

УДК 549.01, 552.13

Отражение петрологических закономерностей в минералогии тоналит-гранитов и диоритовых включений в них: сравнение гранитоидных массивов Урала и Альп

И. Р. Рахимов*, А. М. Васильев, А. А. Самигуллин

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия;
e-mail: rigel92@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-2402-9473>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
16.01.2026;

получена
после доработки
04.03.2026;

принята
к публикации
11.03.2026

Ключевые слова:

орогенные гранитоиды,
тоналиты,
диориты,
мафические включения,
минералогия

Гранитоидные массивы могут содержать разнообразные мафические включения (автолиты, ксенолиты, минглинг-дайки). Среди них преобладают включения пород семейства диоритов, визуально контрастирующих с вмещающими тоналит-гранитовыми ассоциациями, но имеющих близкий минеральный и химический состав. Проблема их происхождения дискуссионна, и даже применение комплекса современных прецизионных методов не всегда ее разрешает. Статья содержит петрографический, минералогический и геохимический обзор орогенных гранитоидов трех массивов из двух складчатых поясов мира: Адамелло (Южные Альпы), Ахунский (Южный Урал) и Шабровский (Средний Урал). Выбранные массивы сложены тоналитами и гранитами, в которых распространены однотипные угловатые и округлые диоритовые включения. Результаты показали, что все разновидности пород сложены одним и тем же набором минералов достаточно близкого состава (Ca-Na плагиоклаз, кварц, калиевый полевой шпат, биотит и амфибол), различаясь лишь их соотношениями между собой. Вариации составов минералов, в особенности биотита, амфибола и плагиоклаза, указывают на существенное влияние собственной флюидной фазы, выделявшейся в ходе кристаллизации водонасыщенного расплава. Использование амфибол-плагиоклазовых термобарометров показало, что кристаллизация захваченных диоритов и вмещающих тоналит-гранитов происходила в близких условиях (обычно в диапазоне 700–800 °С и давлении 2–4 кбар). Диоритовые включения являются автолитами, т. е. фрагментами либо раскристаллизованных пород (угловатые включения), либо захваченными порциями частично раскристаллизованного расплава (округлые включения) из нижней части единой интрузивной камеры. Закономерности их распределения и химического состава в матричных тоналит-гранитах и диоритовых включениях свидетельствуют об их генетическом единстве. Анализ бинарных диаграмм показал, что схожие закономерности изменения химического состава пород всех массивов указывают на однотипность хода их эволюции.

Для цитирования

Рахимов И. Р. и др. Отражение петрологических закономерностей в минералогии тоналит-гранитов и диоритовых включений в них: сравнение гранитоидных массивов Урала и Альп. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 180–216. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-180-216>.

Reflection of petrologic regularities in the mineralogy of tonalite-granites and diorite inclusions in them: Comparison of granitoid massifs of the Urals and the Alps

Ildar R. Rakhimov*, Andrey M. Vasiliev, Aidar A. Samigullin

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russia;
e-mail: rigel92@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-2402-9473>

Article info

Received
16.01.2026;

received
in revised form
04.03.2026;

accepted
11.03.2026

Key words:

orogenic granitoids,
tonalites,
diorites,
mafic inclusions,
mineralogy

Abstract

Orogenic granitoid massifs contain a variety of mafic inclusions (autoliths, xenoliths, mingling dikes). These include predominantly diorite-series inclusions, which visually contrast with the host tonalite-granite associations but have similar mineral and chemical compositions. The origin of these inclusions is controversial, and even the use of a range of modern precision methods does not always resolve the issue. The paper provides a petrographic, mineralogical, and geochemical review of orogenic granitoids from three massifs in two fold belts of the world: Adamello (Southern Alps), Akhun (Southern Urals), and Shabry (Middle Urals). The massifs are composed of tonalites and granites containing uniform angular and rounded diorite inclusions. The results obtained have shown that all rock varieties are composed of the same set of minerals of fairly similar composition (Ca-Na plagioclase, quartz, potassium feldspar, biotite, and amphibole), differing only in their ratios. Variations in mineral composition, particularly biotite, amphibole, and plagioclase indicate the significant influence of a fluid phase released during crystallization of a water-saturated melt. The use of amphibole-plagioclase thermobarometers has shown that the trapped diorites and host tonalite-granites crystallized under similar conditions (usually in the range of 700–800 °C and a pressure of 2–4 kbar). Diorite inclusions are autoliths, i. e., fragments of either crystallized rocks (angular inclusions) or trapped portions of partially crystallized melt (rounded inclusions) from the lower part of a single intrusive chamber. Patterns of their distribution and chemical composition in matrix tonalite-granites and diorite inclusions indicate their genetic unity. Patterns of change in the chemical composition of rocks of all massifs indicate a uniform course of their evolution. Binary diagrams show that similar geochemical patterns of rocks from all massifs indicate the uniformity of their evolutionary course.

For citation

Rakhimov, I. R. et al. 2026. Reflection of petrologic regularities in the mineralogy of tonalite-granites and diorite inclusions in them: Comparison of granitoid massifs of the Urals and the Alps. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 180–216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-180-216>.

Введение

Тоналиты, гранодиориты, трондьемиты, адамеллиты и биотитовые граниты широко распространены в различных складчатых поясах, чаще всего проявляясь в син- и постколлизийных тектонических обстановках (Прибавкин и др., 2011; Kumar, 2020; Холоднов и др., 2021; Yang et al., 2025), или окраинно-континентальной обстановке (Феритатер, 1994; Феритатер и др., 1996; Прибавкин, 2000). В качестве их источников обычно рассматриваются либо породы верхней мантии, либо нижней части континентальной коры. В этих гранитоидных массивах практически всегда и нередко в большом количестве встречаются мафические включения, представленные гранодиоритами, диоритами, монцонитами и даже габбро, клинопироксенитами и горнблендитами (Прибавкин и др., 1998). Такие включения имеют различную морфологию (от мелких угловатых и округлых сантиметровых фрагментов до крупных многометровых блоков или жил) и поэтому интерпретируются по-разному. Их рассматривают как ксенолиты, автолиты, продукты магматического минглинга (Chen et al., 1990; Прибавкин и др., 1998; Lindline et al., 2004; Валуи, 2012; Каллистов и др., 2017; Владимиров и др., 2019). Таким образом, генезис мафических включений в гранитоидах рассматривается с разных петрологических позиций, даже в отношении однотипных включений.

В статье рассматриваются однотипные угловатые и округлые мелкие и средние по размерам (сантиметровые и в десятки сантиметров) мафические включения (из семейства диоритов) из трех разных массивов Урала и Альп (Адамелло, Ахуновский и Шабровский) с целью интерпретации их происхождения по результатам исследования их минерального и химического составов (рис. 1, а–г).

Региональная геология

Массив Адамелло

Массив (батолит площадью ~670 км²) приурочен к зоне сочленения синколлизийных региональных разломов Тонале (Периадриатический) и Южная Джудикария (Relvini et al., 2022), размещаясь в вулканитах, парагнейсах, сланцах и доломитах раннего кайнозоя. В строении этого крупного массива (рис. 1, в) выделяют как минимум 4 тоналитовых плутона (с севера на юг – Пресанелла, Авио, Адамелло, Ре ди Каstellо) и 2 ультрамафит-габбровых комплекса (Валь Фредда и Блюмоне) (Schoene et al., 2012). Иногда от Ре ди Каstellо отделяют самостоятельный плутон Корно Альто (Relvini et al., 2022). Все тоналиты объединены в комплекс Лаго делла Вакка. Возрастные ограничения для пород массива Адамелло получены Rb-Sr изохронным методом (по биотиту и мусковиту) (Schoene et al., 2012) и U-Pb методом по циркону (Relvini et al., 2022): наиболее древним является плутон Корно Альто – 43 млн лет, далее плутон Ре ди Каstellо – 42–39 млн лет, затем плутон Адамелло – 38–36 млн лет и, наконец, плутон Авио – 36–34 млн лет. Внедрение этих тоналитов связывают с тектонической перестройкой региона, когда син-субдукционное растяжение сменилось синколлизийным сжатием (Relvini et al., 2022).

Ахуново-Карагайский массив

Массив имеет грушевидную в плане форму (площадь ~260 км²) и расположен в западной части крупного габбро-гранитного Ахуново-Петропавловского батолита (рис. 1, г). В структурном отношении приурочен к Гумбейской подзоне Магнитогорского островодужного террейна, сложенной вулканогенно-осадочными породами среднего девона. Северо-западный контакт Ахуновского массива тектонический, отвечающий надыгу с восточным падением (Жданов и др., 2003). Часто северная и южная части рассматриваются как отдельные Ахуновский (северный) и Карагайский (южный) массивы, но принадлежащие к единому двухфазному ахуново-карагайскому гранитоидному комплексу (Холоднов и др., 2021). По данным этих авторов, Ахуновский массив (вероятно, правильнее называть Ахуновским плутоном в составе единого Ахуново-Карагайского массива) представлен адамеллитами, гранодиоритами и плагиогранитами, тогда как Карагайский (плутон) – биотитовыми гранитами и адамеллитами. Возраст гранодиоритов и адамеллитов Ахуновского плутона определен U-Pb методом по циркону 310 ± 2 и $308 \pm 4,4$ млн лет (Холоднов и др., 2021).

Шабровский массив

Массив имеет полукруглую в плане форму (площадь ~50 км²), окружен вулканогенно-осадочными и метаморфическими толщами кунгурковской свиты нижнего девона и находится в контакте с Уктусским габбро-гипербазитовым массивом (рис. 1, б). Западный контакт Шабровского массива с вмещающими толщами тектонический, а восточный – интрузивный, сопровождаемый приконтактовыми роговиками. По данным (Прибавкин, 2000) матричные породы массива достаточно однородны и сложены порфировидными гранодиоритами и гранитами, но распределение и разнообразие мафических включений в них неоднородно (Прибавкин и др., 1998). Возраст пород Шабровского массива определялся K-Ar изохронным методом и U-Pb конкордантным методом по циркону (Прибавкин и др., 2011): K-Ar – 229–288 млн лет для гранитоидов и 264–334 млн лет для мафических включений; U-Pb – 300–306 млн лет для гранитоидов и 305–306 млн лет для мафических включений. По результатам изучения вещественного состава и радиологического возраста сделан вывод о синколлизийной природе Шабровского массива (Прибавкин и др., 2011).

