

ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ИУЛЬТИНСКОГО
Sn-W МЕСТОРОЖДЕНИЯ: НОВЫЕ ДАННЫЕ

© 2008 г. Т. М. Сущевская*, А. В. Игнатъев**, Т. А. Веливецкая**

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
119991 Москва, ул. Косыгина, 19, ryzhenko@geokhi.ru**Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690063 Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159

Поступила в редакцию 30.03.2007 г.

Изучение изотопных зональностей кислорода в песчано-сланцевых и гранитных породах, вмещающих Sn-W оруденение месторождения Иультин проводится в связи с исследованием его генезиса, как типичного представителя оловянных месторождений кварц-касситеритовой формации [1]. При этом имеется ввиду, что одним из наиболее эффективных путей осаждения Sn и W из гидротермальных растворов является смещение флюидов магматогенного и метеорного происхождения [2–4 и др.]. Поступление метеорных изотопно легких вод в гидротермальную систему обычно сопровождается их взаимодействием с окружающими породами и вследствие этого снижением величин $\delta^{18}\text{O}$ пород. Показано, что возникающие изотопные вариации могут быть источником важной информации не только о генезисе минералообразующих флюидов, но и о путях миграции и количестве растворов, участвующих во взаимодействии [5, 6]. Это делает необходимым проведение изотопных исследований гидротермальных рудообразующих систем в целом, включая пространство, окружающее зону рудоотложения.

Для Иультинского месторождения на основании ранее полученных данных установлено, что в период формирования кварцевых жил и Sn-W оруденения околожилные породы были слабо изменены по изотопному составу кислорода. Предполагается, что значительное обеднение изотопом O^{18} произошло на пострудном этапе, когда в системе преобладали воды изначально метеорного происхождения. Для рассматриваемой гидротермальной системы установлены высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ жильных минералов, отвечающие магматогенному источнику отложивших их флюидов, и в то же время пониженные значения $\delta^{18}\text{O}$ не только околожилных пород, но и δD рудообразующего флюида, рассчитанные по равновесию мусковит-вода. На основе этих данных был сделан вывод о том, что после отложения основной массы руд происходило воздействие инфильтрационного потока изотопно-легких вод [7–9]. В настоящем исследовании делается попытка подтвердить сде-

ланные выводы на более обширном материале, включающем фланговые участки месторождения, рудные тела, различные по продуктивности и по соотношению в них олова и вольфрама.

Иультинское месторождение (Чукотка, Россия) локализовано в экзо- и эндоконтакте штока лейкократовых гранитов (K_2), образовавшихся в заключительную фазу интрузивной деятельности в районе [10]. В геологическом строении месторождения принимают участие метаморфизованные осадочные образования (P_2 – T_1). С внедрением гранитов связано ороговикование этих пород. Месторождение представлено серией рудных жил, залегающих в нескольких системах рудовмещающих трещин, а также в штокверково-грейзеновой зоне, расположенной в кровле купола лейкократовых гранитов. Рудные тела, выделенные в процессе разведки месторождения, образованы обычно одной или несколькими близко расположенными кварцевыми жилами, имеют наибольшую мощность в центральной части. С глубиной они постепенно выклиниваются, особенно резко при входе в гранитный купол. При формировании рудных жил и грейзенов последовательно отлагались минеральные ассоциации: а) дорудная кварц–мусковит–альбит–флюоритовая, б) продуктивная кварц–мусковит–касситерит–вольфрамитовая, в) сульфидная, кварц–арсенопиритовая с халькопиритом и пиритом, г) пострудная, кварц–флюорит–кальцитовая. Согласно данным по флюидным включениям в минералах, формирование продуктивной ассоциации происходило при $T = 270$ – 350°C из умеренно минерализованных (1–9 мас. % NaCl экв.) хлоридно-натриевых растворов, обогащенных CO_2 и CH_4 [11, 12]. Следствием значительного уменьшения давления при раскрытии рудовмещающих трещин, от 5–6 кбар до 1.0–0.5 кбар, явилось вскипание растворов, наиболее интенсивно проявленное в центральной части месторождения.

