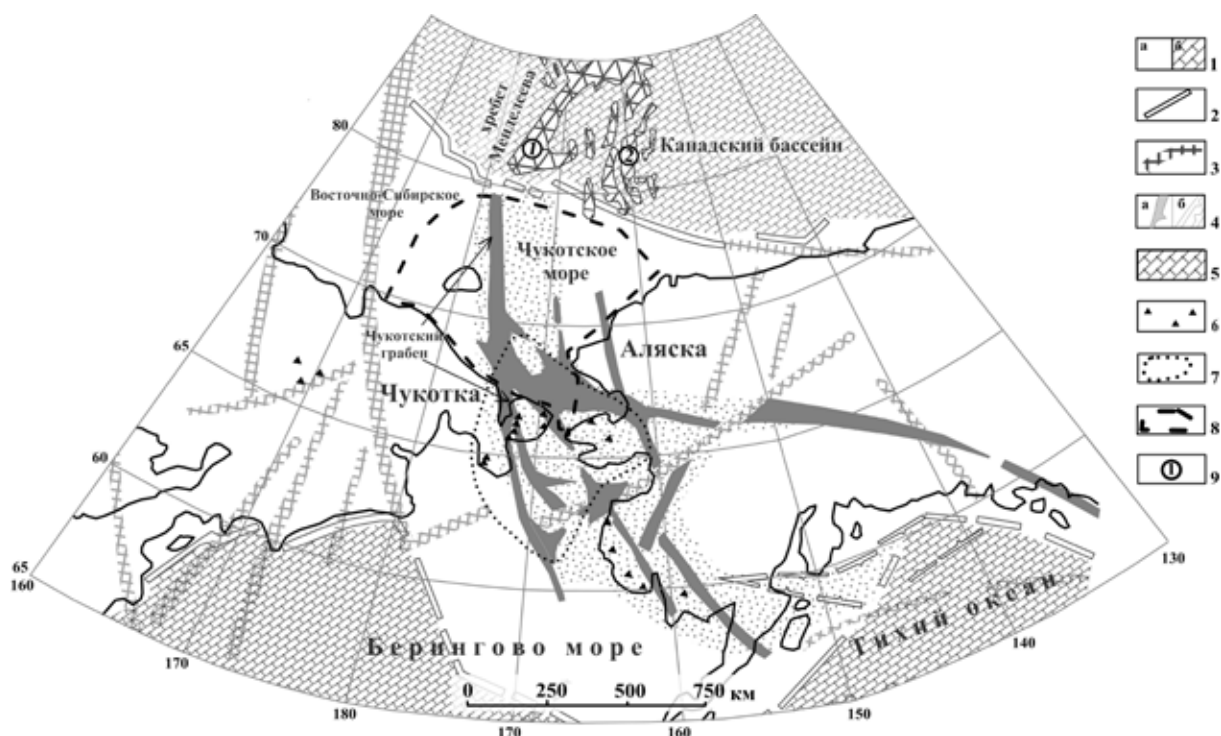


Рис. 1. Местоположение района работ и грабен-рифтовая система Чукотского моря в области взаимодействия Арктической и Тихоокеанской переходных зон (Шипилов и др., 1989)

1 — области с континентальной и субконтинентальной (а) и океанической и субокеанической (б) корой; 2 — континентальная флексура; 3 — крупнейшие пояса разломов сдвига-раздвиговой 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 (Поляк и др., 2010); 7 — зона современного растяжения земной коры (Леви и др., 2009); 8 — район исследований; 9 — кайнозойские рифтогенные бассейны Канадской котловины (Хаин и др., 2009): 1 — Чарли, 2 — Нортвинд

проявлена в сейсмичности акватории вблизи восточной Чукотки, наличии газовых аномалий в придонных водах, а также рельефе дна, полностью отражающем положение основных отрицательных неотектонических структур. По геофизическим данным, в составе осадочного чехла прогибов предполагается наличие вулканогенных образований (Шипилов и др., 1989), а на сейсмоакустических профилях в пределах банки Геральда фиксируются разрывные нарушения субмеридионального простирания, нарушающие новейший чехол. На севере грабен-рифтовая система Чукотского моря переходит в кайнозойские рифтогенные бассейны Чарли и Нортвинд Канадской котловины (рис. 1).