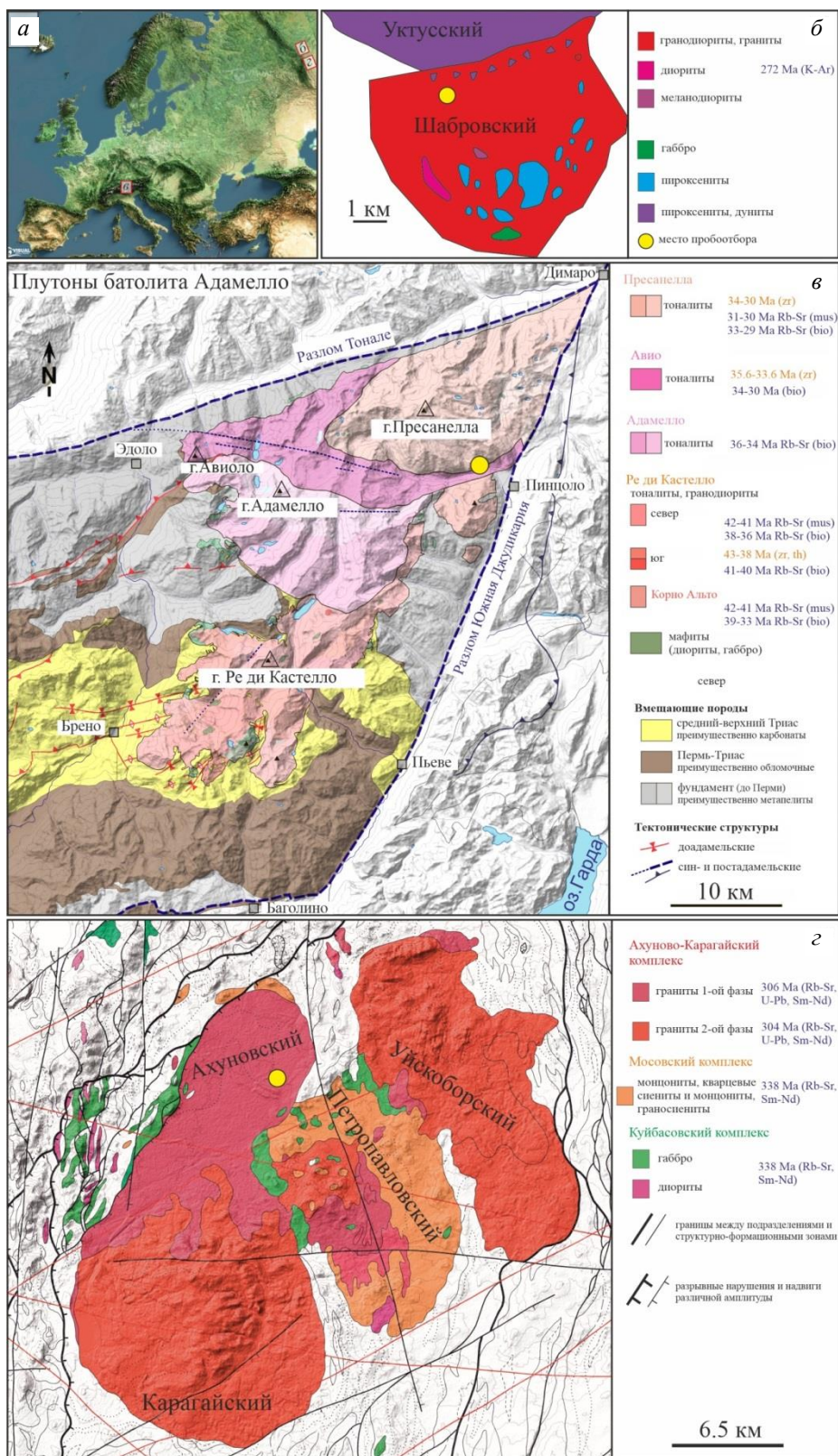


Рис. 1. Обзорная карта Евразии (а) и геологическое строение районов залегания тоналит-гранитовых массивов Шабровский (Прибавкин, 2000) (б), Адамелло (Schoene et al., 2012) (в) и Ахуново-Карагайский¹ (z)

Fig. 1. Overview of Eurasia (a) and the geological structure of the areas of occurrence of the tonalite-granite massifs Shabry (Pribavkin, 2000) (б), Adamello (Schoene et al., 2012) (в), and Akhuno-Karagay (z)

¹ Жданов А. В., Ободов В. А., Макарьев Л. Б. Матюшков А. Д. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XVIII (Учалы). Объяснительная записка. М. : Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2018. 386 с.

Материалы и методы

Образцы. Полевые геологические исследования

Изучены образцы визуально однотипных гранитов и гранодиоритов из трех массивов. Массив Адамелло (Южные Альпы) опробован из гигантских валунов и глыб по р. Рива ди Женова, относящихся к плутону Авио близ границы с плутоном Пресанелла. Ахуновский плутон (Южный Урал) опробован из керна скважины, пробуренной в северной части интрузии, глубина отбора в диапазоне 15–20 м. Шабровский массив (Средний Урал) опробован из механически вскрытого склона близ нефтебазы г. Шабры.

Оптическая и сканирующая электронная микроскопия

Оптическая микроскопия с петрографическим описанием пород проведена на поляризационном микроскопе Altamí Polar 3 в Институте геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (ИГ УФИЦ РАН, Уфа, Республика Башкортостан) для 19 образцов.

Электронная микроскопия с микрорентгеноспектральным анализом проведена в ИГ УФИЦ РАН для 10 образцов (А-1, А-3, А₂₅-1, А₂₅-2, А₂₅-3, А₂₅-4, Е₂₅-1, Е₂₅-2, Е₂₅-3, Е₂₅-4) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact, оснащенный ЭДС-детектором Oxford Energy. При съемке напряжение составляло 20 кВ, ток зонда 3.7–4 нА. Химические составы минералов (амфибол, биотит, Са-Na-K полевой шпат, эпидот, хлорит) представлены в таблицах 1, 2, 3, 4, 5 (Приложение).

Рентгенофлуоресцентный анализ

Химический состав 13 образцов определялся при помощи рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Xenometrix X-Calibur в ИГ УФИЦ РАН. Пределы обнаружений для петрогенных элементов составляли от 0,01 до 0,02 мас.%, для V, Ni и Cr – в диапазоне 5–10 г/т. Для построения калибровочных графиков использовались аттестованные государственные образцы магматических пород.

Результаты исследований

Петрография и минералогия

Изученные образцы из трех массивов представлены тоналитами, диоритами, гранитами и лейкогранитами массивной текстуры, а в Шабровском массиве характерно порфириновидное строение пород. Тоналиты являются матричными породами для массивов Адамелло и Ахуновский, а граниты – для Шабровского массива. Мафические включения в них имеют угловатую, угловато-округлую и округлую форму, размер их варьирует от нескольких сантиметров до десятков сантиметров (рис. 2). Наиболее обильные и разнообразие по форме включения наблюдались в тоналитах массива Адамелло (рис. 1, а–з). Согласно классификационным треугольным диаграммам, построенным на основе петрографического описания (рис. 3, а) и нормативного CIPW пересчета (рис. 3, б), мафические включения в основном соответствуют кварцевому диориту, в одном случае – кварцевому монцодиориту. В Ахуновском плутоне тоналиты более типичные, чем в массиве Адамелло, где они смещены к границе с кварцевым диоритом. В поле гранита попадают образцы матричных пород Шабровского массива и жильный лейкогранит Ахуновского массива.

Минеральный состав матричных пород довольно однообразен, но в массиве Адамелло они относительно обеднены рудными фазами по сравнению с другими массивами. Выявлены свежие и метасоматизированные разновидности пород, в особенности в образцах Ахуновского плутона (А₂₅-1, А₂₅-4) с полностью замещенным биотитом, чаще на границе лейкогранита с тоналитом. В породах всех массивов по плагиоклазу и калиевому полевому шпату (КПШ) развиты вторичные агрегаты (обычно сосюрит). Ниже представлено более подробное минералогическое описание образцов каждого массива. Представительные анализы породообразующих минералов (полевых шпатов, биотита и амфибола) отражены в таблицах Приложения.

Массив Адамелло, плутон Авио

Тоналиты плутона Авио из массива Адамелло (рис. 4, а) имеют следующий минеральный состав (в порядке количественного убывания): Na-Са плагиоклазы (55–60 %), кварц (12–17 %), биотит (7–12 %), роговая обманка (3–7 %), КПШ (< 1 %), эпидот (< 0,5 %), хлорит (< 0,5 %), титанит (< 0,05 %), апатит (< 0,05 %), мусковит (< 0,05 %), магнетит (< 0,05 %), ильменит (< 0,05 %), циркон (< 0,01 %), бастнезит-Се (< 0,01 %).

Диориты из мафических включений (рис. 4, б, в) в тоналитах имеют следующий минеральный состав: Na-Са плагиоклазы (43–47 %), биотит (17–23 %), роговая обманка (3–8 %), кварц (3–5 %), КПШ (< 2 %), эпидот (< 0,5 %), хлорит (< 0,5 %), апатит (< 0,05 %), пренит (< 0,05 %), магнетит (< 0,05 %), ильменит (< 0,05 %), бастнезит-Се (< 0,01 %).

Кварц в тоналитах образует интерстиционные ксеноморфные зёрна размером до 0,55×2 мм и тонкие выделения по трещинам в полевых шпатах. В диоритах дополнительно встречается еще одна морфологическая группа зерен кварца – мелкие ксеноморфные включения с округлым сечением в биотите.

Калиевый полевой шпат в тоналите встречается в виде изометричных и таблитчатых кристаллов размером до 0,7×1,4 мм. Замещение вторичными силикатами происходило от центра к краю зерен, по трещинам развит эпидот. В диорите КПШ представлен двумя морфологическими разновидностями зерен: 1) идиоморфными изометричными размером в среднем 0,3×0,3 мм; 2) ксеноморфными, иногда образующими скопления, размер их до 0,1 мм. Состав не изучен.

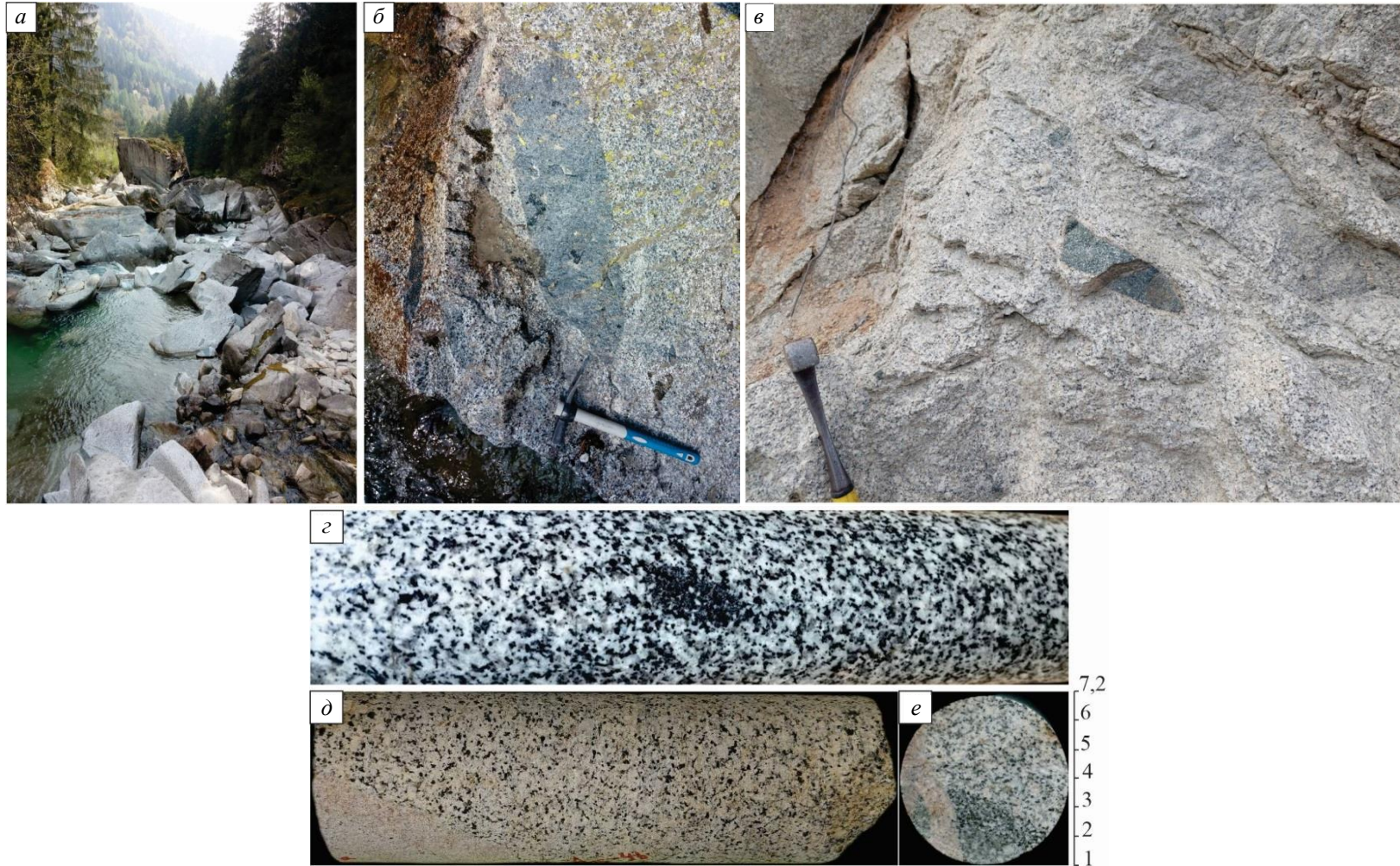


Рис. 2. Вид обнажений и kernового материала гранитоидов массивов Адамелло (*a, б*), Шабровский (*в*) и Ахуновский (*г-е*): *a* – глыбы и мачины тоналитов вдоль р. Рива ди Женова; *б* – угловато-округлое диоритовое включение в тоналите; *в* – вскрытый разрез гранитов с угловатыми и округлыми включениями гранодиоритов; *г* – тоналит с включением диорита; *д* – тоналит с жилой лейкогранита; *е* – жила лейкогранита, секущая тоналит и диоритовое включение в нем

