



ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МАГМАТИЧЕСКОГО ГИБРИДИЗМА В ГАББРО–ГРАНИТНОМ МАССИВЕ ДАШКЕСАН (ДАШКЕСАНСКОЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, АЗЕРБАЙДЖАН)

Э.А. САДЫХОВ^{1,*}, А.С. ДЕСЯТКИН¹, А.А. ВЕЛИЕВ², Э.К. ХМАРИН³

¹ АО «Зарубежгеология», холдинг Росгеология
69, корп. Б, ул. Новочеремушкинская, г. Москва 117418, Россия

² Азербайджанская Международная Горнодобывающая компания
2, ул. Измир, Башня Хаят 2, г. Баку AZ1065, Азербайджан

³ ООО «ЗН Геотерм» (АО «Зарубежнефть»)
9, стр. 1, пом. 35/110/1, Армянский переулок, г. Москва, 101000, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются геохимические признаки магматического смешивания на примере Fe-Co месторождения Дашкесан с использованием геохимических данных и математического моделирования.

Цель. Создание петролого-геохимической модели магматического смешивания месторождения Дашкесан.

Материалы и методы. В основу работы положены полевые материалы, геохимические (ICP-MS, РФА), петрографические исследования шлифов и анализ ретроспективных материалов.

Результаты. Показано влияние процессов контаминации и магматического смешивания (mixing/mingling) на примере массива Дашкесан, с которым связано формирование Fe-Co скарнового месторождения. Богатый состав акцессорных минералов, вариации текстур и структур от гипидиоморфнозернистой до такситовой, наличие многочисленных шлиров и кучевых скоплений темноцветных минералов и многочисленные ксенолиты указывают на процессы магматического смешивания. Характерны геохимические аномалии в породах первой фазы (габбро) с повышенным содержанием литофильных и REE элементов, тогда как для пород последующих стадий гранитоидов наблюдаются пониженные содержания. Геохимические параметры указывают на относительно обогащенный магматический источник формирования пород комплекса с контаминацией континентальной коры и субдукционно-флюидным обогащением. Данные процессы привели к отклонению химического состава пород Дашкесана от состава типично островодужных магматических пород. Источником для пород габбро-гранитового комплекса являлись относительно обогащенные породы мантийного клина.

Ключевые слова: Дашкесан, магматический гибрианизм, геохимия, петрология, скарны, граниты

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: за счет средств аспирантуры ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Для цитирования: Садыхов Э.А., Десяткин А.С., Велиев А.А., Хмарин Э.К. Геохимические признаки магматического гибрианизма в габбро-гранитном массиве Дашкесан (Дашкесанское железорудное месторождение, Азербайджан). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(1):52—64. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-52-64>

Статья поступила в редакцию 11.01.2024
Принята к публикации 15.04.2024
Опубликована 29.04.2024

* Автор, ответственный за переписку

GEOCHEMICAL SIGNS OF MAGMATIC COMMINGLING IN THE DASHKESAN GABBRO-GRANITE INTRUSION (DASHKESAN IRON ORE DEPOSIT, AZERBAIJAN)

EMIN A. SADIKHOV^{1,*}, ALEXEY S. DESYATKIN¹, ANAR A. VELIEV², EDUARD K. KHMARIN³

¹ JSC "Zarubezhgeologiya"
69, Novocheremushkinskaya str., Moscow 117418, Russia

² AIMC (Azerbaijan International Mining Company Limited)
2, Izmir str., Hayat 2, Baku AZ1065, Azerbaijan

³ LLC "ZN Geotherm" (JSC Zarubezhneft)
9, building 1, room 35/110/1, Armenian lane, Moscow 101000, Russia

ABSTRACT

Background. Geochemical signs of magmatic commingling are considered on the example of the Dashkesan Fe–Co deposit using geochemical data and mathematical modeling.

Aim. To develop a petrological-geochemical model of magmatic commingling in the Dashkesan ore deposit.

Materials and methods. The research methodology is based on field data, geochemical data (ICP-MS, XRF) analysis of retrospective data and petrographic studies of thin sections.

Results. The influence of the processes of contamination and magmatic commingling is shown using the Dashkesan deposit as an example. This site is associated with the formation of Fe–Co skarn deposits. The rich composition of accessory minerals, variations in textures and structures from hypidiomorphic granular to taxitic, the presence of numerous schlieren and cumulus accumulations of mafic minerals, and numerous xenoliths and enclaves — all are indicative of magmatic commingling processes. The rocks of the first gabbroid phase with increased contents of lithophile and REE elements are characterized by geochemical anomalies; at the same time, lower contents are observed for rocks of further stages of granitoids. The geochemical parameters indicate a relatively enriched magmatic source for the formation of rocks with contamination of the continental crust and subduction-fluid enrichment. These processes led to a deviation in the chemical composition of the Dashkesan rocks from the composition of typical island-arc igneous rocks. The source for the rocks of the gabbro-granite complex was the relatively enriched rocks of the mantle wedge. In addition to the process of melt mixing, the formation of the gabbro-granite complex was accompanied by crustal contamination and subduction enrichment.

Keywords: Dashkesan, commingling, geochemistry, petrology, skarns, granite, Lesser Caucasus

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: financing from the graduate school of the FGBU "VSEGEI".

For citation: Sadikhov E.A., Desyatkin A.S., Veliev A.A., Khmarin E.K. Geochemical signs of magmatic commingling in the Dashkesan gabbro-granite intrusion (Dashkesan iron ore deposit, Azerbaijan). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(1):52—64. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-52-64>

Manuscript received 04 August 2023

Accepted 15 April 2024

Published 29 April 2024

* Corresponding author

Введение

Явление магматического смешивания (mixing/migling) при участии нескольких источников широко проявлено в формировании многофазных массивов в различных геодинамических обстановках. Так, взаимодействие разных по составу магм приводит к аномальным структурно-текстурным и геохимическим особенностям. Смешивание магм может происходить в магматических промежуточных камерах при контаминации и ассимиляции вмещающих пород или же пород предыдущих фаз. Несмотря на детальную петрографо-минералогическую изученность комплекса Дашкесан и многочисленным работам, посвященным его металлогении, акцессорным минералам и скарнам, остаются вопросы о степени влияния субдукционных процессов, а также роли процессов магматического смешивания расплавов, которые отмечались и предыдущими исследователями [2, 3, 6, 11].

Дашкесанское месторождение располагается на территории Азербайджанской Республики, является одним из самых крупных железорудных месторождений в Закавказье и связано с внедрением габбро-гранитового массива [1, 5, 7]. Главной особенностью массива и месторождения является крайне разнообразный минеральный состав: рудных компонентов, а также акцессорных минералов (сульфиды железа, никеля, кобальта, молибдена, цинка, свинца, меди, золота, а также адамин, grosular, аметист, дашкесанит (хлор- и калийдоминантный аналог гастингсита), эритрин, актинолит и другие). Данный объект является центром внимания многих исследователей в первую очередь за счет своего уникального минерального состава и выступает эталоном контактово-метасоматического скарн-магнетитового месторождения.

