

## Определение физико-химических условий образования пород Кедабекского интрузива на основе состава ильменита и титаномагнетита

©2023 К. Ф. Аббасов<sup>✉</sup>

*Институт геологии и геофизики Министерства Науки и Образования,  
пр. Г. Джавида, 119, AZ1143, Баку, Азербайджанская Республика*

### Аннотация

*Введение:* Несмотря на то, что петрографические особенности пород Кедабекской интрузии и ее геологическо-полевые описание изучены всесторонне за долгие годы исследования, физико-химические условия формирования этой интрузии детально не изучены. В связи с этим возникает необходимость изучения петрохимических свойств минералов, слагающих породы Кедабекской интрузии.

*Методика:* В представленном исследовании были изучены парные минералы ильменита и титаномагнетита, чтобы заполнить вышеупомянутый пробел. Для расчетов и интерпретаций использовались результаты валового химического анализа и микроэлементного анализа мономинеральных проб. Также были представлены и обсуждены изображения шлифов некоторых образцов.

*Результаты и обсуждение:* Ильменит и титаномагнетит из пород Кедабекской интрузии содержат низкие и умеренные концентрации Ti. Высокие концентрации титана в жильных породах могут быть связаны с обогащением расплавов этих пород титаном. Концентрация микроэлементов, таких как Ni, Cr, в составе титаномагнетита и ильменита контролируется фракционной кристаллизацией и уменьшается в сторону более кислых пород. Существует положительная корреляция между FeO и TiO<sub>2</sub> и отрицательная корреляция между Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub>. Окислительно-восстановительная среда кристаллизации соответствует гематит-магнетитовому (ГМ) буферу.

*Выводы:* По результатам исследования можно сделать вывод, что минералы в породах кристаллизовались, преимущественно, в верхних горизонтах земной коры на гипабиссальных глубинах. Окружающая среда была, в основном, окислительной. Об этом свидетельствует отсутствие вюститации среди минералов титано-железистых оксидных минералов, что свидетельствует об их кристаллизации в верхних горизонтах земной коры.

**Ключевые слова:** железо-титановые оксиды, титаномагнетит, ильменит, температура кристаллизации, глубина кристаллизации, парциальное давление, минеральный состав.

*Для цитирования:* Аббасов К.Ф. Определение физико-химических условий образования пород Кедабекского интрузива на основе состава ильменита и титаномагнетита // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 1. С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/29-38>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Аббасов Кянан Фаррух, e-mail: [kenan.abbasov313@gmail.com](mailto:kenan.abbasov313@gmail.com)

### Введение

Изучение условий образования и эволюции исследуемых горных пород, имеет большое петрогенетическое значение. Определение физико-химических условий образования пород возможно путем изучения петрографических, петрохимических и оптических свойств минералов, слагающих породы, так как конкретные физико-химические условия контролировали процессы кристаллизации этих минералов [1–4]. Физико-химические условия и состав первичного расплава зависят от существующих геодинамических условий и степени плавления мантийного субстрата. Кристаллизующийся минеральный парагенезис определяется также длительностью пребывания первичного расплава в интрузивных очагах, или промежуточных магматических камерах, в зависимости от тектонического режима, по мере подъема расплава к верхним горизонтам земной коры.

При изучении генезиса комплексов пород, целесообразно будет изучать сквозные минералы, встречающиеся во всех породах, слагающих интрузивный комплекс. Таким образом, могут быть установлены изменения одних и тех же параметров. Это позволит более точно проследить эволюцию горных пород. В этом отношении, подходящими объектами исследования следует считать клинопироксены, плагиоклазы и оксиды железа и титана.

Изучая состав и свойства железо-титановых оксидных минералов, можно определить, в каком интервале температур происходит процесс кристаллизации при образовании горных пород, на какой глубине происходит кристаллизация минералов, и при каких значениях парциального давления ( $f_{O_2}$ ) кислорода происходило минералообразование [4, 5–9]. Помимо определения этих параметров, вариации химического и микроэлементного состава минералов дают новый материал для предположений о фракционной кристаллизации, ассимиляции и смещении магматических расплавов, определяющих эволюцию горных пород [2, 3].

Хотя Кедабекский интрузивный комплекс, являющийся объектом наших исследований, детально изучен с геолого-петрографической точки зрения, существует потребность в исследованиях с точки зрения его генезиса и глобальной геодинамики. Многофазный Кедабекский интрузив представляет собой интересный геологический объект по условиям геологического формирования и его эволюции. Известно, что с этим интрузивным комплексом генетически связано золото-колчеданное, золото-полиметаллическое оруденение [10–13]. Поэтому целесообразным является изучение минералого-геохимических и петрохимических особенностей парагенезисов Ti-Fe оксидных минералов интрузива на примере пары ильменит-титаномагнетит.

Целью работы является установление эволюции многофазных интрузивных комплексов, на примере Кедабекского интрузива, с использованием минералов – титаномагнетита и ильменита.

### Геология

Шамкирский горст-антиклинорий, где расположен Кедабекский интрузив с точки зрения тектоники плит, находится в Понтско-Малокавказской складчатой зоне Кавказско-Загросского сегмента (Республика Азербайджан), что соответствует центральной части Средиземноморского складчатого пояса. В геологическое строение антиклинали входят продукты магматических процессов, соответствующие среднеюрско-меловому этапу зрелой дуги в эволюции океана Мезо-Тетис [14–16].

