

Вещественные особенности, петрофизические свойства и геодинамические условия формирования гранитоидов Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ)

©2021 В. М. Ненахов[✉], А. В. Жабин, В. И. Жаворонкин, В. В. Ильин, Л. С. Чеботарёва

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: В публикации приведены результаты комплексных исследований минерального, химического составов, геохимии и петрофизических особенностей гранитоидов Даховского кристаллического массива (ДКМ).

Методика: Аналитические исследования вещественного состава включали изготовление и описание шлифов, рентгенофлуоресцентный и рентгеноструктурный анализы. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа пересчитывались на нормативные составы с помощью программы Petro Explorer V.3.2.0.2. Для характеристики минералов аксессуаров были изучены тяжёлые концентраты из протолок главных типов пород. Геофизические характеристики гранитоидов определялись по отобраным образцам и в обнажениях. Они включали плотность, магнитную восприимчивость, скорость прохождения продольных волн, удельное электрическое сопротивление.

Результаты и обсуждения: Результаты флуоресцентного анализа позволили выявить широкий спектр гранитоидов в зависимости от фаз внедрения. Породы первой фазы варьируют от диоритов и кварцевых монодиоритов до гранодиоритов и граносиенитов. Породы второй фазы отвечают по составу гранитам и лейкогранитам умеренной щёлочности. Рентгеноструктурный анализ показал наличие в гранитоидах тридимита, что позволило скорректировать расчётную температуру плавления первичного расплава. Кроме этого, установлены две разновидности хлорита и широкий спектр соединений металлов. Температуры плавления свыше 1000° характерны для диоритов, а менее 1000° – для гранодиоритов первой фазы внедрения. Расчётная температура для гранитов второй фазы колеблется от 765° до 895°.

Выводы: Результаты исследований, в том числе вариативность от диопсид- до корундонормативности, а также спектр аксессуаров из гранитоидов обеих фаз, таких как ортит и магнетит свидетельствуют о подкоровом происхождении родоначальных расплавов с частичным влиянием корового субстрата, ответственного за формирование гранитоидов ДКМ. Определены петрофизические характеристики гранитоидов различных типов, изучены их взаимосвязи и связи с вещественными характеристиками, в частности, с содержанием различных оксидов. Полученные петрофизические характеристики, в совокупности с другими вещественными данными, можно рассматривать как эталонные при производстве региональных исследований и обобщении материала по магматизму Северного Кавказа.

Ключевые слова: Западный Кавказ, Даховский кристаллический массив, гранитоиды, петрохимия, петрофизика.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Ненахов Виктор Миронович, e-mail: viktor.nenahov@mail.ru

Для цитирования: Ненахов В. М., Жабин А. В., Жаворонкин В. И., Ильин В. В., Чеботарёва Л. С. Вещественные особенности, петрофизические свойства и геодинамические условия формирования гранитоидов Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 2. С. 4–21.
DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3484>

Введение

Несмотря на длительную историю изучения и относительно большое количество публикаций, посвящённых гранитоидам Даховского кристаллического массива (ДКМ) [1–4], многие проблемы их классификации, происхождения и времени становления остаются дискуссионными. В частности, существуют представления о его полихронности, при этом диориты выделяются в самостоятельный среднепалеозойский комплекс, а граниты и гранодиориты в позднепалеозойский малкинский [3]. В то же время, ряд авторов [5] считает не правомочным относить граниты массива к малкинскому комплексу, так как они существенно отличаются от петротипа по ряду вещественных особенностей. В любом случае, необходима всесторонняя характеристика массива, опирающаяся на максимально объективную информацию о веществе и свойствах этого эталонного объекта. Предлагаемая работа призвана, в какой-то мере, устранить указанные пробелы.

Методика исследований

Аналитические исследования вещественного состава включали изготовление и описание шлифов (40 штук), рентгенофлуоресцентный (по 30 пробам) и рентгеноструктурный (по 10 пробам) анализы. Для этого из каждой пробы отбирался образец, характеризующий её в наибольшей степени. Материал образца, оставшийся после изготовления шлифа, дробился и истирался до размеров частиц менее 0.01 мм. Из приготовленного таким образом порошка изготавливались препараты для рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного анализов. Первый из них проводился на приборе 3 TIGER, в центре коллективного пользования научным оборудованием ВГУ, аналитик Е. Х. Кориш. Второй – во ВНИГНИ г. Москва, на дифрактометре ARLX'TRA с использованием базы данных ICDD PDF-2, насчитывающей более 350 тысяч видов кристаллических соединений. Аналитик А. А. Дубков. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа пересчитывались на нормативные составы с помощью программы Petro Explorer V.3.2.0.2 (Eugeny Korinevskiy). Для характеристики минералов акцессориев были изучены тяжёлые концентраты из протолочек главных типов пород, с привлечением результатов ранее проведённых исследований.

С целью изучения физических свойств гранитоидов, слагающих Даховский кристаллический массив, из обнажений вдоль р. Белая и впадающих в неё притоков было отобрано свыше 120 максимально свежих образцов, и проведены массовые каппаметрические

измерения (свыше 150) непосредственно на обнажениях. Определение физических характеристик собранной коллекции выполнено в петрофизической лаборатории кафедры геофизики Воронежского государственного университета. В ходе работы были изучены плотность, магнитная восприимчивость, скорость прохождения продольных волн и удельное электрическое сопротивление гранитоидов [6, 7, 8]. Плотность образцов изучалась методом гидростатического взвешивания с использованием высокоточных весов «HIGHLAND» HCB – 1502. Магнитная восприимчивость определена каппаметром КМ-7 (Чехия). Им же выполнены полевые каппаметрические наблюдения на обнажениях. Измерение скорости продольных волн проводилось ультразвуковым дефектоскопом УК 10ПМС. Для определения удельного электрического сопротивления в петрофизической лаборатории кафедры геофизики используется комплекс на базе измерителя иммитанса Е7-20.

Геологическое строение ДКМ

Гранитоиды Даховского интрузива (рис. 1) слагают основную часть одноимённого кристаллического массива (ДКМ). На него приходится около 85% всей площади ДКМ, который представляет собой грубый прямоугольник максимально вытянутый в СЗ – ЮВ направлении (около 9 км).

В поперечном направлении (СВ–ЮЗ) его размеры около 4 км. Общая площадь составляет примерно 35 км². Северо-западная часть массива трансгрессивно перекрывается терригенными отложениями верхней юры, юго-западная и фрагмент юго-восточной осложнены интенсивными разрывными дислокациями. С северо-восточной стороны блок ограничен долгоживущим глубинным разломом сложной кинематики, заложение которого произошло в домезозойское время. В этой части в максимально представительном виде обнажаются вмещающие метаморфизованные породы рамы, которые вместе с гранитоидами образуют ДКМ. Для части протолита метаморфического комплекса установлен среднепалеозойский возраст [9]. Внутреннее строение глубинного разлома детально описано в работе [10].

Массив относится к группе «северных» интрузий, образующих разрозненные выходы среди мезозойских отложений. Они разделяются на три группы: 1) – даховская (Даховский, Саарайский массивы и гранитоиды, вскрытые скважинами северо-западнее); 2) – малкинская (Кубано-Малкинский и Кисловодско-Фроловский интрузивы) и 3) – невинномысская (интрузивные тела, вскрытые скважинами в районе г. Невинномысска) [11]. На Государственной геологической карте масштаба 1:200 000 изданной в 2004 году [12] гранитоиды Даховского массива расчленены на две фазы и отнесены к малкинскому позднепалеозойскому комплексу.

В раме гранитоидов распространены метаморфические породы балканского комплекса, представленные амфиболитами, метапесчаниками, мусковит-биотитовыми гнейсами. Вдоль северной границы

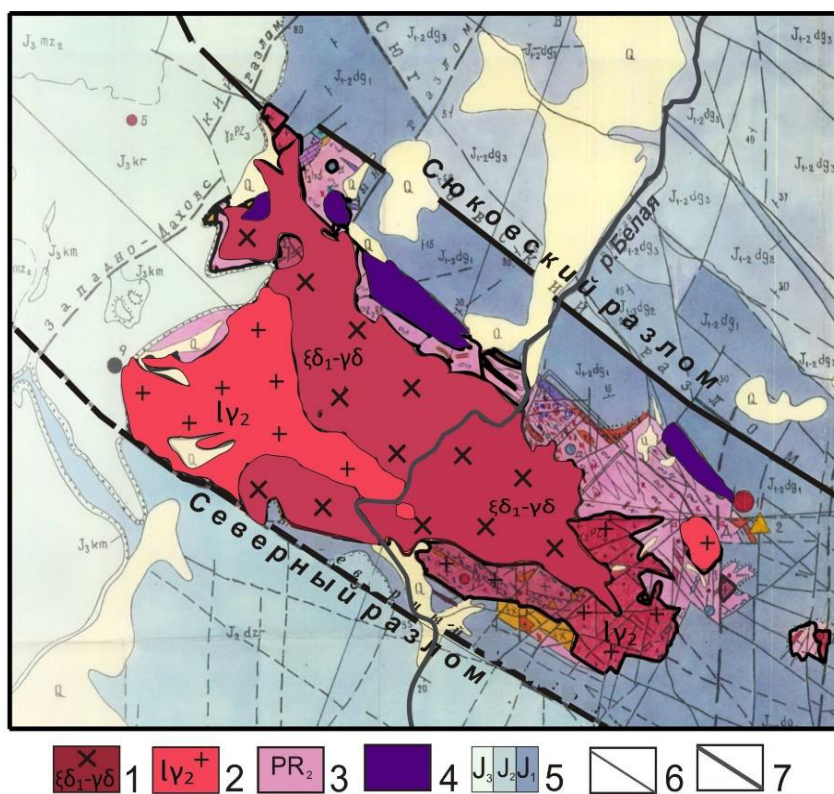


Рис. 1. Схематическая геологическая карта ДКМ. Условные обозначения: 1 – гранитоиды первой фазы; 2 – гранитоиды второй фазы; 3 – породы метаморфического комплекса; 4 – серпентиниты; 5 – юрские отложения; 6 – разрывные нарушения нижних порядков; 7 – региональные разрывные нарушения.

[Fig. 1. Schematic geological map of the Dakhovsky crystalline mass (DCM). Legend: (1) – granitoids of the first phase; (2) – granitoids of the second phase; (3) – rocks of the metamorphic complex; (4) – serpentinites; (5) – Jurassic sediments; (6) – disjunctive dislocations of the lower orders; (7) – regional disjunctive dislocations.]

развиты серпентинитовые тела, в разной степени меланжированные. Меланж разноэтапный, полимиктовый, на отдельных участках несёт следы термального воздействия гранитоидов [10, 13].

