

Е. Д. Надеждина, В. В. Юдина, Н. И. Забавникова

**АКЦЕССОРНЫЙ СФЕН
ИЗ МЕТАСОМАТИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫХ ТРАППОВ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
(РАЙОН РЕКИ БОЛЬШОЙ БОТУОБИИ)**

Сфен широко известен как акцессорный минерал кислых и щелочных изверженных пород; он часто встречается в пегматитах и жилах альпийского типа, нередок также в метаморфических (контактных) породах. Опубликованные данные об особенностях состава и генезиса сфенов относятся, главным образом, к сфенам гранитоидов и щелочных пород (Бонштедт, 1934; Забавникова, 1957).

Присутствие сфенов в производных основных магм отмечается крайне редко, в особенности скудны сведения об его составе и генезисе (Ляхович, 1961).

Изученный нами сфен является акцессорным минералом пород, образовавшихся при автореакционном метасоматическом изменении траппов (Юдина, 1961).

Аподолеритовые метасоматиты не слагают самостоятельных интрузивов, а образуют участки неправильной формы и линейно-вытянутые зоны в дифференцированных пластовых и секущих интрузиях траппов, пространственно приуроченных к зоне интенсивных тектонических нарушений северо-северо-западного простирания, протянувшейся в виде узкой полосы вдоль среднего течения р. Большой Ботуобии и являющейся южным окончанием Ахтарандинской зоны дробления.

Содержащие сфен метасоматические аподолеритовые породы макроскопически заметно отличаются от нормальных траппов лейкократовым обликом и крайне неоднородным составом и структурой. Они состоят из реликтовых минералов исходных траппов — моноклинного пироксена (пижонита), основного плагиоклаза, титаномагнетита и новообразованных — зеленого диопсид-авгита, фассаита, альбита, анальцима и цеолитов, причем отдельные участки этих пород значительно обогащены сфеном и апатитом. Степень метасоматических изменений долеритов различна и меняется от места к месту. Можно наблюдать, как лейкократовые участки беспорядочно чередуются с меланократовыми, мелкозернистые — сменяются гнездами и скоплениями крупных кристаллов пироксена, сфена, апатита и цеолитов.

Микроскопическое изучение метасоматически измененных траппов показало, что в отдельных участках измененных долеритов наблюдается интенсивная сфенизация пироксена — как реликтового (пижонита), так и новообразованного (диопсид-авгита), а отчасти также и титаномагнетита.

Процессы сфенизации пироксенов идут, вероятно, параллельно с анальцимизацией и цеолитизацией плагиоклазов, о чем свидетельствуют постоянные тесные парагенетические ассоциации и взаимное прорастание сфена и цеолитов. В породах, подвергшихся интенсивной сфенизации, количество сфена, по подсчетам в шлифах, достигает 4% от общего объема породы.

В шлифах можно отчетливо проследить все стадии последовательного замещения сфеном породообразующих минералов.

Крупные кристаллы пироксена с периферии начинают замещаться агрегатами мелких кристалликов сфена, которые в виде цепочек, а затем и отдельных более крупных зерен располагаются также в межзерновых швах, по плоскостям спайности (рис. 1, а). Следующей стадией замещения пироксена является образование сфена в виде крупных псевдоморфоз по пироксену с сохранением в отдельных участках его реликтов незамещенного пироксена (рис. 1, б). В результате можно видеть пойкилобластовые кристаллы сфена значительных размеров, часто скелетные, разобщенные, полностью заместившие пироксен, с сохранившимися пойкилитическими вростками цеолитизированного плагиоклаза (рис. 1, в).

Параллельно с изменением пироксена идет сфенизация рудного минерала (титаномагнетита). Сфен в виде широких кайм обрастает зерна титаномагнетита, а иногда и полностью его замещает (рис. 2, а). В некоторых случаях по титаномагнетиту развивается мелкоагрегатный сфен как по периферии зерен, так и с сохранением решетчатой структуры первоначального минерала (рис. 2, б).

Наблюдаемые формы выделения сфена и его парагенетические ассоциации позволяют однозначно решать вопрос в пользу позднего времени его образования, связанного с общими процессами Na-Ca-метасоматоза долеритов в данном районе. Тяжелые фракции протолокчек метасоматически преобразованных долеритов значительно обогащены сфеном по сравнению с нормальными траппам, что дало возможность детально изучить его оптические, физические и химические свойства.