Месторождение Дашкесан находится в Лок-Гарабагской (Сомхето-Карабахской) мезозойской островной дуге в пределах Малого Кавказа. Дашкесанский массив (рис. 1) площадью 38 км² локализован в пределах одноименного Дашкесанского синклинария, имеющего юго-восточное простирание, представляет собой трогообразную структуру с пологими углами падения крыльев, не превышающими 10–20°. Дашкесанский синклинорий сложен верхнеюрскими отложениями, разрез которых начинается глинами келловей, наращивается известняками оксфорда и заканчивается туфогенными образованиями киммериджа. Синклинорий в субширотном направлении пересекается глубинным разломом. Интрузивные породы Дашкесана прорывают вмещающие нижнемеловые породы, представленные вулкано-

генно-осадочными (туффины, туфопесчаники) и вулканогенными (андезиты, андезибазальты) породами, и оказывают на них контактово-метаморфическое воздействие, образуя обширные поля скарнов на контактах с оксфордскими известняками [3,4,11]. Формирование пород массива Дашкесан по U-Pb методу оценивается интервалом 138 ± 2 — 143 ± 2 млн лет [10].

Используя современные геохимические методы, авторы в данной статье обосновывают степень влияния процессов магматического смешивания на становление массива на основе полученных лабораторных данных и геохимического моделирования с помощью миксинг-теста (mixing test) [14].

Геологическая характеристика

Массив Дашкесан представляет собой комплекс из нескольких фаз: первая фаза состоит из габброидов, занимающих около 20% объема; вторая фаза представлена гранитами и гранодиоритами, составляя около 70% массива; третья фаза включает жильные граниты, аплиты, занимая приблизительно 10% объема. Дайки, пересекающие массив, обычно образуют самостоятельные дайковые комплексы, состоящие главным образом из лампрофиров и долеритов, с характерными ступенчатыми сбросами и интенсивными гидротермальными изменениями [5]. Породы последующих фаз прорывают предыдущие, содержащие их ксенолиты и образующие характерные шлировые или теневые структуры (рис. 2а).

Первая фаза пород массива представлена широкой вариацией от габбро, норитов до габбродiorитов через фациальные переходы. Структура габброидных пород: габбровая, гипидиоморфнозернистая, офитовая, текстура от такситовой, неоднородной до массивной. Минеральный состав включает в себя клинопироксены диосид-авгитового ряда, и ортопироксен гиперстен, энстатит. Часто пироксены подвергаются вторичным изменениям, присутствуют включения магнетита, апатита. Плаггиоклазы представлены битовнит-лабрадором. Наблюдается прямая и обратная зональность таблитчатых плаггиоклазов. В фотографиях обратно рассеянных электронов в интерстициях наблюдается ксеногенный калиевый полевой шпат (рис. 2в—г). Также присутствует оторочка из темноцветных минералов на периферии зерен.

Породы второй фазы — гранитоиды, которые образуют вытянутое тело в субширотном направлении, которые занимают около 25 км² площади массива. Представлен широкий ряд гранитоидов от кварцевых диоритов

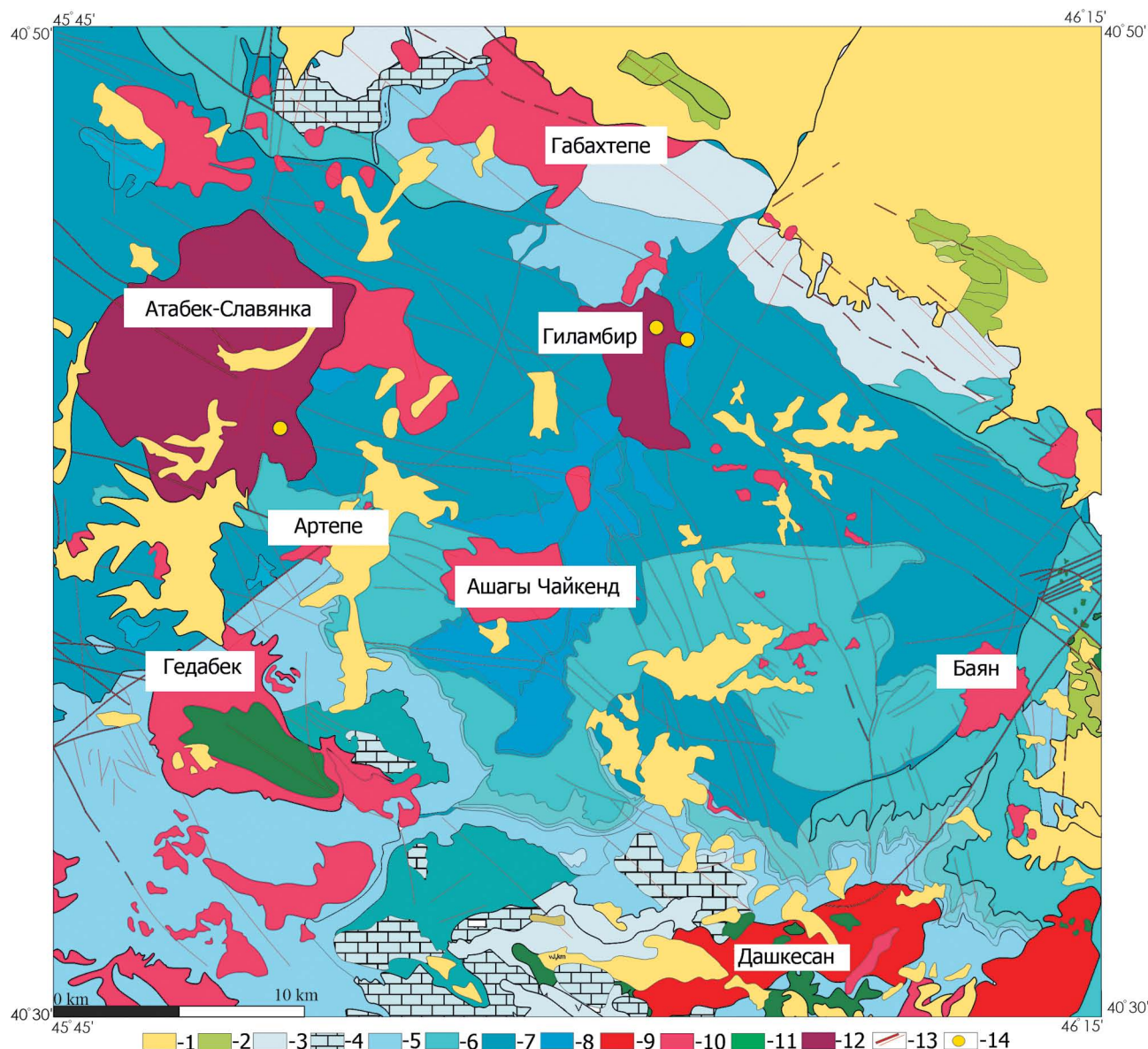


Рис. 1. Геологическая карта 1:50 000. 1. Четвертичные аллювиальные, делювиальные и пролювиальные отложения; 2. Меловые отложения. Известняки, мергели, песчаники, глины; 3. Киммериджский ярус. Туфы, вулканогенно-осадочные породы, андезиты; 4. Келловей-оксфордский ярус. Известняки и туфы; 5. Верхний Бат. Туфы, конгломераты, песчаники; 6. Нижний Бат. Вулканогенно-осадочные породы, песчаники; 7. Поздний Байос. Лавы дацитов, риолитов; 8. Нижний Байос. Базальты, андезиты, туфы; 9. Гранодиориты, граниты; 10. Кварцевые диориты, диориты; 11. Габброиды; 12. Плагиограниты; 13. Разрывные нарушения; 14. Пробы U-Pb

