



УДК 51.214.6(571.645)

А. С. Долгаль², Н. В. Зарубина², А. Н. Иваненко³, М. В. Иванов⁴,
П. Н. Новикова¹, П. Е. Михайлик², Е. В. Михайлик²,
В. А. Рашидов⁶

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь,

² Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток,

³ Институт океанологии РАН, г. Москва,

⁴ Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток,

⁵ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

⁶ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Геолого-геофизические исследования гайота Сет (С-3 Пацифика)

Гайот Сет (Seth), являющийся западным окончанием подводных гор Маркус-Уэйк (рис. 1), был обследован в 13-м рейсе НИС «Вулканолог» в 1982 г. [1–3] и в 6-м рейсе НИС «Томас Вашингтон» в 1991 г. [6].

В 13-м рейсе НИС «Вулканолог» комплекс геолого-геофизических исследований включал эхолотный промер глубоководным эхолотом «WD-110М», непрерывное сейсмоакустическое профилирование в одноканальном варианте в модификации метода центрального луча с применением электроискрового источника типа «спаркер», модульную гидромагнитную съёмку квантовым магнитометром КМ-2 и драгирование цилиндрическими драгами.

Гайот Сет поднимается с глубин 5750–5700 м (рис. 1а), имеет поперечные размеры 53 × 55 км и слегка вытянут в направлении с юго-востока на северо-запад. Его плоская вершина размером 6 × 9 км расположена на глубине 1100 м и в её пределах отмечены две отличительные глубины: 1040 м и 1060 м. Кругизна склона у подножья гайота составляет ~7°, увеличиваясь до 25–30° в привершинной части.

Склоны гайота осложнены значительным количеством небольших возвышенностей с относительной высотой, достигающей 100 м. У его подножья отмечен кольцевой ров глубиной до 130 м, который, возможно, свидетельствует о прогибе литосферы под тяжестью гайота.

Подножие гайота, судя по данным непрерывного сейсмоакустического профилирования, на глубинах >4,5 км перекрыты толщей предполагаемых рыхлых отложений, а плоская вершина — горизонтально-слоистыми, по-видимому, лагунными отложениями мощностью ≤ 100–150 м.

При драгировании вершины гайота в 13 рейсе НИС «Вулканолог» в интервале глубин 1080–1060 м были подняты фосфориты, покрытые железомар-

ганцевой корочкой, а при драгировании северного склона гайота в интервале глубин 2000–1800 м — глыбы органогенных известняков, железомарганцевые конкреции и корки, а также обломки оливинного базальта (рис. 2) [1–3].

При драгировании в 6 рейсе НИС «Томас Вашингтон» на северном склоне в интервале глубин 3600–2400 м были подняты базальты, лавовые брекчии, фосфориты, и железомарганцевые корки, а на западном склоне в интервале глубин 3400–3200 м — базальты и железомарганцевые корки [4]. Содержание марганца в драгированных корках изменяется в диапазоне 18,6–23,0 вес. %.

Возраст драгированных базальтов, определённый ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом, изменяется в диапазоне от 114,0 ± 1,3 млн лет до 139,3 ± 0,7 млн лет [7, 8]. Возраст постройки, определённый палеомагнитным методом составляет около 80–90 млн лет [4].

Аномальное магнитное поле (АМП) Δ*T*_a, измеренное над гайотом, характеризуется отрицательными значениями над вершиной постройки и положительными значениями — над склонами. Максимальная амплитуда аномалии, приуроченный к гайоту, составляет 960 нТл (рис. 1б).

Первоначальная интерпретация показала, что средняя намагниченность подводной постройки составляет ~ 2–3 А/м, а наблюдаемая аномалия магнитного поля обусловлена базальтами, слагающими ядро гайота, а не драгированными слабомагнитными железомарганцевыми корками и известняками [4].

Гидромагнитные измерения, выполненные в 13-м рейсе НИС «Вулканолог», были дополнены данными из базы GEODAS — более 6300 погонных км съёмки за период 1960–2000 гг. С помощью оригинальной технологии удалось свести эту разнородную информацию в единый цифровой массив с относительной погрешностью значений поля менее 4%.