Были обобщены результаты изучения химического состава донных осадков Чукотского моря (Feder et al., 1994; Viscosi-Shirley et al., 2003; Астахов и др., 2010б, 2013а, 2013б) и проведен их анализ с использованием методов многокомпонентной статистики (корреляционный, Q- и R-факторный, кластерный анализы) в пакете программ STATISTICA 8.0.

В распределении биогенных компонент донных осадков Чукотского моря проявляется низкая карбонатность, общая для всех арктических морей, но высокое содержание биогенного кремнезема, более характерное для Берингова моря. Очень специфично распределение органического углерода — отчетливо выделяется зона повышенных содержаний в южной и западной частях моря, которая может быть оконтурена изолинией 2 % $C_{орг}$ (рис. 2). В южной части моря органический углерод очень хорошо коррелирует с аморфным кремнеземом (Астахов и др., 2010б, 2013б), что, равно как и относительно тяжелый изотопный состав (Grebmeier et al., 2006), свидетельствует о поступлении его в осадки совместно с остатками диатомовых водорослей. По последнему показателю в северной части моря также можно предполагать планктонное или микробальное происхождение органического вещества (Астахов и др., 2013б), хотя в Восточно-

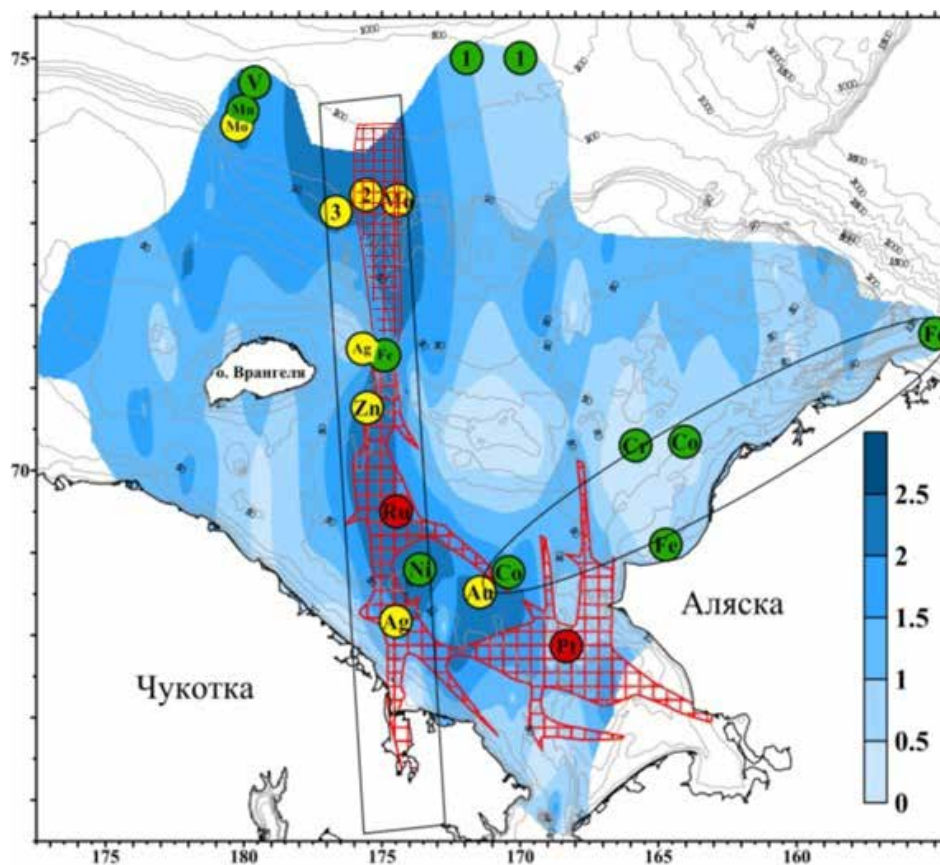


Рис. 2. Содержание органического углерода (%) в донных осадках Чукотского моря и местоположение проб с аномальными содержаниями металлов: сидерофилов — зеленые кружки (в том числе 1 — Mn, Co, Ni, Hg); халькофилов — желтые кружки (в том числе 2 — Cd, Hg; 3 — Cd, Mo); платиноидов — красные кружки. Красной штриховкой показаны основные структуры мезозойско-кайнозойской грабен-рифтовой системы в южной части Чукотского моря (Шипилов и др., 1989); овал — зона Барроу; прямоугольник — Чукотский грабен

Сибирском море возможна значительная примесь терригенного древнего ОВ.