Отмечаются сложные взаимоотношения даек гранитоидов как первой, так и второй фаз внедрения и серпентинитов [10]. Дайки прорывают серпентиниты с интенсивным ороговикованием последних и в то же время сами «растаскиваются» вплоть до образования тектонических блоков – обдавленной. Такое взаимоотношение подчёркивает длительность и многоэтапность формирования тектонической зоны северного обрамления ДКМ.

Гранитоиды первой фазы серого или розовато-серого цветов, от массивной до директивной текстуры, слагают центральную часть интрузии, образуя крупное, вытянутое в северо-западном направлении тело, на долю которого приходится около 60% площади выхода интрузии.

Гранитоиды второй фазы, в основном слагают юго-восточную и западную части интрузива. Их более мелкие тела отмечаются в северной и северо-восточной его частях, где прорывают метаморфиты балканского комплекса, а так же внутри поля распространения гранитоидов первой фазы. На контакте с диоритами и гранодиоритами отмечаются многочисленные, прорывающие их дайки и жилы гранитов и лейкогранитов, характеризующихся розовым до красного цветом. На долю пород второй фазы приходится около 40% площади интрузивного массива.

Петрография

Гранитоиды первой фазы представлены гранодиоритами, монцодиоритами, кварцевыми диоритами, монцонитами, образующими между собой постепенные переходы и отличающимися лишь количественными соотношениями породообразующих минералов.

Гранодиориты светло-серого цвета, полнокристаллические, среднезернистые, массивные, однородные, плотные (рис. 2а). Микроструктура гипидиоморфнозернистая. Главные минералы – плагиоклаз (40%), кварц (30%), биотит (15%), микроклин (5%), второстепенные – роговая обманка (5%); вторичные – хлорит (5%).

Плагиоклаз идиоморфен, встречается в виде хорошо выраженных призм и табличек, часто образует простые и полисинтетические двойники. В первых проявлена прямая зональность (ядра №35–40, периферия №25–31). Во вторых доминирует олигоклаз (№20–25). В проходящем свете имеют грязно-серую окраску, что указывает на присутствие вторичного соссюрита. Реже встречаются чистые зёрна плагиоклазов. Преобладающий размер зёрен 4.5–5 мм. Зёрна кварца ксеноморфны, с неправильными очертаниями и волнистым погасанием. В проходящем свете прозрачны, но наблюдаются и мутные из-за многочисленных газожидких включений. Преобладающий размер 2–3 мм. Кварц часто является заполнителем пространства между выделениями других минералов.

Биотит встречается в виде зеленоватых и зелено-бурых чешуек и пластинок. Микроклин исключи-

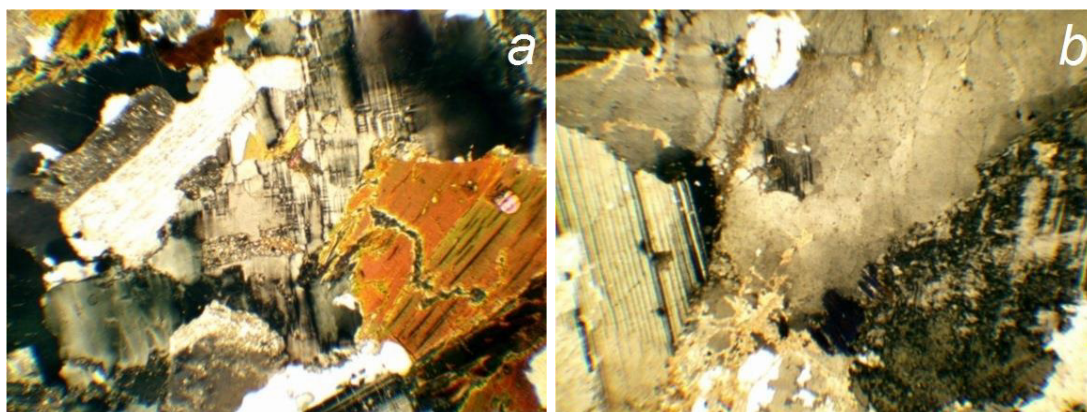


Рис. 2. Фотография шлифа монцодиорита, 1 фаза внедрения (а) и фотография шлифа гранита, 2 фаза внедрения (b).
[Fig. 2. A photograph of a monzodiorite microsection, first interstitial phase (a), a photograph of a granite microsection, second interstitial phase (b).]

тельно ксеноморфен с выраженной микроклиновой решёткой, пелитизирован, преобладающий размер 1–2 мм.

Роговая обманка в виде призматических зёрен (размером 3–4 мм), с косым погасанием (N_g 12–13°), в основном гипидиоморфна. Спайность совершенная под углом 56°. В проходящем свете плеохроирует в зеленоватых тонах. Соответствует обыкновенной роговой обманке.

Ксеноморфные включения хлорита формируют отдельные гнёзда, лепестки, чешуйки размером 1–2 мм. В проходящем свете плеохроирует в зеленоватых тонах, в скрещенных николях имеет аномальную тёмно-синюю до фиолетовой окраску.

Монцодиориты, кварцевые диориты, монцитониты. Породы светло-серые, полнокристаллические, среднезернистые, массивные, с элементами гнейсовидности, плотные, с гипидиоморфнозернистой микроструктурой. Главные минералы представлены плагиоклазом (30–40%), кварцем (до 15%), микроклином (от 5 до 30%), роговой обманкой (от 7 до 15%), второстепенные – мусковитом (до 3%), вторичные – хлоритом и сосюритом (в сумме до 10%).

Зёрна плагиоклазов гипидиоморфны с хорошо выраженными очертаниями зональных табличек и призм, с простым и полисинтетическим двойникованием. В проходящем свете имеют грязно-серую окраску за счёт сосюритизации. Преобладающие размеры 4–4.5 мм. Они в основном серицитизированы и сосюритизированы. Серицит мелкочешуйчатый, золотистого цвета. Сосюрит образует землистые массы, развивающиеся в виде пятен. Серицитизация преобладает над сосюритизацией. Зёрна плагиоклазов соседствуют друг с другом, иногда пространство между ними заполнено мелкими выделениями кварца, микроклина или роговой обманкой. Встречаются зёрна плагиоклазов с оторочкой, сформированной зёрнами этого минерала меньших размеров, с чётко выраженными полисинтетическими двойниками.

Кварц образует ксеноморфные, неправильных очертаний зёрна, с волнистым погасанием, размером 2–3 мм. В проходящем свете прозрачен, иногда, за счёт

минеральных включений, мутный. Часто выступает в качестве заполнителя пространств между выделениями других минералов.

Микроклин встречается в виде зёрен ксеноморфной формы, с ясно выраженной микроклиновой решёткой, с преобладающим размером 2–3 мм. В проходящем свете имеют мутную, буроватую окраску за счёт пелитизации.

Роговая обманка гипидиоморфна образует призматические, удлинённые, зональные кристаллы с ровными, иногда зубчатыми краями, размером 4–5 мм, в проходящем свете зелёные, ярко-зелёные, буровато-зелёные.

Мусковит ксеноморфен, встречается в виде табличек размером около 1 мм. В проходящем свете бесцветен, со слабо зеленоватым оттенком. Развивается по плагиоклазам как в виде отдельных чешуек, так и мелкоагрегатной массы.

Хлорит обычно замещает роговую обманку, образуя отдельные гнёзда, сгустки, чешуи преобладающих размеров 3–4 мм. В проходящем свете имеет зелёную окраску, при введённом анализаторе тёмно-синюю до фиолетовой.

В гранитоидах первой фазы в протолочках установлены циркон (от 100 до 300 г/т), апатит (от 200 до 300 г/т), магнетит (от 200 до 450 г/т), сфен (от 150 до 290 г/т), ортит (от 100 до 300 г/т), гранат (от 100 до 200 г/т) и пирит (от 90 до 150 г/т).

Граниты второй фазы светло-серые с розовым (разной степени интенсивности) оттенком, полнокристаллические, мелко-среднезернистые, массивные, плотные (рис. 2b). Наблюдаемая в шлифе микроструктура – гипидиоморфнозернистая, гранитовая. Минеральный состав представлен плагиоклазом (30–35%), микроклином (15–30%), кварцем (25–30%), мусковитом (3%), биотитом (2%). Присутствуют сосюрит и хлорит в качестве вторичных минералов в количестве до 5%.

Преобладающий размер гипидиоморфных, реже ксеноморфных зёрен плагиоклазов 2–3 мм. В зёрнах первого типа угадываются очертания табличек и призм, они составляют около 30%, на второй приходится около 70%. В основной массе они сосюритизированы и се-

рицитизированы. Серицит мелкочешуйчатый, образует часто агрегаты. Соссюрит сосредоточен, в основном, в центральной части зёрен.

Микроклин (зёрна 4–5 мм), в подавляющем большинстве (около 90%), ксеноморфный, с хорошо выраженной микроклиновой решёткой. Мутная, буроватая окраска зёрен этого минерала указывает на их интенсивную пелитизацию. Пространство между зёрнами плагиоклаза и микроклина заполнено тонким агрегатом этих минералов и кварцем.

Кварц имеет неправильные очертания и характеризуется волнистым погасанием. В проходящем свете его зёрна прозрачны, некоторые из них замутнены из-за наличия микровключений. Размер колеблется от долей мм до 5 мм, преобладают зёрна около 3 мм.

Мусковит образует ксеноморфные чешуйки, подавляющее их количество (около 95%) имеет размер около 1 мм. Развивается по плагиоклазам – как в виде крупных листочков, так и в виде мелкочешуйчатых агрегатов.

Биотит формирует чешуйки и пластинки преимущественно размером 1–2 мм, в проходящем свете плеохроирует в зеленовато-коричневых тонах, замещается хлоритом.

Хлорит развивается по биотиту, образуя отдельные гнёзда, лепестки, чешуйки в основном между зёрнами микроклина и плагиоклаза. В проходящем свете плеохроирует в зелёных тонах. В скрещенных николях окраска резко аномальная – тёмно-синяя, фиолетовая.

Спектр аксессуарных минералов, оценённых по представительной протолочке (20 кг), отобранной из центральной части массива, сложенной гранитами второй фазы, идентичен первой, отличаясь лишь количественно. Среди них определены циркон (405 г/т), апатит (260 г/т), магнетит (316 г/т), сфен (238 г/т), ортит (240 г/т), гранат (95 г/т), пирит (120 г/т).

По данным рентгеноструктурного анализа (РСА) в гранитоидах обеих фаз помимо кварца отмечается присутствие тридимита, иногда в существенных объёмах. Максимальное его количество характерно для диоритов первой фазы (проба 44/17), где достигает 27.6%, при содержании кварца 11.8%. Тридимит характерен и для гранитов второй фазы (до 7.2% при содержании кварца 23.3%). В целом, намечается прямая корреляция между количеством тридимита и расчётной температурой плавления.

Методом РСА в породах, претерпевших существенные вторичные преобразования, устанавливаются две разновидности хлорита (проба 97/17) с общим содержанием до 3.4%. Редко встречается санидин и содалит. Кроме породообразующих минералов, отмечается широкий спектр соединений металлов (табл. 1).