Fig. 1. Geological map 1:50 000. 1. Quaternary alluvial, eluvial and proluvial deposits; 2. Cretaceous deposits. Limestone, marl, sandstone, clay; 3. Kimmeridgian Stage. Tuff, volcanic-sedimentary rocks, andesite; 4. Callovian-Oxfordian stage. Limestone and tuff; 5. Late Bathonian. Tuff, conglomerate, sandstone; 6. Early Bathonian. Volcanogenic-sedimentary rocks, sandstone; 7. Late Bajocian. Lavas of dacite, rhyolite; 8. Early Bajocian. Basalt, andesite, tuff; 9. Granodiorite, granite; 10. Quartz diorite, diorite; 11. Gabbro; 12. Plagiogranite; 13. Faults; 14. U-Pb samples

до монцодиоритов, гранитов через фациальные переходы. Структура мелко-среднезернистая, равномерно зернистая, порфировая, текстура от массивной до такситовой. Минеральный состав

характерный для гранитоидных пород с содержанием кислого плагиоклаза 40—50%, ортоклаза 10—25% и темноцветных минералов (биотит, пироксен, роговая обманка).

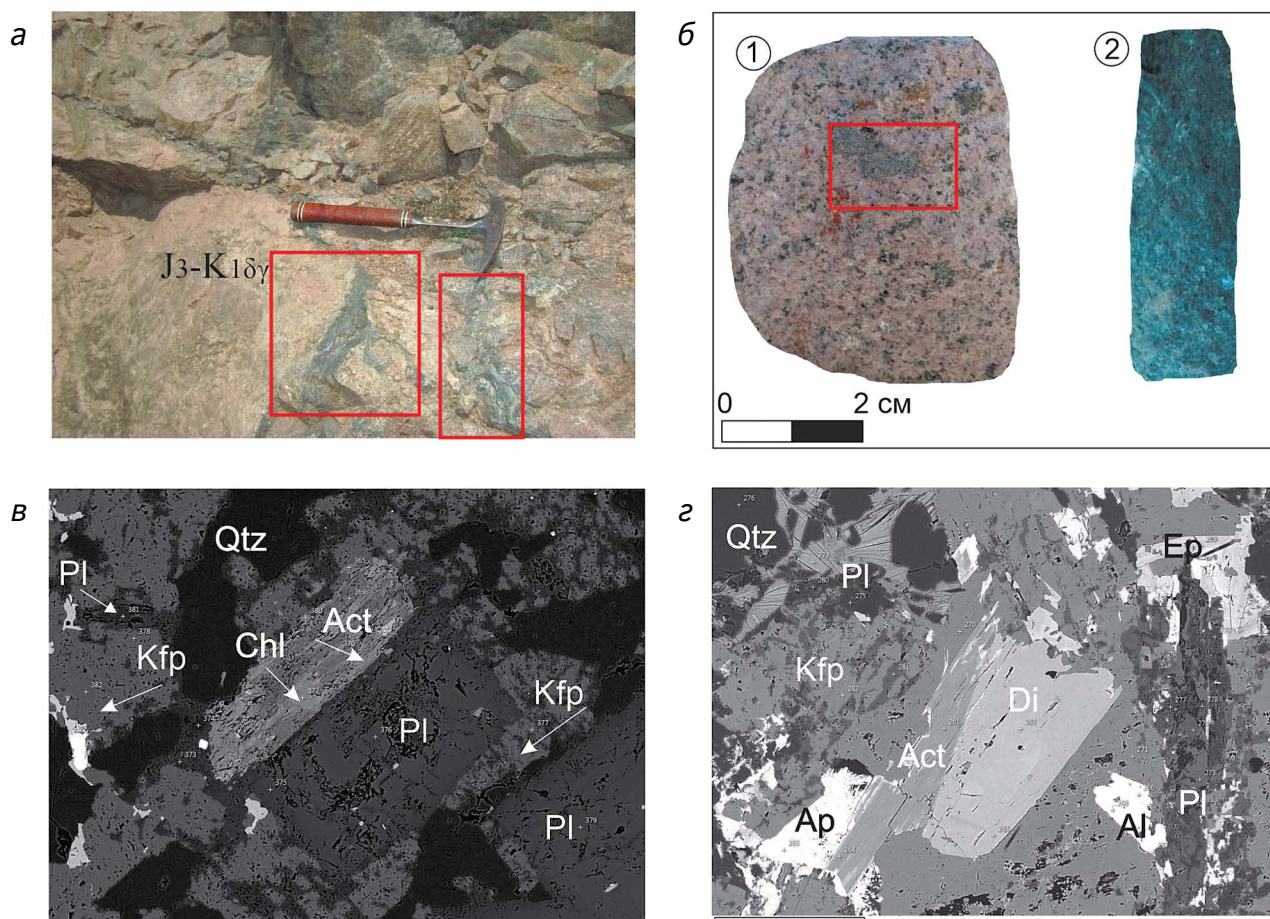


Рис. 2. Фотографии образцов и микрозондовые изображения. а — пример ксенолитов в обнажении; б — образец гранодиорита с включением ксенолита (1); (2) — образец габбро; в, з — изображение габбро в обратно рассеянных электронах. Act — актинолит, Di — диопсид; Pl — плагиоклаз, Kfp — калиевый полевой шпат, Qtz — кварц, Chl — хлорит, Ep — эпидот, Al — алланит

Fig. 2. Sample photographs and microprobe images. а — example of xenoliths in granodiorites; б — sample of granodiorite with inclusion of xenolith (1); (2) — gabbro sample; в, з — image of gabbro in backscattered electrons. Act—actinolite, Di—diopside; Pl — plagioclase, Kfp — potassium feldspar, Qtz — quartz, Chl — chlorite, Ep — epidote, Al — allanite

В гранитоидах часто обнаруживаются ксенолиты габброидов размером от 1 до 30 см и более, а также ксенолиты диоритов и эффузивных пород, включенных в их состав. Ксенолиты подвержены окварцеванию, амфиболизации, эпидотизации и серицитизации. Темные минералы часто претерпевают вторичные изменения, часто происходит хлоритизация, а пироксен заменяется амфиболом. Содержание темных минералов в породах обычно неоднородно. Граниты встречаются в небольших количествах только апикальных частях. Они представляют собой плотные, светло-розовые породы средней зернистости, имеющие однородную структуру и массивную текстуру, внешне напоминающие гранодиориты с высоким содержанием лейкократовых минералов.