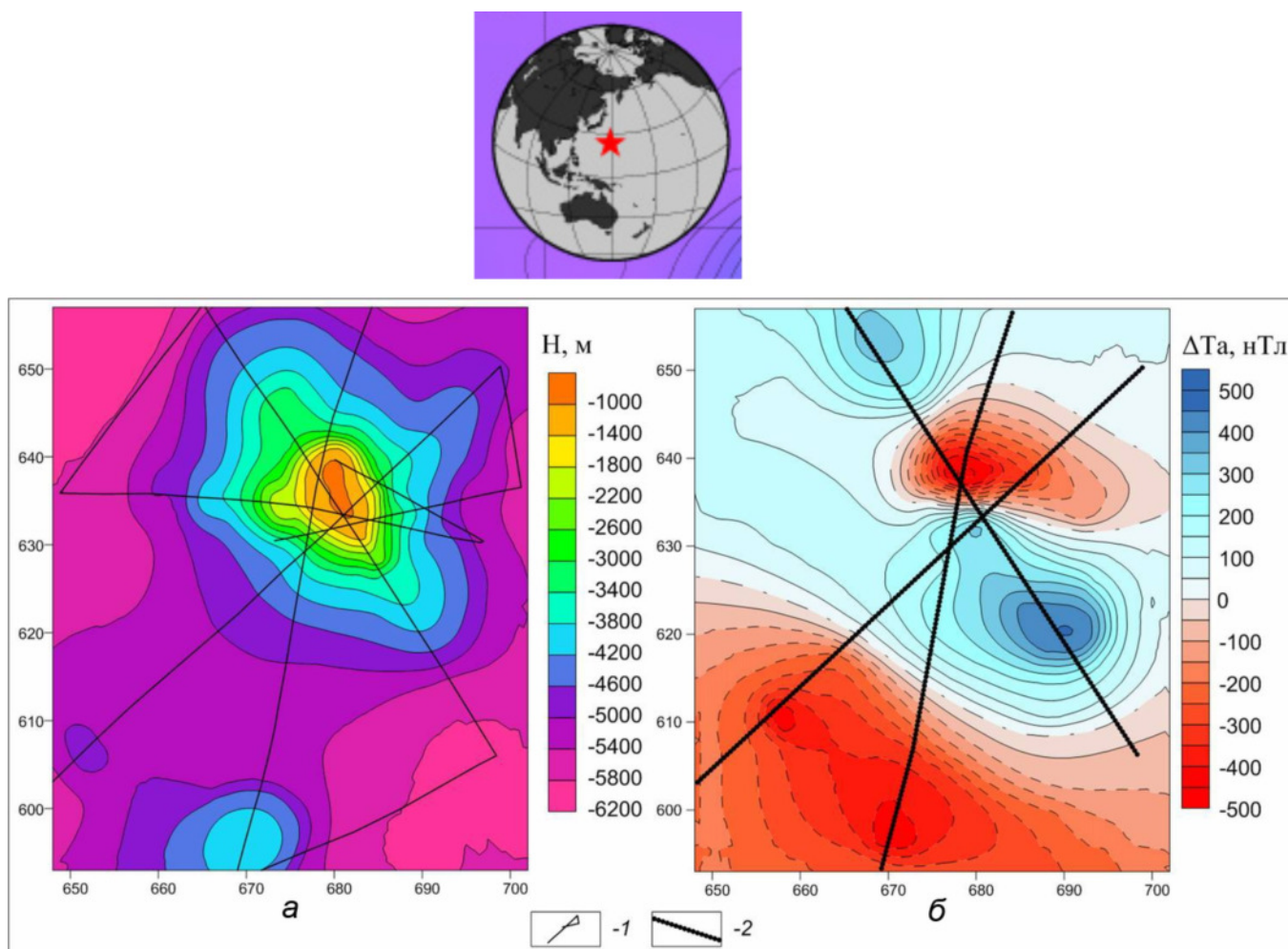


Рис. 1. Местоположение, батиметрия (а) и аномальное магнитное поле (б) гайота Сет: 1 — галсы; 2 — интерпретационные профили.

Это позволило синтезировать карту АМП на площади размером $\sim 150 \times 200$ км, содержащую внутри себя гайот Сет [3], и существенно повысить качество последующих интерпретационных построений. По методу магнитных моментов получены оценки среднего направления эффективной намагниченности для всей площади: склонение $D = -19,9^\circ$, наклонение $I = -27,1^\circ$, палеоширота $\varphi = -14,4^\circ$, что лучше согласуется с датировками абсолютного возраста [7, 8], чем результаты выполненного ранее палеомагнитного анализа [4].

Анализ морфологии АМП и его трансформант осуществлялся с помощью ранговых фильтров и других современных технологий обработки изображений (скелетонизация, морфинг, водораздел и т. д.), а полученные оценки D и I использовались для предварительной редукции аномалий к полюсу (рис. 3а). Этот массив послужил основой для последующих расчётов (рис. 3б-г). Анализируемая область была разбита на набор сопряженных непересекающихся многоугольников, центрами которых служат локальные максимумы модуля аналитического сигнала (рис. 3г). Посредством этого осуществилось

сегментирование изучаемой площади на набор под-областей, внутри каждой из которых находится минимальное количество особенностей поля, с целью локализации источников аномалий в плане.