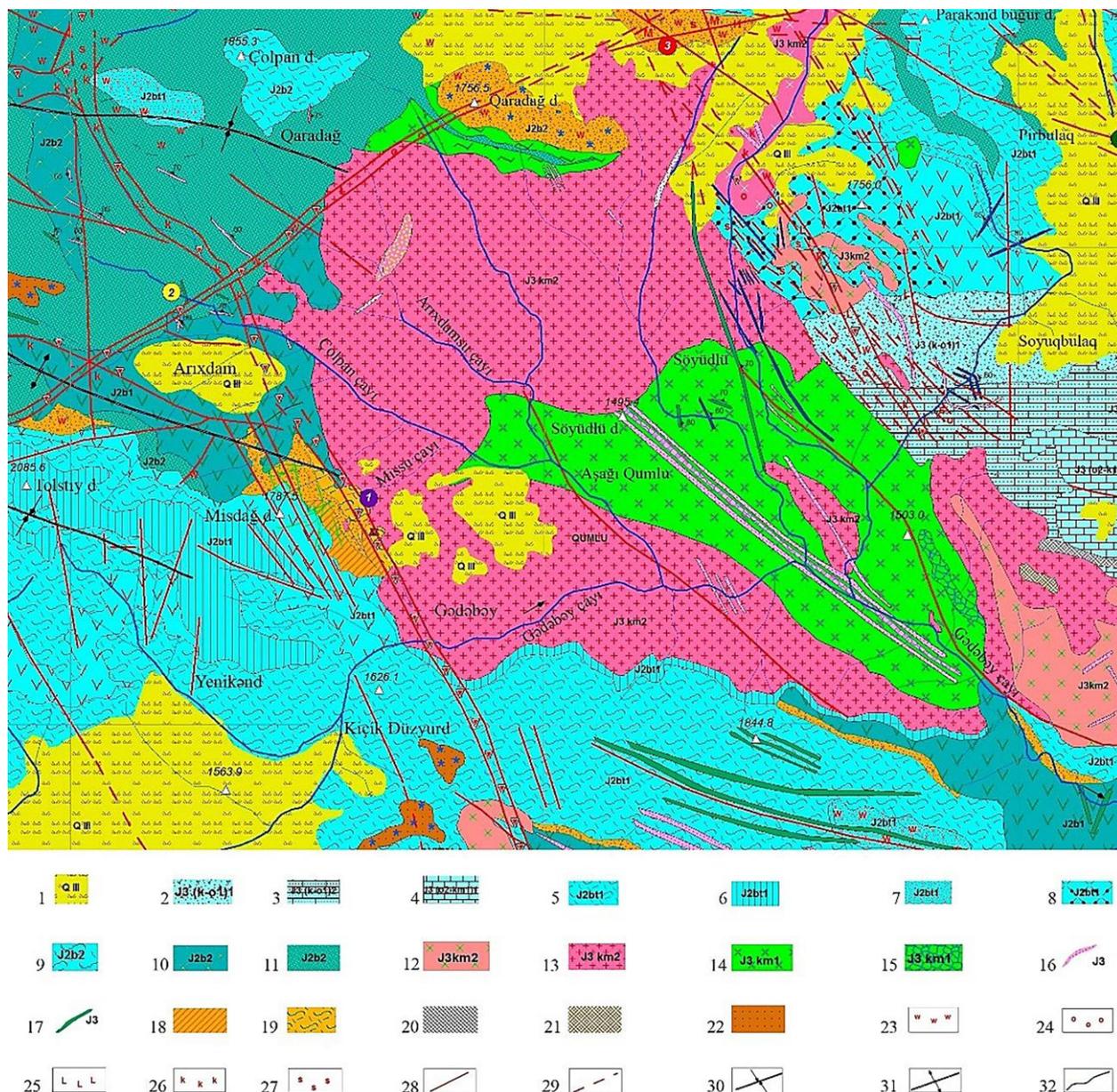
На локальном уровне Кедабекский интрузив расположен преимущественно в центральной, и частично в северо-восточной части Шакарбай-Арыхдамской антиклинали. Северо-западная часть интрузива окаймлена вулканитами нижнего байоса и кварцевыми плагиопорфировыми лавами, которые перекрывают вулканиты. Северо-восточная часть массива контактирует с вулканитами, вулканогенно-осадочными и осадочными породными комплексами пластов Бата и Келловей–Оксфорда. В северо-западном направлении интрузив прослеживается от слияния реки Кедабай с рекой Шамкир до села Арыхдам (рис. 1).

Химический состав минералов интрузива, накопление данных о типоморфных компонентах в минералах и остаточных расплавах, а также традиционные петрологические диаграммы, основанные на химическом составе пород, показывают, что Кедабекский интрузив формировался в две фазы. Морфологические взаимоотношения пород при полевых наблюдениях также подтверждают многофазность Кедабекского интрузива [14, 16]. Об этом свидетельствует то, что во многих местах породы габброидной фазы прорываются более поздними породами кварцево-диоритовой фазы. Также ксенолиты габброидных пород присутствуют в составе кварцевых диоритов. Вокруг этих ксенолитов наблюдаются термальные контакты. Согласно процессу эволюции, эти ксенолиты не претерпели полного плавления, поскольку температуры кристаллизации пород I фазы были выше, чем у пород II фазы [14].

Первая фаза, названная нами габброидной, представлена оливиновыми габбро и габброноритовыми породами, наиболее близкими к исходному расплаву, который эволюционировал под влиянием фракционной кристаллизации, дифференцировавшись в меланократовые габбро-лейкократовые габбро-габбродиорит-диоритовые породы соответственно. Вторая фаза названа кварцевым диоритом, наиболее распространенным типом породы в этом районе. Породы второй фазы: диориты – кварцевые диориты – тоналиты – гранодиориты – гранитные пегматиты. Из кварцевых диоритов также образовались монцодиорит-монцитит-сиениты – щелочная ветвь интрузивных пород [15, 17].

### Методология

Микронзондовый анализ железо-титановых минералов выполнен на искусственных полированных препаратах с использованием электронного микроскопа



**Рис. 1.** Геологическая карта Кедабекского интрузивного массива (составлена компанией Azerbaijan Mining Company). Главные населенные пункты: Arıxdam – Арыхдам; Gədəbəy – Кедабек; Söyüdlü – Союдлю; Qumlu – Кумлу. Условные обозначения: 1 – аллювиально-делювиальные отложения верхнего четвертичного периода; 2 – туфовые конгломераты; 3 – туфо конгломераты; 4 – слой известняка (оксфорд-киммеридж); 5 – верхний вулканокластический слой (коллекторы андезитовых туфов); 6 – переслаивающийся разрез верхнего вулканического слоя байоса; 7 – верхний вулканокластический слой байоса (метаморфически измененные туфы); 8 – верхний вулканокластический слой байоса (андезитовые туфы и туффиты); 9 – вулканокластический слой байоса; 10 – андезитовые порфиры; 11 – лавовая фация кварцевых плагиопорфиров; 12 – Каракайско-Карамурадский габбисальный субинтрузив (диориты, диорит-порфиры, кератоспиллиты); 13 – Кедабекский интрузив (вторая фаза); 14 – Кедабекский интрузив (первая фаза); 15 – Кедабекский интрузив (габбро-пироксениты); 16 – кварц-диоритовые порфиры; 17 – диабазовые порфиры; 18 – амфибол-плагиоклаз-биотит-кварцевая фация (вторичные кварциты); 19 – пироксен-плагиоклазовые и эпидот-плагиоклазовые фации (вторичных кварцитов); 20 – карбонат-эпидотовая фация.