По результатам R-факторного анализа для нормированных по алюминию содержаний химических элементов выделяются три полиэлементные ассоциации (рис. 3Б). 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. Ассоциация III, включающая железо, марганец и ряд микроэлементов, определяется наличием в осадках минералов (окислы или сульфиды) железа и марганца, которые накапливают определенные микроэлементы. Наиболее тесные корреляционные связи в этой ассоциации характерны для ванадия и элементов сульфидофилов V-Zn-Mo. Железо и марганец коррелируют с ними, между собой и с органическим углеродом значительно хуже. Органический углерод ($C_{\text{орг}}/Al$) 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 (рис. 3Б). 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 $C_{\text{орг}}$ с элементами ассоциации III (V, Mo, Zn, Cr, Hg) объясняется тем, что органическое вещество, наряду с гидроксидами и сульфидами железа и марганца, является компонентом-концентратором этих металлов. Совместное накопление этих металлов и органического вещества весьма типично для эвксинных (сероводородных) обстановок (Юдович, Кетрис, 1988).

Результаты Q-факторного и Q-кластерного анализов показывают, что основные различия в макроэлементном составе осадков определяются соотношением в них обломочных и глинистых

минералов, что в первом приближении отражает гранулометрический состав осадков. На диаграмме в пространстве первых двух Q-факторов (рис. 3А) пробы кластеров 5, 7, 10–12 образуют фигуру, почти точно очерчивающую теоретическую параболу, соответствующую 100 % суммы факторных нагрузок 1 и 2 факторов, т.е. ограничивают условия, при которых химический состав осадков определяется только терригенным и биогенным кремнистым веществом, в различной степени дифференцированным по гранулометрическому составу. Помимо кластеров исключительно терригенных и биогенно-терригенных осадков выделяются кластеры со значительной примесью хемогенного материала (рис. 3А). Местоположение этих проб показано на рис. 2. В большинстве случаев специфический химический состав этих осадков определяется влиянием термальных (кластеры 2, 3) или холодных водно-газовых источников (кластеры 4, 9).

Признаком существования локальных участков со специфическими гидрохимическими условиями, в том числе определяемых эндогенной активностью, может быть наличие аномальных содержаний элементов (особенно микроэлементов) ассоциации III (рис. 3Б), 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 среднеквадратичного отклонения (Юдович, Кетрис, 1988). На рис. 2 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, распределение которых было изучено только в южной части Чукотского моря (Астахов и др., 2010а). Как следует из рис. 2, пробы с аномальными концентрациями металлов ассоциации III и кластеров осадков с существенной примесью хемогенного материала локализируются в пределах Чукотского грабена и некоторых других структур грабен-рифтовой системы, где они ассоциируют с высокими содержаниями органического углерода, и в самой северной части изученного района, где распространены окисленные осадки и предполагается продолжение на материковый склон и шельф кайнозойских рифтогенных структур Чарли и Нортвинд.