Для изучения глубинного строения гайота Сет выполнялись томографический анализ АМП, решение смешанной обратной задачи магниторазведки (ОЗМ) монтажным методом и построение 3D-интерполяционной модели источников (рис. 4) [1]. Для интерпретации были выбраны три наиболее протяжённых галса, проходящих через вершину вулканической постройки. В результате было выделено три субвертикальных магнитовозмущающих объекта. Эффективная намагниченность объекта 2, находящегося непосредственно под вершиной вулканической постройки, $J_{\text{эф}} = 3$ А/м со средним углом намагничения $\alpha = 87^\circ$; объект 1 обладает $J_{\text{эф}} = 3,6$ А/м и $\alpha = 83^\circ$; объект 3 — $J_{\text{эф}} = 5$ А/м и $\alpha = 87^\circ$. Объект 1 заключён в интервале глубин 4,5–20 км и обладает наибольшими поперечными размерами, превышающими 10 км; объект 2 выходит к поверхности вершины вулканической постройки и прослеживается до глубины порядка 15–18 км;



Рис. 2. Железомарганцевые образования гайота Сет, драгированные в 13 рейсе НИС «Вулканолог».

объект 3 характеризуется наиболее мощной верхней частью и расположен в глубинном интервале 4,5–20 км. На основании 2,5D-моделирования монтажным методом была сформирована интерполяционная трехмерная модель источника поля (рис. 4б) и три вышеописанных объекта объединены в верхней части изучаемого геологического пространства. Магнитовозмущающее тело, соответствующее застывшей магматической системе гайота, обладает сложной морфологией с внушительными как горизонтальными, так и вертикальными размерами.

Оригинальная интерпретационная технология моделирования данных гидромагнитной съёмки позволила выявить подводящие каналы гайота Сет, которые могут ассоциироваться с многожерловой структурой вулканической постройки и выполнить оценку петромагнитных свойств пород в естественном залегании.

Железомарганцевые образования, драгированные в 13 рейсе НИС «Вулканолог» (рис. 2), изучены комплексом современных методов [1]: минеральный состав методом порошковой дифрактометрии на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-4 и «Rigaku»; химический состав методами атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с ин-

дуктивно связанной плазмой (ICP AES и ICP MS), в Центре коллективного пользования (ПЦЛЭИА) Дальневосточного геологического института ДВО РАН, а также атомно-адсорбционной спектроскопии с использованием отечественного анализатора ртути РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915.

Полученные данные свидетельствуют об уникальности железомарганцевого рудогенеза гайота Сет.

На станции В13-1 (глубина 1060–1080 м) подняты слоистые пелитоморфные фосфориты (франколит) покрытые до 1 мм железомарганцевой пленкой (вернадит), в которой установлено «ураганное» (т. е. более 1000 мг/т) содержание ртути — 4120 мг/т (рис. 5, таблица).

На станции В13-2 (глубина 1800–2000 м) среди рудного вещества установлены только фрагменты железомарганцевых корок без субстрата, которые относятся к кобальтомарганцевым коркам (КМК). Содержание ртути здесь достигает 1270 мг/т (таблица). Морфологическая типизация исследованных образцов по текстурно-структурным признакам позволила выделить четыре группы (таблица). Три группы соответствуют полному сводному разрезу КМК Маркус-Уэйк и Магеллановых подводных гор