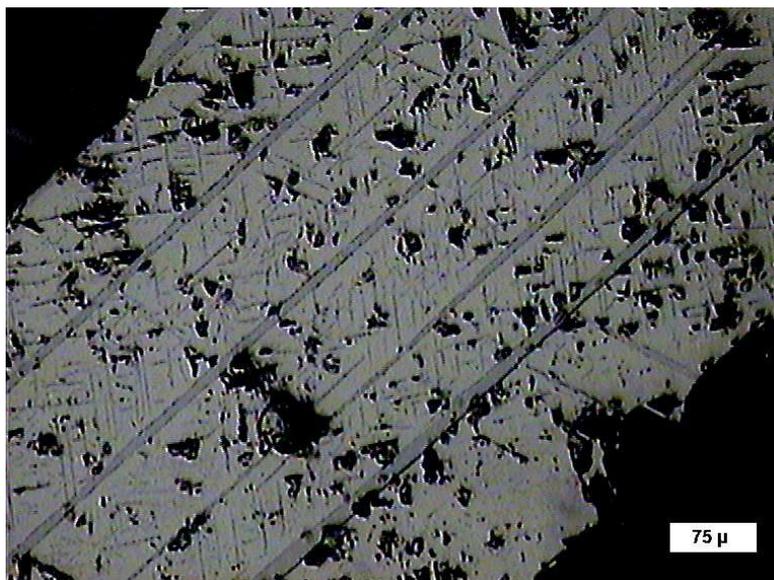
**Fig. 1** Geological map of the Gadabay intrusion massifs (compiled by Azerbaijan Mining Company). Main settlements: Arıxdam – Arykhdam; Gadabay - Gadabay; Söyüdlü – Soudlu; Kumlu – Kumlu. Legends: (1) - alluvial-deluvial deposits of the Upper Quaternary period; (2) – tuff conglomerates; (3) - tuff conglomerates; (4) – limestone layer (Oxford-Kimmeridgian); (5) – upper volcaniclastic layer (reservoirs of andesite tuffs); (6) – interbedded section of the upper volcanic layer of the Bajocian; (7) – upper volcaniclastic layer of Bajocian (metamorphically altered tuffs); (8) – upper volcaniclastic layer of Bajocian (andesitic tuffs and tuffites); (9) – Bajocian volcaniclastic layer; (10) – andesitic porphyries; (11) – lava facies of quartz plagioporphyr; (12) – Karakay-Karamurad gibabasal subintrusive (diiorite, diiorite-porphury, keratospillites); (13) – Gadabay intrusive (second phase); (14) – Gadabay intrusive (first phase); (15) – Gadabay intrusion (gabbro-pyroxenites); (16) – quartz-diorite porphyries; (17) – diabase porphyries; (18) – amphibole-plagioclase-biotite-quartz facies (secondary quartzites); (19) - pyroxene-plagioclase and epidote-plagioclase facies (secondary quartzites); (20) – carbonate-epidote facies.

Jeol, JSM-66 10LV. Фотографии аншлифов были сделаны под поляризационным микроскопом Carl Zeiss Axio Imager A2m в Институте Геологии и Геофизики Национальной Академии Наук Азербайджана. В работе использованы результаты микронзондового анализа 22 зерен титаномагнетита и 16 ильменита.

### Минералогия

Минералы титаномагнетит и ильменит не встречаются в исследуемых горных породах в виде характерные для них кристаллических форм. Форма кристаллов только ксеноморфная. То есть, эти минералы кристаллизовались после минералов, сформировавших горную породу, заполняя пустоты. Помимо основных минералов титаномагнетита и ильменита, в породах обнаружены также гематит, ульвошпинель, очень небольшое количество рутила и другие железотитановые оксиды [18]. Рутил и ульвошпинель также

наблюдаются в виде новообразованных фаз распада в минерале хозяине – ильменит-магнетите. Ульвошпинель наблюдается в виде пластинчатых кристаллов, пересекающих зерна под углом  $90^\circ$ , а рутил – в виде прямоугольных кристаллов. Ильменит встречается в виде собственных кристаллов и образует внутри магнетита пластинчатые кристаллы (ламели), похожие на ульвошпинель [18]. Следует отметить, что присутствие как ульвошпинеля, так и ильменита, в виде фаз распада в титаномагнетите, подтверждается наблюдением характерной решетки в аншлифе (рис. 2). В титаномагнетите первоначально выделялась ульвошпинель в виде фаз распада. По мере увеличения степени окисления расплава часть выделенной ульвошпинели превращается в ильменит [19, 20]. Первоначальное выделение ульвошпинели также свидетельствует о более высоких температурах кристаллизации минералов [19, 21].



**Рис. 2.** Решетка распада в зерне магнетита: темно-серые пластины ульвошпинели, пересекающие зерно под углом  $90^\circ$  и ильменита, пересекающие его под углом  $45^\circ$ .

**Fig. 2.** The decay lattice in magnetite grain: dark grey plates of ulvöspinel crossing the grain at an angle of  $90^\circ$  and ilmenite crossing it at an angle of  $45^\circ$ .

### Результаты и обсуждение

Химический состав минералов титаномагнетита и ильменита приведены в таблицах 1 и 2. Явной закономерности в содержании  $TiO_2$  в акцессорном титаномагнетите изученных пород не обнаружено. Для разных горных пород содержание  $TiO_2$  в Ti-Mgt колеблется в пределах 1.15–6.38 мас.%. наименьшая концентрация наблюдается в образце из кварцевого диорита, а наибольшая – в монзоните. Однако в другом образце кварцевого диорита содержание  $TiO_2$  в Ti-Mgt составляет 2.35 мас.%. Это значение можно считать средним, с учетом других пород. Содержание  $Al_2O_3$  и  $MgO$  в Ti-Fe оксидных минералах уменьшается от основных пород к кислым. Количество  $Al_2O_3$  и  $MgO$  в минерале (табл. 3) определяет количество его шпинелевого минала, что в ряде случаев указывает на эффект дифференциации или увеличение глубины кристаллизации [2, 8, 22].

Для определения температуры кристаллизации и глубины прошедших процессов минералообразования, а также индекса  $\log f_{O_2}$  (с использованием парных минералов – магнетит-ульвошпинели и ильменит-гематита) нами применена методика, описанная в работах [4, 8, 17]. Так как первая пара рассчитана по составу минерала титаномагнетита, а вторая рассчитана по составу ильменита. Примесь NiO присутствует в Ti-Fe оксидных минералах во всех породах, а  $Cr_2O_3$  присутствует только в габброноритах и гиперстеновых габбро. Однако наибольшее количество NiO также зафиксировано в габброноритах. Это связано с тем, что они являются первично-дифференцированными породами.