Породы третьей фазы образуют тонкие (от 2—3 см до 1 м) аплитовидные жилы, проникающие, как в гранитоиды второй фазы, так и в габброиды первой фазы. Эти аплитовидные жилы состоят из розовых мелкозернистых пород с высоким содержанием светлых минералов и минимальным содержанием темных минералов. В зонах контакта между гранитом и аплитом часто встречаются ксенолиты из окружающих пород. Дайки и тонкие аплитовые жилы распространены в большом количестве.

Становление массива Дашкесан завершается формированием даек долеритов и лампрофиров. Протяженность и мощность этих даек варьируют в широких пределах, они часто разбиты микротрещинами, ступенчато сброшены и изменены.

Геохимическая характеристика

Содержание SiO_2 в магматических породах Дашкесанского массива колеблется от 43 до 71%, образуя последовательный непрерывный тренд от габброидов до гранитоидов. Соотношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ изменяется в широком диапазоне (от 1,2 до 8,5) породы Дашкесанского массива охватывают области

низкокальциевой, известково-щелочной и высококальциевой серий. Статистический химический состав пород массива Дашкесан приведен в таблице 1.

Наблюдаются отрицательные корреляции SiO_2 с Al_2O_3 и MgO для пород первой фазы, тренды остальных петрогенных элементов не устанавливаются четкой корреляционной связи. Для гранитоидов

Таблица 1. Сводные статистические данные по магматическим породам Дашкесанского массива
Table 1. Summary statistics on igneous rocks of the Dashkesan

	Габбро $n = 12$			Диорит $n = 8$			Гранодиорит $n = 11$			Гранит $n = 16$ по данным (Мустафаев 1977)
	Медиана	Q1	Q3	Медиана	Q1	Q3	Медиана	Q1	Q3	Среднее
SiO_2	53,80	53,08	54,33	56,70	56,23	58,23	66,60	63,40	67,95	72,63
Al_2O_3	17,60	17,15	17,93	17,05	16,35	17,30	16,00	15,70	16,80	12,76
Fe_2O_3	6,33	3,54	7,78	7,50	5,42	8,89	3,31	2,75	3,55	2,68
MnO	0,11	0,10	0,12	0,13	0,10	0,14	0,07	0,06	0,09	0,02
MgO	4,84	4,27	5,08	3,45	3,23	3,71	1,17	0,95	1,80	0,64
CaO	11,65	7,89	13,35	6,99	6,80	7,22	3,47	2,88	4,59	1,84
Na_2O	3,38	3,15	3,89	3,93	3,65	4,33	4,20	4,04	4,27	3,13
K_2O	1,25	0,65	1,59	1,75	1,52	1,94	3,63	2,38	3,76	4,61
TiO_2	1,16	1,10	1,24	1,36	1,27	1,46	0,71	0,58	0,80	0,18
P_2O_5	0,25	0,22	0,30	0,32	0,23	0,39	0,14	0,12	0,16	0,07
LOI	0,80	0,68	0,97	0,58	0,53	0,74	0,66	0,48	1,63	1,30
TOTAL	101,15	91,80	106,57	99,74	95,32	104,33	99,96	93,33	105,38	99,86
V	213	195	232	198	142	249	73	55	102	40
Cr	22	16	58	38	33	42	15	8	19	10
Co	17	10	22	19	13	22	6	5	6	5
Ni	22	13	42	20	15	25	5	4	7	17
Cu	12	8	37	34	19	86	6	3	13	13
Zn	32	27	35	66	45	81	41	35	57	51
Rb	18	9	31	35	22	36	53	46	67	70
Sr	535	478	565	469	433	505	292	264	372	
Y	23	19	28	31	29	34	26	24	28	
Zr	109	88	158	205	162	217	249	237	261	
Nb	7,5	5,5	11,0	15,1	12,0	17,0	13,8	12,9	15,1	
Mo	1,3	0,9	2,0	1,9	1,6	2,6	1,9	1,6	2,6	0,5
Ag	0,06	0,04	0,08	0,06	0,05	0,11	0,08	0,06	0,09	
Sn	1,7	1,1	1,7	1,4	1,3	1,7	1,6	1,1	2,1	0,9
Sb	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,5	
Ba	189	136	239	226	206	254	359	330	394	
La	23,70	17,88	26,18	25,20	22,30	26,23	23,50	17,95	28,40	12,00
Ce	45,65	34,40	48,43	49,35	45,80	52,38	48,90	36,15	52,05	25,00

	Габбро $n = 12$			Диорит $n = 8$			Гранодиорит $n = 11$			Гранит $n = 16$ по данным (Мустафаев 1977)
	Медиана	Q1	Q3	Медиана	Q1	Q3	Медиана	Q1	Q3	Среднее
Pr	5,94	4,50	6,49	6,65	5,94	7,41	5,92	4,85	6,33	
Nd	23,50	17,68	27,40	27,95	25,55	31,40	21,60	19,55	23,25	
Sm	4,59	3,91	5,63	6,15	5,70	6,47	4,24	4,07	4,54	2,70
Eu	1,39	1,26	1,68	1,50	1,29	1,57	1,07	0,94	1,12	0,72
Gd	4,53	3,44	5,13	5,43	5,15	5,77	3,94	3,62	4,30	
Tb	0,64	0,52	0,79	0,87	0,74	0,94	0,64	0,57	0,70	0,54
Dy	4,08	3,47	4,94	5,31	4,78	6,07	4,37	3,85	4,59	
Ho	0,90	0,77	1,09	1,17	1,05	1,33	0,96	0,85	1,01	
Er	2,33	2,03	2,68	2,93	2,70	3,34	2,53	2,21	2,66	
Tm	0,37	0,31	0,40	0,47	0,43	0,55	0,43	0,39	0,46	
Yb	1,95	1,76	2,33	2,71	2,49	2,98	2,33	2,22	2,67	2,60
Lu	0,37	0,33	0,40	0,44	0,37	0,50	0,44	0,39	0,47	0,42
Hf	2,74	2,03	3,73	4,53	3,27	5,10	5,83	5,61	6,09	5,70
Ta	0,43	0,34	0,75	0,97	0,77	1,06	1,11	1,05	1,23	
W	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,9	
Pb	2,4	2,1	3,9	5,2	4,5	5,9	6,5	5,0	9,0	
Bi	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Th	3,1	2,1	3,8	5,5	5,0	6,0	10,9	10,1	12,4	13,0
U	1,4	1,1	1,7	1,7	1,6	1,8	2,0	1,9	2,4	
Na ₂ O+K ₂ O	4,69	4,12	5,10	5,70	5,51	5,84	7,69	6,29	7,93	7,74
Na ₂ O/K ₂ O	2,68	2,31	5,20	1,99	1,87	2,84	1,13	1,08	1,83	0,68
Сумма REE	117,43	95,18	135,42	135,33	125,25	144,68	123,86	99,58	130,93	
LREE	102,73	80,93	116,91	116,43	106,91	124,95	107,95	83,98	113,76	
HREE	15,01	12,53	17,04	19,04	17,43	20,92	15,23	14,25	16,18	
(La/Yb) _n	7,66	6,85	8,24	6,89	6,66	7,33	7,25	5,39	9,52	3,31
(Gd/Yb) _n	1,75	1,57	1,88	1,72	1,60	1,83	1,50	1,15	1,61	
(La/Sm) _n	2,82	2,62	3,63	2,65	2,44	2,80	3,76	2,72	4,41	
Eu/Eu*	0,93	0,86	1,12	0,78	0,76	0,82	0,81	0,67	0,84	