Ранее для Иультинского месторождения были получены изотопно-кислородные данные по жильным и грейзеновым минералам, а также по вмещающим породам. Вмещающие гидротермальную

Таблица 1. Изотопный состав кислорода кварца и мусковита

Разрез	Горизонт	Рудное тело, жила	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰, SMOW}$		
			Кварц жильный	Мусковит центра жилы	Мусковит зальбанда жилы
I	5	7	10.2	–	7.3
III	5	62/50	9.5 10.7 10.8	–	8.4
IV	5	62/50	10.6 10.8 11.2	8.2	7.7 8.0 9.4
V	4	62/50	10.1 10.2 10.7	8.8 8.8	9.0
VI	3	62/50	6.7 7.3 11.2 11.3 11.2	–	7.3
VII	3	62/50	9.9 10.5	9.1	–
VIII	4	10	9.7 10.4	–	–
IX	6	62/50	10.8 11.1 11.1 11.0 11.3 11.4 11.4	9.3	7.0 8.7
X	3	10	10.7 11.2	–	10.6
XI	7	62	10.7	–	–
420*	7	120	11.5 10.4	–	9.3

* Данные для кварца и мусковита из рудного тела № 120, расположенного на 7-ом горизонте в корневой части месторождения. Примечание. Абсолютные отметки горизонтов в руднике месторождения Иультин, м: I – 680, II – 630, III – 585, IV – 540, V – 475, VI – 415, VII – 350; максимальная отметка поверхности – 740.

систему породы анализировались по разрезам, отобраным в центральной части месторождения, в гранитах подрудной зоны и в песчано-сланцевых породах внешней зоны месторождения [7–9]. Кроме того, был проанализирован изотопный состав водорода мусковитов из жил и грейзенов, на основании чего были рассчитаны величины δD минералообразующих флюидов [7].

В данной работе изучены еще восемь разрезов околожилльных пород, расположенных следующим образом. Разрезы III, V, VI, IX, XI отобраны по метаморфизованным песчано-сланцевым породам, вмещающим рудное тело (РТ) 62/50 на горизонтах 3, 4, 5, 6, что существенно дополняет ранее полученную картину по центральной части месторождения. Три разреза (II, VIII, X) характеризуют рудное тело № 10 (РТ 10) на горизонтах 3, 4, 5, один разрез (I) – рудное тело № 7 – на горизонте 5. Привлечение материала по рудным телам 7 и 10 объяснялось возможностью опробования на них забалансовых и безрудных участков, что представляло интерес для сравнения с мощным и богатым в отношении Sn и W рудным телом 62/50. Получены также дополнительные данные по изотопному составу кислорода основных жильных минералов, кварца и мусковита (табл. 1).

Анализ изотопного состава кислорода минералов и пород проводили в Приморском центре исследований химического состава и стабильных изотопов. Для анализа изотопов кислорода силикатов и окислов была использована высоковакуумная установка с лазерным вариантом подготовки проб к последующему прецизионному масс-

спектральному анализу на приборе Finnigan MAT 252 [13]. Полученные результаты по изотопному составу кислорода минералов из жил и рудных тел представлены в табл. 1. В табл. 2 содержатся данные по разрезам, рис. 1 и 2 построены по результатам наиболее представительных разрезов.

Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ по породам, вмещающим рудные жилы, показывает, что как метаморфизованные песчано-сланцевые породы, так и измененные граниты, обеднены изотопом ^{18}O по мере приближения к контакту жилы от значений $\delta^{18}\text{O}$ порядка 10‰ до нулевых и даже отрицательных. Это соответствует аналогичной тенденции, установленной ранее по разрезам пород, вмещающим РТ 62/50, и по разрезам во внешней зоне месторождения, опробованной по подходным горным выработкам [9, 14]. Сравнение данных, характеризующих наиболее богатое в отношении Sn-W оруденения рудное тело 62/50 (рис. 1) и более бедное, особенно в отношении Sn, рудное тело № 10 (рис. 2), не выявляет существенных различий. Этому выводу не противоречат и данные по разрезам I, III, VI (табл. 2). Не обнаруживаются какие-либо различия и в распределении $\delta^{18}\text{O}$ по вертикали, в пределах рассматриваемых интервалов (250 м для РТ 62/50 и 110 м для РТ 10). Наиболее низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ установлены в разрезе XI, пересекающем РТ 62/50 на 7-ом горизонте в грейзенизированных гранитах. Исследование пористости и проницаемости пород, находившихся в кровле гранитного штока показало, что они являлись наиболее проницаемыми и благоприятными для поступления экзогенных вод [9]. В пределах