С эволюционной точки зрения содержание элементов группы Fe (Cr, Ni) в магнетите уменьшается от габброноритов к более кислым породам [2]. Количество  $TiO_2$  является переменным.

**Табл. 1.** Химический состав зерен титаномагнетита из пород Кедабекского интрузива (мас.%)  
**Table 1.** Chemical composition of titanomagnetite grains from the rocks of the Gadabay intrusion (wt.%)

Оксиды (oxides)	Образцы пород (Rock samples)										
	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16
SiO <sub>2</sub>	0,22	0,24	0,21	0,12	0,12	0,09	0,14	0,07	0,09	0,09	0,08
TiO <sub>2</sub>	2,75	2,36	2,04	3,84	1,66	1,38	2,38	1,15	2,66	1,62	5,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,06	1,75	3,21	1,73	1,83	1,34	1,23	1,26	1,83	1,14	0,58
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,38	0,59	0,42	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,65	2,56	0,06	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,44	58,91	60,62	59,04	63,93	64,74	63,15	65,58	61,02	64,21	58,63
FeO	32,11	32,38	31,65	33,47	30,67	31,74	31,47	30,41	32,33	30,53	33,84
MnO	0,32	0,34	0,38	0,18	0,38	0,18	0,16	0,31	0,35	0,16	0,29
MgO	0,87	0,49	0,86	0,69	1,21	0,43	1,21	1,12	0,68	1,26	1,18
NiO	0,24	0,16	0,16	0,09	0,09	0,07	0,09	0,06	0,12	0,08	0,08
Сумма Sum	99,66	99,19	99,19	99,16	99,89	99,97	99,83	100,34	99,67	99,51	99,88

Продолжение Табл. 1  
 [Continued Table 1]

Оксиды (oxides)	Образцы пород (Rock samples)										
	17	17a	18	19	21	22	23	24	25	27	28
SiO <sub>2</sub>	0,07	0,09	0,08	0,09	0,10	0,00	0,11	0,07	0,12	0,10	0,12
TiO <sub>2</sub>	1,30	1,30	4,46	1,16	3,64	3,66	2,46	6,38	5,38	5,71	5,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,42	0,75	1,23	0,64	1,16	1,38	0,38	0,78	0,73	0,69	1,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	64,08	65,21	58,52	65,80	60,39	60,35	63,59	55,52	57,15	56,26	56,13
FeO	31,54	31,17	34,24	31,09	33,86	33,53	32,63	36,44	35,06	35,95	35,69
MnO	0,40	0,40	0,18	0,40	0,14	0,31	0,25	0,18	0,34	0,20	0,28
MgO	0,45	0,42	0,48	0,44	0,38	0,42	0,38	0,25	0,36	0,24	0,32
NiO	0,07	0,10	0,12	0,06	0,10	0,09	0,06	0,09	0,12	0,08	0,06
Сумма Sum	99,33	99,44	99,31	99,68	99,77	99,74	99,86	99,71	99,26	99,23	99,5

*Примечание:* Названия пород: 5, 6 – габбро-норит, 7 – гиперстеновое габбро, 8 – биотит-кварцевое габбро, 9 – габбро диорит, 10 – роговообманковый диорит, 11 – уралитовый диорит, 12, 13 – кварцевый диорит, 14 – диорит (I фаза), 15, 16 – гранодиорит, 17, 17a – тоналит, 18 – гранодиорит, 19 – роговообманковое габбро, 21 – кварцевый диорит, 22, 23 – кварцевый монцодиорит, 24, 25 – монзонит, 27 – долерит, 28 – спессартит.

*Note:* Rocks names: (5, 6 – gabbro-norit, (7) – hypersthene gabbro, (8) – biotite-quartz gabbro, (9) – gabbro diorite, (10) – hornblende diorite, (11) – uraltite diorite, (12, 13) – quartz diorite, (14) – diorite (I phase), (15, 16) – granodiorite, (17, 17a) – tonalit, (18) – granodiorite, (19) – hornblende gabbro, (21) – quartz diorite, (22, 23) – quartz monzodiorite, (24, 25) – monzonite, (27) – dolerite, (28) – spessartite.

**Табл. 2.** Химический состав ильменита из интрузивных пород Кедабекского интрузива (мас.%)  
**Table 2.** Chemical composition of ilmenite from intrusive rocks of the Gadabay intrusion (wt.%)

Оксиды (oxides)	Образцы пород (Rock Samples)															
	10	12	13	14	15	16	17	17a	18	19	21	22	23	24	25	27
SiO <sub>2</sub>	0.09	0.07	0.06	0.14	0.04	0.06	0.09	0.08	0.09	0.06	0.07	0.1	0.08	0.09	0.09	0.11
TiO <sub>2</sub>	47.6	48.84	48.75	49.36	49.24	49.25	49.25	49.38	49.58	49.62	49.28	49.65	49.36	49.26	49.5	49.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.18	0.12	0.14	0.42	0.26	0.16	0.2	0.39	0.42	0.16	0.32	0.39	0.34	0.33	0.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.61	6.94	7.07	4.93	5.57	5.55	5.55	6.23	5.28	4.96	5.54	5.28	5.64	5.86	5.28	4.93
FeO	42.45	42.96	42.98	44.36	43.7	43.62	43.71	43.21	43.85	44.04	43.4	43.65	43.52	43.31	43.99	44.16
MnO	0.33	0.34	0.39	0.18	0.24	0.28	0.29	0.32	0.32	0.28	0.28	0.41	0.33	0.41	0.26	0.12
MgO	0.32	0.39	0.28	0.12	0.28	0.31	0.25	0.41	0.31	0.26	0.36	0.39	0.4	0.39	0.38	0.16
NiO	0.08	0.11	0.08	0.09	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.09	0.1	0.06	0.04	0.11	0.12
Сумма Sum	99.64	99.83	99.73	99.32	99.55	99.39	99.37	99.91	99.9	99.7	99.18	99.9	99.78	99.7	99.94	99.32

**Табл. 3.** Параметры кристаллизации титаномагнетита и ильменита в породах Кедабекского интрузива  
**Table 3.** Crystallization parameters of titanomagnetite and ilmenite in the rocks of the Gadabay intrusion

Миналы и параметры (End-members and parameters)	Образцы пород (Rock samples)										
	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16
Tmgt <sub>Usp</sub> (%)	8.83	7.86	6.88	11.9	5.3	4.35	7.46	3.53	8.2	5.08	15.27
Tmgt <sub>Mgt</sub> (%)	91.17	92.14	93.12	88.1	94.7	95.65	92.54	96.47	91.8	94.92	84.73
I <sub>Il</sub> (%)					84.21		86.89	86.83	90.56	88.65	89.07
I <sub>He</sub> (%)					15.79		13.11	13.17	9.44	11.35	10.93
T (°C)					715		710	660	697	683	711
log f <sub>O<sub>2</sub></sub>					-13.7		-14.3	-15.02	-14.9	-15.5	-15.1
T <sub>C</sub>	527	533	539	510	548	553	535	558	531	549	487
H(km)	3.0	2.7	2.3	3.9	1.8	1.5	2.5	1.2	2.8	1.8	5.0

Продолжение Табл. 3.  
[Continued Table 3.]

