

УДК 551.3:553.065 (268)

## ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ

© 2008 г. А. С. Астахов, Ван Рудзян, Гао А., М. В. Иванов

Представлено академиком В.А. Акуличевым 16.07.2007 г.

Поступило 27.07.2007 г.

Сведения о современных геодинамических процессах в Чукотском море и в отдельных его структурах очень ограничены из-за слабой общей геологической и геофизической изученности акватории и неполноты сведений по сейсмичности. Имеющиеся сейсмические станции на побережье (рис. 1) позволяют определить координаты лишь 7% фиксируемых в регионе землетрясений [1]. Обычно это землетрясения менее 6 баллов, эпицентры трех зафиксированных на акватории землетрясений более 6 баллов (рис. 1) находятся вблизи сейсмически активной зоны побережья, включающей полуостров Стюарт и Восточную Чукотку. Здесь, благодаря близости сейсмостанций, зарегистрировано много слабых мелкофокусных землетрясений [2]. На п-ове Стюарт они локализируются в осевой зоне, на п-ове Чукотка существенно сгущаются в пределах так называемого Чукотского грабена (рис. 1) – неотектонической структуры, выраженной в рельефе и продолжающейся в Чукотском море и далее как каньон Геральд [3]. Сейсмичность последнего не изучена из-за его удаленности от сейсмостанций. На Восточной Чукотке к этой структуре приурочены многочисленные гидротермальные источники с температурой излияющихся вод до 90°C [4]. В подобной неотектонической структуре в восточной части моря, выраженной в рельефе дна как каньон Барроу и находящейся вблизи сейсмостанции на мысе Барроу, зарегистрированы многочисленные землетрясения амплитудой до 6 баллов [1]. Приведенные сведения, а также имеющиеся геолого-геофизические и геоморфологические данные [3, 6] свидетельствуют о возможной высокой

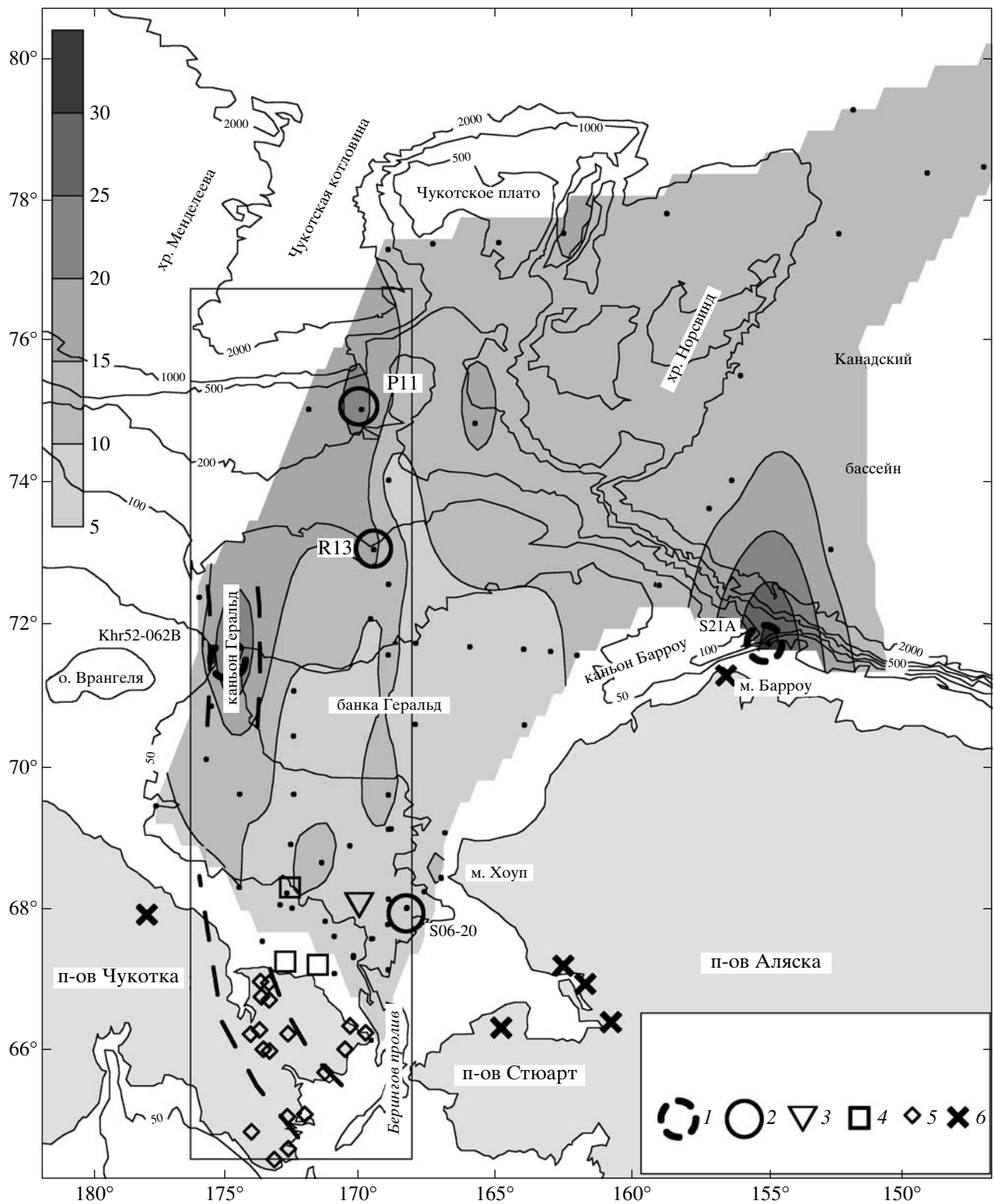
современной геодинамической активности отдельных структур Чукотского моря.