Табл 1. Результаты рентгеноструктурного анализа пробы 97-17
[Table 1 Results of the X-ray diffraction analysis of sample 97-17]

Фаза [Phase]	Содержания (%) [Weight (%)]	Погрешность [Accuracy]
Альбит [Albite]	39.1	1.06
Кварц [Quartz]	23.3	0.62
Микроклин [Microcline]	8	0.52
Тридимит [Tridymite]	7.2	1.96
Хлоритоид [Chloritoid]	2.5	0.34
Горнблендит [Hornblende]	2.5	0.49
Санидин [Sanidine]	2.4	0.47
Оксид титана [Titanium oxide]	1.8	0.28
Хлорит [Chlorite]	1.7	0.3
Хлорит. диокт. [Chlorite. dioct.]	1.7	0.57
Сидерит [Siderite]	1.4	0.14
Re ₃ O ₁₀ Оксид рения [Rhenium oxide]	0.9	0.11
Содалит [Sodalite]	0.6	0.16
Тридимит [Tridymite]	0.6	0.19
Биотит [Biotite]	0.5	0.34
Манганохромит [Manganochromite]	0.5	0.11
Миллерит [Millerite]	0.4	0.12
Сульфид Ni [Ni sulphide]	0.4	0.08
Триоксид Cr [Cr trioxide]	0.4	0.12
Re Si Силикат рения [Rhenium silicate]	0.4	0.03
Фтор. Магний [Fluoride. magnesium]	0.4	0.12
Фтор. Никель [Fluoride.nickel]	0.3	0.09
Диселенид Rh [Rh diselenide]	0.3	0.07
Халькопирит [Chalcopyrite]	0.3	0.06
Re ₂ PbO ₈	0.3	0.04
Иодит меди [Copper iodide]	0.3	0.05
ReSi ₂	0.2	0.04
Сульфид Co [Co sulphide]	0.2	0.1
Дисульфид Ru [[Ru disulphide]	0.2	0.07
Селенид Ni [Ni selenide]	0.2	0.06
Селенид Co [Co selenide]	0.2	0.07
Диарсенид Pd [Pd diarsenide]	0.2	0.07
Иодит меди [Copper iodide]	0.2	0.04
IrSb ₃ [IrSb ₃]	0.2	0.04
Алюминат Au [Au aluminate]	0.1	0.02

Петрохимия

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) породы первой фазы на классификационной диаграмме ($\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) варьируют в широком диапазоне от диоритов и кварцевых монцодиоритов до гранодиоритов и граносиенитов (табл. 2; рис. 3). Породы второй фазы отвечают по составу гранитам и лейкогранитам умеренной щёлочности. В целом породы обеих фаз формируют гомодромную ассоциацию, об-

разующую единый непрерывный ряд с равномерно распределёнными на диаграмме фигуративными точками, подчёркивающими эволюционный характер и генетическое родство расплавов.

На харкеровской диаграмме ($\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$) точка пересечения трендов щелочей и CaO (коэффициент Пикока), отвечает содержанию $\text{SiO}_2 = 57.5\%$, что позволяет отнести ассоциацию к известково-щелочной серии (рис. 4).

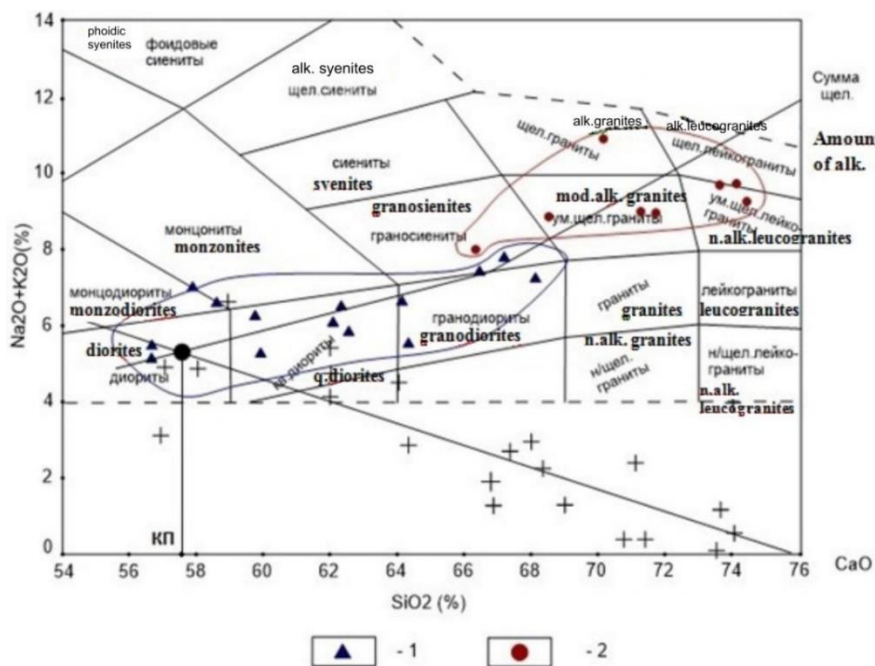


Рис. 3. Фигуративные точки составов гранитоидов ДКМ на классификационной диаграмме и вариации изменения трендов суммы щелочей и CaO. Условные обозначения: 1 – 1 фаза генерации (гранитоиды); 2 – 2 фаза генерации (лейкокраповые граниты).

[Fig. 3. Figurative points of the compositions of the DCM granitoids in the classification diagram and variations in the change in trends of the sum of alkalis and CaO. Legend: (1) – first generation phase (granitoids); (2) – second generation phase (leucocratic granites).]

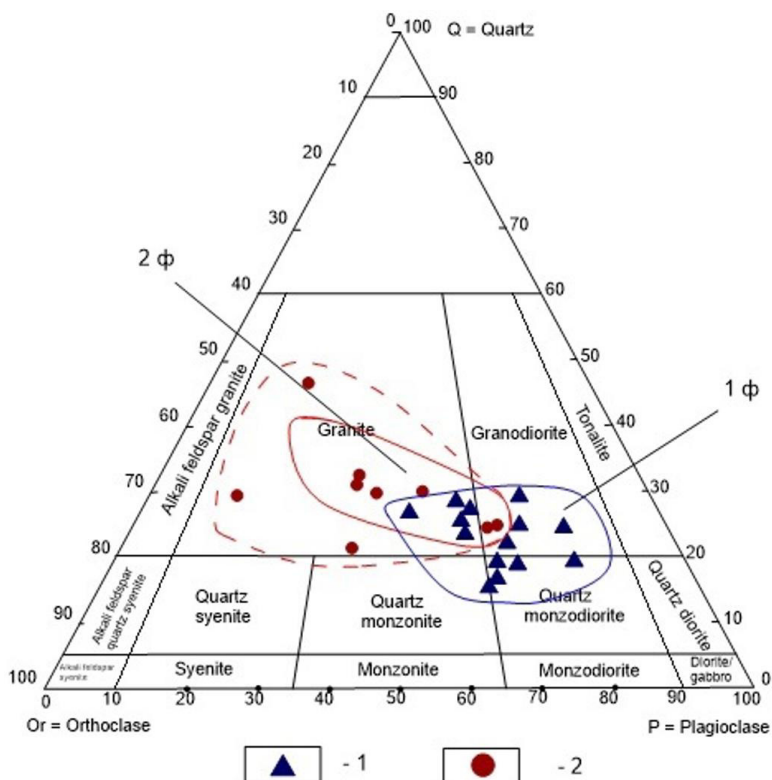


Рис. 4. Фигуративные точки нормативных составов на диаграмме А. Штреккайзена. Условные обозначения: 1 – 1 фаза генерации (гранитоиды); 2 – 2 фаза генерации (лейкокраповые граниты).

[Fig. 4. Figurative points of norms in the diagram by A. Streckeisen. Legend: (1) – first generation phase (granitoids); (2) – second generation phase (leucocratic granites).]

Табл. 2 Химический состав гранитоидов ДКМ
[Table 2. Chemical composition of Dakhovsky crystalline massif granitoids]

Имя [Name]	Физ. свойства [Phys. Properties]		Оксиды (%) [Oxides (%)]														Сумма		
	χ	σ (г/см ³)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ППП					
Гранитоиды 1-й фазы [Granitoids of phase 1]	№																		
	126/18	0.285	2.71	2.651	2.863	14.399	62.33	0.172	0.018	3.885	4.289	0.135	7.397	0.96	99.914				
	86/17	0.678	2.70	2.592	5.028	14.844	59.923	0.168	0.02	2.669	4.086	0.111	7.751	1.87	99.935				
	99	0.674	2.75	2.916	2.762	14.958	62.047	0.145	0.009	3.198	5.674	0.113	6.886	0.54	99.947				
	36/19	0.209	2.68	3.286	4.49	16.441	57.884	0.155	0.031	3.768	2.915	0.126	7.707	2.3	99.914				
	97/17	0.187	2.69	2.854	2.873	14.698	62.412	0.117	0.021	3.447	4.405	0.114	6.72	1.41	99.772				
	43/18	0.532	2.71	3.167	3.468	15.664	56.661	0.173	0.02	2.009	5.124	0.172	8.962	3.47	99.937				
	31/18	0.439	2.76	2.353	2.801	13.928	62.544	0.17	0.029	3.562	5.289	0.114	7.478	0.65	99.771				
	556/18	1.805	2.75	2.949	2.735	15.572	58.601	0.138	0.012	3.708	5.586	0.137	8.462	1.31	99.922				
	486/18	0.340	2.75	2.896	2.53	14.806	59.75	0.161	0.015	3.44	6.25	0.142	8.279	0.67	99.771				
	9	0.147	2.67	4.545	1.104	15.237	64.129	0.177	0.006	2.137	3.119	0.112	7.202	1.48	99.927				
	44/17	0.350	2.74	2.653	3.996	14.132	56.662	0.156	0.012	2.854	6.017	0.176	10.727	1.6	99.929				
	58/18	-0.016	2.61	3.186	0.995	11.811	71.24	0.028	0.065	5.693	2.592	0.068	2.072	2.17	99.972				
	3/82	1.978	2.66	3.045	2.302	14.174	64.321	0.144	0.014	2.59	4.451	0.111	6.099	1.98	99.947				
3/81	1.978	2.66	2.976	0.185	12.488	74.437	0.011	0.014	6.333	0.861	0.1	0.025	1.694	0.86	99.984				
41/18	2.906	2.67	3.346	2	14.198	66.426	0.119	0.008	4.137	2.918	0.472	0.099	5.675	0.54	99.938				
97/17	0.145	2.62	4.447	0.65	14.976	66.315	0.112	0.008	3.59	1.713	0.409	0.089	4.645	2.89	99.844				
61/17	-0.105	2.57	2.279	0.369	12.111	73.911	0.049	0.016	9.144	0.087	0.011	0.013	1.527	0.42	99.937				
4/86	0.031	2.59	4.061	0.529	13.13	71.702	0.136	0.024	4.935	0.387	0.293	0.047	3.986	0.5	99.73				
80/17	-0.039	2.66	7.73	0.792	15.476	68.524	0.577	0.013	1.172	2.753	0.176	0.03	2.464	0.26	99.967				
456/18	-0.031	2.60	3.858	0.431	13.46	70.116	0.083	0.04	7.099	0.843	0.229	0.048	3.428	0.21	99.845				
526/18	0.570	2.60	3.494	0.138	11.875	73.655	0.065	0.017	6.219	1.161	0.014	0.035	3.038	0.25	99.961				
37/18	-0.051	2.60	4.762	1.377	7.471	74.095	0.067	0.12	5.006	4.05	0.012	0.052	2.584	0.38	99.976				
6	3.370	2.60	6.428	0.47	3.868	69.445	0.16	0.011	10.107	1.553	0.283	0.064	7.116	0.25	99.755				
68/18	0.890	2.71	2.644	1.544	14.042	67.189	0.117	0.036	5.223	3.017	0.426	0.067	4.149	1.25	99.704				
1	4.129	2.71	3.341	1.813	13.196	68.136	0.179	0.013	3.967	3.583	0.482	0.064	4.995	0.16	99.929				

На диаграмме Штрекайзена фигуративные точки нормативных составов пород образуют сгущения, соответствующие, главным образом, полям гранодиоритов и гранитов и частично кварцевых монцодиоритов (рис. 5).