Миналы и параметры (End-members and parameters)	Образцы пород (Rock samples)										
	17	17а	18	19	21	22	23	24	25	27	28
Tm <sub>Usp</sub> (%)	4.14	4.17	13.07	3.68	11.05	10.65	7.57	18.79	16.15	17.16	16.69
Tm <sub>Mgt</sub> (%)	95.86	95.83	86.93	96.32	88.95	89.35	92.43	81.21	83.85	82.84	93.31
I <sub>Il</sub> (%)	89.35	88.03	89.23	89.72	89.3	89.37	88.57	88.29	89.42	90.58	
I <sub>He</sub> (%)	10.65	11.97	10.77	10.28	10.7	10.63	11.43	11.71	10.38	9.42	
T (°C)	645	655	710	636	703	703	680	747	722	713	
log f <sub>O<sub>2</sub></sub>	-16	-15.7	-14.9	-16.4	-15	-15	-15.2	-14.1	-14.8	-15.2	
T <sub>C</sub>	555	554	500	557	513	516	534	465	482	475	477
H(km)	1.4	1.5	4.4	1.3	3.7	3.6	2.6	6	5.2	5.6	5.5

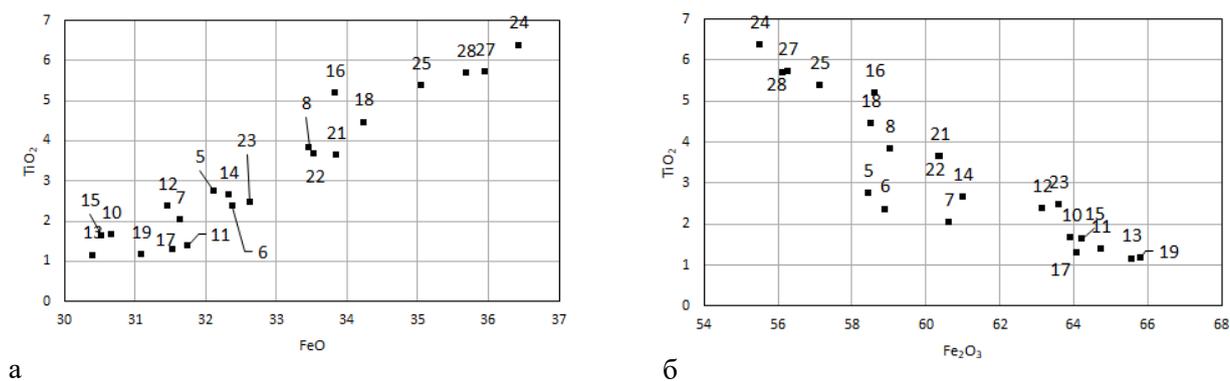
*Примечания:* Tm<sub>Usp</sub> – количество ульвошпинелиевого минала в титаномагнетите; Tm<sub>Mgt</sub> – количество магнетитового минала в титаномагнетите; I<sub>Il</sub> – количество ильменитового минала в ильмените; I<sub>He</sub> – количество гематитового минала в ильмените.  
*Notes:* Tm<sub>Usp</sub> is the amount of ulvospinel minal in titanomagnetite; Tm<sub>Mgt</sub> is the amount of magnetite minal in titanomagnetite; I<sub>Il</sub> is the amount of ilmenite minal in ilmenite; I<sub>He</sub> is the amount of hematite minal in ilmenite.

Корреляция TiO<sub>2</sub> с оксидами FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показана на диаграмме (рис. 3). Как видно, количество TiO<sub>2</sub> пропорционально увеличивается с увеличением содержания FeO в минерале. Наоборот, с избыточным увеличением Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в титаномагнетите содержание TiO<sub>2</sub> уменьшается. Это объясняется тем, что по мере увеличения содержания FeO, в титаномагнетите увеличивается также количество миналов ульвошпинели и ильменита. Наоборот, с увеличением Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> увеличивается количество минала магнетита и остается мало FeO для образования вышеуказанных миналов [17]. Высокотитановые магнетиты с другой стороны, подвержены фазовому распаду с образованием рутила [18]. Между другими оксидами значимые связи не установлены. Следует отметить отсутствие положительной корреляции между MgO-NiO, как у оливина, так и у ортопироксена. Количество MgO в минерале не влияет на содержание NiO. Это связано с тем, что магнетит не является основным носителем NiO [2, 3].

Для выполнения поставленной цели мы использовали расчет миналов титаномагнетита и ильменита для построения петрологических моделей: расчет температуры кристаллизации по геотермометру [4], и определение зависимости T<sub>C</sub> – глубина, а также расчет

значений log f<sub>O<sub>2</sub></sub> по диаграмме [9, 23]. По данным химического анализа минералов (табл. 1, 2), миналы были рассчитаны на основе молярных масс катионов, нормированных к 4 моль кислорода для титаномагнетита и 3 моль кислорода для ильменита. В таблице 3 приведен минальный состав титаномагнетита и ильменита. Нормированные катионы не приводятся во избежание увеличения размера таблицы. Для более полной информации по данному вопросу рекомендуются работы [8].

Как уже упоминалось, содержание TiO<sub>2</sub> в составе минерала влияет на количество ульвошпинелиевого минала, а содержание MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> влияет на количество шпинелевого минала. Ульвошпинелиевый минал используется для расчета температуры Кюри (T<sub>C</sub>) кристаллизации минерала [4, 8, 17]. Наличие вюститита является показателем того, что среда была восстановительной, т.е. кристаллизация происходила в отсутствии кислорода. Несмотря на то, что вюститный минал был рассчитан в некоторых парах образцов, это не свидетельствует о восстановительной среде кристаллизации пород, так как его доля совершенно незначительная (0.17–1.51 %), так как глобальный тектонический режим соответствует активной континентальной



**Рис. 3.** Диаграммы соотношений: *а* –  $\text{TiO}_2$  с  $\text{FeO}$  и *б* –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с  $\text{TiO}_2$  в титаномагнетитах. Расшифровка номеров образцов и петрографических различий пород приведена в табл. 1.