характерна положительная корреляция с кремнекислотой для суммы щелочей и отрицательные корреляции с Fe₂O₃, MgO, CaO, Al₂O₃. Характерной чертой пород Дашкесана является также нетипично низкое содержание V, Cr, Co, Ni, Zn в габброидах и, наоборот, повышенное относительно кларка содержание Ba, Pb, Rb, Sr, K, Nb, Mo, Sn, Th, U, Ce, тогда как для гранитоидов второй фазы, наблюдается обратная картина. Также для габброидов наблюдается высокое содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в среднем 115 г/т,

для гранитоидов 120 г/т. Распределение (РЗЭ) в габброидах от умеренно до сильнодифференцированного (La/Yb)_n в среднем 7,70, а для пород второй фазы 7,4.

Обсуждение результатов

Согласно геологическим данным, массив Дашкесан является доскладчатым образованием, формирование которого непосредственно связано с субдукционными процессами. Распределение РЗЭ и мультиэлементные спектры

обнаруживают типичные для связанных с субдукцией магматических пород отрицательные Ta-Nb- и Ti-аномалии и обогащение субдукционными компонентами (Ba, Th, Sr, Pb, Nb) [9].

Таблица 2. Параметры миксинг теста (mixing test) [14]
Table 2. Mixing test parameters [14]

Порода	Образец	R	X
габброиды	обр. 19	0,97	0,66
	обр. 21	0,96	0,75
	обр. 23	0,97	0,66
	обр. 25	0,98	0,71
	обр. 6	0,93	0,75
	обр. 44	0,99	0,78
	обр. 45	0,95	0,69
	обр. 46	0,97	0,78
	обр. 46а	0,97	0,81
	обр. 46б	0,97	0,83
	обр. 48	0,97	0,97
диориты	обр. 13	0,91	0,74
	обр. 30	0,94	0,47
	обр. 20	0,93	0,38
	обр. 24	0,97	0,53
	обр. 28	0,96	0,62
	обр. 9	0,95	0,59
	обр. 10	0,95	0,62
	обр. 12	0,95	0,60
гранитоиды	обр. 26	0,93	0,26
	обр. 31	0,94	0,47
	обр. 34	0,94	0,08
	обр. 35	0,94	0,11
	обр. 37	0,94	0,25
	обр. 39	0,92	0,16
	обр. 40	0,93	0,38
	обр. 4	0,76	0,02
	обр. 8	-0,66	-0,02
	32	0,88	0,09
дайки	обр. 2	0,95	0,85
	обр. 38	0,96	0,95
	обр. 41	0,96	1,08
	обр. 29	0,89	0,24
	обр. 3	0,75	0,04

R — коэффициент корреляции; X — угол наклона кривой и доля базальтовой магмы

Основываясь на минералогическом исследовании, можно сделать вывод, что в процессе становления массива, помимо кристаллической дифференциации, имело место магматическое смешивание [12, 13, 15, 16, 17, 18]. Этот вывод, помимо геологических наблюдений, основывается также на следующих фактах.

1. Разнообразие минеральных ассоциаций как породообразующих, так и аксессуарных минералов — наблюдаемая вариация текстур и структур гипидиоморфнозернистой до такситовой, наличие многочисленных шлиров и кучевых скоплений темноцветных минералов.

2. Присутствие включений калиевого полевого шпата в габброидах.

3. Обрастание плагиоклаза ортоклазом, кварцем, пироксеном, амфиболом, пойкилитовые структуры темноцветных минералов.

4. В пироксене и амфиболе встречаются включения плагиоклаза.

5. Широкие фациальные переходы в пределах одних фаз.

6. Включения ксенолитов предыдущих фаз по всему массиву

Дополнительно проведен миксинг-тест, предложенный Fourcade, Allègre [14].

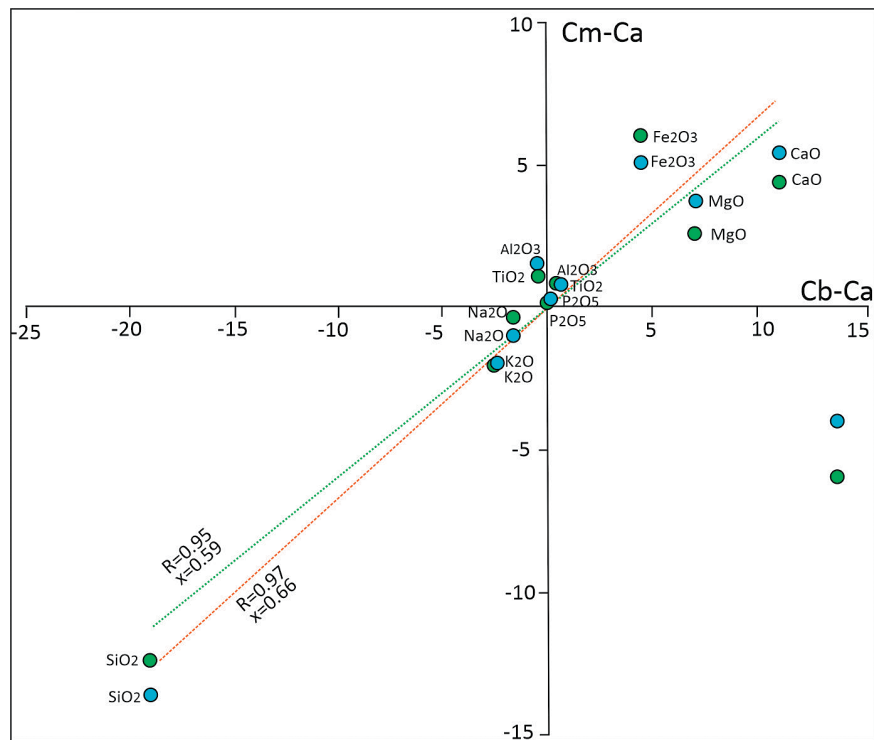
Если **A** — кислая, а **B** — основная магмы, то содержание **C** каждого элемента **i** в любом смешанном расплаве **M** должно соответствовать уравнению:

$$C_i^M = x \cdot C_i^A + (1 - x) \cdot C_i^B \quad (1)$$

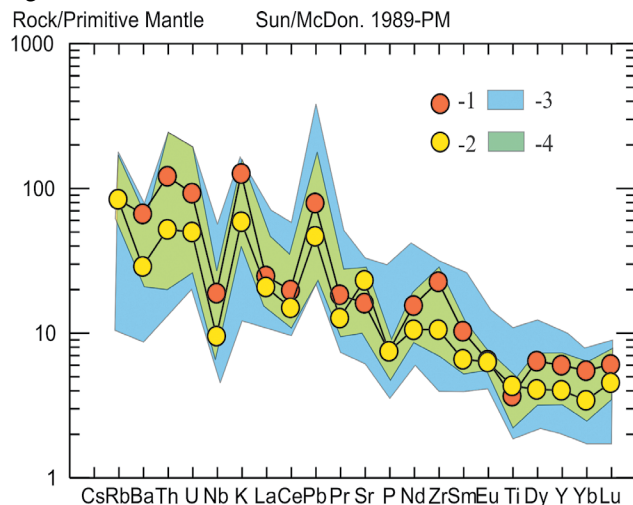
или $C_i^{M-} - C_i^A = x \cdot (C_i^{B-} - C_i^A),$

где **x** ($0 < x < 1$) — это доля основной мамы в смешанном расплаве **M**. Для получения гибридной магмы необходимо смешать два крайних ее члена, соответствующих наименее и наиболее дифференцированным разностям. Результатом решения уравнения является прямая в координатах **C^B–C^A**, **C^M–C^B**, где наклон кривой определяет долю основной магмы при формировании как конечно-го, так и всех промежуточных составов гибридных пород. Полученные положительные корреляции отражают высокую вероятность модели смешения. Как видно из результатов моделирования (табл. 2), габброиды Дашкесана могли формироваться в результате смешения 65—95% (75% в среднем) основной магмы и 5—35% гранитной магмы; при формирования кварцевых диоритов и грандиоритов доля базальтовой составляла 40—70% (60% в среднем), а гранитоидов — около 15%. На (рис. 3а) для примера показана модель смешения для двух образцов: габбродиорита

a



б



в

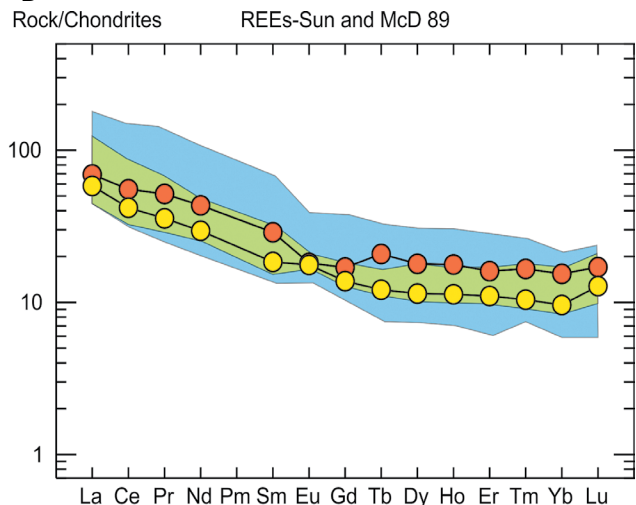


Рис. 3. Математический расчет для миксинг теста [14]. а — для петрогенных элементов диорит (1) обр. 9 и габбродиорита (2) обр. 19 с линейными трендами. При расчете использовались значения $Ca =$ обр. 33, $Cb =$ обр. 47; x — объемное содержание мафического компонента, R — коэффициент корреляции; б, в — распределение редкоземельных и микроэлементов для магматических пород габбро-гранитового комплекса, нормированные на: б — хондрит [Sun, McDonough, 1989], в — примитивную мантию [Sun, McDonough, 1989].

1 — наблюдаемые содержания в граните (обр. 39); 2 — модельные содержания в граните (обр. 39); 3 — реальные составы пород; 4 — модельные составы пород

Fig. 3. Calculation for mixing test [14]. а — for petrogenic elements, diorite (1) sample 9 and gabbrodiiorite (2) sample 19 with linear trends. The calculations used the values of $Ca =$ sample. 33, $Cb =$ sample. 47; x is the content of the mafic component, R is the correlation coefficient; б, в — distribution of rare earth and trace elements for igneous rocks of the gabbro-granite complex, normalized to: б — chondrite [Sun, McDonough, 1989], в — primitive mantle [Sun, McDonough, 1989].

1 — observed contents in granite (sample 39); 2 — model contents in granite (sample 39); 3 — rock compositions; 4 — model compositions

и диорита. Хорошая линейная корреляция ($R = 0,95-0,97$) указывает на справедливость модели.

В дополнение к этому проведено сравнение реально наблюдаемых содержаний редкоземельных и микроэлементов с вычисленными содержаниями элементов в гибридной породе. В целом отмечается хорошее совпадение реальных и модельных распределений. Тем не менее совпадения не идеальны, наиболее сильны различия в содержаниях Th, U, Pb, Sr, Ba, Nb, Ta, Zr. Неполное совпадение содержаний микро- и редкоземельных элементов в первую очередь объясняется тем, что процесс смешения сопровождался коровой контаминацией, магматическим и субдукционным обогащением [9].

Модель образования пород Дашкесанского комплекса (рис. 4) заключается в выплавлении родоначальных расплавов из обогащенных пород мантийного клина при активном участии субдукционных флюидов, которые образуются в результате плавления осадков плиты. Наблюдаемое мантийное обогащение возможно за счет неоднородности субстрата и мантийного метасоматоза. По мере продвижения расплавов кислая и основная магмы смешиваются в промежуточных камерах или же кислая магма во второй фазе внедрения прорывает уже существующие габброиды. Обычно температуры кислой магмы недостаточно для плавления основных пород, однако взаимодействие с флюидной составляющей приводит к возрастанию