Fig. 2. View of outcrops and kern material of granitoids of the Adamello (*a, б*), Shabry (*в*) and Akhun (*г-е*) massifs:
a – tonalite blocks and machinas along the Riva di Genova; *б* – angular-rounded diorite inclusion in tonalite; *в* – exposed section of granites with angular and rounded inclusions of granodiorites; *г* – tonalite with diorite inclusion; *д* – tonalite with a leucogranite vein; *е* – leucogranite vein cutting a tonalite and a diorite inclusion in it

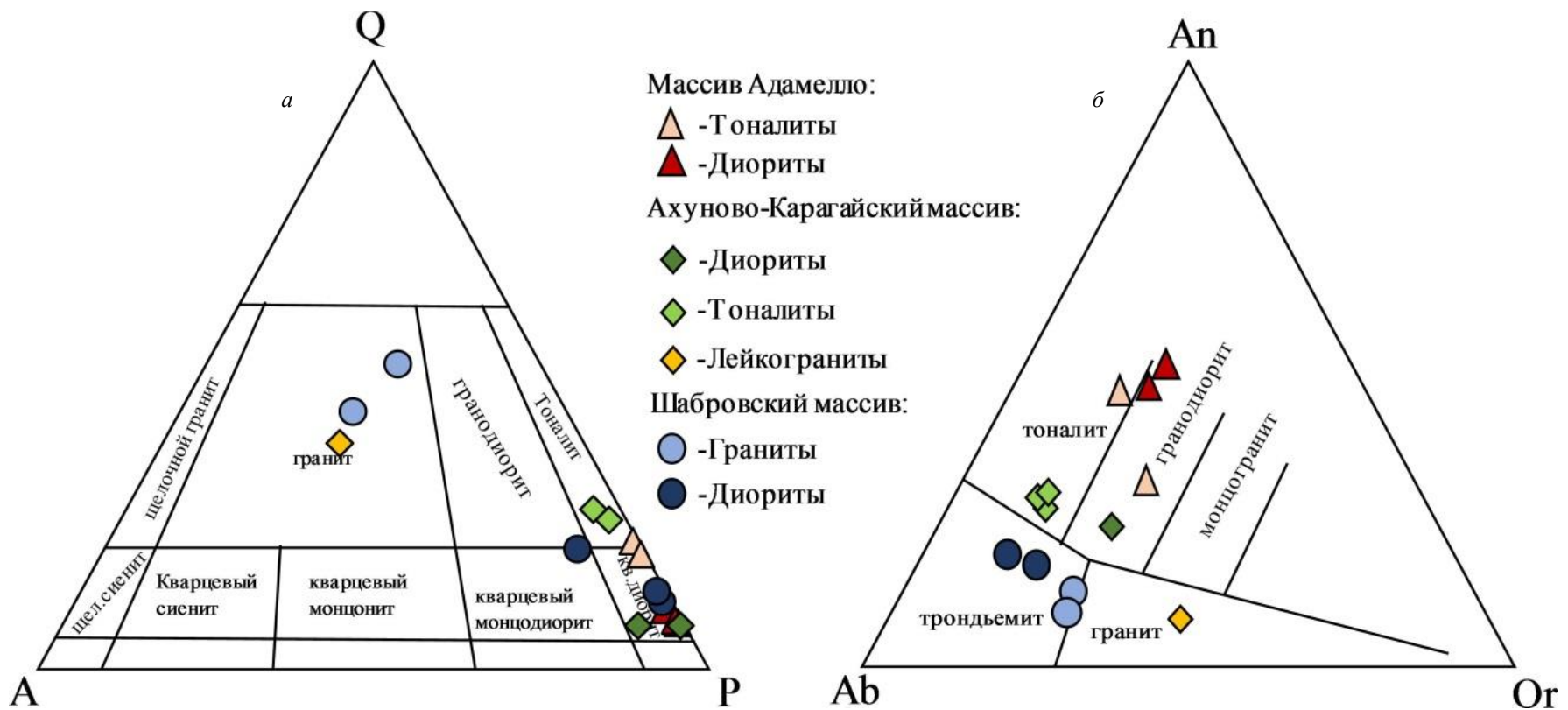


Рис. 3. Классификационные диаграммы: *a* – Q–A–P (кварц – калиевый полевой шпат – плагиоклаз) (Streckeisen, 1976); *б* – An–Ab–Or (нормативный пересчет) (O'Connor, 1965) для пород гранитоидных массивов Адамелло, Ахуновский и Шабровский

Fig. 3. Classification diagrams: *a* – Q–A–P (quartz – potassium feldspar – plagioclase) (Streckeisen, 1976); *б* – An–Ab–Or (normative) (O'Connor, 1965) for rocks of the Adamello, Akhun and Shabry granitoid massifs

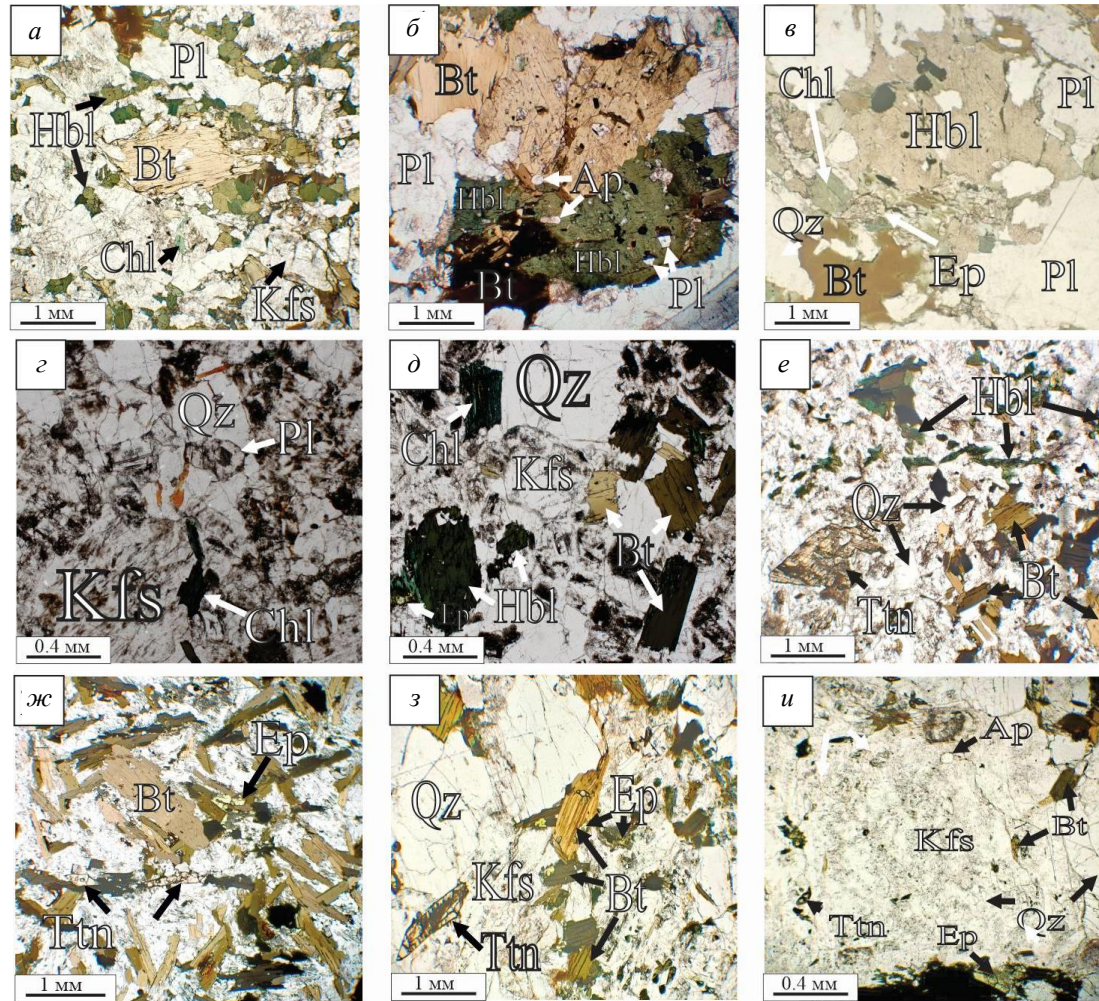


Рис. 4. Микрофотографии пород гранитоидных массивов Адамелло (а-в), Ахунувский (з-е) и Шабровский (ж-и): а – тоналит; б – биотит-амфиболовый сросток в диорите; в – диорит; з – лейкогранит; д – тоналит; е – кварцевый диорит; ж – диорит; з – гранит; и – вкрапленник калиевого полевого шпата в граните.

Bt – биотит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Hbl – роговая обманка, Kfs – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Ttn – титанит

Fig. 4. Photomicrographs of rocks from the Adamello (a–v), Akhun (z–e), and Shabry (zh–i) granitoid massifs: a – tonalite; б – biotite-amphibole intergrowth in diorite; в – diorite; з – leucogranite; д – tonalite; е – quartz diorite; ж – diorite; з – granite; и – potassium feldspar phenocryst in granite. Bt – biotite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Hbl – hornblende, Kfs – potassium feldspar, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Ttn – titanite

Плагиоклаз и в тоналите, и в диорите представлен тремя морфологическими типами зерен: 1) ксеноморфными округлого сечения с прямой зональностью, в которых центральная часть и кайма замещены соссюритовой массой, размер зерен $0,55 \times 0,6$ мм; 2) лейсты с закругленными краями (овальным сечением) размером обычно $0,2 \times 0,5$ мм в тоналите и $0,25 \times 0,7$ мм в диорите; 3) мелкими ксеноморфными включениями в биотите, иногда совместно с кварцем. В диорите второй тип зерен преобладает. По трещинам зерен часто развит хлорит. По составу плагиоклазы из тоналита и диорита полностью перекрываются, ложась на поля андезина, лабрадора и битовнита (рис. 7, а). Между разными морфологическими типами зерен не обнаруживается различия по составу. Диапазон содержаний анортитового минала в тоналите 33,35–74,55 мол.%, а в диорите 44,51–74,48 мол.%. Наиболее богаты анортитом включения плагиоклаза в биотите. В плагиоклазе стабильно присутствует примесь железа: 0,13–0,31 мас.% FeO из тоналита и 0,11–0,33 % из диорита (табл. 3, Приложение).