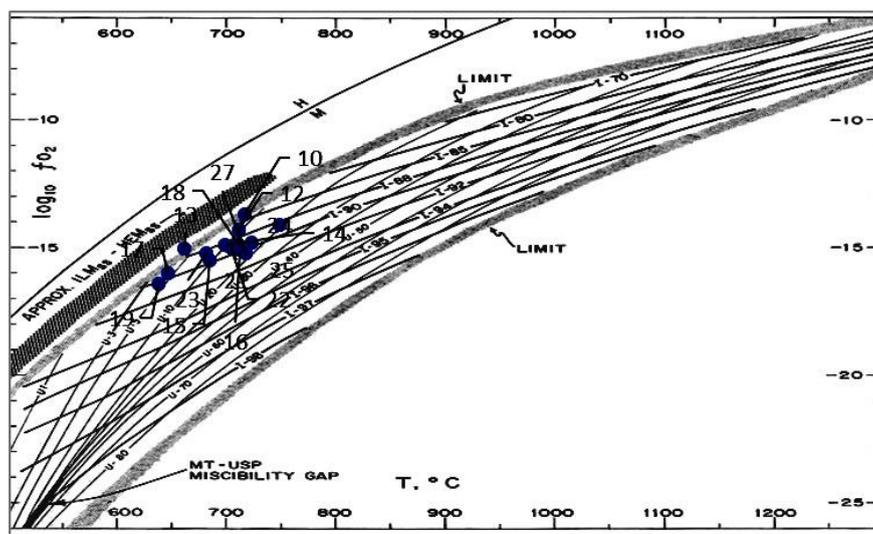
**Fig. 3.** Correlation diagrams: (*a*) –  $\text{TiO}_2$  with  $\text{FeO}$  and (*b*) –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  with  $\text{TiO}_2$  in titanomagnetites. The interpretation of sample numbers and petrographic differences of rocks is shown in Table 1.

окраине или же зрелой островодужной дуге [15, 23], для этих обстановок восстановительная среда не характерна. А наличие небольшого количества вюститного минала может быть связано с неточным приборным определением и соотношением  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Миналы и параметры, рассчитанные на основе составов титаномагнетита и пары ильменит-титаномагнетит, представлены в таблице 3. Расположение фигуративных точек пар минералов в окислительно-восстановительных буферных системах представлено на рисунке 4. Показано, что областью устойчивости этих минералов является область ТМ (гематит-магнетит). Параметры и соотношения Тс – Н (глубина) рассчитаны с помощью диаграммы Н. Кавайи [4].

По рассчитанным данным, в наиболее глубокой интрузивной камере кристаллизовались монцонитовые породы. Глубина их кристаллизации составляет 5.2–6.0 км. Наибольшая глубина кристаллизации долерита и спессартита, являющихся жильными породами, может быть связана с вторичным происхождением аксессуар-

ных титаномагнетитов, сформировавшихся за счет гидротермальных флюидов. Учитывая, что обе жильные породы являются продуктом остаточных расплавов I фазы, это предположение представляется нам наиболее вероятным. Минимальная глубина и наивысший индекс восстановительной среды, зафиксированы в Ti-Fe оксидах роговообманковых диоритов I фазы. Самая высокая температура кристаллизации также рассчитана для монцонитов. В целом для минералов, входящих в состав изучаемых горных пород глубина кристаллизации колеблется от 1.3 до 6 км, а температуры кристаллизации варьирует в пределах от 654 до 769°С. Значения  $\log f_{\text{O}_2}$  находятся в диапазоне от -16.68 до -13.8. Высокие температуры кристаллизации и относительно более глубокий уровень кристаллизация монцонитов могут свидетельствовать о том, что щелочной магматизм является продолжением III фазы в качестве новой фазы магматизма, а не продолжением I фазы или II фазы. Кроме того, возможно обогащение остаточного расплава титаном. Для решения этого вопроса необходимы дополнительные исследования.



**Рис. 4.** Расположение фигуративных точек изученных минералов в окислительно-восстановительных буферных зонах [10, 11].

**Fig. 4.** The location of the figurative points of the studied minerals in the oxidation-reduction buffer zones [10, 11].

### Заклучение

Анализ химического состава изученных минералов – титаномагнетита и ильменита интрузивных пород Кедабекского интрузива, образовавшихся в две или три фазы, показывает, что указанные минералы в породах кристаллизовались, преимущественно, в верхних горизонтах земной коры на гипабиссальных глубинах. Окружающая среда была, в основном, окислительной. Об этом свидетельствует отсутствие вюститита среди минералов титано-железистых оксидных минералов. Из типоморфных элементов-примесей Sr присутствует только в Ti-Fe минералах из габброноритов и пироксеновых габбро. Ni в небольшом количестве содержится в изученных минералах всех пород, но также в самых больших количествах в габброноритах, что свидетельствует о том, что эти породы являются самыми первыми дифференциатами первичного расплава. В монцонитах железо-титановые оксидные минералы имеют самую высокую температуру кристаллизации. Эволюция направлена в сторону тоналит, гранодиорит и жильных пород; их температура кристаллизации снижается. Парциальное давление кислорода  $\log f_{O_2}$  колеблется в пределах от -16.68 до -13.8. Это область соответствует гематит-магнетитовому буферу (НМ).