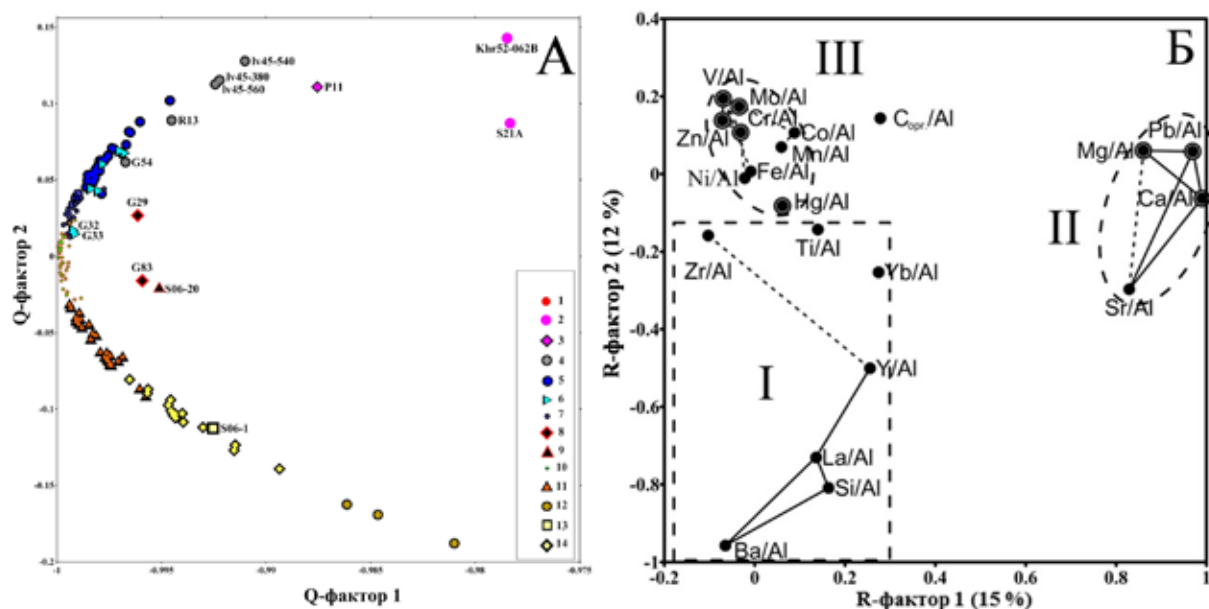


Рис. 3. Результаты статистической обработки химического состава проб донных осадков Чукотского моря: А — диаграмма в пространстве 1 и 2 Q-факторов, 1–14 — точки проб, относящихся к различным кластерам; Б — диаграмма в пространстве 1 и 2 R-факторов; кружками выделены элементы, имеющие значимую положительную корреляцию с содержанием органического углерода (C_{org}/Al); линии — наиболее значимые корреляционные связи (сплошная — $>0,7$, штриховая — $0,6–0,7$); I–III — полиэлементные ассоциации

Проведенные исследования показали, что интенсивное накопление органического вещества и металлов на отдельных участках Чукотского моря 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 ($C_{орг}$, $SiO_{2аморф}$, 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. Отсутствие интенсивного поступления терригенного материала и растворение биогенных карбонатов, что определяет невысокую скорость осадконакопления.

4. Широкое развитие сезонных обстановок с дефицитом кислорода, что определяет общее обогащение осадков элементами группы железа (Fe, V) и сульффилами (Ag, Mo, Zn, Cd).

5. Наличие газовых и водно-газовых холодных и термальных эндогенных источников в пределах активных структур грабен-рифтовой системы, что определяет:

- увеличение продуктивности планктонных и бентосных, включая микробиальные, сообществ за счет поставки эндогенными источниками элементов, участвующих в биохимических процессах (углерод/метан, P, Si, Fe), и ускоренное накопление углерода и 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 до благоприятных для накопления в осадках ряда элементов (Fe, Mn, Au, Pt, Hg).

Учитывая, что наличие долин и изолированных впадин на шельфе, так же как флюодинамическая активность, являются следствием тектонической активизации грабен-рифтовой системы в кайнозой, что, в свою очередь, определяет возможность формирования аноксидных и эксинных обстановок, роль геодинамических условий становится определяющей в формировании в Чукотском море тонкозернистых осадков, обогащенных органическим углеродом, благородными металлами (Ag, Au, Pt, Ru) и металлами ассоциации III (Mo, V, Ni, Cr, Co, Fe).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-05-91167-ГФЕН_а) и ДВО РАН (грант 12-II-CO-07-021).

Литература

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

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., Гусев Е.А., Колесник А.Н., Шакиров Р.Б. Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря // Геология и геофизика. 2013б. Т. 54, № 9. С. 1056–1070.

Беленицкая Г.А. Типы седиментогенеза: расширенный вариант классификации // Отечественная геология. 2008. № 3. С. 29–49.

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

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

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

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

Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И. Тектоника и нефтегазоносность Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 4. С. 443–460.

Шутилов 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.

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.

Jones C. E., Jenkyns H.C. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous // Am. 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.

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.