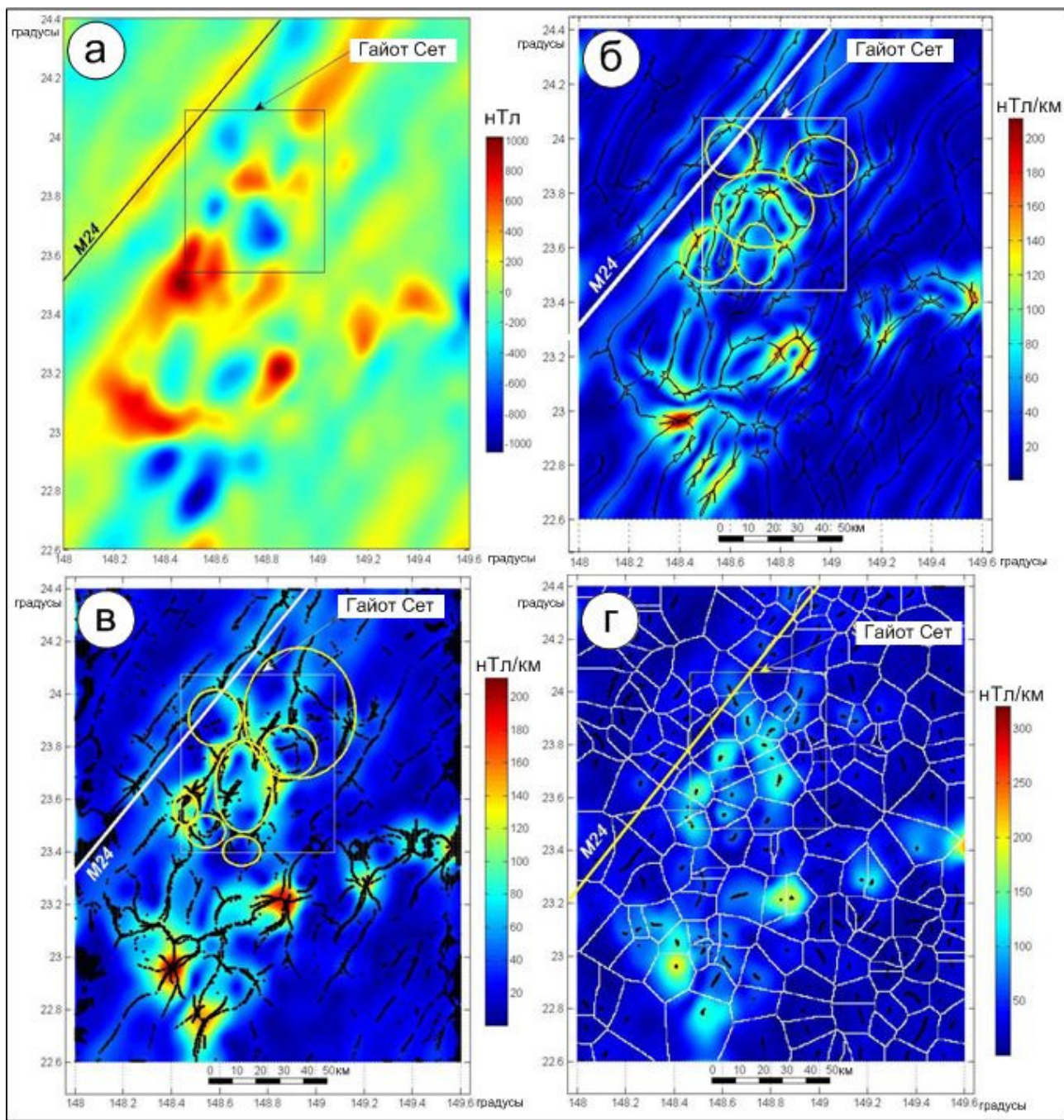


Рис. 3. Анализ морфологии АМП и его трансформант: а — редукция поля ΔT_a к полюсу; б — морфоанализ максимумов горизонтального градиента поля; в — морфоанализ модуля аналитического сигнала поля; г — сегментирование изученной площади. М24 (153,9 млн лет) — идентифицированная линейная магнитная аномалия.

и гайотов (нижний фосфатизированный антрацитовидный — I слой, средний пористый — II слой, верхний буроугольный — III слой) и четвертый — вновь образованный IIIA слой. Основными минералами в I группе являются франколит и вернадит, во II группе — вернадит с примесью кварца, в группах III и IIIA основной минерал вернадит, а среди нерудных — примесь кварца, плагиоклаза и кальцита.

Химический состав породообразующих элементов образцов КМК станции В13-2 согласуется с про-

ведённой типизацией. Этому подтверждению служат и данные о содержании редкоземельных элементов и иттрия (REY), которые наиболее чутко реагируют на процессы формирования железомарганцевых образований (рис. 6).

Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что первые три слоя соответствуют полному разрезу КМК Маркус-Уэйк и Магеллановых подводных гор, были сформированы гипсометрически выше по склону и в результа-

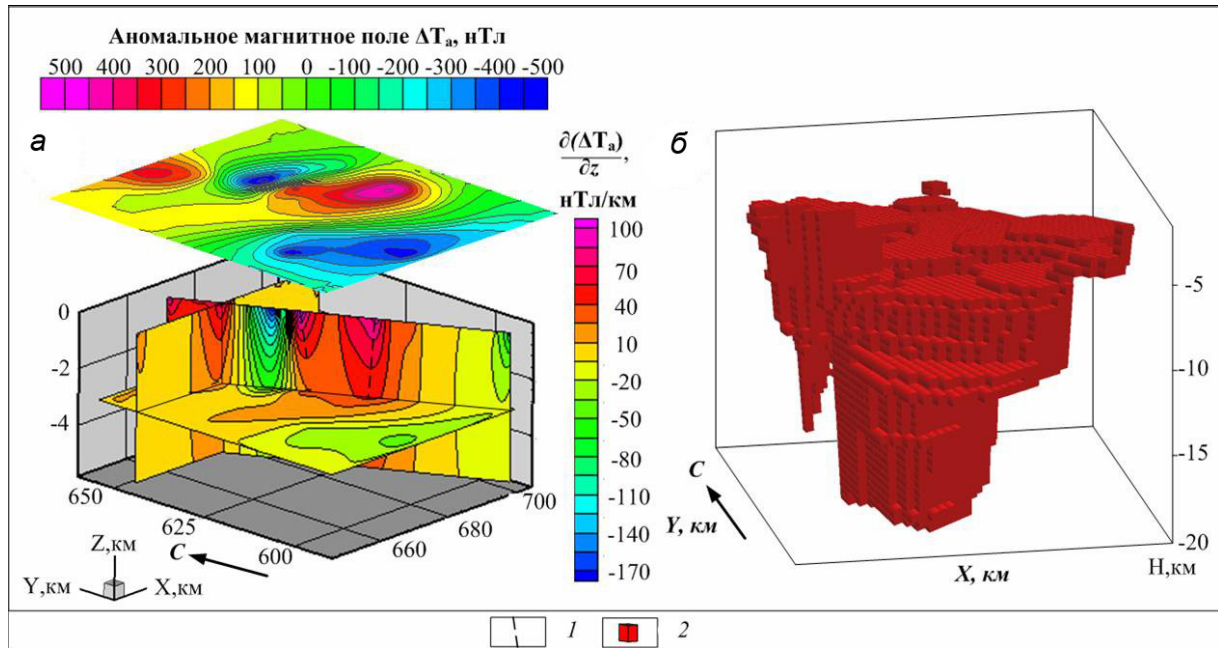


Рис. 4. Интерпретационная томография АМП (а) и 3D-модель глубинного строения гейота Сет (б): 1 – оси подводящих каналов; 2 – единичный элемент.

Химический состав КМК гейота Сет.