В неизмененных долеритах сфен присутствует в единичных зернах, а в лейкократовых аподолеритовых метасоматитах он составляет 1,5—2 кг на 1 т породы. В протолокчках пород сфен концентрируется, главным образом, в тяжелых слабоэлектромагнитных фракциях, хотя нередко встречается также и в неэлектромагнитных, совместно с апатитом и цирконом.

Изученный нами сфен характеризуется большим разнообразием форм. Как правило, это несовершенные кристаллы с крайне неравномерно развитыми гранями. Обычны искаженные, уродливые формы со ступенчатыми, ребристыми гранями, входящими углами, иногда покрытые ржаво-бурой или беловатой коркой. Иногда на гранях видна обычная для сфенов тонкая штриховка.

Размеры кристаллов сфена в протолокчках варьируют в широких пределах. Диаметр мелких зерен — от 0,1 до 0,5 мм, крупных — до 2 мм. В штуфах породы наблюдались сфены до 1—1,5 мм в диаметре. Одиночные зерна не характерны; более обычны сростки и неправильной формы агрегаты различно ориентированных кристаллов сфена.

Цвет яркий, медово-желтый, светло-желтый; у крупных индивидуумов цвет более интенсивный — буроватый, желтовато-коричневый.

Интенсивность окраски связана нередко с увеличением внутренней трещиноватости, наблюдаемой у крупных кристаллов, и с возрастанием количества посторонних включений в них.

Мелкие кристаллы сфена прозрачны и бледно окрашены; крупные, из-за обилия трещин и включений, мутны, полупрозрачны и темнее

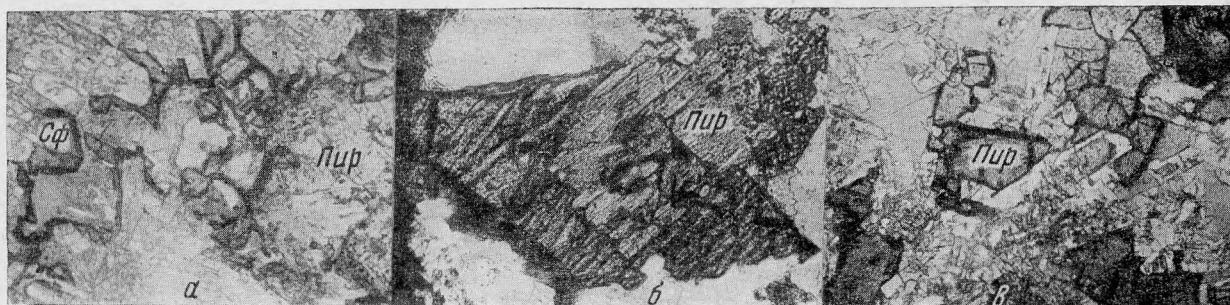


Рис. 1. Стадии замещения пироксена (Пир) сфеном (Сф) в метасоматически-измененных долеритах
а — мелкоагрегатный сфен, развивающийся по периферии пироксена; шлиф 252, увел. 46, без анализатора; *б* — псевдоморфоза сфена по пироксену (с реликтами пироксена); шлиф 184, увел. 90, без анализатора; *в* — крупный пойкилобластовый (разоб-
 щенный) кристалл сфена; шлиф 82, увел. 46, без анализатора



Рис. 2. Замещение титаномангнетита (черное) сфеном (Сф) в метасоматически-измененных долеритах.

а — сфен, развивающийся по периферии титаномангнетита; шлиф 242, увел. 90, без анализатора; *б* — мелкоагрегатный сфен, заместивший решетку ильменита в титаномангнетите (мангнетит замещен цеолитами); шлиф 95, увел. 46, без анализатора

окрашены. Крупные темноокрашенные разновидности имеют матовую поверхность и жирный блеск в изломе. Сохранность мелких кристаллов сфена хорошая, но у крупных кристаллов ухудшается с увеличением количества внутренних трещин, полостей и включений, по которым развиваются тонкие пленки гидроокислов железа. Нередко, благодаря обилию пленок гидроокислов железа, сфен окрашен в темный, ржаво-бурый цвет.

Наиболее обычны для сфена двухфазовые газожидкие включения (полости, заполненные жидкостью с пульсирующими пузырьками газа); нередки также включения посторонних минералов — пироксена, апатита, плагиоклазов, циркона и титаномагнетита.