Биотит является главным темноцветным минералом в образцах Адамелло. Образует субидiomорфные чешуйчатые выделения красно-коричневой окраски со средним размером 1,7 мм в тоналите и 0,6 мм в диорите. Часто характерны сростания зерен с разной ориентировкой. Во многих из них обильны включения кварца, плагиоклаза и роговой обманки. Нередко по биотиту развит хлорит, образующий полные или чаще частичные псевдоморфозы, иногда хлорит присутствует по трещинам спайности и краям с оторочкой до 0,1 мм. Также по краям развит эпидот. Составы биотита из тоналита и диорита на классификационной диаграмме полностью перекрываются (рис. 7, б). Содержание Mg# ($Mg/(Mg+Fe^{2+})_{\text{формул.коэф}}$) составляет 0,48–0,55 в биотите из тоналита и 0,46–0,53 в биотите из диорита. Содержание TiO_2 в биотите из тоналита варьирует в пределах 0,92–3,75 мас.% (до 0,422 ф.е.), в биотите из диорита – 2,00–4,43 мас.% (до 0,456 ф.е.) (табл. 2, Приложение).

Амфибол в тоналите образует зерна таблитчатого облика, но с неровными границами размером до 2 мм. В диорите минерал представлен двумя морфологическими разновидностями зерен: 1) идиоморфными призматическими (с ромбовидным сечением) размером $0,3 \times 1$ мм; 2) ксеноморфными с округлым сечением, размер до 0,2 мм, часто образуют скопления-сростки. Минерал плеохроитует от зеленого к светло-бурому. На классификационных диаграммах (рис. 7, в, г) составы амфибола из тоналита и диорита характеризуются едиными трендами от магнезиогастингсита к ферроэдентиту и магнезиогорнблендита к актинолиту. Содержание Mg# сильно варьирует: от 0,44 до 0,74 (0,63 в среднем) в амфиболе из тоналита и от 0,47 до 0,79 (0,63 в среднем) в амфиболе из диорита. Содержание TiO_2 в амфиболе из тоналита варьирует в пределах 0,60–3,51 мас.% (до 0,402 ф.е.), а в амфиболе из диорита – 0,17–1,41 мас.% (до 0,151 ф.е.) (табл. 1, Приложение). Несмотря на значительные вариации ясной зональности в зернах не выявлено, наблюдается незаконномерное пятнистое распределение максимумов и минимумов по содержаниям элементов и индексов.

Эпидот и в тоналите, и в диорите представлен тремя морфологическими типами выделений: 1) тонкие, заполняющие трещины в калиевом полевоом шпате и кварце; 2) ксеноморфные агрегаты замещения размером до 0,2 мм по краям кристаллов амфибола (в тоналите) и биотита (в диорите), часто в ассоциации с хлоритом; 3) крупные угловатые ксеноморфные зерна размером до 2,2 мм в тоналите и до 0,6 мм в диорите, в сростании с амфиболом и полевыми шпатами (рис. 5, а). Первые два типа отвечают по составу клиноцоизиту и эпидоту (рис. 8, а), которые формировались на постмагматической стадии. Третий тип представлен алланитом (ΣREE от 0,564 до 0,682 ф.е.) и редкоземельным эпидотом (ΣREE до 0,220 ф.е.), и, по всей видимости, отвечает магматической стадии. Химический состав см. в табл. 4 (Приложение).

Хлорит в тоналите и диорите образует частичные псевдоморфозы по биотиту (до половины объема зерна, обычно по краям), а также замещает по трещинам роговую обманку (в основном в диорите). Размеры выделений до 0,1 мм. На классификационной диаграмме (рис. 8, б) составы хлорита распределяются в основном в поле рипидолита и незначительно в полях пикнохлорита и диабантина. Химический состав см. в табл. 5 (Приложение).

Рудные минералы – титанит, магнетит, ильменит. Первый развит только в тоналите, остальные – и в диорите тоже. **Титанит** представлен тремя морфологическими типами зерен: 1) мелкими идиоморфными размером до 0,01 мм; 2) ксеноморфными выделениями размером до 0,01 мм по трещинам спайности в биотите, обычно в сростании с хлоритом (рис. 6, а); 3) в виде кайм замещения зерен ильменита, размер выделений до 0,05 мм (рис. 6, а). По составу между этими типами различий практически нет, характерна примесь Al (Al_2O_3 1,14–1,84 мас.%). **Магнетит** образует мелкие кристаллы октаэдрической формы размером до 0,3 мм, а также округлые, более мелкие зерна. **Ильменит** представлен мелкими идиоморфными кристаллами в виде включений до 0,2 мм в биотите (тоналит) (рис. 6, а) и амфиболе (диорит), до 0,1 мм, но также ильменит встречается в виде свободных ксеноморфных зерен в интерстициях (в основном в диорите).

Апатит является характерным аксессуарным минералом пород, представленным шестоватыми кристаллами (дипирамидальными) длиной до 0,4 мм. Часто находится в виде включений в зернах биотита и амфибола. В диорите размер кристаллов мельче. По соотношению F-Cl-OH апатит отвечает в основном гидроксилapatиту (OH 0,911–1,173 ф.е., F 0,65–0,999 ф.е., Cl 0–0,176 ф.е.). Содержание F варьирует в пределах 0,65–1,04 мас.% в тоналите и 0,63–0,99 % в диорите, а Cl 0,0п–0,18 % в тоналите и 0,0п–0,09 % в диорите.

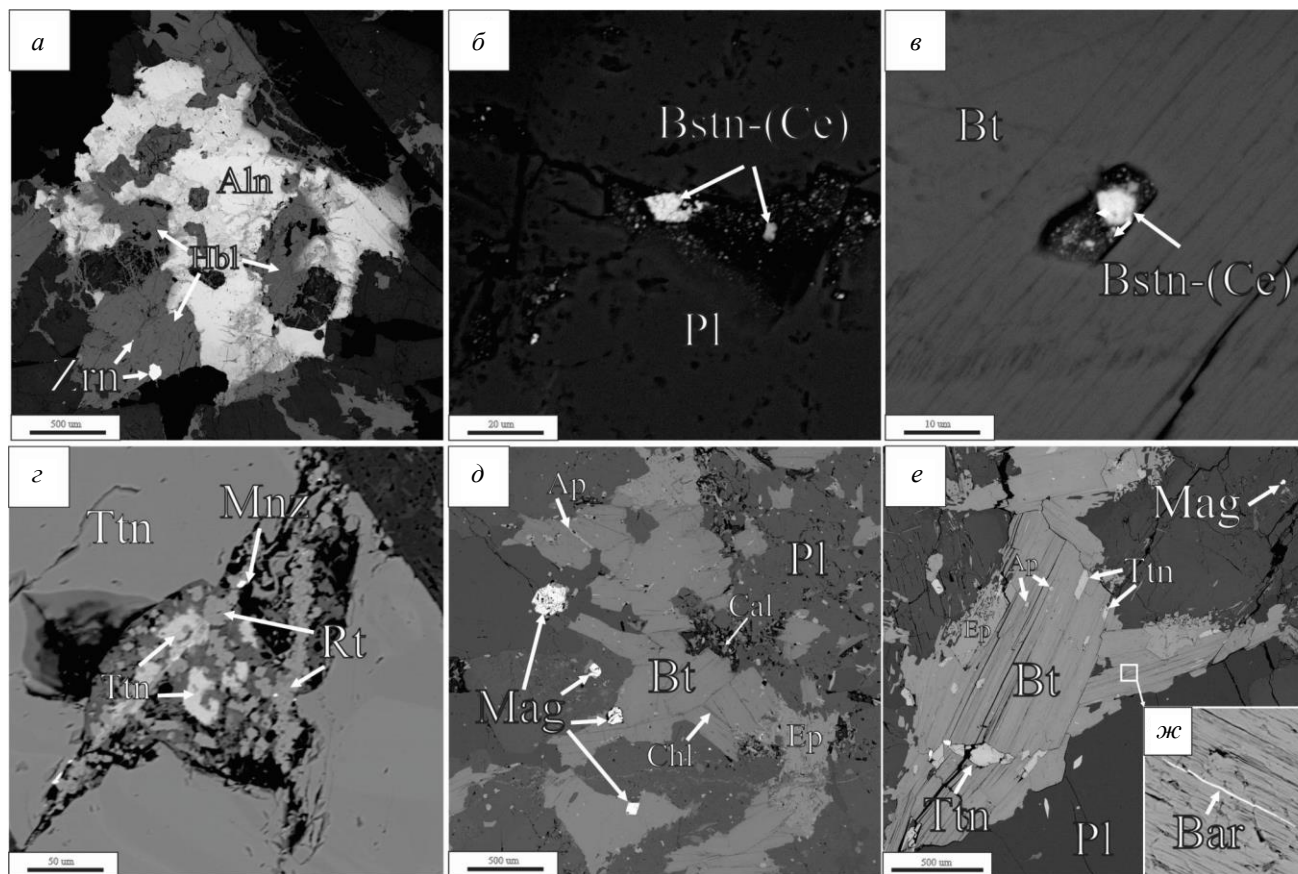


Рис. 5. BSE-изображения минералов гранитоидных массивов Адамелло (а-в), Ахунувский (г, д) и Шабровский (е, ж): а – выделение алланита в сростании с амфиболом; б – зерно бастнезита-(Ce) в трещине плагиоклаза; в – включение бастнезита-(Ce) в биотите; г – агрегаты замещения титанита; д – зерна магнетита в ассоциации с биотитом; е – включения титанита в биотите; ж – прожилок барита в трещине биотита. Aln – алланит, Ap – апатит, Bar – барит, Bstn-(Ce) – бастнезит-(Ce), Bt – биотит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Mag – магнетит, Mnz – монацит, Pl – плагиоклаз, Rt – рутил, Ttn – титанит, Zrn – циркон

Fig. 5. BSE images of minerals from the Adamello (a–c), Akhun (g, d) and Shabry (e, ж) granitoid massifs: a – allanite intergrowth with amphibole; б – bastnaesite-(Ce) grain in a plagioclase crack; в – bastnaesite-(Ce) inclusion in biotite; г – titanite replacement aggregates; д – grains of magnetite in association with biotite; е – inclusions of titanite in biotite; ж – barite veinlets in a biotite crack. Aln – allanite, Ap – apatite, Bar – barite, Bstn-(Ce) – bastnaesite-(Ce), Bt – biotite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Mag – magnetite, Mnz – monazite, Pl – plagioclase, Rt – rutile, Ttn – titanite, Zrn – zircon