Таблица 2. Изотопный состав кислорода вмещающих пород по разрезам

№ обр.	Место отбора, см.*	Порода, минерал	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	№ обр.	Место отбора, см.*	Порода, минерал	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW
Разрез I, горизонт 5, штрек 530, рудное тело (РТ) 7				2065	750	Слюдистый кварцит	5.8
2007	15	Слюдистый сланец	1.8	2066	800	Слюдистый сланец	3.3
2008	30	Слюдистый сланец	0.8	2068	900	Слюдистый сланец	6.2
2009	47.5	Слюдистый сланец	3.1	Разрез V, горизонт 4, РТ 62/50			
2010	50	Кварц	10.2	2094	50	Песчаник ороговикоманный	3.4
		Мусковит	7.3	2095	100	Роговик биотитовый	-0.8
2013	127.5		2.7	2100	310	Слюдистый сланец	4.4
Разрез II, горизонт 5, пересечение квершлага 516 и штрека 517, РТ 10				2104	525	Роговик биотитовый	3.1
2018	50	Ороговикоманный песчаник	11.3	2105	575	Роговик биотитовый	5.8
2019	150	Слюдистый сланец	10.7	Разрез VI, горизонт 3, пересечение штрека 53 и штрека 322			
2022	450	Ороговикоманный песчаник	9.6	2119	220	Песчаник ороговикоманный	8.3
2023	550	Ороговикоманный песчаник	9.7	2124	417.5	Слюдистый сланец	2.7
2024	650	Слюдистый сланец	9.9	2125	570	Халцедоновая порода	5.1
2025	750	Слюдистый сланец	8.6	2132	785	Песчаник ороговикоманный	4.8
2026	850	Слюдистый сланец	7.8	2133	825	Песчаник ороговикоманный	5.1
2029	1150	Слюдистый сланец	6.5	2137	950	Песчаник ороговикоманный	5.2
2031	1365	Слюдистый сланец	5.8	2138	1000	Песчаник ороговикоманный	6.3
2034	1560	Слюдистый сланец	6.0	2139	2525	Песчаник	3.8
Разрез III, горизонт 3, штрек 56, РТ 62/50				Разрез VII, горизонт 3, пересечение штрека 108 и штрека 388в, РТ 62/50			
2076	60	Слюдистый сланец	9.3	2163	847.5	Роговик	6.5
2078	200	Кварц	10.7	2164	845	Биотитовый роговик	3.0
2079	204.5	Кварц	9.5	2165	795	Слюдистый сланец	5.1
2080	207	Мусковит	8.4	2167	670	Слюдистый сланец	5.4
2087	684.25	Биотитовый роговик	8.4	2168	595	Роговик биотитовый	5.3
2088	739.25	Кварц	10.8	2169	545	Слюдистый сланец	3.6
2090	854.25	Слюдистый сланец	7.7	2170	495	Слюдистый сланец	5.5
2091	929.25	Слюдистый сланец	5.4	2176	225	Биотитовый роговик	2.4
Разрез IV, горизонт 5, пересечение штрека 90а и квершлага 519, РТ 62/50				2177	175	Биотитовый роговик	5.9
2051	50	Слюдистый сланец	6.5	2178	125	Слюдистый сланец	5.5
2052	150	Роговик	6.7	2179	50	Биотитовый роговик	5.4
2053	250	Кварцит	7.0	Разрез VIII, горизонт 4, пересечение квершлага 403 и штрека 406, РТ 10			
2058	480	Кварцит	10.8	2146	10	Контакт кварцевой жилы	1.3
2063	650	Слюдистый сланец	2.6	2150	140	Биотитовый роговик	1.1
2064	700	Слюдистый сланец	4.6	2151	190	Измененный биотитовый роговик	-0.3