Оптические свойства сфена изучены под микроскопом в шлифах и в иммерсионных препаратах. В шлифах отмечается у сфена заметный плеохроизм с обычной схемой абсорбции $N_g > N_m = N_p$. Окраска по N_g — желтовато-буроватая, буровато-коричневатая, по N_m и N_p — бледно-бурая, часто почти бесцветная. Измерение показателей преломления и $2V$ сфена проводилось в монохроматическом натровом свете. Показатели преломления определялись в ориентированных разрезах в фосфорных иммерсионных жидкостях. Угол оптических осей замерен на федоровском столике в коноскопе в разрезах, \perp острой биссектрисе N_g (табл. 1).

Таблица 1

Физические свойства сфена

Константы	Сфен из аподолеритовых метасоматитов, обр. 98, левый берег р. Большой Ботуобии	Сфен из аподолеритовых метасоматитов (обр. 258), правый берег р. Большой Ботуобии, в 23 км ниже по течению от места взятия обр. 98
N_g	$\geq 2,060^*$	$\geq 2,060$
N_m	1,909	1,909
N_p	1,857	1,860
$+2V$	31—32	30—31
Дисперсия оптических осей	$r \gg v$	$r \gg v$
Схема абсорбции	$N_g > N_m = N_p$	$N_g > N_m = N_p$
Удельный вес**	3,475	3,502

* Точность измерения N_g , N_m и $N_p \pm 0,003$.

** Удельный вес сфена определен В. С. Аmeliной методом гидростатического взвешивания (навеска — 2 г).

Для полного химического анализа был отобран сфен из двух протолок аподолеритовых метасоматитов.

Минерал разлагался смесью сульфата аммония и серной кислоты с последующим растворением в H_2SO_4 с H_2O_2 . После отделения кремнекислоты производилось трехкратное осаждение полуторных окислов и обработка их фтористо-водородной кислотой для отделения редкоземельных элементов. Элементы группы полуторных окислов определялись параллельно из алиquotных частей. Sr, Na и K определялись методом пламенной фотометрии. Сумма редких земель была расшифрована сотрудниками ИГЕМ АН СССР Г. М. Варшал и Л. С. Шустовой, методом бумажной хроматографии.

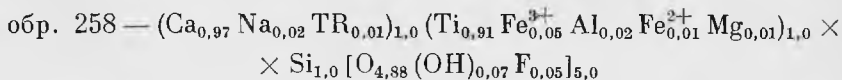
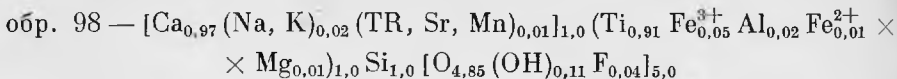
Результаты анализов, а также их пересчет на кристаллохимические формулы приведены в табл. 2.

Химический состав сфенов и расчет структурных формул

Обр. 38				Обр. 58						
Компоненты	вес. %	атомные количества	коэффициенты при катионах	валентность катионов	группа (O, OH, F)	вес. %	атомные количества	коэффициенты при катионах	валентность катионов	группа (O, OH, F)
SiO ₂	30,88	5139	1,00	4,00	O ²⁻ =9,85-5=4,85 (F, OH) ¹⁻ =5-4,85=0,15 OH=0,15-0,04=0,11	30,56	5085	1,00	4,00	O ²⁻ =9,88-5=4,88 (F, OH) ¹⁻ =5-4,88=0,12 OH=0,12-0,05=0,07
Al ₂ O ₃	0,48	94	0,02	0,06		0,52	102	0,02	0,06	
TiO ₂	37,23	4660	0,91	3,64		36,64	4586	0,91	3,64	
Ne обн.	»	—	—	—		Ne обн.	—	—	—	
Ta ₂ O ₅	»	—	—	—		»	—	—	—	
ZrO ₂	0,26	21	0,00	—		0,26	21	0,00	—	
HfO ₂	2,15	269	0,05	0,15		1,87	234	0,05	0,15	
FeO	0,24	33	0,01	0,02		0,44	61	0,01	0,02	
MgO	0,25	62	0,01	0,02		0,27	67	0,01	0,02	
MnO	0,03	4	0,00	—		0,02	3	0,00	—	
TiR ₂ O ₃	0,20	12	0,00	—		0,53	32	0,01	0,03	
CaO	27,74	4946	0,97	1,94		27,45	4893	0,97	1,94	
StrO	0,01	1	0,00	—		0,01	1	0,00	—	
Na ₂ O	0,26	84	0,02	0,02	0,25	81	0,02	0,02		
K ₂ O	0,08	16	0,00	—	0,08	16	0,00	—		
H ₂ O-	Ne обн.	—	—	—	Ne обн.	—	—	—		
H ₂ O+	0,39	(433)	(0,08)	—	0,46	(511)	(0,10)	—		
F	0,35	184	0,04	—	0,47	242	0,05	—		
Сумма	100,55	—	Остаток = 15341 / 3 = 5114	9,85	—	99,83	—	Остаток = 15182 / 3 = 5061	9,88	
— O = F ₂	0,15	—	—	—	0,20	—	—	—	—	
Сумма	100,40	15341	—	—	99,63	15182	—	—	—	