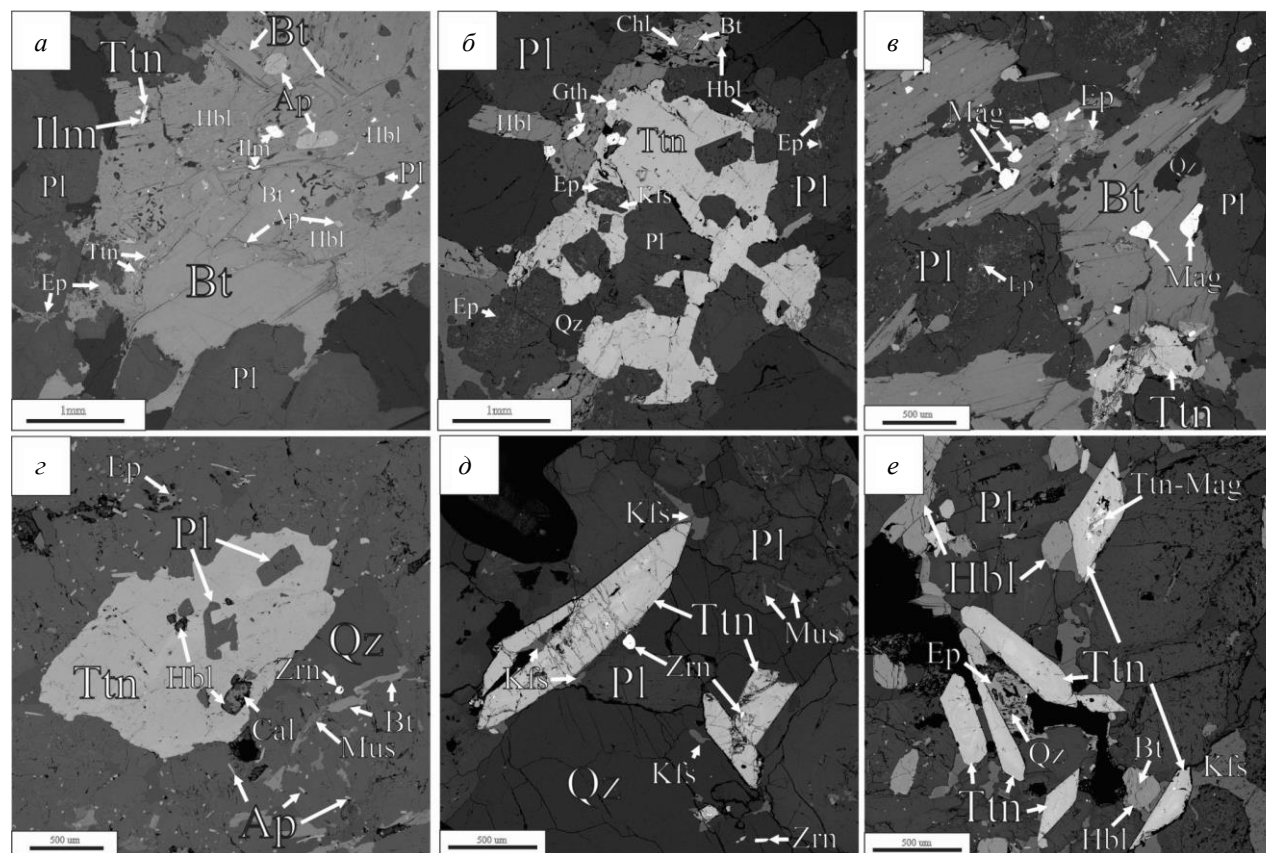


Рис. 6. BSE-изображения минералов гранитоидных массивов Адамелло (а), Ахунувский (б-г) и Шабровский (д, е): а – включения апатита, ильменита, титанита в биотите; б – ойкокрст титанита; в – сросток титанита и биотита с включениями магнетита; г – титанит с включениями плагиоклаза и амфибола; д – идиоморфные кристаллы титанита в ассоциации с цирконом; е – идиоморфные кристаллы титанита с включениями магнетита. Ap – апатит, Bt – биотит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Hbl – роговая обманка, Ilm – ильменит, Kfs – калиевый полевой шпат, Mag – магнетит, Mus – мусковит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Ttn – титанит, Zrn – циркон

Fig. 6. BSE images of minerals from the Adamello (a), Akhun (b-c), and Shabry (d, e) granitoid massifs: a – inclusions of apatite, ilmenite, and titanite in biotite; b – titanite oikocryst; c – intergrowth of titanite and biotite with magnetite inclusions; d – titanite with plagioclase and amphibole inclusions; e – euhedral titanite crystals in association with zircon; f – euhedral titanite crystals with magnetite inclusions. Ap – apatite, Bar – barite, Bstn-(Ce) – bastnaesite-(Ce), Bt – biotite, Cal – calcite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Hbl – hornblende, Ilm – ilmenite, Kfs – potassium feldspar, Mag – magnetite, Mus – muscovite, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Ttn – titanite, Zrn – zircon

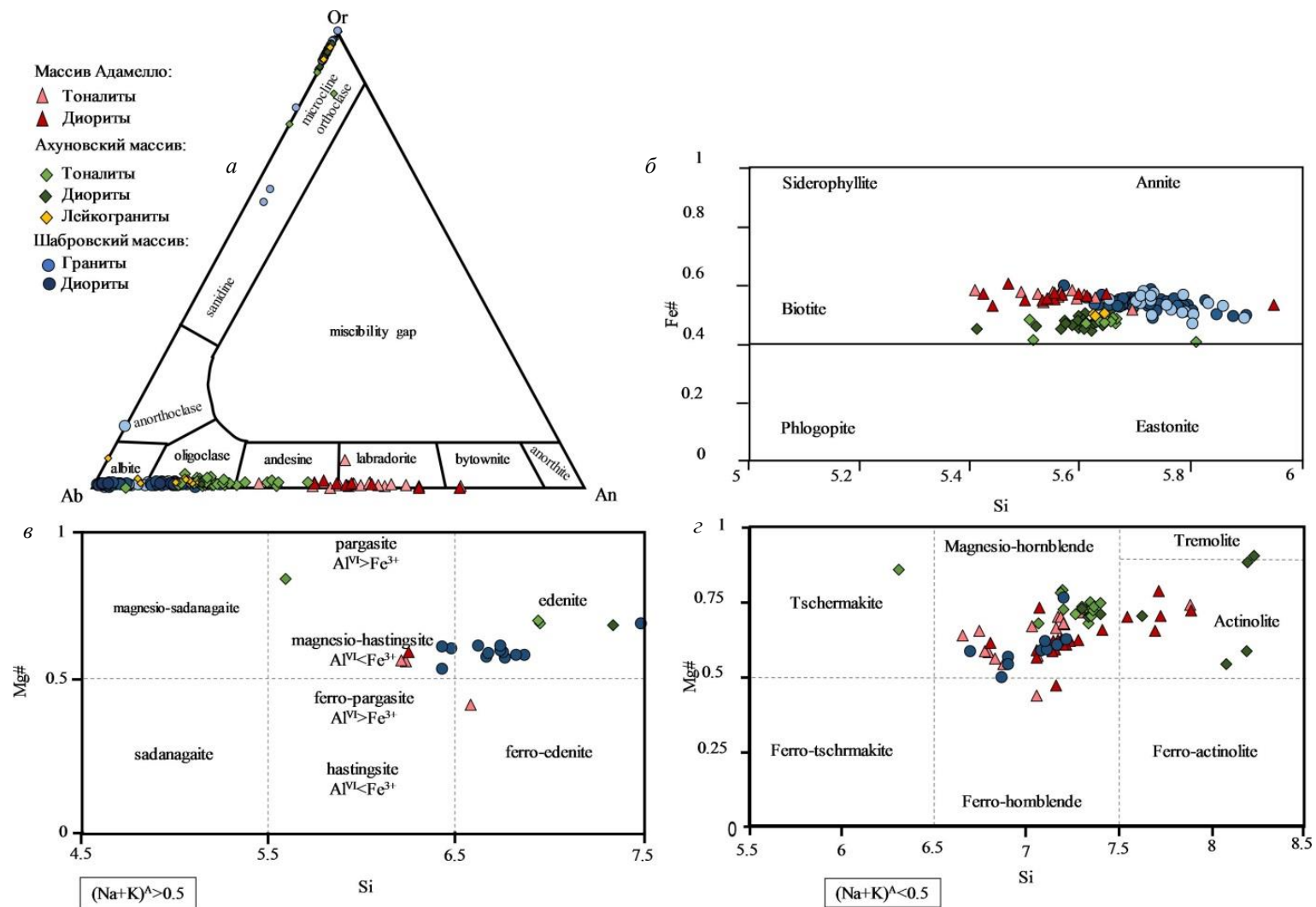


Рис. 7. Классификационные диаграммы для породообразующих минералов гранитоидных массивов Адамелло, Ахуновский и Шабровский: а – Or–Ab–An для полевого шпата (Deer et al., 1992); б – Fe#–Si для биотита (Nachit et al., 2005); в и з – Si–Mg# для амфибола (Leake et al., 1997)

Fig. 7. Classification diagrams for rock-forming minerals of the Adamello, Akhun, and Shabry granitoid massifs: а – Or–Ab–An for feldspar (Deer et al., 1992); б – Fe#–Si for biotite (Nachit et al., 2005); в and з – Si–Mg# for amphibole (Leake et al., 1997)

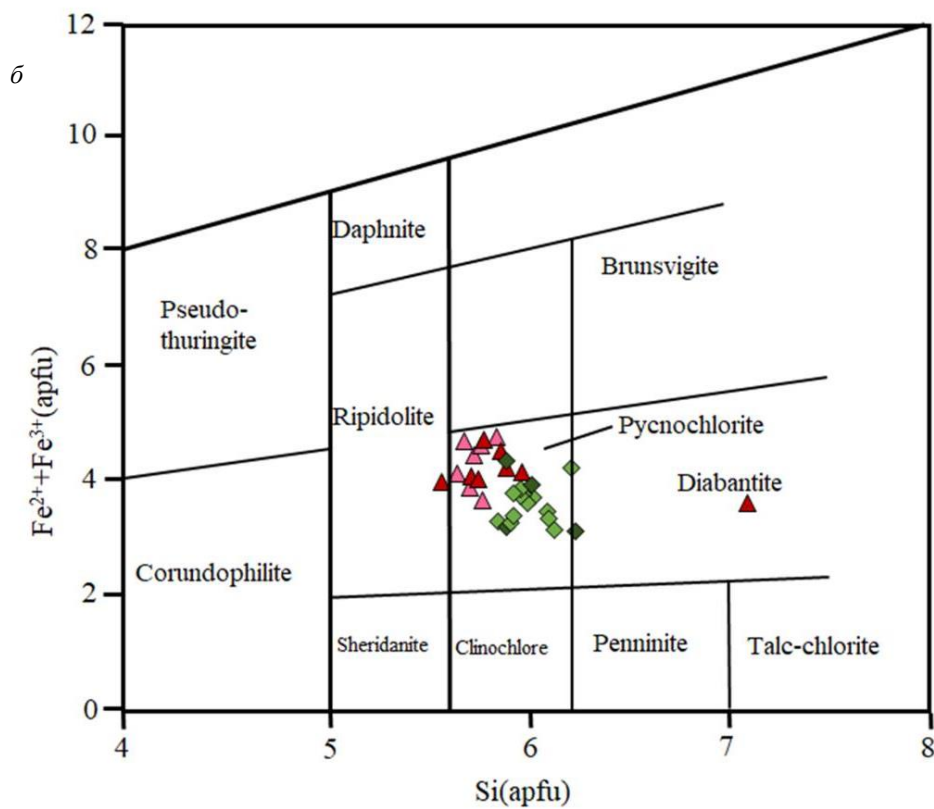
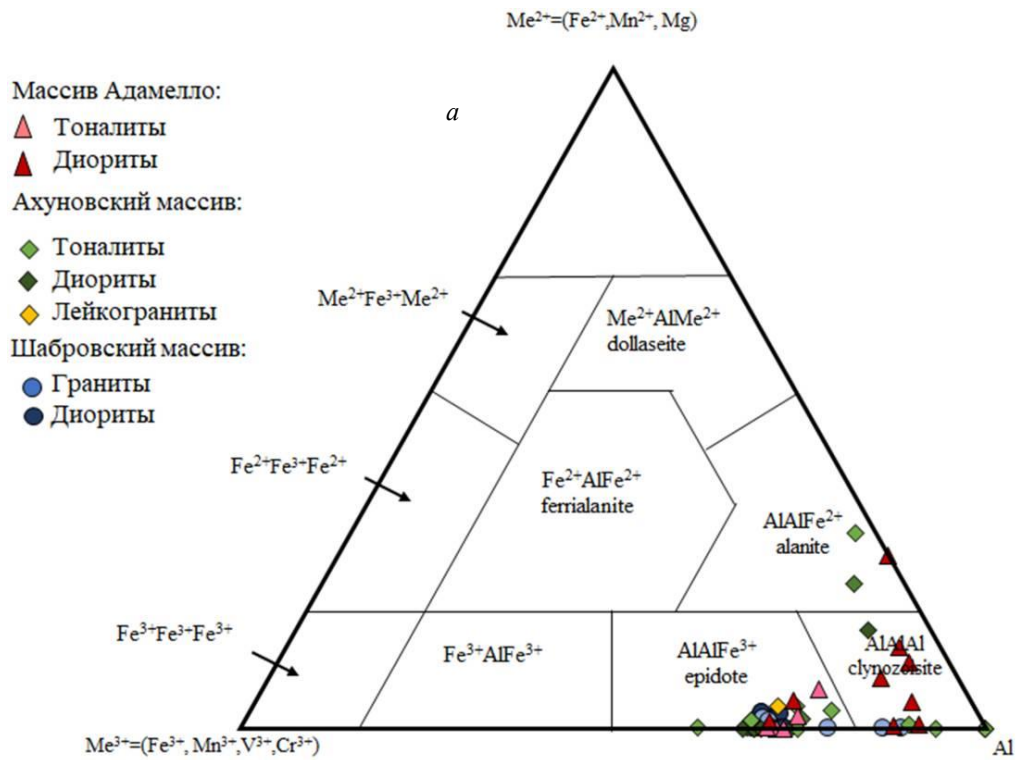