Для получения дополнительной косвенной информации о современных геологических процессах был изучен химический состав донных осадков Чукотского моря и примыкающей части Северного Ледовитого океана с последующей обработкой данных по методике литохимического анализа [7]. При этом использовались методы статистического анализа в пакете программ STATISTICA 6.0. Изучались пробы донных осадков, полученные в экспедициях по российско-американскому проекту RUSALCA в 2004 и 2006 гг., в 1-й и 2-й Китайских Арктических экспедициях, а также в 46-м рейсе нис “Профессор Хромов” в 2002 г. (рис. 1).

Для каждой пробы по результатам Q-факторного анализа (метод главных компонент без вращения), учитывающего вариации содержаний 7 макро- и 14 микроэлементов в массиве из 73 проб (табл. 1) получены значения новых переменных – Q-факторов, дающих более осредненную характеристику осадка, чем содержание химических элементов. В какой-то мере они заменяют литохимические модули, используемые при классическом литохимическом анализе [7]. Вариации значений первого Q-фактора определяются суммарным вкладом кремния, алюминия и железа, входящих в состав алюмосиликатов, являющихся основой терригенного вещества осадков. Из-за резкого преобладания терригенного осадконакопления в Чукотском море вклад этого фактора в изменчивость химического состава выборки является основным. Положительные значения второго фактора определяются группой элементов, характерных для глинистых отложений (Al, Fe, частично, Mg, Ca), отрицательные – для обломочных (Si, Ti). Вариации значений третьего Q-фактора определяются содержанием кальция и магния, четвертого – железа, пятого – марганца.

Для группирования проб по химическому составу был выполнен кластерный (tree-clustering)

*Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Владивосток  
Лаборатория морской геологии  
Университета Тончжи, Шанхай, КНР*



**Рис. 1.** Значения литохимического модуля  $(Fe + Mn)/Ti$  для поверхностных донных осадков Чукотского моря и примыкающей части Северного Ледовитого океана, станции отбора проб донных осадков и некоторые элементы геодинамической обстановки. Штриховые линии – неотектоническая структура Чукотский грабен [3]. Прямоугольником выделена зона с наибольшей современной геологической активностью. 1, 2 – станции отбора проб и их номера: 1 – металлоносные осадки кластера 4, 2 – “аномальные” пробы; 3 – район с аномально высоким содержанием метана в осадках [3, 4]; 4 – эпицентры землетрясений в Чукотском море с амплитудой более 6.0 [2]; 5 – гидротермальные источники Восточной Чукотки [5]; 6 – действующие сейсмические станции [1].