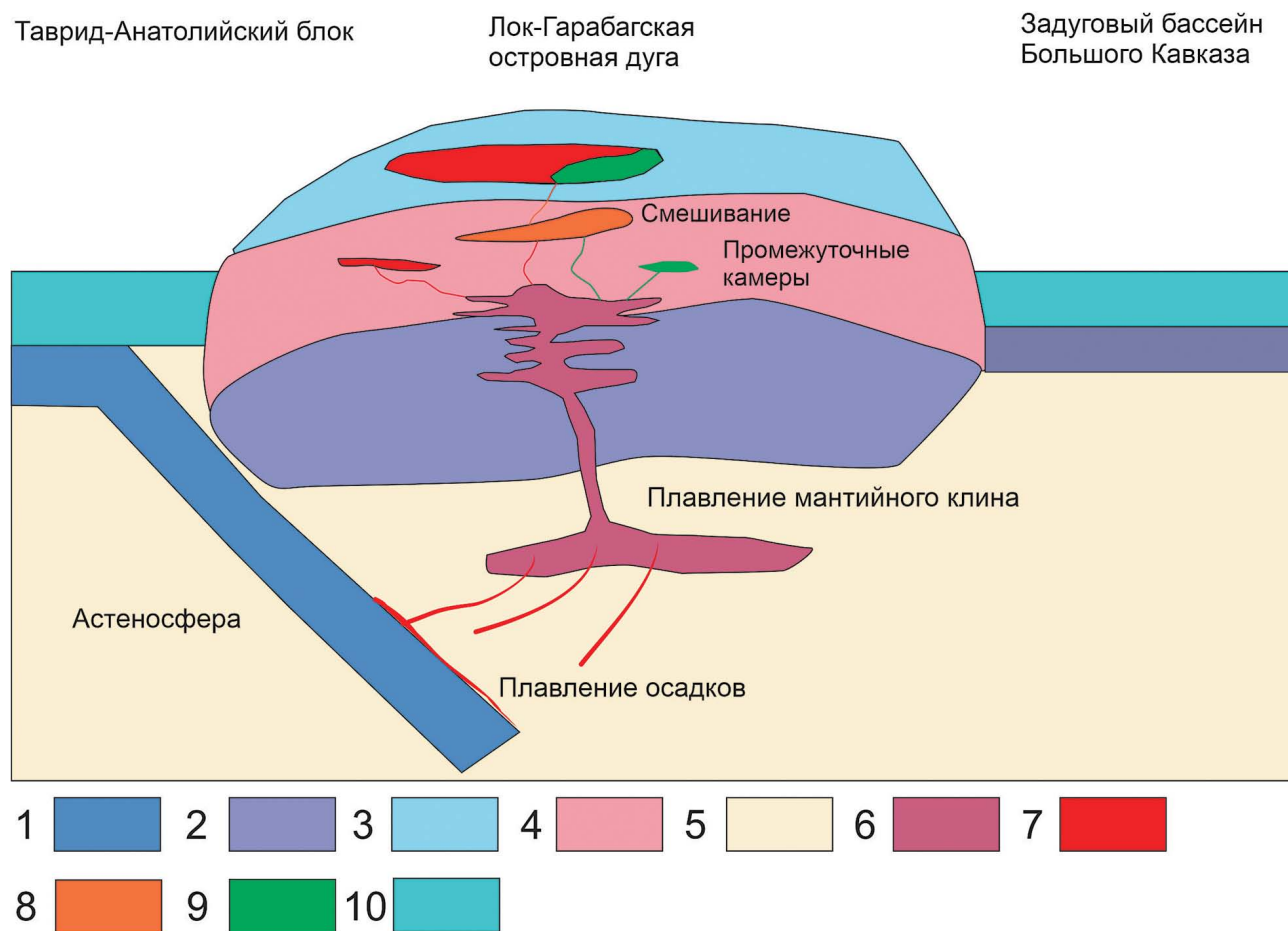


Рис. 4. Модель формирования массива Дашкесан

1 — океаническая плита; 2 — океаническая кора задугового бассейна; 3 — мезозойские вулканиты; 4 — континентальная кора; 5 — астеносфера; 6 — плавление мантийного клина; 7 — гранитоиды; 8 — промежуточные магматические камеры смешивания; 9 — габброиды; 10 — океан

Fig. 4. The model of the formation of the Dashkesan intrusion

1 — oceanic plate; 2 — oceanic crust of the back-arc basin; 3 — Mesozoic volcanic rocks; 4 — continental crust; 5 — asthenosphere; 6 — melting of the mantle wedge; 7 — granite; 8 — transitional magmatic mixing chambers; 9 — gabbro; 10 — ocean

физико-химической активности, что приводит к возможности частичного переплавления габброидных пород по периметру, их захвату и дальнейшей переработке.

Заключение

Геохимические особенности пород Дашкесана — наличие положительной и отрицательной европиевой аномалии, аномально высокое содержание редкоземельных элементов в породах первой фазы, повышенное содержание литофильных и высокозарядных элементов Nb, Rb, Ba, Sr, Pb, U, Th, K, Zr, Hf в габброидах, низкие содержания типич-

ных для кислых дифференциатов микроэлементов и суммы редкоземельных элементов, — скорее всего, обусловлены процессами смешения расплавов (миксинг/миглинг) и коровой контаминации. На основе математического расчета миксинг-теста формирование переходных фаций возможно за счет смешения ~ 60% основной магмы и 40% кислой магмы. Модель формирования комплекса заключается в первичном плавлении обогащенного мантийного клина и дальнейшем перемещении в магматических камерах, а также коровой контаминацией, ассимиляцией и субдукционным обогащением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Р.Н., Мустафаев Г.В., Мустафаев М.А. и др. Мезозойские магматические формации Малого Кавказа и связанное с ними эндогенное оруденение / под ред. Э.Ш. Шихалибейли. Баку: Элм, 1988. 160 с.
2. Исмаил-заде А.Д. Петрологическая интерпретация процесса гибридизма в мезозойских гранитоидных интрузивах Малого Кавказа // Изв. НАНА. Сер. Науки о Земле. 2006. № 2. С. 9—19.
3. Кашкай М.А. Петрология и металлогения Дашкесана и других железорудных месторождений Азербайджана. М., 1965. 888 с.
4. Марфунин А.С. Материалы к петрографии Дашкесанского массива и его контактового поля // Труды ИГН АН СССР. Вып. 165. Сер. петрограф. 1955. № 147. С. 113—142.
5. Мустафаев Г.В. Мезозойские гранитоиды Азербайджана и особенности их металлогении. Баку: Элм, 1977. 234 с.
6. Мустафаев Г.В. О гибридизме магм мезозойских интрузивов Малого Кавказа и фемическом профиле эндогенного оруденения // Магматизм, формации кристаллических пород и глубины земли. М.: Наука, 1974. С. 25—27.
7. Нагиев В.Н. Рудные месторождения Азербайджанской Республики: монография / науч. ред. С.А. Бекташи; ред. Ю.Д. Заманов. Баку: Элм, 2007. 596 с.
8. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
9. Садыхов Э.А. Мезозойские плутонические комплексы Лок-Гарабахской зоны Малого Кавказа: геохимическая характеристика, возраст и магматические источники. Диссертация, 2019. С.189
10. Садыхов Э.А. Геохимия, U-Pb датирование и геодинамические условия формирования габбро-гранитового комплекса Лок-Гарабахской тектономагматической зоны (Дашкесанский интрузив) // Мат-лы конференции «Граниты и эволюция Земли: мантия и кора в гранитообразовании». Екатеринбург, 2017. С. 264—266.
11. Шипулин Ф.К. Интрузии и рудообразование (на примере Дашкесана). Л.: Наука, 1968. 216 с.
12. Baxter S., Feely M. Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. No. 1. P. 63—74.
13. Enclaves and granite petrology / J. Didier & B. Barbarin. Elsevier, 1991. 601 p.
14. Fourcade S., Allegre C.J. Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrénées, France) // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. Vol. 76. No. 2. P. 177—195
15. Frost T.P., Mahood G.A. Field, chemical and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorite, Sierra Nevada, California // Geological Society of America Bulletin. 1987. Vol. 99. P. 272—291.
16. Hibbard M.J. The magma mixing origin of mantled feldspars // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. Vol. 76. P. 158—170.
17. Hibbard M.J. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems / J. Didier, B. Barbarin (eds.) // Enclaves and granite petrology. Amsterdam: Elsevier, 1991. Vol. 13. P. 431—444.
18. Wilcox R.E. The idea of magma mixing: history of a struggle for acceptance // J. Geol. 1999. Vol. 107. P. 421—432.