Слой КМК № образца	I					II			III			IIIА	
	В13-2/1-1	В13-2/1-2	В13-2/2-2	В13-2/2-3	В13-2/4	В13-2/7-3	В13-2/7-4	В13-2/5	В13-2/7-1	В13-2/7-2	В13-2/2-1	В13-2/3-в	В13-2/3-б
	% масс.												
Si	2,68	2,05	2,42	2,00	2,43	5,00	3,68	4,53	6,29	4,62	5,53	6,13	4,74
Ti	0,46	0,57	0,53	0,63	0,52	1,23	1,03	1,06	0,77	0,82	0,95	0,85	1,10
Al	0,90	0,67	0,71	0,54	0,69	1,34	1,03	1,13	1,17	0,87	1,27	1,33	1,07
Fe	8,02	6,55	9,45	8,41	7,33	13,96	11,97	13,35	19,70	17,13	17,95	17,48	19,07
Mn	13,41	13,76	12,17	14,25	12,64	21,46	25,87	25,11	18,41	20,48	19,30	19,59	22,00
Mg	0,68	0,63	0,59	0,58	0,59	0,93	1,03	1,06	0,88	0,89	0,92	0,92	0,95
Ca	21,73	21,07	22,43	19,98	21,88	3,02	2,73	2,84	2,27	2,31	2,73	2,54	2,84
Na	1,36	1,46	1,28	1,54	1,26	1,66	1,65	1,95	1,63	1,66	2,18	1,76	1,93
K	0,52	0,40	0,41	0,35	0,39	0,65	0,63	0,65	0,50	0,42	0,53	0,58	0,50
P	5,59	5,34	5,64	4,91	5,49	0,50	0,32	0,27	0,39	0,37	0,38	0,36	0,41
ppm	10,52	10,91	9,83	10,99	10,56	12,28	13,26	13,42	11,87	11,51	11,47	11,20	11,63
	г/г												
Co	1775,1	2250,8	1796,9	2224,9	1729,3	5011,1	3546,2	4718,8	2996,6	3578,8	3939,5	3379,4	4352,8
La	602,5	462,9	332,6	457,7	363,5	221	188,9	184,9	262,5	292,1	271,4	256,8	301,7
Ce	1096,2	1117,3	1029,4	936,5	1044,8	1343,4	1489,8	1116,5	760,2	672,8	895,3	843,7	959
Pr	81	66,3	55,6	73,1	60,2	44,9	38	40	59,1	59,3	60,8	58,4	69
Nd	356,7	289,5	240,5	318,1	260,6	187,1	156,9	164,5	250,3	254,8	258,2	246,3	293,9
Sm	60,7	51,3	44,4	54,8	49,2	36,3	31,8	34,3	51,7	51,3	51,8	50,1	60,6
Eu	16,1	13,4	11,4	14,5	12,7	9,1	7,8	8,4	12,8	12,9	12,7	12,4	15
Gd	95	73,3	60,2	81,2	68,7	43,6	37,3	38,8	58,6	60,6	58,4	57,1	68,4
Tb	13,9	10,6	8,6	11,8	9,4	6,9	5,6	6	8,8	9,2	9,2	8,8	10,4
Dy	101,1	71,6	55,4	78,1	61,4	42,2	33,9	34,5	52,3	56,1	53,6	52,1	60,8
Y	1165,4	771,8	490,8	705,1	535,8	181,8	142,7	111,3	163	177,9	169,3	162,1	182,1
Ho	25,5	17,3	12,6	17,9	13,9	8,6	6,9	6,8	10	11,2	10,4	10	11,7
Er	85,2	56	39,1	55,4	43,2	26,0	20,8	19,9	29	32,4	30	28,6	33,6
Tm	11,9	7,7	5,2	7,3	5,8	3,6	3	2,8	3,9	4,5	4,2	4	4,7
Yb	81,6	51,3	34	48,6	37,8	23,4	19,4	19	25,8	29,5	27,4	25,8	30,2
Lu	13,5	8,4	5,4	7,7	6	3,7	3	2,8	3,8	4,4	4	3,8	4,4
сумма REY	3806,2	3068,6	2425,3	2867,8	2573,0	2181,6	2185,7	1790,4	1751,9	1729,0	1916,7	1820,1	2105,4
	мг/г												
Hg	795	577	577	918	179	275	651	849	732	294	1220	1180	1290

те дезинтеграции снесены по склону гейота Сет на данную глубину. Четвертый слой, залегающий несогласно на фрагментах КМК этих групп, судя по результатам вычислений по кобальтовому хронометру, начал отлагаться не ранее 1 млн л. н. Физико-химические условия формирования слоёв

III и IIIА были близки. Кроме того, толщина слоя III среди фрагментов КМК гейота Сет и III слоя КМК Маркус-Уэйк и Магеллановых подводных гор и гйотов приблизительно одинакова. Однако по содержанию ртути четвертый слой (IIIА) резко выделяется. Аномально высокая концентрация её характерна