Для гранитоидов, как для первой, так и для второй фаз, характерна преобладающая (около 90% всех анализов) диопсид – нормативность (от 1 до 7%), Часть пород корундонормативны (от 0.2 до 2%) и совсем не-

значительная часть по этим показателям «нейтральна». Все перечисленные данные свидетельствуют о подкоровом происхождении родоначальных расплавов с частичным влиянием корового субстрата (табл. 3). Подобные умеренно глинозёмистые гранитоиды могут возникать и за счёт селективного плавления нижнекорового субстрата, о чём свидетельствует относительно высокое содержание калия (от 2.8 до 3.8%) в гранитоидах и до 5%, а в отдельных случаях до 10%, в гранитах.

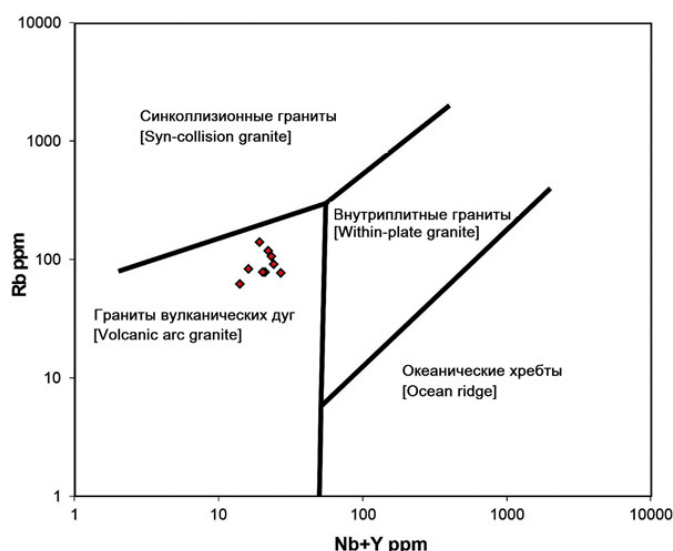


Рис. 5. Геодинамическая позиция гранитоидов по А. Штрекайзену.

[Fig. 5. Geodynamic position of granitoids according to A. Streckeisen.]

Табл. 3. Таблица средних нормативных содержаний минералов в гранитоидах ДКМ
[Table 3. Table of average standard contents of minerals in the DCM granitoids]

Минерал [Mineral]	Петротип [Petrotype]	
	Гранитоиды [Granitoids]	Граниты [Granites]
Кварц [Quartz]	19.5	26
Плагиоклаз [Plagioclase]	41.5	32
Ортоклаз [Orthoclase]	19.5	31
Корунд [Corundum]	1	3
Диопсид [Diopside]	3.5	2
Гиперстен [Hypersthene]	6	2
Волластонит [Wollastonite]	0	3
Гематит [Hematite]	7.5	3
Апатит [Apatite]	0.4	0.3
Сфен [Sphen]	1.5	0
Рутил [Rutile]	1	0
Акмит [Acmite]	0	4

Сравнение средних нормативных составов пород первой и второй фаз (табл. 4) показывает заметное увеличение количеств кварца в породах второй фазы (с 18.5 до 26%) и ортоклаза (с 19.5 до 31%) и сниженные плагиоклаза (с 41.5 до 32%). При этом уменьшаются содержания сфена (с 1.5 до 0) и рутила (с 1.0 до 0), появляются нормативный волластонит (3%) и акмит (4.0%). Среднее содержание нормативного корунда в породах первой фазы 1%, а во второй 3%. Средние нормативные содержания диопсида, наоборот уменьшаются с 3.5 до 2%. Присутствие в средних нормативных составах одновременно корунда и диоп-

сида свидетельствуют о гибридной (корово-мантийной) природе исходных расплавов, сформировавших массив.

Геохимические особенности гранитоидов изучены по валовым пробам (распространённые элементы-примеси и REE) и монофракциям цирконов.

Содержание ванадия находится на уровне кларкового, а других «мантийных» элементов (хрома, никеля, кобальта и меди) ниже кларкового. Надкларковые концентрации характерны для литофилов (рубиния, стронция, бария, цезия), а также для иттрия, циркония и ниобия (табл. 5).

Табл. 4. Содержание элементов-примесей (в РРМ) в гранитоидах ДКМ
 [Table 4. Content of impurity elements (in РРМ) in the DСM granitoids]

Имя [Name]	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Sb	Cs	Ba	Pb	Th	U
	0	70	36	5	16	9	39	13	2	77	253	14	75	7	3	7	4	667	14	4	6
	0	91	45	7	12	17	48	14	0	90	204	16	87	8	2	2	5	848	16	10	6
	8	103	30	8	12	8	86	16	2	76	152	18	96	9	6	6	43	1101	12	3	5
	16	83	29	4	18	6	33	10	4	62	119	8	53	6	1	3	4	780	7	6	5
	0	75	27	5	13	14	55	17	4	105	300	15	90	8	4	4	5	764	18	5	6
	12	96	45	5	21	12	42	13	2	77	211	13	70	7	4	6	5	827	13	8	6
	0	107	31	7	18	17	55	15	3	62	224	17	95	8	3	3	6	963	11	5	6
	0	11	14	0	8	5	14	11	3	128	43	9	7	5	2	4	0	81	25	2	6
	12	79	33	6	10	7	57	16	3	118	177	14	101	8	2	5	6	842	13	3	8
Среднее [Average]	5,5	82,5	35	5,5	14	12	50	14	3	90,5	214	13,5	84	8	2,5	4,5	9	816	14,5	6	6,5
	0	13	19	0	6	8	13	13	3	131	28	13	17	13	1	2	1	155	32	5	13
	0	26	28	0	6	4	10	11	3	17	221	17	29	4	2	3	1	234	3	12	6
	0	14	38	0	4	4	18	8	0	40	56	6	34	6	2	2	1	338	14	3	5
	0	5	26	0	10	8	4	9	3	155	63	1	1	4	3	5	12	91	37	2	4
	0	55	46	4	10	9	36	13	3	83	325	8	82	8	1	3	4	622	15	12	7
	0	49	31	3	6	13	37	14	4	140	194	12	78	7	2	6	3	566	26	2	5
Среднее [Average]	0	23	27	1	8	6	16	11	2	91	111	10	27	7	2	4	3	261	21	5	7

Табл. 5. Нормативный состав минералов в гранитоидах ДКМ
[Table 5. Standard composition of minerals in the DCM granitoids]

Имя [Name]	Содержание минерала (%) [Mineral content (%)]													Температура плавления [Melting point]
	№	Кварц [Quartz]	Плагиоклаз [Plagioclase]	Ортоклаз [Orthoclase]	Корунд [Corundum]	Диопсид [Diopside]	Гиперстен [Hypersthene]	Вола- стонит [Wollas- tonite]	Акмит [Acmite]	Рутил [Rutile]	Гематит [Hematite]	Апатит [Apatite]	Сфен [Sphen]	
Гранитоиды I-й фазы [Granitoids of phase 1]	126/18	20.05	38.29	22.96	0	1.04	6.65	0	0	0	7.4	0.4	2	975.41
	86/17	18.94	40.97	15.77	0.69	0	12.52	0	0	0.87	7.75	0.39	0	1030.9
	99	18.94	42.93	18.9	0	5.03	4.55	0	0	0	6.89	0.34	1.72	992.08
	36/19	11.99	41.05	22.27	2.07	0	11.18	0	0	0.81	7.71	0.36	0	1068.07
	97/17	20.16	41.2	20.37	0	1.14	6.63	0	0	0	6.72	0.27	1.72	983.37
	43/18	15.33	49.33	11.87	0	0	8.64	0	0	0.58	8.96	0.4	1.15	1090.75
	31/18	22.08	36.74	21.05	0	4	5.12	0	0	0	7.48	0.39	2.09	980.94
	556/18	13.48	43.22	21.91	0	4.66	4.65	0	0	0	8.46	0.32	1.75	1055.01
	486/18	15.83	41.7	20.33	0	7.6	2.78	0	0	0	8.28	0.37	2.04	1032.27
	9	21.71	52.74	12.63	0.21	0	2.75	0	0	0.68	7.2	0.41	0	953.66
	44/17	14.23	40.63	16.87	0	5.67	7.33	0	0	0	10.73	0.36	2.32	1090.65
	58/18	26.7	27.87	33.64	0	5.35	0	1.77	0	0	2.07	0.06	0.17	911.66
	3/82	25	43.08	15.31	0	0.97	5.29	0	0	0	6.1	0.33	1.76	950.37
	3/81	31.32	27.15	37.43	0	0.99	0	0.21	0	0	1.69	0.03	0.25	765.35
	41/18	22.74	39.79	24.45	0	0.41	4.79	0	0	0	5.68	0.28	1.16	823.81
	97/17	22.42	45.34	21.22	0.94	0	1.62	0	0	0.41	4.65	0.26	0	912.55
	61/17	27.9	11.38	54.04	0	0.06	0.89	0	4.42	0	0	0.11	0.03	774.36
	4/86	28.07	35.24	29.16	0.76	0	1.32	0	0	0.29	3.99	0.32	0	812.14
80/17	14.93	69.44	6.93	0	4.02	0.11	0	0	0	2.46	1.34	0.43	873.54	
456/18	19.87	29.71	41.95	0	2.21	0.05	0	2.36	0	2.61	0.19	0.56	842.78	
526/18	28.94	26.46	36.75	0	0.74	0	1.81	2.64	0	2.12	0.15	0.03	779.38	
37/18	35.15	10.56	29.58	0	7.4	0	4.22	7.48	0	0	0.16	0.03	771.51	
6	35.21	0	21.12	0	2.53	0	1.01	20.59	0	0	0.37	0.69	853.95	
68/18	24.21	33.28	30.87	0	1.23	3.28	0	0	0	4.15	0.27	1.05	894.77	
1	25.27	37.52	23.44	0	4.35	2.5	0	0	0	5	0.41	1.18	880.18	