*Конфликт интересов:* Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Генштафт Ю.С., Цельмович В.А., Гапеев А.К., Солодовников Г.М. Значение Fe-Ti оксидных минералов в науках о Земле // *Вестник ОГГТГ РАН*. 1999. № 1(7). С. 3–12.
2. Глазунов О.М., Мехонешин А.С., Захаров М.Н. Геохимия элементов группы железа в эндогенном процессе. Новосибирск: Наука, 1985. 199 с.
3. Kushiro I. Fractional crystallization of basaltic magma. In: Yoder. H. Sw Jr (ed.) *The Evolution of the Igneous Rocks* // Princeton. NJ: Princeton University Press. 1979. P. 171–203.
4. Naoto Kawai Magnetism of the Earth Crust // *Geological and Mineralogical Institute. Kyoto University. Japan*. 1957. 17 p.
5. Carmichael. I.S., Nicholls J. Iron-titanium oxides and oxygen fugacities in volcanic rocks // *Journal of Geophys. Res.* 1967. Vol. 72. P. 4665–4687.
6. Carmichael I. S. E. The Iron-Titanium Oxides of Salic Volcanic Rocks and their Associated Ferromagnesian Silicates // *Contr. Mineral. and Petrol.* 1967. 14. 1967. P. 36–64.
7. Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // *J. Petrol.* 1964. Vol. 5. P. 310–357.
8. Lindsley D. H., Spencer K. J. A solution model for coexisting iron-titanium oxides // *American Mineralogist*. 1981. Vol. 66. P. 1189–1201
9. Lindsley. D. H. and Spencer. K. J. Fe-Ti oxide geothermometry Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite” (Ilm) // *EOS*. 1982. Vol. 63. 471 p.
10. Алийев В.И. Колчеданные рудные формаций Малого Кавказа. Баку. 1976 50 с.
11. Геология Азербайджана. Полезные ископаемые. В 7-ми томах. Том 6. 2003. 631 с.
12. Babazadə V.M., Məmmədov M.N., Mansurov M.İ., Abbasov K.F., Şəmiyev R.A. Üst Yura-alt təbaşiryaşlı Gədəbəy intruzivinin qızıl-miskolçedan və qızıl polimetal filizləşməsində petrol rolu. *Bakı universitetinin xəbərləri*. 2017. №1. səh. 111–122
13. Эфендиев Г.Х. Гидротермальный рудный комплекс северо-восточной части Малого Кавказа // *Акад. Наук Азерб. ССР*. 1957. 300 с
14. Абдуллаев Р.Н. Мезозойский вулканизм северо-восточной части Малого Кавказа. Баку. 1963. 226 с.
15. Mammadov M.N., Babaeva G.J., Veliyev A.A., Abbasov K.F., Sariyev F.H., Bayramov A.A. Petrological factor soffermation of central Lok-Garabakh zone intrusion complexes of upper Jurassic earlyCretaceousage // *ANAS Transactions. Earth Sciences*. No 2. 2021. P. 3–15. DOI: 10.33677/ggianas20210200059
16. Керимов Г.И. Петрология и рудоносность Кедабекского рудного узла. Баку. 1963. 208 с.
17. Kərimov V.M., Abbasov K.F. Gədəbəy filiz rayonunun gec yura-erkən təbaşir yaşlı Söyüdlü intruzivinin formalaşmasında dəmir-titan oksidi minerallarının petrogenetik rolu // *Eko Energetika elmi-texniki jurnalı*. 2017. No 4. səh. 7882
18. Abbasov K. Microscopic study of ore mineralization from Gadabay intrusion // *UNESCO Chair for Science, Technology and Engineering Education at the AGH University of Science and Technology, Krakow. Azerbaijan: NESCO/Poland Co-sponsored Fellowship Programme in Engineering*. Ed. 2016A. 2016
19. Evans. B. W., Scaillet. B. & Kuehner.S. M. Experimental determination of coexisting iron-titanium oxides in the systems FeTiAlO. FeTiAlMgO. FeTiAlMnO. and FeTiAlMgMnO at 800 and 900°C. 1–4 kbar. and relatively high oxygen fugacity // *Contributions to Mineralogy and Petrology* 2006. No 152. P. 149–167.
20. Ramdohr P.P. The ore minerals and their intergrowths // *English translation of the third edition*. Pergamon Press. 1969.
21. Lattard D., Sauerzapf U. & Kasemann M. New calibration data for the Fe-Ti oxide thermo-oxybarometers from experiments in the Fe-Ti-O system at 1bar. 1000–1300 °C and a large range of oxygen fugacities // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2005. No 149. P. 735–754.
22. Lattard. D., Engelmann. R., Kontny. A. & Sauerzapf. U. Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of compositions. crystal chemistry. and thermomagnetic methods // *Journal of Geophysical Research*. B12S28. 2006. No 111. P. 1–18. doi:10.1029/2006JB004591.
23. Scaillet. B. & Evans. B. The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P-T-fO<sub>2</sub>-fH<sub>2</sub>O conditions of the dacite magma // *Journal of Petrology*. 1999. No 40. P. 381–411.

## Determination of the physicochemical conditions for the formation of rocks of the Gadabay intrusion based on the composition of ilmenite and titanomagnetite

©2023 K. F. Abbasov✉

*Institute of Geology and Geophysics of the Ministry of Science and Education,  
119 G. Javid Ave., AZ1143, Baku, Republic of Azerbaijan*

### Abstract

**Introduction:** Despite the fact that the petrographic features of the rocks of the Gadabay intrusion and its geological-field descriptions have been studied comprehensively over many years of research, the physico-chemical conditions of the formation of this intrusion have not been studied in detail. Therefore, it is necessary to study the petrochemical properties of the minerals of constituent rocks of the Gadabay intrusion.

**Methods:** In the present study, paired ilmenite and titanomagnetite minerals were studied in order to fill the aforementioned gap. For calculations and interpretations, the results of the bulk chemical analysis and trace element analysis of monomineral samples were used. Images of polished sections of some samples were also presented and discussed.

**Results and discussion:** Ilmenite and titanomagnetite from the rocks of the Gadabay intrusion contain low and moderate concentrations of Ti. High concentrations of titanium in vein rocks can be associated with the enrichment of melts of these rocks with titanium. The concentration of trace elements, such as Ni, Cr, in the composition of titanomagnetite and ilmenite is controlled by fractional crystallization and decreases towards more acidic rocks. There is a positive correlation between FeO and TiO<sub>2</sub> and negative correlation between Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>. Oxidatively-reducing crystallization medium corresponds to hematite-magnetite (HM) buffer.

**Conclusions:** Based on the results of the study, it can be concluded that the minerals in the rocks crystallized mainly in the upper horizons of the earth's crust at hypabyssal depths. The environment was mostly oxidative. This was evidenced by the absence of wustite among minerals of titanium-ferruginous oxide minerals, which indicates their crystallization in the upper horizons of the earth's crust.

**Keywords:** iron-titanium oxides, titanomagnetite, ilmenite, crystallization temperature, crystallization depth, partial pressure, mineral composition.