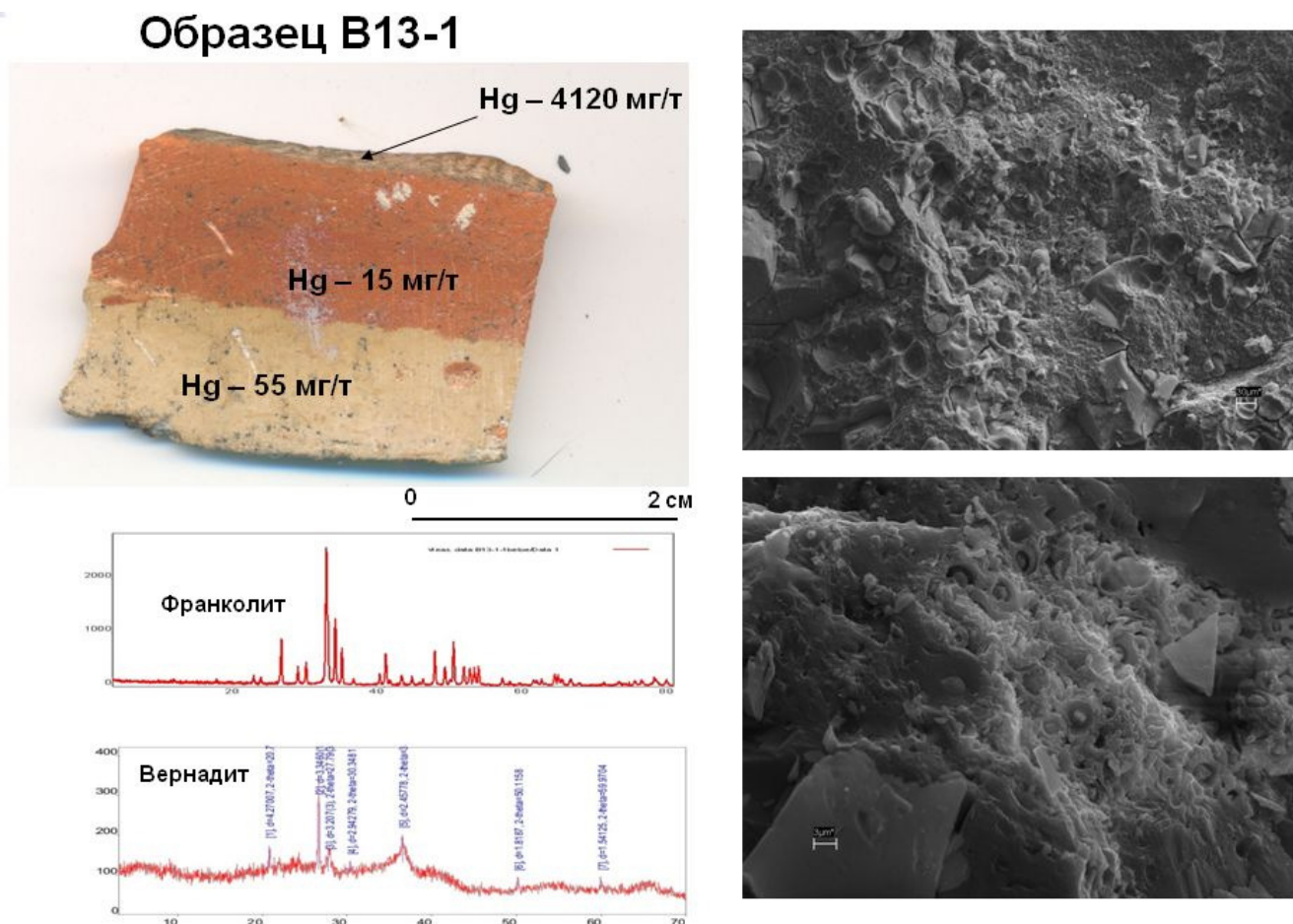


Рис. 5. Слоистые пелитоморфные фораминиферово-кокколитовые фосфориты (франколит) покрытые до 1 мм железомарганцевой пленкой (вернадит), в которой установлено содержание ртути — 4120 мг/т. Справа фотография-скан: вверху — остатки фораминифер преобладают, внизу — кокколитов.

только для современных гидротермальных железомарганцевых образований.

Мы полагаем, что столь высокое содержание ртути в гидrogenных КМК гайота Сет, по-видимому, явилось следствием плиоцен-четвертичной вулcano-тектонической активизации, проявившейся на гайотах Северо-Западной Пацифики. Среднемиоценовая вулcano-тектоническая активизация, широко проявившаяся на гайотах Северо-Западной Пацифики, не сопровождалась формированием высоких содержаний ртути в гидrogenных КМК, о чём свидетельствуют результаты анализов по концентрации этого металла (173–317 мг/т) в гидротермально проработанных нижних слоях КМК гайота Детройт. Количество ртути в гидrogenных железомарганцевых образованиях составляет 39 мг/т в Восточной Пацифике и 78 мг/т — в Западной Пацифике [5].

В результате выполненных комплексных геолого-геофизических исследований выявлены подводящие каналы гайота Сет, которые могут ассоциироваться с многожерловой структурой вулканической постройки. Получены данные, свидетельствующие об уникальности железомарганцевого рудогенеза

гайота Сет, для которого характерны ураганные содержания ртути, достигающие 4120 мг/т.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15–05–01 823) и Президиума ДВО РАН (проект № 15–I–1–0080).

Список литературы

1. Долгаль А. С., Зарубина Н. В., Иваненко А. Н. и др. Комплексные исследования гайота Сет (С-З Пацифика) // Вулканизм и связанные с ним процессы. XVIII ежегодная научная конференция, посвящённая Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 130–134.
2. Долгаль А. С., Иваненко А. Н., Новикова П. Н., Рашидов В. А. Геомагнитные исследования гайота Сет (Тихий океан). Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Успенского Д. Г. М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 133–136.
3. Долгаль А. С., Иваненко А. Н., Новикова П. Н., Рашидов В. А. Новые данные о строении гайота Сет (горы Маркус-Неккер, Тихий океан) // Геология морей и океанов. Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии.