Рис. 8. Классификационные диаграммы для минералов надгруппы эпидота (Kartashov, 2014) (а) и хлорита (Hey, 1954) (б)
 Fig. 8. Classification diagrams for minerals of the epidote supergroup according to (Kartashov, 2014) (a) and chlorite according to (Hey, 1954) (b)

Среди прочих минералов в незначительном количестве отмечаются мусковит, циркон, бастнезит-Се, пренит. **Мусковит** обычно частично замещает биотит. **Циркон** встречен только в тоналите, наиболее крупные идиоморфные включения дипирамидальной формы размером до 0,1 мм находятся в роговой обманке (рис. 5, а). Иногда встречается в апатите в виде мелких ксеноморфных округлых включений. **Бастнезит-Се** обнаружен в виде мелкодисперсной массы в трещинах зерен плагиоклаза и биотита (рис. 5, б, в). **Пренит** представлен скоплениями размером до 1,5 мм мелких ксеноморфных зерен в интерстициях зерен КПШ.

Ахуново-Карагайский массив, Ахуновский плутон

Согласно имеющейся выборке наибольшее петрографическое разнообразие среди изученных массивов характерно для Ахуновского плутона, где выявлены следующие типы пород: 1) лейкогранит (аплит) с аллотриоморфнозернистой структурой, образующий жильные тела (рис. 4, з); 2) тоналит с гранитовой структурой (матричная порода) (рис. 4, д); 3) мелкозернистый диорит в виде мафических включений в тоналите (рис. 4, е).

Тоналиты имеют следующий минеральный состав: Na-Ca плагиоклазы (45–50 %), кварц (15–20 %), биотит (7–10 %), роговая обманка (2–3 %), КПШ (1–3 %), титанит (0,5 %), магнетит (< 0,5 %), апатит (< 0,5 %), эпидот (< 0,5 %), хлорит (< 0,5 %), мусковит (< 0,1 %), циркон (< 0,01 %).

Диориты из мафических включений обладают следующим минеральным составом: Na-Ca плагиоклазы (55–60 %), биотит (22–27 %), роговая обманка (7–12 %), кварц (3–5 %), КПШ (0–5 %), эпидот (< 0,5 %), магнетит (< 0,1 %), апатит (< 0,1 %), титанит (до 1–2 %), кальцит (< 0,1 %), хлорит (< 0,5 %), мусковит (< 0,05 %), циркон (< 0,01 %).

Лейкократовый гранит (аплит), близкий к аляскиту (в обр. А₂₅-1 и А₂₅-4) Ахуново-Карагайского батолита, имеет следующий минералогический состав: кварц (32–37 %), КПШ (31–36 %), Na-Ca плагиоклазы (13–23 %), биотит (до 3 %), роговая обманка (до 1 %), апатит (< 0,5 %), эпидот (< 0,5 %), хлорит (< 0,5 %), гетит (< 0,05 %), магнетит (< 0,05 %), мусковит (< 0,05 %).

Кварц в указанных породах морфологически однотипен. Зерна ксеноморфны, образуют сложные срастания с полевыми шпатами, размер кристаллов кварца до 1,6 мм в тоналитах и аплите, в диорите он значительно мельче и не превышает 0,1 мм, также встречаются округлые зерна минерала, иногда образует включения в КПШ, плагиоклазе, роговой обманке, биотите.

Калиевый полевой шпат представлен идиоморфными изометричными и субидиоморфными вытянутыми кристаллами размером до 4,4×7,2 мм, с включениями кварца и плагиоклаза. В диорите встречаются ксеноморфные зерна размером до 1 мм с вростками плагиоклаза. Часто кристаллы сосюритизированы, особенно макрокристы. На классификационной диаграмме (рис. 7, а) составы КПШ из трех типов пород перекрываются, образуя компактный тренд вдоль грани Or₁-Ab, но часть точек из тоналитов смещена, что, возможно, связано с пертитовыми вростками альбита в КПШ. Примесь ВаО в КПШ из тоналитов составляет 0,30–0,72 мас.%, в КПШ из диоритов – 1,00–1,47 %, а в КПШ из аплита 0,22–0,52 % (табл. 3, Приложение).

Плагиоклаз в тоналитах образует субидиоморфные зерна типа лейст размером до 0,9×2,1 мм, а в диорите – ксеноморфные изометричные зональные зерна размером от 1 до 2,6 мм. Часто плагиоклаз сосюритизирован, так, в аплите практически полностью, где сосюритовый агрегат образует кольцевые скопления внутри кристаллов. Состав плагиоклаза варьирует широко, на классификационной диаграмме точки ложатся на поля андезина, олигоклаза и альбита (рис. 7, а). В тоналитах содержание An варьирует от 34,96 до 17,13 мол.%, в диорите – от 30,36 до 20,01, в аплите – от 0,21 до 0. Таким образом, в аплите присутствует только вторичный альбит. Примесь FeO в плагиоклазе из тоналита составляет 0,12–0,16 мас.%, из диорита – 0,09–0,25 %, из аплита – 0,21–0,32 % (табл. 3, Приложение).

Биотит в разных породах морфологически однообразен, представлен чешуйчатými, удлиненно-и коротко-таблитчатыми зернами, размеры в среднем от 0,2 до 0,5 мм, наиболее крупные зерна достигают 3,4 мм. Встречаются включения плагиоклаза и кварца. По краям зерен биотит замещен эпидотом и хлоритом, замещение хлоритом развито также по трещинам спайности, а в отдельных образцах (А₂₅-3 и А₂₅-4) хлорит полностью заместил часть зерен биотита. Составы биотита из разных пород практически полностью перекрываются на классификационной диаграмме (рис. 7, б). Содержание Mg# составляет 0,43–0,65 в биотите из тоналитов, 0,55–0,62 в биотите из диорита и 0,56–0,57 в биотите из аплита. Содержание TiO₂ в биотите из тоналитов варьирует в пределах 1,00–3,31 мас.% (до 0,367 ф.е.), в биотите из диорита – 1,95–3,72 % (до 0,386 ф.е.) и 3,15–3,49 % (до 0,389 ф.е.) в биотите из аплита (табл. 2, Приложение).

Амфибол в породах плеохроирует от светло-зеленой до темно-зеленой окраски. В аплите не встречен. Минерал представлен тремя морфологическими типами зерен: 1) таблитчатыми, размером от 0,4 до 2,8 мм; 2) идиоморфными с ромбовидным сечением размером до 1 мм; 3) ксеноморфными, с округлым сечением,

размером от 0,3 до 0,8 мм, часто образуют сростания с чешуйками биотита, в тоналите эти сростки наиболее крупные и многочисленные. Как и в случае с биотитом, по краям кристаллов или нацело амфибол замещен хлоритом и эпидотом. Также в амфиболе присутствует множество включений округлых зерен кварца размером до 0,2 мм. Согласно классификационным диаграммам амфибол отвечает эдениту и магнезиогорнблендиту, часть в диоритах отвечает актинолиту и тремолиту (рис. 7, в, з). Составы из тоналитов и диорита во многом перекрываются. Зональность в кристаллах не выявлена. Различия по составу выявлены между отдельными зернами. Содержание Mg# варьирует: от 0,68 до 0,73 (0,72 в среднем) в амфиболе из тоналитов и от 0,54 до 0,90 (0,72 в среднем) в амфиболе из диорита. Содержание TiO₂ в амфиболе из тоналитов варьирует в пределах 0,57–1,32 мас.% (до 0,114 ф.е.), а в амфиболе из диорита – 0,13–0,95 мас.% (до 0,105 ф.е.) (табл. 1, Приложение).

Эпидот в породах образует различные ксеноморфные выделения, замещая первичные магматические минералы, размер выделений обычно в районе 0,1 мм, реже до 0,9 мм. В агрегатах замещения титанита встречается редкоземельный эпидот. По составу наблюдается широкий разброс, на классификационной диаграмме точки распределяются в полях эпидота и клиноцоизита (рис. 8, а). Примесь Ce₂O₃ достигает 0,36 мас.% (0,011 ф.е.) (табл. 4, Приложение).

Хлорит образует частичные или полные псевдоморфозы по биотиту и роговой обманке, наибольшее количество хлорита выявлено на контакте аплита с тоналитом. На классификационной диаграмме (рис. 8, б) состав хлорита полностью соответствует пикнохлориту. Химический состав см. в табл. 5, Приложение.

Рудные минералы – титанит, магнетит, гетит, рутил, монацит. **Титанит** представлен тремя морфологическими разновидностями зерен: 1) ксеноморфными интерстициальными (ойкокритами с неравномерной зональностью) размером до 2,7×1,5 мм с включениями зерен сосюритизированного плагиоклаза (рис. 6, б); 2) идиоморфными с резкими угловатыми очертаниями размером до 0,55×1,9 мм (чаще в диорите), в них часто проявлена полосчатая зональность; 3) мелкими ксеноморфными угловатыми выделениями размером до 0,5×0,5 мм в жилах хлорита, в крупных кристаллах титанита вместе с аналогичными по форме выделениями **рутила** и **монацита** (рис. 5, з). По составу первые две разновидности в тоналитах близки и характеризуются неравномерным распределением примесей. Так, содержание Al₂O₃ меняется от 0,93 до 1,61 мас.%, выявлены примеси Y (Y₂O₃ до 2,09 %), Nb (Nb₂O₅ до 2,42 %), Ce (Ce₂O₃ до 1,04 %). Третья разновидность – вторичный титанит – почти не содержит Al, но богат REE (La₂O₃ до 3,34 %, Ce₂O₃ до 9,81 %, Pr₂O₃ до 1,05 %, Nd₂O₃ до 3,45 %), Nb₂O₅ до 0,44 %. **Магнетит** образует ксеноморфные выделения или октаэдрические кристаллы размером до 0,2 мм, часто в виде включений в амфиболе и титаните или в сростании с ними (рис. 5, д, рис. 6, в). **Гетит** выявлен в виде мелких угловатых кристаллов в сростании с Fe-эпидотом и пластинчатых выделений в трещинах спайности в биотите. Кроме того, обнаружено субмикронное зерно торогуммита в сростании с гетитом.

Апатит представлен шестоватыми (дипирамидальными) кристаллами длиной до 0,07 мм, образуя включения в биотите и амфиболе. Он не содержит хлор и распределяется между фторapatитом и гидроксилapatитом (ОН 0,716–1,221, F 0,779–1,284). Содержание F в апатите из тоналита – 3,30–3,99 мас.%, в апатите из диорита – 3,01–3,64 %, в апатите из аплита – 0,89 %.