**Таблица 1.** Содержания химических элементов и значения Q-факторов для кластеров донных осадков (средние) и “аномальных” проб

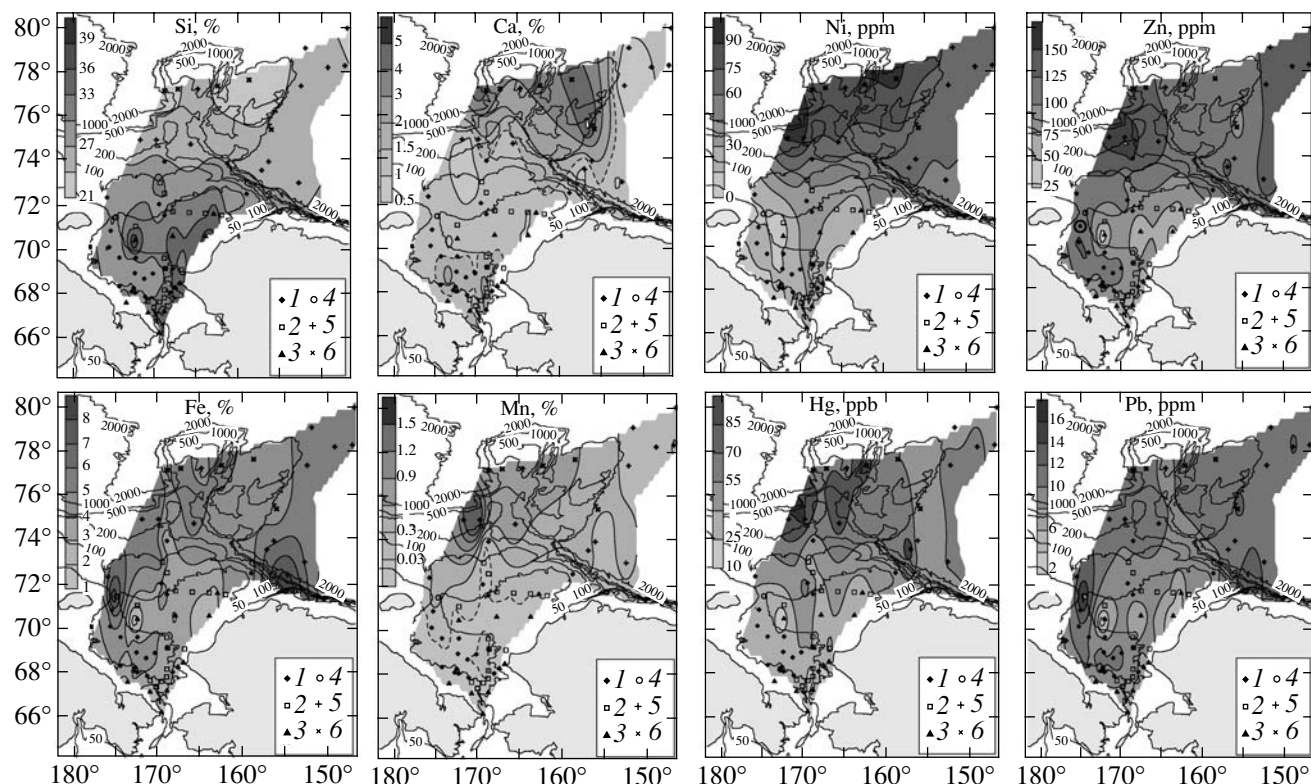
Химические элементы, факторы	Кластеры						“Аномальные” пробы		
	1	2	3	4	5	6	S06-20	R13	P11
Si, %	28.51	31.43	36.11	27.69	24.76	23.24	28.09	31.85	25.02
Ti, %	0.42	0.38	0.28	0.32	0.46	0.39	0.40	0.35	0.37
Al, %	6.31	5.96	4.34	5.24	8.50	7.29	5.50	8.98	6.96
Fe, %	4.11	3.49	2.17	9.21	5.51	4.84	3.21	5.84	5.83
Mg, %	1.51	1.28	0.77	1.56	1.74	2.11	1.25	1.51	1.65
Ca, %	1.59	1.38	1.26	1.53	1.19	4.27	3.81	0.55	0.90
Mn, %	0.028	0.027	0.015	0.243	0.528	0.612	0.024	0.049	2.451
Ba, 10 <sup>-4</sup> %	788	691	733	704	793	606	501	621	731
Co, 10 <sup>-4</sup> %	14	13	9	21	52	87	15	15	82
Cr, 10 <sup>-4</sup> %	74	60	36	68	94	75	55	69	83
Cu, 10 <sup>-4</sup> %	22	18	12	21	46	52	19	21	47
La, 10 <sup>-4</sup> %	28	27	23	29	39	35	25	26	31