REFERENCES

1. Abdullaev R.N., Mustafaev G.V., Mustafaev M.A., et al. Mesozoic igneous formations of the Lesser Caucasus and associated endogenous mineralization / ed. E.Sh. Shikhalibeyli. Baku: Elm, 1988. 160 p.
2. Ismail-zade A.D. Petrological interpretation of the process of hybridism in Mesozoic granitoid intrusions of the Lesser Caucasus // ANAS Transactions, Earth Sciences. 2006. No. 2. P. 9—19.

3. Kashkai M.A. Petrology and metallogeny of Dashkesan and other iron ore deposits of Azerbaijan. Moscow, 1965. 888 p.
4. Marfunin A.S. Materials for the petrography of the Dashkesan massif and its contact field // Proceedings of the Geological Institute of USSR. Vol. 165. Petrography section 1955. No. 147. P. 113—142.
5. Mustafaev G.V. Mesozoic granitoids of Azerbaijan and features of their metallogeny. Baku: Elm, 1977. 234 p.
6. Mustafaev G.V. On the hybridism of magmas of the Mesozoic intrusions of the Lesser Caucasus and the femic profile of endogenous mineralization // Magmatism, formations of crystalline rocks and the depths of the earth. Moscow: Nauka, 1974. P. 25—27.
7. Nagiev V.N. Ore deposits of the Azerbaijan Republic: monograph / scientific. ed. S.A. Bektashi; ed. Yu.D. Zamanov. Baku: Elm, 2007. 596 p.
8. Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. 200 p.
9. Sadikhov E.A. Geochemistry, U-Pb dating and geodynamic conditions for the formation of the gabbro-granite complex of the Lok-Garabakh tectonomagmatic zone (Dashkesan intrusion) // Materials of the conference “Granites and the evolution of the Earth: mantle and crust in granite formation”. Ekaterinburg, 2017. P. 264—266.
10. Sadikhov E.A. Mesozoic plutonic complexes of the Lok-Garabag zone of the Lesser Caucasus: geochemical characteristics, age and magmatic sources. PhD thesis, 2019. P.189
11. Shipulin F.K. Intrusions and ore formation (using the example of Dashkesan). Leningrad: Nauka, 1968. 216 p.
12. Baxter S., Feely M. Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland // Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 76. No. 1. P. 63—74.
13. Enclaves and granite petrology / J. Didier & B. Barbarin. Elsevier, 1991. 601 p.
14. Fourcade S., Allegre C.J. Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrénées, France) // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. Vol. 76. No. 2. P. 177—195
15. Frost T.P., Mahood G.A. Field, chemical and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorite, Sierra Nevada, California // Geological Society of America Bulletin. 1987. Vol. 99. P. 272—291.
16. Hibbard M.J. The magma mixing origin of mantled feldspars // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. Vol. 76. P. 158—170.
17. Hibbard M.J. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems / J. Didier, B. Barbarin (eds.) // Enclaves and granite petrology. Amsterdam: Elsevier, 1991. Vol. 13. P. 431—444.
18. Wilcox R.E. The idea of magma mixing: history of a struggle for acceptance // J. Geol. 1999. Vol. 107. P. 421—432.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Садыхов Э.А. — разработал концепцию статьи, провел структуризацию материала, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Десяткин А.С. — внес вклад в написании текста статьи, утвердил концепцию.

Велиев А.А. — предоставил геологические данные, внес вклад в концепцию статьи.

Хмарин Э.К. — внес вклад в обработку материалов и графическое оформление.

Emin A. Sadikhov — developed the concept of the article, structured the data, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Alexey S. Desyatkin — contributed to writing the text of the article, approved the concept.

Anar A. Veliev — provided geological data, contributed to the concept of the article.

Eduard K. Khmarin — contributed to data processing and graphic design.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Садыхов Эмин Али оглы* — ведущий геолог АО «Зарубежгеология».

69, корп. Б, ул. Новочеремушкинская, Москва 117418, Россия

тел.: +7 (906) 228-50-75

e-mail: sadikhov.emin@gmail.com

SPIN-код: 9142-6084

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4699-1546>

Emin A. Sadikhov* — lead geologist of JSC “Zarubezhgeologiya”.

69, Novocheremushkinskaya str, Moscow 117418, Russia

tel.: +7 (906) 228-50-75

e-mail: sadikhov.emin@gmail.com

SPIN-code: 9142-6084

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4699-1546>

Десяткин Алексей Сергеевич — генеральный директор АО «Зарубежгеология».

69, корп. Б, ул. Новочеремушкинская, Москва 117418, Россия

тел.: +7 (965) 224-56-43

e-mail: asdesyatkin@rusgeology.ru

Велиев Анар Алескер оглы — PhD, менеджер по геологии и разработке AIMC (Azerbaijan International Mining Company Limited).

2, ул. Измир, Башня Хаят 2, Баку AZ1065, Азербайджан

тел.: +994 (50) 235-78-79

e-mail: anar.veliyev@aimc.az

Хмарин Эдуард Константинович — менеджер по геологии и разработке ООО «ЗН Геотерм» (АО «Зарубежнефть»).

9, строение 1, помещение 35/110/1, Армянский пер., Москва 101000, Россия

тел.: +7 (914) 094-92-43

e-mail: e.khmarin@gmail.com

Alexey S. Desyatkin — General Director of JSC “Zarubezhgeologiya”.

69, Novocheremushkinskaya str., Moscow 117418, Russia

tel.: +7 (965) 224-56-43

e-mail: asdesyatkin@rusgeology.ru

Anar A. Veliev — PhD, exploration and project manager AIMC (Azerbaijan International Mining Company Limited).

2, Izmir str., Hayat 2, Baku AZ1065, Azerbaijan

tel.: +994 (50) 235-78-79

e-mail: anar.veliyev@aimc.az

Eduard K. Khmarin — exploration and project manager “ZN Geotherm” LLC (Zarubezhneft JSC).

9, building 1, room 35/110/1, Armenian lane, Moscow 101000, Russia

tel.: +7 (914) 094-92-43

e-mail: e.khmarin@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author