Поведение REE в гранитоидах Даховского массива ранее было изучено Снежко В. А. с соавторами [5]. Среднее содержание REE ими установлено на уровне 144 ppm в породах первой фазы, а в гранитах второй – 153 ppm (табл. 6). При этом вариативность для пород первой фазы весьма существенна (от 80 до 230 ppm), а для второй значительно ниже (133–202 ppm), что подчёркивает большую гетерогенность расплавов первой и относительную гомогенность второй фаз. Для гранитоидов обеих фаз характерны умеренно дифференцированные тренды распределения REE с существенным обогащением LREE (коэффициентом фракционирования $La/Nb=12$; $\sum LREE/\sum HREE=10$) и слабо проявленным Eu минимумом. Породы схожи с хорошо изученными I-гранитами комплекса Кептенс-Бей [14]. Послед-

нее обстоятельство подчёркивает незначительную роль амфибола при кристаллизационной дифференциации исходного расплава, что обычно для условий коровой магмогенерации. Тренды удивительно схожи, что лишний раз подчёркивает генетическое родство расплавов.

Геохимические особенности циркона, прежде всего отношение Zr/Hf, изученное ранее [15], свидетельствует о гибридной природе исходных расплавов. В среднем эти отношения отвечают интервалу 50–52 (гранитный тип отношений по [16]), хотя в ядрах зональных цирконов отдельные определения дают значения 64–66, что характерно для более основных ассоциаций. Кроме Hf, в цирконах зафиксированы редкоземельные примеси Fe, Ca и Y в содержаниях, не превышающих сотых долей процентов.

Табл. 6. Среднее содержание REE в гранитоидах ДКМ
[Table 6. Average REE content in the DCM granitoids]

	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1 фаза [Phase 1]	15.23	30.9	55.6	5.95	18.1	5.27	0.93	3.78	0.54	3.15	0.51	1.63	0.26	1.73	0.25
2 фаза [Phase 2]	20.64	34.5	65.5	7.49	23.7	5.88	1.22	4.67	0.71	3.95	0.69	1.89	0.29	2.1	0.3

Табл. 7. Физические свойства гранитоидов Даховского кристаллического массива
[Table 7. Physical properties of the granitoids in the DCM]

Наименование породы [Name of the rock]	Плотность σ , г/см ³ [Density σ , g / cm ³]		Скорость продольных волн V_p , м/с [Longitudinal wave Velocity V_p , m/s]		Магнитная восприимчивость $\kappa \cdot 10^{-3}$ ед. СИ [Magnetic susceptibility $\kappa \cdot 10^{-3}$ SI units]		Удельное сопротивление ρ , Ом·м [Resistivity ρ , Ohms·m]	
	min [max]	среднее [average]	min [max]	среднее [average]	min [max]	среднее [average]	min [max]	среднее [average]
Гранитоиды 1 фазы [Granitoids, phase 1]	2.67 2.78	2.72	2212 5208	4300	-0.507 1.581	0.271	98.38 591.25	363.5
Гранитоиды 2 фазы [Granitoids, phase 2]	2.57 2.67	2.61	2158 5545	4342	-0.430 1.743	0.454	71.14 489.72	248.2

Петрофизическая характеристика гранитоидов ДКМ

Результаты лабораторных измерений плотности, скорости, магнитной восприимчивости и удельного сопротивления сведены в таблицу 7. Для более полной характеристики магнитной восприимчивости привлечена информация полевой капаметрии (более 150 измерений). Полученные данные прошли стандартную обработку с построением вариационных кривых распределения параметров, определения их статистических характеристик и корреляционных взаимосвязей.

На рис. 6 приведены вариационные кривые распределения измеренных параметров гранитоидов каждой из двух фаз внедрения. Характер распределения физических свойств пород, слагающих малкинский комплекс, позволяет с уверенностью выделить петрофизические группы, приуроченные к определенному петрологическому типу гранитоидов.

Гранитоиды первой фазы характеризуются средней плотностью 2.72 г/см³. При этом распределение плотности носит ярко выраженный бимодальный характер. Это позволяет предположить наличие в выборке двух петроплотностных подгрупп пород имеющих среднюю плотность 2.70 и 2.76 г/см³. Средняя магнитная восприимчивость гранитоидов первой фазы составляет $0.271 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Максимальное представительство данных сосредоточено в пределах от 0 до $0.9 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Возможное наличие в рамках пород первой фазы двух петрографических подгрупп подчеркивается характерной асимметрией вариационной кривой магнитной восприимчивости. В пользу этого предположения говорит также бимодальный характер распределения скорости продольных волн (рис. 6с). Анализ петрологических особенностей образцов горных пород показывает, что выделяемые в рамках первой фазы петрофизические подгруппы представлены соответственно амфибол-биотитовыми гранодиоритами и диоритами-монцодиоритами.

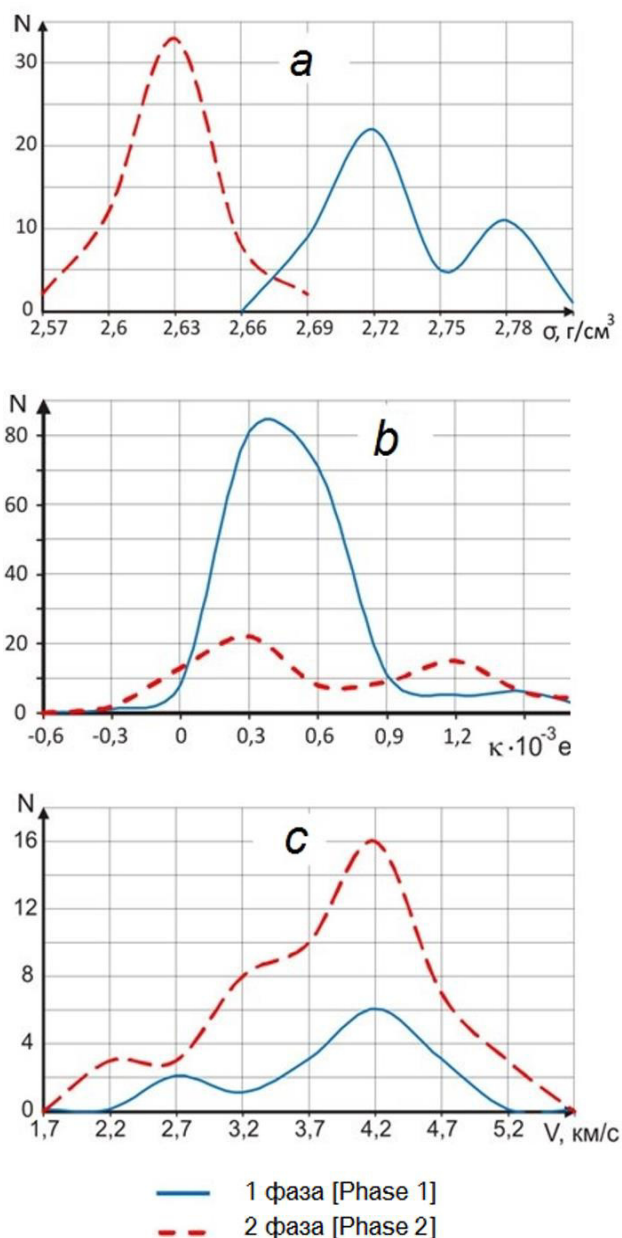


Рис. 6. Вариационные кривые петрофизических параметров гранитоидов ДКМ: *a* – плотность, *b* – магнитная восприимчивость, *c* – скорость продольных волн.

[Fig. 6. Variation curves of the petrophysical parameters of DCM granitoids: (*a*) – density, (*b*) – magnetic susceptibility, (*c*) – longitudinal wave velocity.]

Плотность пород, относимых ко второй фазе внедрения (лейкократовые гранит-аплиты) характеризуется распределением близким к нормальному со средним значением 2.61 г/см^3 , что существенно ниже, чем плотность образований первой фазы. Их магнитная восприимчивость носит отчетливо выраженный бимодальный характер (рис. 6b). Это позволяет выделить в рамках этой группы пород две петрофизические подгруппы: первую со средним значением параметра $0.217 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ и вторую – $1.117 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Характерно, что в первой подгруппе весомое представительство имеют диамагнитные разности пород. Средняя скорость продольных волн для гранитоидов второй фазы составляет 4342 м/с , что идентично гранитоидам первой фазы внедрения. Отметим незначительную левую асимметрию вариационной кривой скорости (рис. 6в), что свидетельствует о возможном влиянии на этот параметр наложенных процессов.

Сведения об удельном электрическом сопротивлении гранитоидов (табл. 7) представлены В. Н. Коробом, в обобщенном виде они приведены в работе [6]. Этот параметр определен для ограниченного количества образцов, увлажненных в лабораторных условиях. Низкие значения сопротивления пород можно объяснить повышенной пористостью образцов, отобранных из обнажений. Как известно, проводимость горных пород во многом определяется их влагонасыщенностью. Повышенная пористость, по всей видимости, сказалась и на изученном скоростном параметре. В целом, определенные нами значения скоростей продольных волн ниже, чем в аналогичных породах других регионов [17]. Тем не менее, имеющиеся данные об электропроводности позволяют предположить дифференциацию пород первой и второй фаз внедрения – различие в средних значениях удельного сопротивления составляет более 30%.

На основе совокупности результатов изучения физических свойств гранитоидов Даховского кристаллического массива составлена его петрофизическая модель [7] (рис. 7). Из нее следует, что различные их типы достаточно четко дифференцируются по петрофизическим параметрам. Предложенная модель в совокупности с петрологическими характеристиками пород может служить основой для применения геофизических методов при глубинных исследованиях, геологическом картировании и поисках полезных ископаемых.

Тип пород [Types of rocks]	$\sigma, \text{г/см}^3$			$V_p, \text{м/с}$			$\kappa \cdot 10^{-3} \text{ ед. СИ}$				$\rho, \text{Ом-м}$		
	2.55	2.65	2.75	4200	4300	4400	0.1	0.4	0.7	1.0	1.2	200	300
Гранитоиды первой фазы внедрения [Granitoids of the 1st phase of implementation]	[Bar chart showing distribution]			[Bar chart showing distribution]			[Bar chart showing distribution]				[Bar chart showing distribution]		
Гранитоиды второй фазы внедрения [Granitoids of the 2nd phase of implementation]	[Bar chart showing distribution]			[Bar chart showing distribution]			[Bar chart showing distribution]				[Bar chart showing distribution]		

Рис. 7. Петрофизическая модель гранитоидов Даховского кристаллического массива.
[Fig. 7. Petrophysical model of granitoids in the DCM.]