Ni, 10 <sup>-4</sup> %	26	25	19	26	76	83	35	43	98
Pb, 10 <sup>-4</sup> %	10	8	5	15	11	12	9	9	11
Sr, 10 <sup>-4</sup> %	195	193	178	230	177	229	313	173	212
V, 10 <sup>-4</sup> %	119	97	64	118	165	141	99	111	170
Y, 10 <sup>-4</sup> %	22	20	16	25	29	27	18	22	25
Yb, 10 <sup>-4</sup> %	2	2	3	3	3	3	2	2	3
Zn, 10 <sup>-4</sup> %	106*	80	49	105	136	116	78	90	172
Zr, 10 <sup>-4</sup> %	89	81	60	108	115	105	82	80	91
Hg, 10 <sup>-7</sup> %	39	32	22	36	63	62	29	34	90
SiO <sub>2</sub> ам.	8.58	5.40	2.53	4.88	1.62	1.06	–	6.06	5.27
C <sub>орг</sub> , %	1.71	1.24	0.50	1.01	0.80	0.47	–	0.87	0.69
Q-фактор 1	–1.000	–0.998	–0.993	–0.982	–0.990	–0.987	–0.996	–0.997	–0.991
Q-фактор 2	0.000	–0.051	–0.110	0.083	0.130	0.112	–0.033	0.061	0.090
Q-фактор 3	0.004	0.001	0.002	0.059	0.023	–0.105	–0.083	0.045	0.045
Q-фактор 4	0.001	0.006	0.005	–0.153	0.023	–0.020	–0.015	0.020	–0.026
Q-фактор 5	0.007	0.001	–0.004	0.014	–0.003	–0.006	0.003	0.008	–0.077