Расчет формул сфена сделан по способу, предложенному И. Д. Борнеман-Старинкевич (1960) для амфиболов.

В результате пересчета анализов выведены следующие формулы:



Чистый компонент CaTiSiO_5 составляет: в обр. 98 — 88,6 мол.%, в обр. 258 — 87,9 мол. %.

Т а б л и ц а 3

Состав и содержание редких земель в сфенах
(в относительных процентах к сумме TR)

Элементы	Обр. 98	Обр. 258
La	9,90	10,5
Ce	34,40	35,8
Pr	4,82	3,0
Nd	15,10	18,8
Sm	4,95	3,0
Gd	6,65	4,1
Tb	} 18,90	} 24,7
Y		
Dy		
Ho	Следы	Следы
Er	»	»
Yb	»	»
Сумма TR_2O_3 в минерале, в %	0,20	0,53

Насколько известно, сфен из основных пород беден изоморфными примесями и не содержит вообще примесей редких элементов. Таковы сфены из Кузинского, Вишневогорского и Баранчинского массивов на Урале и др. (Забавникова, 1957). Их состав близок к чистому CaTiSiO_5 . Однако описываемые сфены содержат в качестве изоморфных примесей Fe, Al, Mg, Mn, Na, K, OH, F, а также редкие элементы TR, Zr, Sr. Кроме того, спектральным анализом в них обнаружены V (o,n—) и Sb, Sn, Cu (0,00n). Результаты расшифровки редких земель, сведенные в табл. 3, показывают, что преобладающей является цериевая группа элементов, составляя примерно 75% от всей суммы редких земель.

Присутствие такого количества элементов-примесей характерно для сфена щелочных и кислых магм. Наличие редких земель при полном отсутствии Nb и Ta роднит изученный сфен со сфенами кислых пород, в которых Σ TR количественно почти всегда преобладает над Σ Nb, Ta.

Как и в других случаях, сфен в данном районе характеризует физико-химические условия минералообразования. Являясь своего рода собирателем, принимающим в свою решетку большое количество элементов, в том числе и редких, содержащихся в растворе, сфен служит геологическим индикатором среды.

Повышенное содержание сфена в аподолеритовых метасоматитах свидетельствует о накоплении в постмагматических растворах (наряду с Ca и Na) титана, что подтверждается химическими анализами нормальных и измененных долеритов (Юдина, 1961).

Присутствие TR и Zr в составе новообразованного сфена указывает на то, что редкие элементы, содержащиеся в трапповой магме, концентрируются на послемагматическом этапе в условиях щелочной среды.

Концентрация редких элементов в растворах, с которыми связаны метасоматические преобразования долеритов, подтверждается не только обогащением аподолеритовых метасоматитов сфеном и анатитом, содержащими редкие элементы, но также отсутствием последних или крайне ничтожным содержанием их в минералах нормальных неизменных траппов.

ЛИТЕРАТУРА

- Б о р н е м а н - С т а р ы н к е в и ч И. Д. Химическая формула минералов. IV. Амфиболы. — Записки Всес. минер. об-ва, ч. 89, серия 2, 1960.
- Б о н ш т е д т Э. М. Титанит (сфен). Минералогия Союза, серия А, вып. 3, Изд-во АН СССР, 1934.
- З а б а в н и к о в а Н. И. Об изоморфных замещениях в сфенах. — Геохимия, № 3, 1957.
- Л я х о в и ч В. В., Б а р и н с к и й Р. Л. Особенности состава редких земель в акцессорных минералах гранитоидов. — Геохимия, № 6, 1961.
- Ю д и н а В. В. Субщелочные разновидности сибирских траппов в бассейне р. Большой Ботубии (правый приток р. Вилюя). — Изв. АН СССР, серия геол., № 6, 1961.