**For citation:** Abbasov K. F. Definition of physico-chemical conditions for the formation of rocks of the Gadabay intrusion based on the composition of ilmenite and titanomagnetite // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta (Proceedings of Voronezh State University). Series: Geology*. 2023. No. 1. pp. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/29-38>

**Conflict of interests:** The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Kanan F. Abbasov, e-mail: [kenan.abbasov313@gmail.com](mailto:kenan.abbasov313@gmail.com)

## REFERENCES

- Genshaft Ju.S., Cel'movich V.A., Gapeev A.K., Solodovnikov G.M. Znachenie Fe-Ti oksidnyh mineralov v naukah o Zemle [Importance of Fe-Ti oxide minerals in Earth sciences]. *Vestnik OGGGG RAN – Proceedings of RAN*, 1999, no. 1(7), pp. 3–12. (In Russ.)
- Glazunov O.M., Mehoneshin A.S., Zaharov M.N. *Geohimija jelementov gruppy zheleza v jendogennom processe* [Geochemistry of iron group elements in endogenic process]. Novosibirsk, Nauka publ., 1985, 199 p. (In Russ.)
- Kushiro I. Fractional crystallization of basaltic magma. In: Yoder. H. S. Jr (ed.) *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1979, pp. 171–203.
- Naoto Kawai Magnetism of the Earth Crust *Geological and Mineralogical Institute. Kyoto University. Japan*, 1957, 17 pp.
- Carmichael I.S., Nicholls J. Iron-titanium oxides and oxygen fugacities in volcanic rocks. *Journal of Geophys. Res.*, 1967, vol. 72, pp. 4665–4687
- Carmichael I. S. E. The Iron-Titanium Oxides of Salic Volcanic Rocks and their Associated Ferromagnesian Silicates. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 1967, 14, 1967, pp. 36–64.
- Buddington A.F., Lindsley D.H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *J. Petrol.*, 1964, vol. 5, pp. 310–357.
- Lindsley D.H., Spencer K.J. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *American Mineralogist*, 1981, vol. 66, pp. 1189–1201
- Lindsley. D.H. and Spencer. K.J. Fe-Ti oxide geothermometry Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite” (Ilm). *EOS*, 1982, vol. 63, 471 p.
- Alijev V.I. *Kolchedannye rudnye formacij Malogo Kavkaza* [Pyrite ore formations of the Lesser Caucasus]. Baku, 1976, 50 p. (In Russ.)
- Geologiya Azerbaidzhana. Poleznye iskopaemye.* [Geology of Azerbaijan. Mineral resources]. In 7 vol. Vol. 6, 2003, 631 p. (In Russ.)
- Babazadə V.M., Məmmədov M.N., Mansurov M.İ., Abbasov K.F., Şəmiyev R.A. Üst Yura-alt təbəşiryaşlı Gədəbəy intruzivinin qızıl-miskolçedan və qızıl polimetall filizləşməsində petrol rolu. Bakı universitetinin xəbərləri, 2017, no. 1, səh. 111–122.
- Efendiev G.Kh. *Gidrotermal'nyi rudnyi kompleks severo-vostochnoi chasti Malogo Kavkaza* [Geothermal ore complexes of the north-east part of the Lesser Caucasus]. *Akad. Nauk Azer. SSR. – National Science of Azer. SSR*, 1957, 300 p. (In Russ.)
- Abdullaev R.N. *Mezozoiskii vulkanizm severo-vostochnyi chasti Malogo Kavkaza* [Mesozoic volcanism of north-east part of the Lesser Caucasus]. Baku, 1963, 226 p. (In Russ.)
- Mammadov M.N., Babaeva G.J., Veliyev A.A., Abbasov K.F., Sariyev F.H., Bayramov A.A. Petrological factor sofformation of central Lok-Garabakh zone intrusion complexes of upper Jurassic earlyCretaceousage. *ANAS Transactions. Earth Sciences.* no 2, 2021, pp. 3–15. DOI: 10.33677/ggianas20210200059
- Kerimov G.I. *Petrologiya i rudonosnosti Kedabekskogo rudnogo uzla* [Petrology and mineralization of Gadabay mineralization node]. Baku, 1963, 208 p. (In Russ.)
- Kərimov V.M., Abbasov K.F. Gədəbəy filiz rayonunun gec yura-erkən təbəşir yaşlı Söyüdlü intruzivinin formalaşmasında dəmir-titan oksidi minerallarının petrogenetik rolu. *Eko Energetika elmi-texniki jurnalı*, 2017, no 4, səh. 7882
- Abbasov K. Microscopic study of ore mineralization from Gadabay intrusion. Microscopic study of ore mineralization from Gadabay intrusion. *UNESCO Chair for Science, Technology and Engineering Education at the AGH University of Science and Technology, Krakow.* Azerbaijan: NESCO/Poland Co-sponsored Fellowship Programme in Engineering. Ed. 2016A, 2016.
- Evans. B. W., Scaillet. B. & Kuehner.S. M. Experimental determination of coexisting iron-titanium oxides in the systems FeTiAlO. FeTiAlMgO. FeTiAlMnO. and FeTiAlMgMnO at 800 and 900°C. 1–4 kbar. and relatively high oxygen fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 2006, no 152, pp. 149–167.
- Ramdohr P.P. The ore minerals and their intergrowths. *English translation of the third edition*, Pergamon Press, 1969.
- Lattard D., Sauerzapf U. & Kasemann M. New calibration data for the Fe-Ti oxide thermo-oxybarometers from experiments in the Fe-Ti-O system at 1bar. 1000–1300 °C and a large range of oxygen fugacities. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, no 149, pp. 735–754.
- Lattard. D., Engelmann. R., Kontny. A. & Sauerzapf. U. Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of compositions. crystal chemistry. and thermomagnetic methods. *Journal of Geophysical Research.* B12S28, 2006, no 111, pp. 1–18. doi:10.1029/2006JB004591.
- Scaillet. B. & Evans. B. The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P-T-fO<sub>2</sub>-fH<sub>2</sub>O conditions of the dacite magma. *Journal of Petrology*, 1999, no 40, pp. 381–411.

Аббасов Кянан Фаррух – научный сотрудник Института геологии и геофизики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики, преподаватель Азербайджанского Государственного университета нефти и промышленности, Азербайджанская республика;  
e-mail: kenan.abbasov313@gmail.com;  
ORCIDhttps://orcid.org/0000-0002-4129-1129

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Kanan F. Abbasov – Researcher at the Institute of Geology and Geophysics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, lecturer, Azerbaijan State University of Oil and Industry; Republic of Azerbaijan;  
e-mail: kenan.abbasov313@gmail.com;  
ORCIDhttps://orcid.org/0000-0002-4129-1129

Author have read and approved the final manuscript.