\* Без учета аномального содержания в одной из проб (рис. 2).

анализ (метод Уарда с оценкой общности по евклидовому расстоянию), позволивший разделить все пробы на 6 кластеров (табл. 1). Сопоставление с вещественным составом осадков [8–10], анализ распространения кластеров относительно содержаний отдельных элементов (рис. 2) и их средний химический состав (табл. 1) свидетельствуют, что разделение на кластеры определяется типом отложений и, главным образом, соотношением в осадках глинистой (пелитовой) и обломочной (песчано-алевритовой) составляющих терригенного вещества.

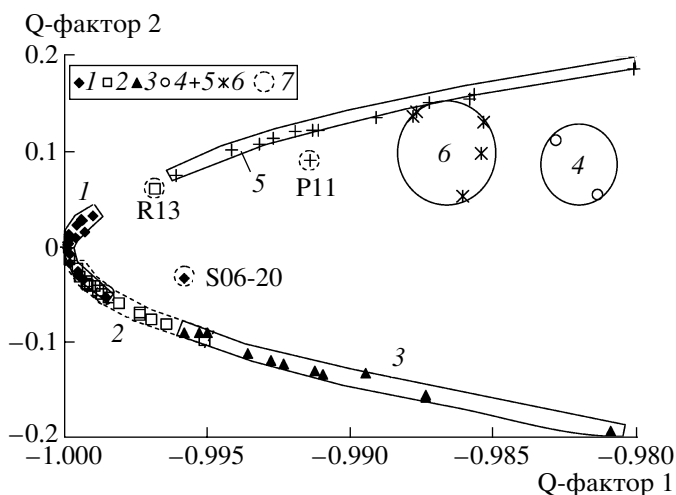
Выделение на этом фоне проб осадков с существенной примесью материала иного генезиса, в

том числе поступившего из эндогенных источников, возможно при комбинировании результатов кластерного и факторного анализов. На диаграмме в пространстве первых двух Q-факторов (рис. 3) пробы кластеров 1–3 и 5 образуют почти правильную параболу. Отрицательная по значениям 2-го фактора ее ветвь оконтуривается точками, соответствующими пробам песчано-алевритовых осадков кластеров 3 и 2. Положительная ветвь образована глинистыми осадками кластера 5. Вершину образуют пробы смешанных песчано-алеврито-глинистых осадков или глинистых осадков, обогащенных биогенным кремнеземом и отнесенных к кластеру 1. Учитывая состав осадков,



**Рис. 2.** Содержания некоторых химических элементов в донных осадках Чукотского моря и местоположение проб, отнесенных к различным кластерам (показаны различными значками для кластеров 1–6). Кругом показана станция с аномальным содержанием цинка (0.52%); при построении карты эта проба не учитывалась.

входящих в эти кластеры (рис. 2, табл. 1), можно отметить, что они сформированы почти исключительно терригенным (алюмосиликатным) веществом, в различной степени дифференцированным по гранулометрическому составу.



**Рис. 3.** Диаграмма в пространстве первого и второго Q-факторов для проб донных осадков Чукотского моря. 1–6 – пробы кластеров от первого до шестого соответственно; 7 – “аномальные” пробы.

Пробы, имеющие существенную примесь нетерригенного материала (за исключением биогенного кремнезема) и, соответственно, повышенные абсолютные значения Q-факторов с меньшим вкладом в изменчивость химического состава выборки (3–5), располагаются внутри параболы, образуя отдельные кластеры (4 и 6) или входя в различные кластеры (1–3 и 5), обособляясь от их основных полей (рис. 3). Из них пробы кластера 6, как установлено при изучении микроскопических препаратов, имеют примесь карбонатных раковин фораминифер. Это определяет повышенные содержания кальция (рис. 2) и магния и минимальные значения Q-фактора 3 (табл. 1).

Выделенные по результатам многокомпонентного статистического анализа кластер 4 и “аномальные” пробы P11 и R13 (рис. 3) характеризуются повышенными содержаниями железа, марганца и некоторых микроэлементов (Hg, Ni, Zn, V, Pb), при максимальных абсолютных значениях четвертого (кластер 4) или пятого (проба P11) Q-факторов и высоких значениях коэффициента (Fe + Mn)/Ti (рис. 1). Применительно к морским отложениям это часто считается признаком привноса металлов гидротермами [11–14]. Осадки, отнесенные к кластеру 4, распространены в каньоне Барроу, где зарегистрирована высо-

кая сейсмическая активность [1], и в каньоне Геральд, входящем в неотектоническую структуру “Чукотский грабен” с многочисленными гидротермальными проявлениями в изученной сухопутной части (рис. 1). Там же выявлены поля железомарганцевых конкреций на поверхности дна. “Аномальные” пробы P11 и R13 с высоким содержанием марганца отобраны на малоизученном внешнем шельфе Чукотского моря. Очень высокое содержание марганца и некоторых микроэлементов (Hg, Zn, Ni) позволяет сопоставить их с осадками внешнего шельфа восточной части моря Лаптевых, примыкающего к рифтогенной зоне хр. Гаккеля [15].