Характер взаимосвязей изученных петрофизических параметров иллюстрируется рис. 8. Из него следует, что каждая из фаз генерации гранитоидов характеризуется четко выраженным «облаком». В максимальной степени это характерно для соотношений «плотность – магнитная восприимчивость» и «плотность – скорость». В более завуалированной форме обнаруживается взаимосвязь между скоростью продольных волн и магнитной восприимчивостью для каждого из выделяемых типов пород (рис. 8b). В данном случае «облака» существенно перекрываются. В пределах каждой из групп гранитоидов весомых корреляционных связей между изученными параметрами не установлено.

Наиболее показательным в этом отношении является поле взаимосвязи плотности и магнитной восприимчивости (рис. 8a), позволяющее наглядно продемон-

стрировать дифференциацию пород малкинского плутонического комплекса по выбранным параметрам.

Взаимосвязь физических свойств и геохимических особенностей всех типов гранитоидов исследованы для всех образцов, которые изучены рентгенофлуоресцентным и рентгеноструктурным анализами в рамках настоящего исследования. Важно то, что пробы для аналитических исследований готовились из тех же образцов, которые подвергались петрофизическим исследованиям. Это существенно повышает степень достоверности полученных результатов.

По результатам исследования намечается четко выраженный тренд связи физических параметров с вещественными характеристиками гранитоидов. На рис. 9 это иллюстрируется зависимостями плотности от содержания оксидов.

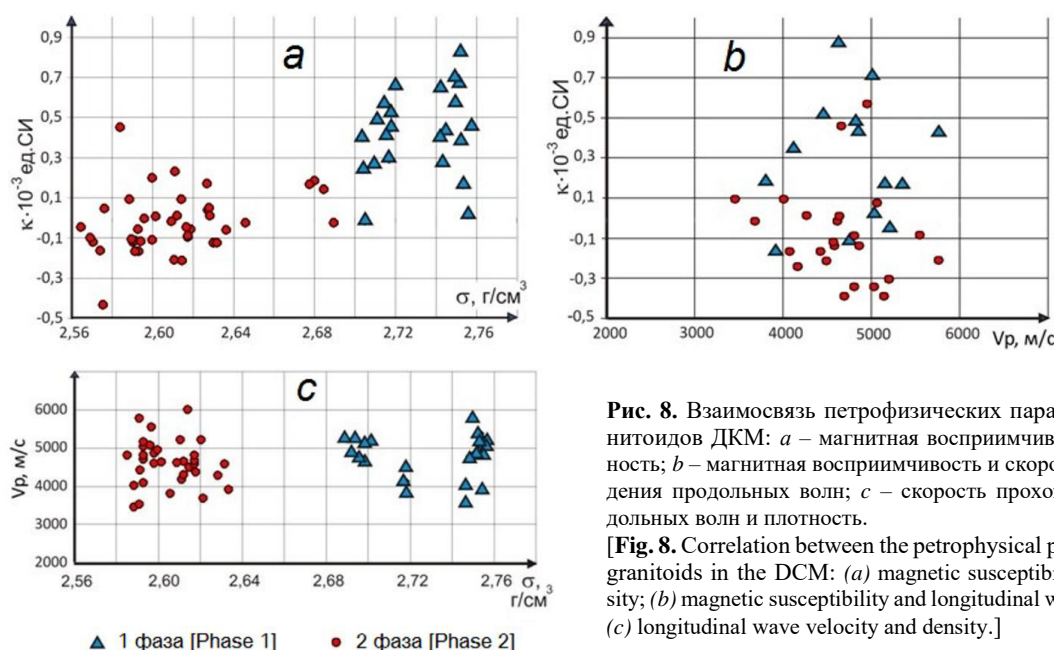


Рис. 8. Взаимосвязь петрофизических параметров гранитоидов ДКМ: *a* – магнитная восприимчивость и плотность; *b* – магнитная восприимчивость и скорость прохождения продольных волн; *c* – скорость прохождения продольных волн и плотность.

[Fig. 8. Correlation between the petrophysical parameters of granitoids in the DCM: (a) magnetic susceptibility and density; (b) magnetic susceptibility and longitudinal wave velocity; (c) longitudinal wave velocity and density.]

В частности, взаимосвязь плотности и суммарного содержания оксидов железа и магния носит характер прямой линейной зависимости (рис. 9a). Сходный характер относится к зависимостям от оксидов кальция и алюминия (рис. 9b и 9c). Зависимости, обусловленные содержанием щелочей (рис. 9d) и кварца (рис. 9e), имеют ярко выраженную обратную линейную зависимость.

Геодинамика

Геодинамическая типизация гранитов на основе их вещественных признаков широко вошла в практику региональных исследований и в настоящее время является обязательным компонентом фундаментальных построений и геодинамического моделирования. Вместе с тем, по мере накопления фактических данных по гранитоидам различных регионов и возрастных условий их проявления, появляется все больше информации о том, что используемые дискриминантные диаграммы [18] не всегда работают эффективно. Часто

возникают случаи неопределенности геодинамической природы гранитов, совмещающие в себе геохимические признаки пород, исключающих возможности однозначного решения. В каждом конкретном случае причины подобного «сбоя» могут быть разные, завися от многообразных факторов, часто противоречивых и разновекторных. Связано это, прежде всего, с условиями образования гранитных расплавов, которые могут быть, как результатом селективного плавления разнообразных протолитов, так и конечными дифференциатами различных исходных расплавов, начиная от базальтоидного и заканчивая гранитоидным. Помимо этого, состав вылавков зависит от степени селективности плавления, на которую, в свою очередь, влияет режим теплового потока, количество и состав флюидов, состав протолита, а также характер корово-мантийного взаимодействия [19]. Последний фактор является определяющим, так как контролирует, по-существу, все остальные предыдущие. Разберем каждый из перечисленных факторов подробнее.

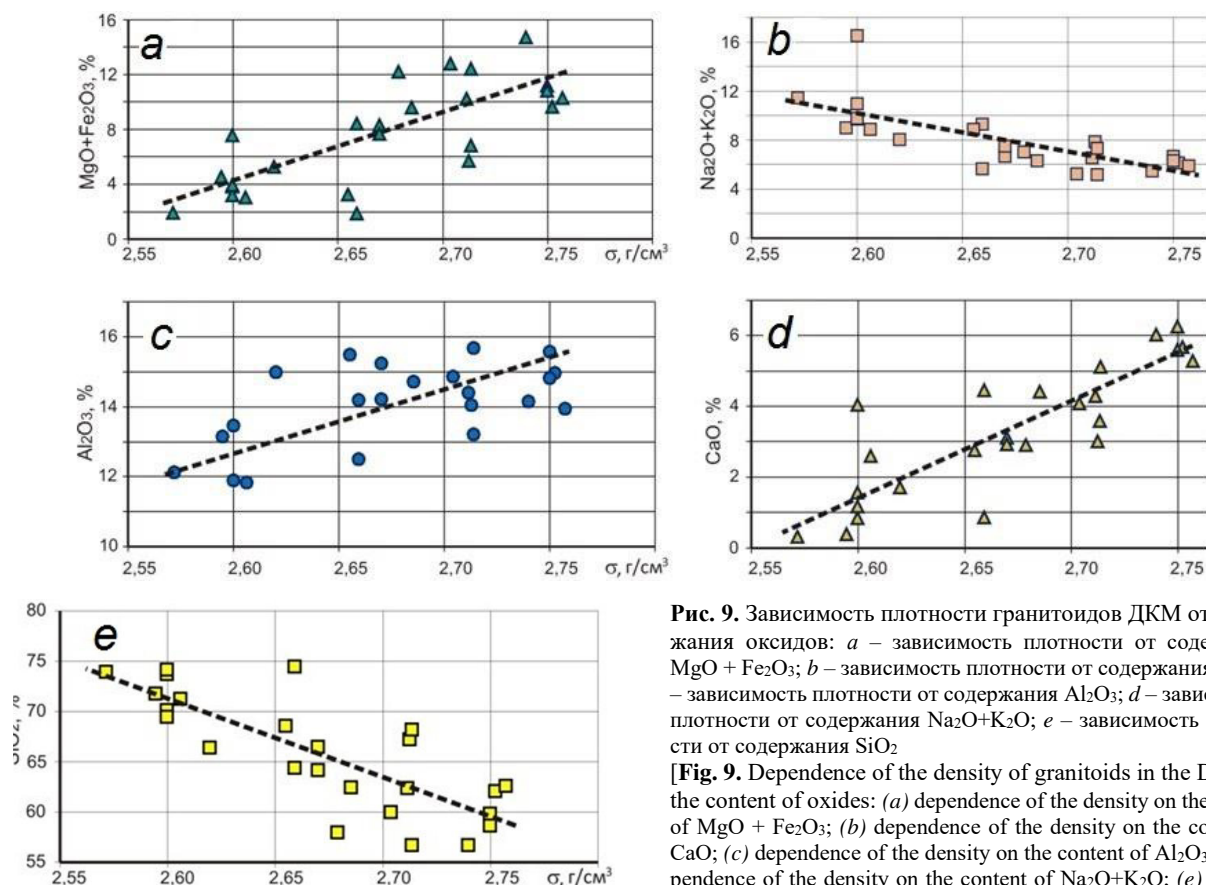


Рис. 9. Зависимость плотности гранитоидов ДКМ от содержания оксидов: *a* – зависимость плотности от содержания MgO + Fe₂O₃; *b* – зависимость плотности от содержания CaO; *c* – зависимость плотности от содержания Al₂O₃; *d* – зависимость плотности от содержания Na₂O+K₂O; *e* – зависимость плотности от содержания SiO₂

[**Fig. 9.** Dependence of the density of granitoids in the DCM on the content of oxides: (*a*) dependence of the density on the content of MgO + Fe₂O₃; (*b*) dependence of the density on the content of CaO; (*c*) dependence of the density on the content of Al₂O₃; (*d*) dependence of the density on the content of Na₂O+K₂O; (*e*) dependence of the density on the content of SiO₂.]