Таблица 2. Окончание

№ обр.	Место отбора, см.*	Порода, минерал	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	№ обр.	Место отбора, см.*	Порода, минерал	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW
2154	365	Биотитовый сланец	6.2	2215	500	Измененный роговик	2.4
2155	432.5	Биотитовый сланец	-0.9	2217	562	Биотитовый роговик	5.5
2156	475	Слюдистый сланец	-0.2	2218	637	Песчаник ороговикованный	7.7
2157	525	Слюдистый сланец	5.4	2219	737	Песчаник ороговикованный	8.9
2158	600	Слюдистый сланец	5.4	2220	937	Биотитовый роговик	4.4
2159	700	Биотитовый роговик	6.7	Разрез XI, горизонт 7, РТ 62			
Разрез IX, горизонт 6, пересечение штрека 601 и квершлага 603, РТ 62				2221	50	Гранит альбитизированный	1.4
2180	50	Хлоритизированный биотитовый роговик	9.5	2222	150	Гранит альбитизированный	2.3
2184	315	Биотитовый роговик	8.2	2223	250	Гранит альбитизированный	2.6
2185	415	Слюдистый сланец	8.7	2224	325	Гранит мусковитовый	1.5
2187	540	Биотитовый роговик	8.7	2226	425	Гранит мусковитовый	0.5
2188	585	Хлоритизированный биотитовый роговик	7.7	2227	475	Гранит мусковитовый	3.0
2199	1065	Слюдистый сланец	4.4	2228	525	Гранит мусковитовый	1.1
2200	1140	Роговик измененный	5.6	2232	580	Гранит грейзенизированный	3.2
2201	1240	Роговик	8.5	2233	605	Гранит грейзенизированный	4.3
Разрез X, горизонт 3, пересечение квершлага 328 и штрека 323, РТ 10				2234	655	Гранит альбитизированный	2.1
2204	200	Биотитовый роговик	8.6	2235	730	Гранит альбитизированный	1.8
2206	325	Биотитовый сланец	7.8	2236	830	Гранит слабоальбитизированный	3.5
2207	357.5	Роговик	4.6	2237	930	Гранит слабоальбитизированный	3.8
2214	475	Измененный роговик	6.3				

* Значения соответствуют середине интервала при сколочной системе отбора проб вмещающих пород по линии разреза.

менее проницаемых ороговикованных вмещающих пород песчано-сланцевого состава также наблюдаются отдельные низкие значения $\delta^{18}\text{O}$, отмеченные, например, в разрезах I, IV, V, VII и VIII. В последнем случае в зоне разреза VIII, пересекающего РТ10 на 4-ом горизонте это легко объяснить, поскольку здесь фиксируется участок тектонического нарушения, тогда как в остальных разрезах мы имеем дело, видимо, с более локальными проявлениями повышенной проницаемости. Рассмотрение данных, представленных на рис. 1 и 2, показывает отсутствие корреляции между мощностью рудного тела и степенью взаимодействия вмещающих пород с изотопно-легкими водами. Это подтверждает вывод о более позднем поступлении основной массы этих вод в гидротермальную систему месторождения [14]. Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ по линиям разрезов отвечает инфильтра-

ционному характеру движения потока вод метеорного происхождения, вступавших во взаимодействие с породами. Закономерно, что наиболее интенсивным это взаимодействие было в зонах контактов жил, в измененных гранитных породах кровли штока и в зонах тектонических нарушений.

Рассмотрим теперь, о чем свидетельствуют данные по изотопному составу кислорода минералов, кварца и мусковита, отобранных из рудных жил по изученным разрезам (табл. 1, рис. 1, 2). Для рудных тел, вне зависимости от типа (грейзеновое или жильное) и масштаба оруденения, наблюдаются высокие значения $\delta^{18}\text{O}$: до 11.4‰ для кварца и до 10.6‰ для мусковита. Этот уровень в целом согласуется с ранее полученными значениями $\delta^{18}\text{O}$ по кварцу и мусковиту из других рудных тел (№№120 и 132). Использование изотопно-водородного геотермометра мусковит-вода показало,