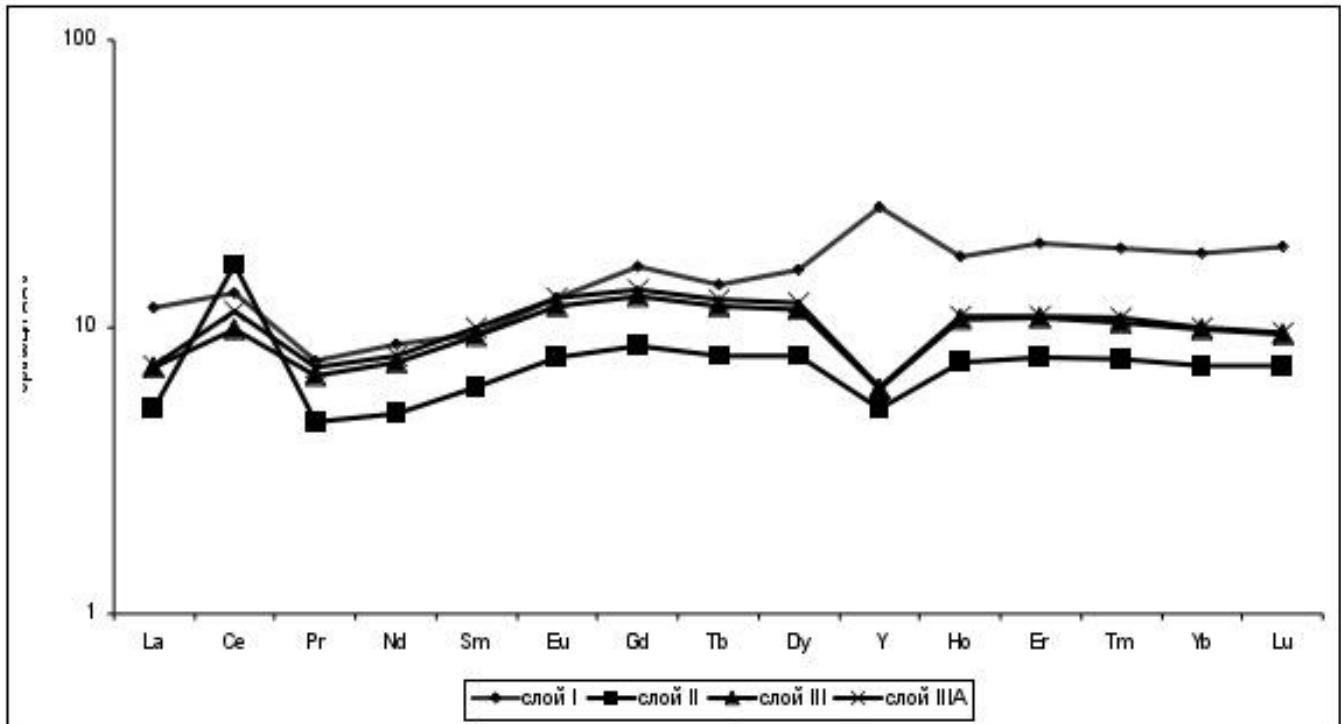


Рис. 6. Распределение средних величин сланец-нормированных редкоземельных элементов и иттрия в слоях I, II, III и IIIA в КМК гайота Сет.

Москва, 18–22 ноября 2013 г. Москва: ГЕОС, 2013. Том. 5. С. 76–80.

- Магнитное поле океана / Отв. ред. Городницкий А. М. — М.: Наука. 1993. 285 с.
- Михайлик П. Е., Ханчук А. И., Михайлик Е. В. и др. Новые данные по содержанию ртути в железомарганцевых корках подводных гор С-З Пацифики // ДАН, 2012. Том. 447. № 5. С. 546–551.
- Hein J. R., Zielinski S. E., Staudigel H. et al. Composition of Co²⁺ Rich Ferromanganese Crusts and Substrate Rocks from the NW Marshall Islands and International Waters to the North, Tunes 6 Cruise // Open File Report 97–482. Department of the Interior U.S. Geological Survey. 1997. 65 p.
- Koppers A. A. P. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology and Isotope Geochemistry of the West Pacific Seamount Province. Implications for Absolute Pacific Plate Mounts and the Mount of Hotspots / Netherlands Research. School of Sedimentary Geology. 1998. Publication no. 980 701. 263 p.
- Koppers A. A. P., Staudigel H., Pringle M. S., Wijbrans J. R. Shortlived and discontinuous intraplate volcanism in the South Pacific: Hot spots or extensional volcanism? // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2003. Vol. 4. № 10. P. 1–49.