I-граниты энсиалических островных дуг и активных окраин андского типа – явление достаточно масштабное. Они известны во всех покровно-складчатых поясах (орогенах) межконтинентального и периконтинентального типов. Менее характерны они для внутриплитных орогенов. I-граниты достаточно чётко делятся на два подтипа. Первый отвечает субдукционной стадии, второй – постсубдукционной коллизии. Их отличия настолько очевидны, что следовало бы выделить в самостоятельные типы. Упомянутые отличия касаются как геологических условий проявления (субдукционные всегда сопровождаются комагмичными эффузивами, для коллизионных – это большая редкость), так и вещественных характеристик макро- и микроуровней (петрография, петрохимия, геохимия), а также длительностью становления (первые развиваются в более длительном возрастном диапазоне, от десятков до сотен млн лет; вторые – в узком до 10 млн лет). Тем не менее, гранитоиды обеих подгрупп объединяет одно, а именно, подкоровое происхождение родоначальных расплавов, что выражается в ассоциации гранитов с «длинными» сериями, более ранние дериваты которых отвечают габброидам, затем средним и умеренно кислым породам, а заключительные – кислым и ультракислым разновидностям гранитов. Различия подтипов определяются степенью влияния на исходные расплавы корового субстрата, роль которого от субдукционного к коллизионному существенно возрастает. В этой связи коллизионные I-граниты пред-

ставляют собой переходный тип от собственно субдукционных I-гранитов к S-гранитам, а их петрохимический облик в значительной степени определяется большей долей корового компонента в процессе коровомантийного взаимодействия [20].

Кристаллизационная дифференциация в S-гранитах, которые являются производными коровых расплавов, проявлена менее ярко, так как диапазон ассоциирующих пород начинается с адамеллитов (с содержанием SiO₂=65–67%) и заканчивается лейкогранитами-аляскитами (SiO₂=71–75%). Такие серии всегда «короткие», а фазовые взаимоотношения в них часто затушёваны. Заключительные конечные продукты дифференциации часто представлены пегматитовыми телами сегрегационного или жильного типов.

Что касается изучаемых гранитоидов, то вариативность составов пород первой фазы достаточно значима. Если за эталон взять гранодиориты массивной текстуры центральной части массива (обр. 3/82), попадающие на всех диаграммах в одноимённое поле, и имеющие соответствующие петрографические и петрохимические характеристики, то по сравнению с ними в разных частях массива мы сталкиваемся с разнотипными диоритами – от типичных их разновидностей (SiO₂ = 56–57% и суммой щелочей 5–5.5), монцодиоритами и монцонитами (SiO₂ = 58% и суммой щелочей 6.5–7.0) до кварцевых диоритов (SiO₂ = 60–62.5 при сумме щелочей 5.2–6.1). При этом часть анализов попадает и в поле граносиенитов.

Отмечается чёткая закономерность – на периферической части массива доминируют гранитоиды с директивностью, выраженной в гнейсовидности с одновременным уменьшением кремнекислотности и щёлочности. Наиболее основные разновидности диорита обычно слагают отдельные участки сегрегационного типа (рестит?).

По-видимому, именно эти разновидности слагают незначительные по размеру тела с «размытыми» границами часто неправильной формы, и ранее обычно относились к самостоятельному даховскому комплексу. На наш взгляд, это не совсем корректно из-за явно подчинённого по объёму их положения среди доминирующих пород второй фазы, отсутствия границ прорывания и отличительных признаков на уровне петрографии, минералогии и геохимии. Правильнее их следует рассматривать в составе первой фазы малкинского комплекса, как возможные реликты корового рестита.

Расчётные температуры плавления показывают, что диапазон для пород первой фазы (диориты-гранодиориты) колеблется в пределах от 930° до 1100°. Более высокие температуры (свыше 1000°) характерны для пород диоритовой группы, более низкие – для гранодиоритов (930–990°). Разброс температур, таким образом, в одном интрузивном теле составляет около 170°. Расчётная температура для гранитов второй фазы колеблется от 765° до 895°. При этом разброс температур более узкий, составляя около 130°.

На бинарных дискриминантных диаграммах Пирса фигуративные точки образуют поля сгущения, отвечающие островным дугам и синколлизионным гранитам (рис. 5). Таким образом, по геохимическим данным, гранитоиды Даховского массива являются производными корово-мантийного взаимодействия в условиях субдукционного или постсубдукционного коллизионного геодинамического режима.

Спектр аксессуаров из гранитоидов обеих фаз, таких как ортит и магнетит, свидетельствует о существенном влиянии подкоровых расплавов при генерации исходной магмы, ответственной за формирование гранитоидов ДКМ.

Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Гранитоиды Даховского массива представляют собой фрагмент гетерогенного основания альпийской структуры Северного Кавказа, сформированного в результате герцинского орогенеза. Ассоциация пород первой фазы внедрения по своим вещественным и петрофизическим характеристикам отражает процессы магмогенерации в условиях корового субстрата с существенным влиянием подкоровых расплавов по механизму гибридности (смешения). При формировании гранитоидов (главным образом, гранитов) второй фазы степень влияния корового компонента увеличивается, а подкорового (мантийного) – снижается, при этом

увеличивается щёлочность с одновременным возрастанием доли калия в их составе. Граниты второй фазы представляют собой гомогенный продукт кристаллизационной дифференциации гетерогенного расплава, исходного для гранитов.

2. Единый тренд эволюции, выраженный на харкевской диаграмме, подчёркивает генетическое родство пород первой и второй фаз, об этом же свидетельствуют и другие их вещественные характеристики, петрофизические свойства и геологические взаимоотношения. Важным представляется факт, который ещё предстоит осмыслить, прорывания меланжированных пород в шовной зоне рамы дайками гранитов второй фазы и отсутствия подобных взаимоотношений с породами первой фазы.

3. Вся совокупность геологических данных, вещественные и петрофизические особенности гранитоидов позволяют говорить о целостности выделения их в самостоятельный даховский двухфазный комплекс, а не относить к малкинскому. Для выделения его в эталонный объект необходимы дополнительные детальные изотопно-возрастные исследования.

4. Полученные результаты, детально описывающие геологическую и петрофизическую модели Даховского кристаллического массива, могут служить надёжной основой для глубинного физико-геологического моделирования на основе физических полей как самого ДКМ, так и его аналогов, широко представленных в пределах Северного Кавказа.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Г. Д. Геология магматических комплексов Северного Кавказа и основные черты, связанной с ними минерализации. Тр. ИГЕМ. Вып. 20. Изд. АН СССР, 1958. 139 с.
2. Афанасьев Г. Д. Формации изверженных пород Северного Кавказа по данным абсолютного возраста. Геология СССР. Т. 1X, ч.1, 1968. 473 с.
3. Войткевич Г. В., Лебедев Г. И. О корреляции докембрийских формаций юга Русской платформы и Северного Кавказа. Тезисы докладов. IV Конференция по геологии и полезным ископаемым Северного Кавказа. Ессентуки, 1974. С. 63–64.
4. Закруткин В. В., Попов Ю. В., Иванов В. В. Сахрайско-Белореченский кристаллический массив – крайне западное окончание полосы выходов фундаментов Кавказа. В кн.: *Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии юга России и Кавказа*. Мат. 11 международной конференции. Новочеркасск. Т.1. 1999. С. 36–40.
5. Снежко В. А., Снежко В. В., Родионов А. О. Особенности распределения редкоземельных элементов в гранитоидах Даховского массива. Сборник матер. Восьмой международной конференции «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы». Майкоп, Туапсе, 2016. С. 158–159.
6. Короб В. Н., Кузнецова Ю. В., Ляшенко Н. В. Петрофизические свойства магматических пород Даховского кристаллического массива. *Инновационные методики геофизических исследований*. – Воронеж: Научная книга, 2018. С. 50–54.

7. Жаворонкин В. И., Ильин В. В. Петрофизический облик гранитоидов Даховского кристаллического массива Северо-западный Кавказ). XXI Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2020. С. 83–86.
8. Ильин В. В. Петрофизические особенности гранитоидов Даховского кристаллического массива (Северо-Западный Кавказ). *Геология в развивающемся мире*. Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2020. С. 208–211.
9. Сомин М. Л., Левченко О. А., Котов А. Б., Макеев А. Ф., Комаров А. Н., Ро Н. И., Лаврищев В. А., Лебедев В. А. Палеозойский возраст высокобарических метаморфических пород Даховского выступа (северо-западный Кавказ): результаты U-Pb геохронологических исследований // *Докл. РАН*. 2007. Т. 416. №3. С. 360–363.
10. Ненахов В. М., Жабин А. В., Никитин А. В., Бондаренко С. В. Внутреннее строение тектонической зоны северного обрамления Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. №1. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.1/1686>
11. Снежко Е. А. Некоторые петрохимические особенности северных гранитов Кавказа. *Проблемы Земли и Космоса в творчестве П. Н. Чирвинского*. Ростов на Дону: Изд-во РГУ. 1985. С. 79–84.
12. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия кавказская. Лист L-37-XXXV (Майкоп). Под ред. К. О. Ростовцева. С.-Пб: 2004. 240 с.
13. Попов Ю. В., Жабин А. В., Пустовит О. Е. Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа Даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ) // *Геология и геофизика Юга России*. 2019. 9(4). С. 38–48.
14. Особенности изучения и геологического картирования коллизионных гранитоидов. под редакцией Н. В. Межеловского. Роскомнедра. М.: 1992. 100 с.
15. Золотарёва Г. С., Ненахов В. М. Акцессорные минералы и типоморфизм цирконов гранитов Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2006. №1. С. 39–44.
16. Ляхович В. В. Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза. М.: Наука, 1967. 488 с.
17. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
18. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks // *J. Petrol.* 1984. Vol. 25. №. 44. P. 956–963.
19. Попов В. С. Петролого-геохимическая модель формирования орогенных известково-щелочных серий. Геохимия магматизма. М.: Наука. 1982. С. 93–124.
20. Попов В. С. Смешение магм – важный петрогенетический процесс. Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1984. Вып. 2. С. 229–240.

Ненахов Виктор Миронович – д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой общей геологии и геодинамики, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: nenakhov@geol.vsu.ru;

Жабин Александр Васильевич – к. г.-м. н., доцент кафедры общей геологии и геодинамики, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: zhabin01@gmail.com

Жаворонкин Валерий Иванович – к. г.-м. н., доцент кафедры геофизики, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: vzhavoronkin@yandex.ru

Ильин Виталий Викторович – студент-бакалавр, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: vitaliy.ilin2000@bk.ru

Чеботарева Любовь Сергеевна – студент-магистр, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: lyubov.chebotareva98@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vicror M. Nenakhov – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Head of the Department of General Geology and Geodynamics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: nenakhov@geol.vsu.ru;

Aleksandr V. Zhabin – PhD in Geol.-Min., Associate Professor of the Department of General Geology and Geodynamics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: zhabin01@gmail.com

Valeriy I. Zhavoronkin – PhD in Geol.-Min., Associate Professor of the Department of Geophysics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: vzhavoronkin@yandex.ru

Vitaliy V. Ilyin – bachelor student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: vitaliy.ilin2000@bk.ru

Lyubov S. Chebotareva – master student, Воронежский государственный университет, Воронеж; E-mail: lyubov.chebotareva98@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

Substances, petrophysical properties, and geodynamic conditions for the formation of granitoids in the Dakhovsky crystalline massif (Western Caucasus)

©2021 V. M. Nenakhov[✉], A. V. Zhabin, V. I. Zhavoronkin, V. V. Ilyin, L. S. Chebotareva

¹*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The article provides the results of a comprehensive research into the mineral and chemical composition, geochemistry, and petrophysical features of granitoids in the Dakhovsky crystalline massif (DCM).