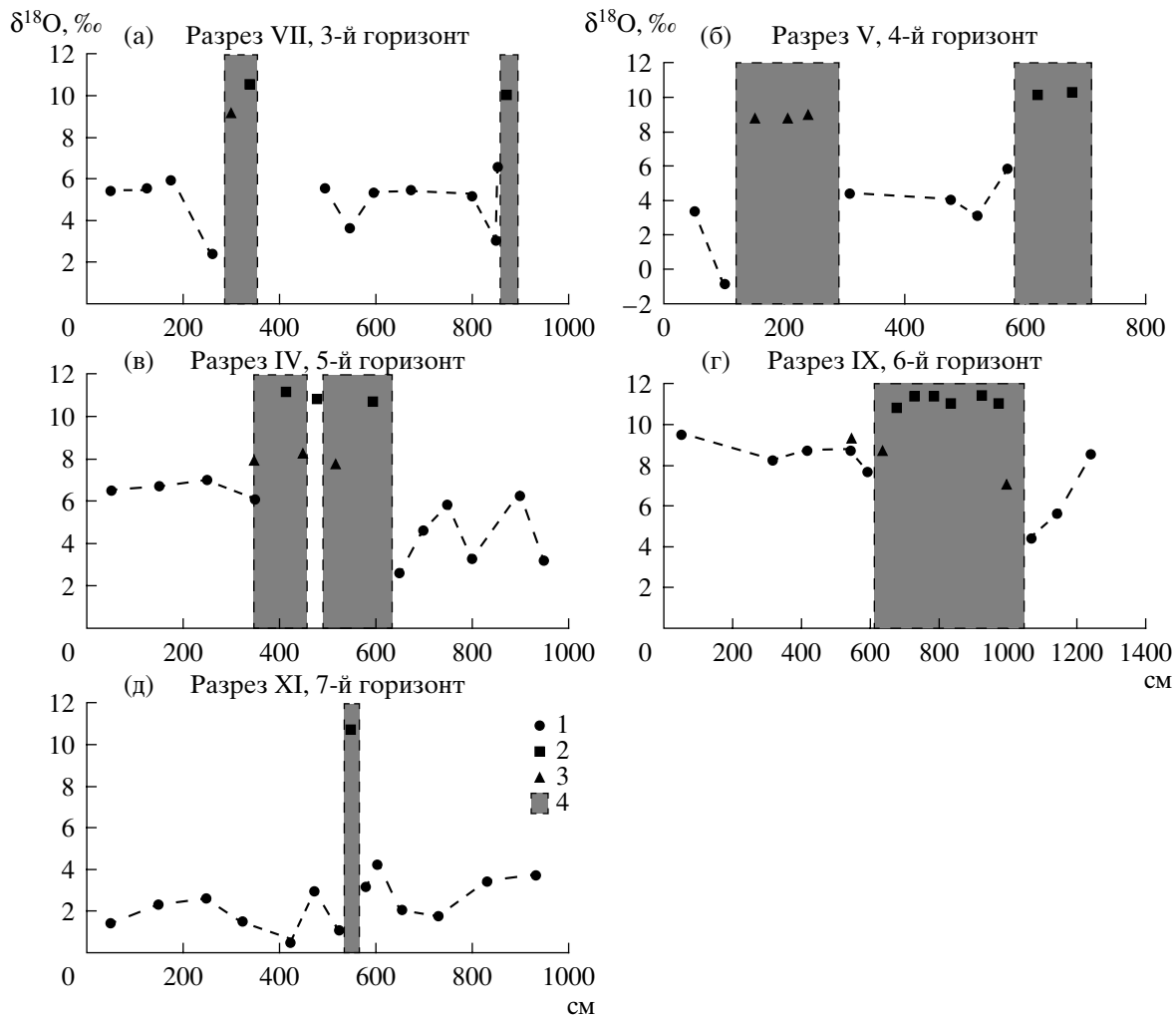


Рис. 1. Изотопный состав кислорода околожильных пород рудного тела 62/50 на 3-ем (а), 4-ом (б), 5-ом (в), 6-ом (г), 7-ом (д) горизонтах

1 – значения $\delta^{18}\text{O}$ для породы в целом; 2 – изотопный состав кислорода жильного кварца; 3 – изотопный состав кислорода мусковита; 4 – кварцевая жила.

что вода флюида имела магматогенную природу и была равновесна с малоизмененными гранитами [7, 8]. Низкие значения δD этих флюидов были интерпретированы нами, как результат более высокой скорости изотопного обмена водорода, протекающего в ОН-группе мусковита, по сравнению с кислородом в минерале в целом, при воздействии изотопно-легких метеорных вод в пострудное время. Очевидно, изотопный состав кислорода жильного кварца оставался близким к начальному по вышеуказанной причине. Кроме того, было высказано предположение, что имел значение достаточно крупный размер кристаллов кварца и мусковита в жилах, существенно превышающий размеры зерен этих минералов в боковых породах. В таком случае при протекании изотопного обмена по диффузному механизму более крупные зерна в жилах останутся малоизмененными,

тогда как мелкие зерна в породах будут изменены [14].