Прочие минералы – циркон, мусковит и кальцит. **Циркон** встречен в виде дипирамидальных кристаллов в интерстициях, часто с округлым сечением, размер зерен до 0,1 мм (рис. 6, з). **Мусковит** образует чешуйчатые зерна размером до 0,1 мм по краям кристаллов плагиоклаза (рис. 6, з). **Кальцит** выявлен в форме отдельных мелких угловатых зерен по трещинам в полевых шпатах, в интерстициях породообразующих минералов (рис. 5, д) в виде пятнистых скоплений размером от 0,1 до 0,3 мм, а также в виде ксеноморфных выделений, замещающих амфибол внутри зерен титанита (рис. 6, з).

Шабровский массив (плутон)

Граниты имеют следующий минеральный состав: кварц (25–35 %), КПШ (12–23 %), Na-Ca плагиоклазы (15–20 %), биотит (5–10 %), роговая обманка (до 1–3 %), эпидот (< 0,5 %), магнетит (< 0,1 %), апатит (< 0,1 %), ильменит (< 0,05 %).

Диориты из включений характеризуются составом: кварц (3–10 %), КПШ (3–10 %), Na-Ca плагиоклазы (25–35 %), биотит (25–35 %), роговая обманка (2–7 %), эпидот (< 0,5 %), хлорит (< 0,5 %), титанит (< 0,1 %), титаномангнетит (< 0,05 %), мусковит (< 0,05 %), циркон (< 0,01 %), монацит (< 0,01 %), барит (< 0,01 %), церит (< 0,01 %).

Кварц представлен тремя морфологическими типами зерен: 1) ксеноморфными в интерстициях размером от 0,5 до 2 мм (в основном в граните); 2) гломеропорфировыми сростками и микрофенокритами с округлым сечением размером от 2 до 4 мм (в диоритах), имеющими обильные включения амфибола, биотита, и иногда титанита; 3) округлыми включениями в породообразующих минералах (особенно в биотите и амфиболе) размером от 0,1 до 0,5 мм (преобладают в диоритах). В некоторых зернах первого типа выявлены многочисленные включения субмикронных кристаллов биотита и амфибола.

Калиевый полевой шпат образует как изометричные порфиновые вкрапленники размером обычно 2 мм (в гранитах), так и интерстициальные субидiomорфные и ксеноморфные зерна размером в среднем $0,7 \times 0,7$ мм. Проявлена слабая серицитизация, часто неравномерная, особенно во вкрапленниках. Характерны включения плагиоклаза, кварца, биотита, циркона и титанита в КПШ (рис. 4, *и*). Кроме того, присутствуют мелкие ксеноморфные включения гиалофана. По составу КПШ из тоналитов вариативен, возможно, за счет включений пертитовых вростков альбита, а из диоритов стабилен (рис. 7, *а*). Примесь ВаО в КПШ из гранитов составляет 0,21–2,26 мас.%, а в КПШ из диоритов – 0,25–2,75 % (табл. 3, Приложение).

Плагиоклаз представлен двумя морфологическими типами зерен: 1) чаще всего субидiomорфными изометричными и таблитчатыми концентрически-зональными со средним размером $0,2 \times 0,4$ мм; 2) ксеноморфными с овальным сечением, имеющими размер от 0,2 до 0,6 мм, обычно в виде включений во вкрапленниках КПШ. Кристаллы первого типа, кроме основной массы, встречаются и в виде микрофенокристов и в гранитах, и в диоритах. Часто плагиоклаз сосюритизирован. Замещение зональных зерен происходило от центральной части к краю, нередко сопровождаясь 1–2 кольцами сосюрита. Содержание An в плагиоклазе из гранита варьирует от 18,5 до 0 мол.%, а из диорита 23,27–1,85 %. Точки составов располагаются в полях олигоклаза и альбита (рис. 7, *а*). Примесь FeO в первом составляет 0,0n–0,14 мас.%, во втором 0,13–0,17 % (табл. 3, Приложение).

Биотит характеризуется чешуйчатыми зернами, средний размер которых 1,3 мм в гранитах, а в диоритах – более мелкими, но распределенными равномерно. В большинстве образцов по краям зерен биотита развит эпидот. В редких случаях по трещинам спайности происходит замещение хлоритом. Окраска биотита варьирует от светло-коричневой до темно-коричневой. Составы биотита из гранитов и диоритов практически полностью перекрываются на классификационной диаграмме (рис. 7, *б*). Содержание Mg# составляет 49–59 мол.% в биотите из гранитов, 54–59 мол.% в биотите из диоритов. Содержание TiO₂ в биотите из гранитов варьирует в пределах 0,98–3,61 мас.% (до 0,385 ф.е.), в биотите из диоритов – 1,01–3,35 мас.% (до 0,373 ф.е.) (табл. 2, Приложение).

Амфибол присутствует только в диоритах, в гранитах обнаружено лишь одно зерно в двух шлифах. Окраска минерала варьирует от светло-зеленой до светло-коричневой. Представлен двумя морфологическими типами зерен: 1) идиоморфными и субидiomорфными призматическими и таблитчатыми с ромбовидным сечением со средним размером 0,8 мм; 2) ксеноморфными (иногда округлого сечения), часто образующими скопления, размер которых достигает 1,4 мм, в том числе в виде включений в кварце и КПШ. По большей части зерен амфибола развиты выделения эпидота. Согласно классификационным диаграммам амфибол образует единые тренды от магнезиогастингсита к эдениту и в поле магнезиогорнблендита (рис. 7, *в, г*). Зональность не выявлена. Содержание Mg# варьирует: от 55 до 71 мол.% (62 в среднем) в амфиболе из гранитов и от 54 до 63 мол.% (60 в среднем) в амфиболе из диоритов. Содержание TiO₂ в амфиболе из гранитов варьирует в пределах 0,58–1,17 мас.% (до 0,130 ф.е.), а в амфиболе из диоритов – 0,87–1,56 мас.% (до 0,178 ф.е.) (табл. 1, Приложение).

Эпидот представлен тремя морфологическими типами зерен: 1) выделениями в форме частичных псевдоморфоз по биотиту и амфиболу (до 20–30 % площади) размером до 0,3 мм; 2) мелкодисперсными пластинчатыми выделениями и сплошными массами из листовато-чешуйчатых зерен, приуроченных к агрегатам замещения биотита и амфибола, размер скоплений достигает 1 мм; 3) идиоморфными таблитчатыми в виде включений в кварце, КПШ и плагиоклазе размером до 0,1 мм. Точки составов распределяются в полях эпидота и клиноцоизита (рис. 8, *а*). REE в них не обнаружены. Химический состав см. в табл. 4, Приложение.

Хлорит образует жильные выделения по трещинам спайности в биотите и по краям кристаллов биотита и амфибола. В отличие от образцов других массивов, в Шабровском массиве хлорит развит весьма незначительно. Химический состав см. в табл. 5, Приложение.

Рудные минералы – титанит, ильменит, монацит. **Титанит** представлен двумя морфологическими типами зерен: 1) идиоморфными призматически-клиновидными в сростании с полевыми шпатами (рис. 6, *д*), размер зерен до $0,2 \times 0,7$ мм; 2) ксеноморфными интерстиционными жилевидными размером $0,02 \times 0,4$ мм (рис. 5, *е*). В первом типе характерны рекуррентно-зональные зерна с наличием концентрических зон с повышенным содержанием Nb₂O₅ (до 0,35 мас.%), Ce₂O₃ (0,67–0,86 %) и Nd₂O₃ (0,49–0,9 %) (рис. 6, *е*). Ксеноморфные кристаллы титанита не характеризуются такими примесями. **Ильменит** представлен мелкими ксеноморфными выделениями размером до 0,01 мм в виде включений в эпидоте и зональных зернах титанита. **Монацит** образует два морфологических типа зерен: 1) ксеноморфные призматического облика размером до 0,01 мм в виде включений в полевых шпатах; 2) тонкие выделения в трещинах спайности биотита.

Апатит представлен шестоватыми (дипирамидальными) кристаллами длиной до 0,2 мм, обычно в форме включений в биотите и КПШ, реже в амфиболе. Характерна примесь S (до 0,2 мас.% в апатите

из гранита и 0,19–0,54 % в апатите из диорита) и отсутствие Cl. Содержание F в апатите из гранита от 4,44 до 4,65 мас.%, в апатите из диорита от 3,79 до 4,96 %. По составу соответствует фторапатиту (ОН 0,678–0,968, F 1,032–1,322).

Прочие редкие минералы – мусковит, барит, циркон, церит. **Мусковит** образует чешуйчатые субмикронные зерна в виде включений в плагиоклазе. **Барит** в виде тонких жилок в трещинах спайности биотита (рис. 5, ж). **Циркон** образует множество включений размером до 0,2 мм коротко-призматических кристаллов в КПШ, плагиоклазе, биотите, реже в титаните и мелкодисперсной эпидотовой массе. **Церит** обнаружен в виде единичного тонкого пластинчатого выделения в плагиоклазе.

Термобарометрия

Для оценки температур равновесия сосуществующих минералов были применены следующие виды эмпирических геотермобарометров: амфибол-плагиоклазовый термометр по (Holland et al., 1994) и амфибол-плагиоклазовый барометр по (Fershtater, 1990). Полученные результаты отражены табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов температуры и давления по амфибол-плагиоклазовым термометру (Holland et al., 1994) и барометру (Fershtater, 1990) для изученных гранитоидов

Table 1. Results of temperature and pressure calculations using an amphibole-plagioclase thermometer (Holland et al., 1994) and a barometer (Fershtater, 1990) for the studied granitoids

Массив	Адамелло							Ахуновский							Шабровский					
	Тоналит				Диорит			Тоналит				Диорит			Гранит			Диорит		
№ пары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T, °C	775	717	850	824	766	781	740	699	679	685	727	653	696	764	724	699	581	667	729	709
P, кбар	2	2,5	2,5	2,5	2	2	2	2	2,5	2,5	5	2	2,5	2,5	2,5	3,5	4,5	5	5	5

В тоналитах массива Адамелло получены величины температур от 717 до 850 °C и давлений 2–2,5 кбар для пары амфибол – плагиоклаз, а в диоритах – 740–781 °C, 1,8–2 кбар.

В тоналитах Ахуновского плутона по амфибол-плагиоклазовой паре получены диапазоны температур 619–727 °C и давлений 2–5 кбар, тогда как в диоритах – 653–764 °C и 2–2,5 кбар.

В гранитах Шабровского массива по амфибол-плагиоклазовой паре получены диапазоны температур 581–699 °C и давлений 3,5–5 кбар, а в диоритах – 709–729 °C и 5 кбар.