Methodology: Analytical studies of the material composition included the production and description of microsections, X-ray fluorescence and X-ray diffraction analyses. The results of X-ray fluorescence analysis were reduced to norms using the Petro Explorer V.3.2.0.2 program. Heavy concentrates from the grinding samples of the main types of rocks were studied to characterise the accessory minerals. The geophysical characteristics of the granitoids were determined by selected samples and in the outcrops. They included density, magnetic susceptibility, longitudinal wave velocity, and electrical resistivity.

Results and discussions: The results of the fluorescence analysis revealed a wide range of granitoids depending on interstitial phases. First phase rocks vary from quartz diorites and quartz monzodiorites to granodiorites and granosyenites. Second phase rocks correspond in composition to granites and leucogranites of moderate alkalinity. X-ray diffraction analyses showed the presence of tridymite in granitoids, which allowed adjusting the calculated melting temperature of the primary melt. Also, it revealed two varieties of chlorites and a broad range of metal compounds. Melting temperatures above 1,000° are characteristic of diorites, and below 1,000° of granodiorites of the first interstitial phase. The calculated temperature for the second phase granites ranges between 765° and 895°.

Conclusions: The results of the studies, including the variability from diopside- to corundum standard, as well as the range of accessory minerals from granitoids of both phases, such as orthite and magnetite, indicate the subcrustal origin of the parental melts with partial influence of the core substrate responsible for the formation of granitoids in the DCM. Petrophysical characteristics of granitoids of various types were defined and their interconnections and connections with the composition characteristics, in particular, the content of various oxides, were studied. The obtained petrophysical characteristics in combination with other composition data can be regarded as reference characteristics in the regional research and generalisation of the material on magmatism in Northern Caucasus.

Keywords: Western Caucasus, Dakhovsky crystalline massif, granitoids, petrochemistry, petrophysics.

For citation: Nenakhov V. M., Zhabin A. V., Zhavoronkin V. I., Ilyin V. V., Chebotareva L. S. Substances, petrophysical properties, and geodynamic conditions for the formation of granitoids in the Dakhovsky crystalline massif (Western Caucasus). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 2, pp. 4–21.

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3484>

Conflict of interests: The authors declare 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.

✉ Victor M. Nenakhov, e-mail: viktor.nenakhov@mail.ru

REFERENCES

1. Afanas'ev G. D. Geologiya magmaticheskikh kompleksov Severnogo Kavkaza i osnovnye cherty, svyazannoi s nimi mineralizatsii [Geology of magmatic complexes of the North Caucasus and the main features of associated mineralization.]. *Tr. IGEM [Proceedings of IGEM]*. Vol. 20. Moscow, AN SSSR publ, 1958. 139 p. (In Russ.)
2. Afanas'ev G. D. *Formatsii izverzhennykh porod Severnogo Kavkaza po dannym absolyutnogo vozrasta. Geologiya SSSR. T. IX, ch. I* [Formations of igneous rocks of the North Caucasus according to absolute age. Geology of the USSR. T. IX, part 1,], 1968. 473 p. (In Russ.)
3. Voitkevich G. V., Lebed'ko G. I. O korrelyatsii dokembriiskikh formatsii yuga Russkoi platformy i Severnogo Kavkaza [On the correlation of the Precambrian formations of the south of the Russian platform and the North Caucasus]. *Tezisy dokladov. IV Konferentsiya po geologii i poleznym iskopaemym Severnogo Kavkaza* [Abstracts of reports. IV Conference on Geology and Mineral Resources of the North Caucasus]. Essentuki, 1974, pp. 63–64. (In Russ.)
4. Zakrutkin V. V., Popov Yu. V., Ivanov V. V. Sakhraisko-Belorechenskii kristallicheskiei massiv – kraine zapadnoe okonchanie polosy vykhodov fundamentov Kavkaza [Sakhraisko-Belorechenskiy crystalline massif - the extreme western end of the strip of outcrops of the Caucasus basements]. V kn.: *Problemy geologii, poleznykh iskopaemykh i ekologii yuga Rossii i Kavkaza*. Mat. 11 mezhdunarodnoi konferentsii [In the book: Problems of geology, minerals and ecology of the south of Russia and the Caucasus. Mat. 11th international conference]. Novocherkassk, vol. 1, 1999, pp. 36–40. (In Russ.)
5. Snezhko V. A., Snezhko V. V., Rodionov A. O. Osobennosti raspredeleniya redkozemel'nykh elementov v granitoidakh Dakhovskogo massiva [Features of the distribution of rare earth elements in the granitoids of the Dakhovsky massif]. *Sbornik mater. Vos'moi mezhdunarodnoi konferentsii «Vulkanizm, biosfera i ekologicheskie problemy»* [Collection of mater. Eighth International Conference "Volcanism, Biosphere and Environmental Problems"]. Maikop, Tuapse, 2016, pp. 158–159. (In Russ.)
6. Korob V. N., Kuznetsova Yu. V., Lyashenko N. V. Petrofizicheskie svoistva magmaticheskikh porod Dakhovskogo kristallicheskogo massiva [Petrophysical properties of magmatic rocks of the Dakhovsky crystalline massif.]. *Innovatsionnye metodiki geofizicheskikh issledovaniy* [Innovative methods of geophysical research.]. Voronezh, Nauchnaya kniga publ., 2018, pp. 50–54. (In Russ.)
7. Zhavoronkin V. I., Il'in V. V. Petrofizicheskie oblik granitoidov Dakhovskogo kristallicheskogo massiva Severo-zapadnyi Kavkaz [Petrophysical appearance of granitoids of the Dakhovsky crystalline massif (Northwest Caucasus)]. XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya "Fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukakh o Zemle". Materialy konferentsii [XXI International Conference "Physicochemical and Petrophysical Research in Earth Sciences". Conference materials.]. Moscow, IGEM RAN publ., 2020, pp. 83–86. (In Russ.)
8. Il'in V. V. Petrofizicheskie osobennosti granitoidov Dakhovskogo kristallicheskogo massiva (Severo-Zapadnyi Kavkaz) [etrophysical features of granitoids of the Dakhovsky crystalline massif (North-West Caucasus)]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire*. Sbornik nauchnykh trudov po materialam XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Geology in the Developing World. Collection of scientific papers based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Perm', PGNIU publ., 2020, pp. 208–211. (In Russ.)
9. Somin M. L., Levchenkov O. A., Kotov A. B., Makeev A. F., Komarov A. N., Ro N. I., Lavrishchev V. A., Lebedev V. A. Paleozoiskii vozrast vysokobaricheskikh metamorficheskikh porod Dakhovskogo vystupa (severo-zapadnyi Kavkaz): rezul'taty U-Pb geokhronologicheskikh issledovaniy [Paleozoic Age of high-pressure metamorphic rocks of the Dakhovsky uplift (northwestern Caucasus): results of U-Pb geochronological studies]. *Dokl. RAN – Reports of the Academy of Sciences*, 2007, vol. 416, no. 3, pp. 360–363. (In Russ.)
10. Nenakhov V. M., Zhabin A. V., Nikitin A. V., Bondarenko S. V. The internal structure of the tectonic zone of the northern frame of Dakhov Crystalline Massif (Western Caucasus). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 1, pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.1/1686> (In Russ.)
11. Snezhko E. A. Nekotorye petrokhimicheskie osobennosti severnykh granitov Kavkaza [Some petrochemical features of the northern granites of the Caucasus.]. *Problemy Zemli i Kosmosa v tvorchestve P. N. Chirvinskogo* [Problems of the Earth and Space in the works of P. N. Chirvinsky]. Rostov na Donu, RGU publ., 1985, pp. 79–84. (In Russ.)
12. *Ob'yasnitel'naya zapiska k Gosudarstvennoi geologicheskoi karte Rossiiskoi federatsii masshtaba 1:200000. Seriya kavkazskaya. List L-37-XXXV (Maikop)*. Pod red. K. O. Rostovtseva [Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 200000. Caucasian series. Sheet L-37-XXXV (Maykop). Ed. K.O. Rostovtseva]. Saint-Petersburg, 2004, 240 p. (In Russ.)
13. Popov Yu. V., Zhabin A. V., Pustovit O. E. Mineral'nyi sostav serpentinitov tektonicheskogo melanzha Dakhovskogo kristallicheskogo vystupa (Bol'shoi Kavkaz) [Mineral composition of serpentinites of tectonic melange of the Dakhovsky crystalline bulge (Greater Caucasus)]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii – Geology and geophysics of the South of Russia*, 2019, 9(4), pp. 38–48. (In Russ.)
14. *Osobennosti izucheniya i geologicheskogo kartirovaniya kollizionnykh granitoidov*. Pod red. N. V. Mezhelovskogo [Features of the study and geological mapping of collisional granitoids. edited by N.V. Mezhelovsky]. Moscow, Roskomnedra publ., 1992, 100 p. (In Russ.)
15. Zolotareva G. S., Nenakhov V. M. Aktsessornye mineraly i tipomorfizm tsirkonov granitov Dakhovskogo kristallicheskogo massiva (Zapadnyi Kavkaz) [Accessory minerals and typomorphism of zircons from granites of the Dakhovsky crystalline massif (Western Caucasus)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2006, no. 1, pp. 39–44. (In Russ.)
16. Lyakhovich V. V. *Aktsessornye mineraly v granitoidakh Sovetskogo Soyuza* [Accessory minerals in the granitoids of the Soviet Union.]. Moscow, Nauka publ., 1967, 488 p. (In Russ.)
17. *Fizicheskie svoistva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh. Spravochnik geofizika*. Pod red. N. B. Dortman [Physical properties of rocks and minerals. Geophysics Handbook. Ed. N.B. Dortman.]. Moscow, Nedra publ., 1984, 455 p. (In Russ.)
18. Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks. *J. Petrol*, 1984, vol. 25, no. 44, pp. 956–963.
19. Popov V. S. Petrologo-geokhimicheskaya model' formirovaniya orogennykh izvestkovo-shchelochnykh serii [Petrological-geochemical model of the formation of orogenic calc-alkaline series]. *Geokhimiya magmatizma* [Geochemistry of magmatism]. Moscow, Nauka publ., 1982, pp. 93–124. (In Russ.)
20. Popov V. S. Smeshenie magm – vazhnyi petrogeneticheskii protsess [Mixing of magmas - an important petrogenetic process]. *Zap. Vsesoyuzn. mineral. ob-va* [Notes of the All-Union Mineralogical Society.] 1984, vol. 2, pp. 229–240. (In Russ.)