Изученные в данной работе жильные минералы относятся к той же кварц-касситерит-вольфрамитовой продуктивной стадии, их образование проходило в том же интервале T и P [11], и согласно полученным данным, их также можно считать образованными из флюида существенно магматогенной природы. Это согласуется с принципиально важной закономерностью геохимии Sn-W месторождений, генетически связанных с гранитами, состоящей в том, что источником олова и вольфрама могут быть лишь гидротермальные растворы магматогенного происхождения. При более низких параметрах T и P , как следует из данных эксперимента и физико-химического моделирования, флюиды не могут концентрировать и транспортировать значительные количе-

ства Sn и W, необходимые для формирования месторождений [2–4].

Изложенные материалы позволяют заключить, что особенностью формирования Иульгинского месторождения является интенсивное взаимодействие потока инфильтрационных изотопно-легких вод с вмещающими породами после формирования кварцевых жил, несущих Sn-W минерализацию. При этом была нивелирована первичная картина изотопно-кислородной зональности, но мало затронуты сами жилы, не являющиеся зонами сосредоточенной фильтрации. Характер взаимодействия потока экзогенных вод с породами и время его поступления в гидротермальную систему месторождения определялись структурными особенностями месторождения. Наиболее важными являются: а) наличие нескольких систем разнонаправленных пересекающихся трещин; б) проявление разрывных подвижек после формирования кварцевых жил. Движению потока инфильтрационных вод способствовали также достаточно высокие (до 250°C) температуры в гидротермальной системе в пострудное время [11], что согласно исследованиям Балашова и Зарайского могло существенно повышать проницаемость метаморфизованных осадочных пород [15]. В этом отношении Иульгин принципиально отличен от хорошо изученного W-Мо месторождения Акчатау. Мощные протяженные кварцевые жилы с вольфрамитом на Акчатау формировались в зонах сосредоточенной фильтрации гидротермальных растворов одновременно с развитием изотопно-кислородной зональности во вмещающих, в основном, гранитных породах [14]. В обеих рудообразующих гидротермальных системах происходило смешение эндогенных и экзогенных флюидов, приводившее к образованию рудной минерализации и сопровождавшееся развитием изотопно-кислородной зональности во вмещающих породах. Однако, масштаб и характер проявления этих процессов был различным. На Акчатау основная масса вольфрамитовых руд в кварцевых жилах и грейзенах отложилась из магматогенных растворов, поступление вод смешанного генезиса привело к образованию поздней вольфрамитовой минерализации и не изменило первичной картины изотопно-кислородной зональности.

Таким образом, исследование изотопного состава кислорода вмещающих пород и жильных минералов Иульгинского Sn-W месторождения дает основание считать, что касситерит-вольфрамитовые руды Иульгина формировались из растворов смешанного генезиса, когда флюиды магматогенного происхождения смешивались с метеорными водами, прошедшими до вступления в систему через взаимодействие с вмещающими метаморфизованными песчано-сланцевыми и гранитными породами. Интенсивное поступление экзогенных вод продолжилось и в пострудное время, что привело к