Выделенная при многокомпонентном статистическом анализе (рис. 3) “аномальная” проба S06-20 отобрана в южной части моря в пределах прогиба Хоуп, отличающегося интенсивным эндогенным поступлением метана [3, 4, 10]. В этой же точке установлены очень высокие скорости сульфатредукции и метаноокисления при невысоком содержании органического углерода [10, станция 15]. Специфика химического состава осадка определяется высоким содержанием кальция и стронция (табл. 1), что обычно свидетельствует об обогащении карбонатами. Так как при изучении микроскопических препаратов биогенные и аутигенные карбонаты здесь не были обнаружены, а валовое содержание  $\text{CaCO}_3$  составляет всего 0.45% [10], можно предполагать присутствие иных кальцийсодержащих аутигенных минералов. Например фосфатов, поскольку в иловых водах выявлено очень высокое содержание растворенного фосфора (0.4 мМ [10]).

Таким образом, в пределах Чукотского моря можно выделить несколько участков, где существуют специфические условия осадконакопления, обусловленные влиянием эндогенных водных или газовых источников. Предполагается, что оно может осуществляться либо путем привноса определенных химических элементов субаквальными источниками, либо изменением физико-химических условий в придонных или иловых водах, приводящим к химическому или биохимическому осаждению из них отдельных металлов. Эти участки включают места отбора проб, отнесенных при многокомпонентном статистическом анализе к кластеру 4 и “аномальным” пробам, районы с большими значениями литохимического модуля  $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$  (рис. 1), высокими содержаниями Fe, Mn, Hg (рис. 2). Почти все они, за исключением каньона Барроу, локализованы в западной части моря. Учитывая имеющуюся геолого-геофизическую информацию, их можно

объединить в субмеридиональную зону с наиболее активными современными геологическими процессами (рис. 1), частично выраженную в рельефе (Чукотская котловина–Чукотской грабен–Берингов пролив). Она может быть рекомендована для проведения специальных геофизических, геохимических и ландшафтно-биологических исследований в экспедициях Международного полярного года 2007–2008.

Авторы признательны К. Крэйну, О.В. Дудареву, Б.И. Сиренко, В.И. Джуриному за помощь в получении проб осадков.

Работа выполнена в рамках российско-американской программы RUSALCA (проект 6.9 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 17).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1996. 183 с.
2. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмо-тектоника Якутии. М.: Геос, 2000. 227 с.
3. Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас) / Под ред. М.Н. Алексеева. М.: Геос, 2002.
4. *Яшин Д.С., Ким Б.И.* // Геология нефти и газа. 2007. № 4. С. 25–29.
5. *Чешко А.Л., Дубинина Е.О., Вакин Е.А. и др.* / ДАН. 2004. Т. 395. № 5. С. 676–680.
6. *Crane K.* // Arctic Res. United States. 2005. V. 19. P. 3–76.
7. *Юдович Я.Э., Керпус М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 438 с.
8. *Stein R., Grobe H., Wahsner M.* // Mar. Geol. 1994. V. 104. P. 269–285.
9. *Кошелева В.А., Яшин Д.С.* Донные осадки Арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.
10. *Леин А.Ю., Савичев А.С., Русанов И.И. и др.* // Литология и полез. ископаемые. 2007. № 3. С. 247–266.
11. *Страхов Н.М.* Проблемы геохимии современного океанского литогенеза // Тр. Геол. ин-та АН СССР. 1976. В. 292. 299 с.
12. *Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Воробьев П.В. и др.* Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. М.: Наука, 1993. 256 с.
13. *Гурвич Е.Г.* Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Науч. мир, 1998. 340 с.
14. *Астахов А.С.* Литохимия осадков материковой окраины Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2001. 240 с.
15. *Nolting R.F., van Dalen M., Helder W.* // Mar. Chem. 1996. V. 53. P. 285–299.