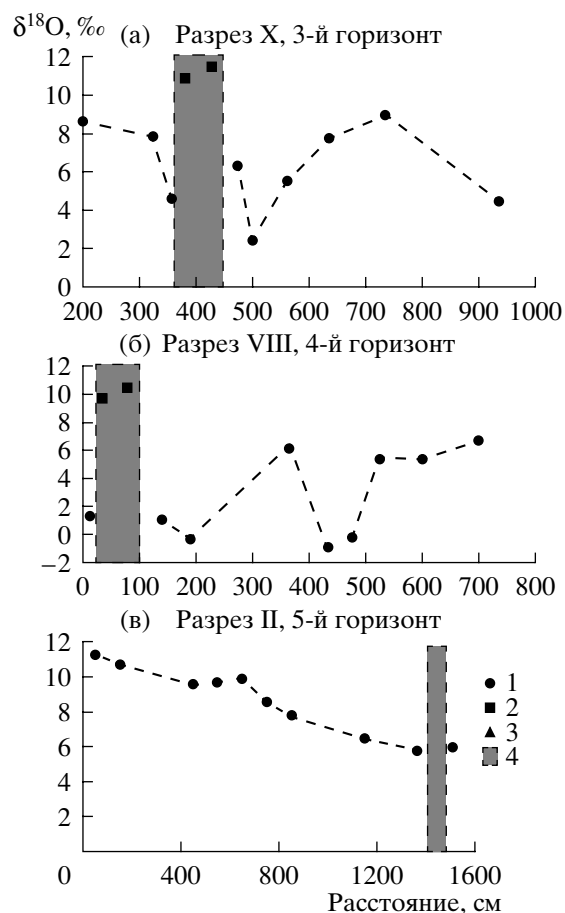


Рис. 2. Изотопный состав кислорода вмещающих пород рудного тела 10 на 3-ем (а), 4-ом (б) и 5-ом горизонтах (в),

Условные обозначения те же, что и на рис. 1.

изменению первоначального характера изотопно-кислородной зональности вмещающих пород.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №03-05-65036, № 07-05-00432).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лугов С.Ф., Макеев Б.В., Павловский А.Б. Основные типы оловорудных районов // М.: Недра, 1976. С. 93.
2. Heinrich C.A. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition // Econ. Geology. 1990. V. 85. P. 457–481.
3. Суцевская Т.М., Рыженко Б.Н. Моделирование смешения флюидов различной природы при осаждении касситерита // Геохимия. 2002. № 2. С. 184–193.
4. Shironosova G.P., Kolonin G.R., Sushchevskaya T.M. Thermodynamic modeling of the influence of isothermal dilution of the tungsten-bearing potential of ore-forming fluid // Geochemistry International. 2001. V. 39. Suppl. 2. P. S 235–240.

5. *Criss R.E., Taylor H.P.* Meteoric-hydrothermal systems. Stable isotopes in high temperature geological processes // *Reviews in Mineralogy*. 1982. V. 16. P. 373–424.
6. *Спасенных М.Ю., Банникова Л.А.* Модель изотопного обмена в процессе фильтрации флюида по породе и возможность ее применения к интерпретации изотопных вариаций кислорода в гидротермальных системах // *Геохимия*. 1986. № 10. С. 1389–1401.
7. *Сущевская Т.М., Игнатьев А.В., Спасенных М.Ю. и др.* О генезисе рудообразующих флюидов Sn-W месторождения Иультин по данным изотопии кислорода и водорода // *Доклады РАН*. 1994. Т. 339. № 3. С. 391–395.
8. *Устинов В.И., Сущевская Т.М., Ерохин А.М.* Изотопный состав кислорода жильных минералов месторождения Иультин // *ДАН СССР*. 1989. Т. 304. № 6. С. 1432–1436.
9. *Спасенных М.Ю., Шмонов В.М., Сущевская Т.М., Игнатьев А.В.* Движение гидротермальных флюидов во вмещающей породах Sn-W месторождения Иультин, Чукотка (по данным об изотопном составе кислорода и проницаемости пород) // *Геохимия*. 2002. № 4. С. 626–638.
10. *Козлов В.Д., Дудкинский Д.В., Элиасс Ю.К.* Геохимия и рудоносность гранитоидов Центральной Чукотки. М.: Наука, 1995. 202 с.
11. *Ерохин А.М., Сущевская Т.М.* Эволюция физико-химических параметров минералообразующей среды при формировании оловорудного месторождения // *Геохимия*. 1992. № 5. С. 660–671.
12. *Сущевская Т.М., Дюришова Я., Ерохин А.М. и др.* Исследование химических характеристик минералообразующей среды при образовании оруденения кварц-касситеритового типа // *Геохимия*. 1995. № 6. С. 36–45.
13. *Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А.* Лазерная методика подготовки проб для анализа стабильных изотопов кислорода силикатов и окислов. Тез. докл. XVII Симпозиума по геохимии изотопов. 2004. М.: ГЕОХИ РАН. С. 96–97.
14. *Спасенных М.Ю., Матвеева С.С., Сущевская Т.М.* Особенности взаимодействия флюид-порода вблизи крупных жильных тел (по изотопным данным) // *Геохимия*. 2005. № 12. С. 1322–1332.
15. *Балашов В.Н., Зарайский Г.П.* Экспериментальное и теоретическое исследование процесса разуплотнения горных пород при нагревании // *Очерки физико-химической петрологии*. М.: Наука, 1982. Вып. 10. С. 69–109.