Геохимия

Химический состав всех изученных образцов представлен в табл. 2. Для их всесторонней классификации и типизации привлечены геохимические диаграммы (рис. 9, а–е). На TAS-диаграмме (рис. 9, а) главные типы пород массивов Адамелло и Ахуновский, вмещающие включения, попадают в поле гранодиорита, а включения – в области диорита и монзонита. В Шабровском массиве основные породы попадают в поле гранита (как и жильный лейкогранит Ахуновского), а включения – на границу диорита и гранодиорита. По соотношению калия и кремнезема (рис. 9, б) образцы из Адамелло отвечают среднекалиевой и высококалиевой сериям. Матричные породы Ахуновского массива соответствуют среднекалиевой серии, тогда как диоритовое включение и жильный лейкогранит являются высококалиевыми. Граниты Шабровского массива отвечают высококалиевой серии, а включения – среднекалиевой. Для большинства образцов характерно низкое и умеренно-низкое K/Na отношение, кроме аплита (K/Na = 1,41): в тоналит-гранитах – 0,66–0,97 в Адамелло, 0,32–0,36 в ахуновских, 0,62 в шабровских; в диоритах – 0,90–1,08 в Адамелло, 0,76 в ахуновских, 0,30–0,40 в шабровских. На диаграмме SiO₂–MALI (рис. 9, в) все образцы из Адамелло с матричными породами Ахуновского массива соответствуют известковым, в то время как в Шабровском массиве граниты являются известково-щелочными, а диориты – щелочно-известковыми. По соотношению кремнезема и коэффициента железистости изученные породы принадлежат магнизальному типу, кроме ахуновского жильного лейкогранита, что сближает их с I-гранитами. Также на близость к I-гранитам указывает диаграмма A/CNK–A/NK (рис. 9, з), где все изученные образцы попадают в область метаглиноземистых гранитоидов. По содержанию TiO₂ и P₂O₅ матричные гранитоиды трех массивов довольно однотипны, но включения в них различаются заметно: диориты Шабровского массива содержат умеренное количество титана (TiO₂ 0,55–0,69 мас.%) и фосфора (P₂O₅ 0,33–0,34 мас.%), диориты Адамелло при умеренно-повышенном количестве титана (TiO₂ 0,82–0,84 %) имеют низкое содержание фосфора (P₂O₅ 0,09–0,10 %), а диорит Ахуновского массива содержит максимальные количества титана (TiO₂ 1,00 %) и фосфора (P₂O₅ 0,66 %). Это хорошо коррелирует с высоким количеством титанита и апатита в нем.

Таблица 2. Химический состав тоналит-гранитов и диоритовых включений в них из массивов Адамелло¹, Ахуновский² и Шабровский³
 Table 2. Chemical composition of tonalite granites and diorite inclusions in them from the Adamello¹, Akhun² and Shabry³ massifs

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ [†]	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S [†]	ППП	Сумма
A-1a ¹	64,94	0,58	14,63	5,61	0,10	6,67	2,30	2,39	1,58	0,09	0,07	0,88	99,83
A-1b ¹	60,08	0,84	14,67	8,93	0,17	6,14	3,88	1,78	1,93	0,17	< 0,01	0,99	99,58
A-2 ¹	65,65	0,49	14,66	4,64	0,12	5,19	1,75	2,97	2,87	0,10	0,07	1,48	99,98
A-3 ¹	59,23	0,82	15,25	8,81	0,17	6,07	4,24	2,20	1,97	0,16	< 0,01	1,04	99,97
A ₂₅ -2a ²	67,77	0,43	14,70	3,85	0,06	4,21	1,54	4,37	1,42	0,19	0,04	0,89	99,47
A ₂₅ -2b ²	57,31	1,00	15,55	9,00	0,12	3,83	3,78	3,71	2,82	0,66	< 0,01	1,91	99,67
A ₂₅ -3 ²	69,38	0,40	14,42	3,79	0,06	4,22	1,40	4,03	1,47	0,14	< 0,01	0,41	99,74
A ₂₅ -4a ²	74,86	0,07	13,06	1,59	0,02	1,04	0,12	3,50	4,95	0,04	< 0,01	0,45	99,69
A ₂₅ -4b ²	69,24	0,43	14,29	4,14	0,06	3,81	1,29	4,09	1,34	0,15	< 0,01	1,03	99,88
E ₂₅ -1 ³	71,82	0,32	13,11	3,26	0,05	1,91	0,92	4,73	2,95	0,15	< 0,01	0,29	99,50
E ₂₅ -2 ³	71,31	0,31	14,20	2,69	0,04	2,03	0,86	4,83	3,01	0,17	< 0,01	0,43	99,88
E ₂₅ -3 ³	62,64	0,69	13,71	8,62	0,15	2,61	3,53	4,67	1,87	0,33	< 0,01	1,05	99,88
E ₂₅ -4 ³	63,40	0,55	14,38	7,07	0,13	3,13	3,35	5,16	1,54	0,34	< 0,01	0,81	99,87

	Sc	V	Cr	Co	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb
A-1a ¹	< 5	63	38	12	14	52	78	179	15	78	< 5	346	< 5
A-1b ¹	19	110	45	21	70	93	91	213	36	91	11	1304	9
A-2 ¹	< 5	59	36	9	20	45	107	404	16	93	9	1275	8
A-3 ¹	19	117	43	20	21	92	90	216	38	86	11	1287	9
A ₂₅ -2a ²	< 5	39	48	8	29	46	56	593	9	148	< 5	702	< 5
A ₂₅ -2b ²	14	134	59	21	273	112	115	651	32	220	9	2690	11
A ₂₅ -3 ²	< 5	40	55	< 5	24	47	59	609	9	146	< 5	658	6
A ₂₅ -4a ²	< 5	15	46	< 5	12	18	94	281	7	23	< 5	709	29
A ₂₅ -4b ²	< 5	30	65	< 5	11	48	61	534	9	141	5	362	< 5
E ₂₅ -1 ³	< 5	28	52	< 5	7	50	71	668	8	168	< 5	583	< 5
E ₂₅ -2 ³	< 5	34	27	33	19	50	74	695	8	170	< 5	663	29
E ₂₅ -3 ³	9	77	101	20	32	127	86	747	33	151	9	1649	17
E ₂₅ -4 ³	11	70	83	15	90	117	67	728	41	148	7	897	23

Примечание. Петрогенные оксиды – мас.%, элементы – г/т; все железо представлено в форме Fe₂O₃[†], вся сера представлена в форме S[†].

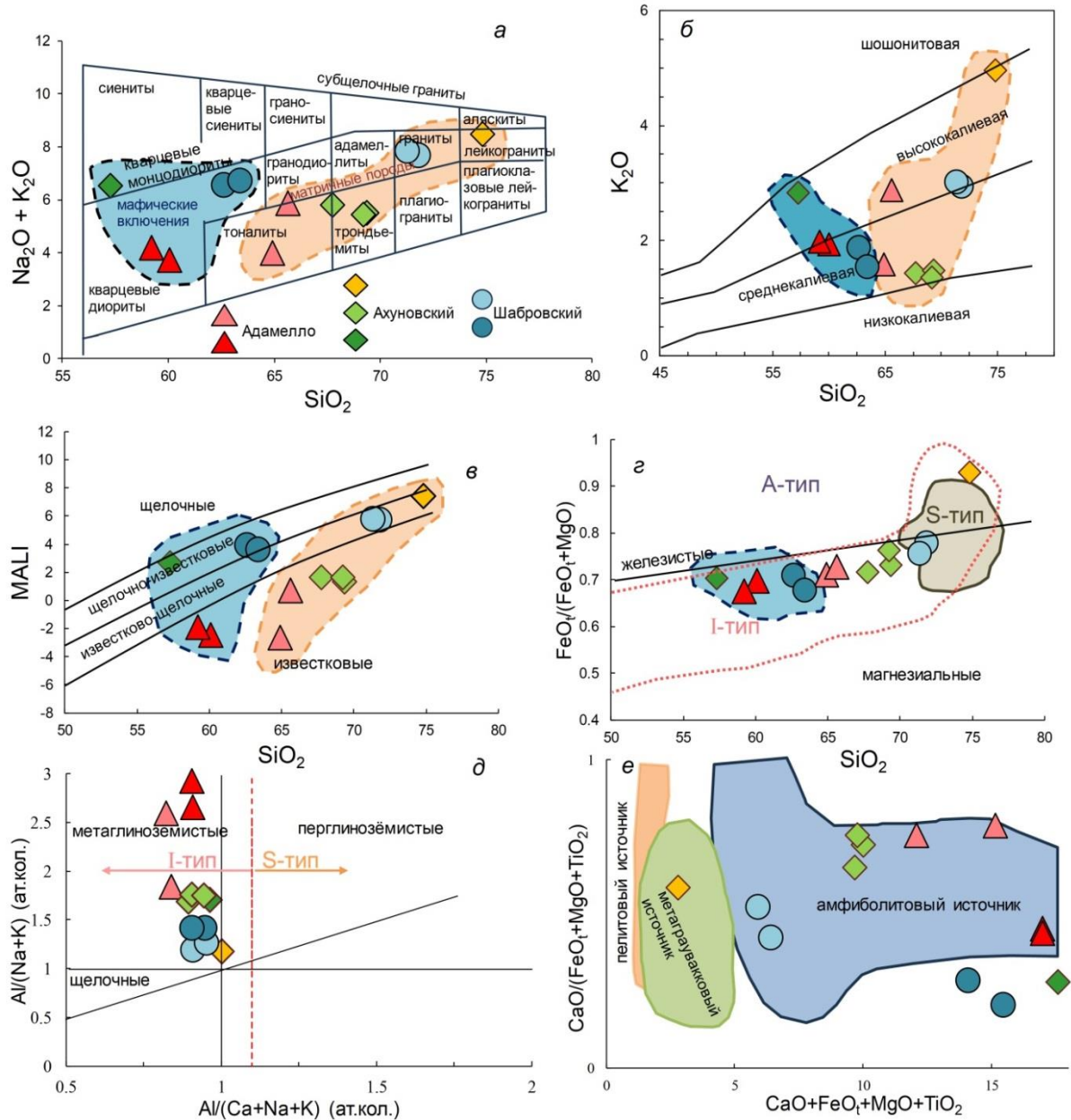


Рис. 9. Классификационные и дискриминационные диаграммы для гранитоидов из массивов Адамелло, Ахуновский и Шабровский: *а* – TAS-диаграмма модернизированная; *б* – $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (Peccerillo et al., 1976); *в* – диаграмма $\text{SiO}_2\text{-MALI}$ (Frost et al., 2001); *з* – диаграмма $\text{FeO}_t/\text{FeO}_t+\text{MgO}$ (Frost et al., 2001); *д* – диаграмма A/NK-A/CNK (Maniar et al., 1989); *е* – диаграмма источника (Patino Douce, 1997).

Голубым полем оконтурены точки составов диоритов из мафических включений, светло-оранжевым полем – точки матричных тоналит-гранитов

Fig. 9. Classification and discrimination diagrams for granitoids from the Adamello, Akhun and Shabry massifs: *a* – modernized TAS diagram; *b* – $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (Peccerillo et al., 1976); *v* – $\text{SiO}_2\text{-MALI}$ diagram (Frost et al., 2001); *z* – $\text{FeO}_t/\text{FeO}_t+\text{MgO}$ diagram (Frost et al., 2001); *d* – A/NK-A/CNK diagram (Maniar et al., 1989); *e* – source diagram (Patino Douce, 1997). The blue field outlines the points of diorite compositions from mafic inclusions, the light orange field – the points of matrix tonalite-granites

Вариационные бинарные диаграммы (рис. 10, *а-м*), построенные на основе кремнезема и других элементов (называемые диаграммами А. Харкера), демонстрируют в основном единообразие трендов распределения для разных гранитоидных систем. В связи с этим создается впечатление о принадлежности всей выборки к генетически единой породной ассоциации. Закономерности распределения большинства компонентов (в частности, например, падение содержаний TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и увеличение Na_2O вместе с ростом кремнезема) типичны для эволюции гранитоидных систем, в особенности известково-щелочных.

Однако выявляются и специфичные вариации, в особенности распределение калия, рубидия и бария, т. е. щелочных и щелочноземельных элементов, которые обычно увеличиваются с ростом кремнезема. В данном случае тренды неоднозначны и, возможно, это связано с особенностями флюидного режима кристаллизовавшихся магм. Кроме того, на диаграмме распределения иттрия (рис. 10, л) хорошо обособляются поля составов матричных гранитоидов и мафических включений в них.

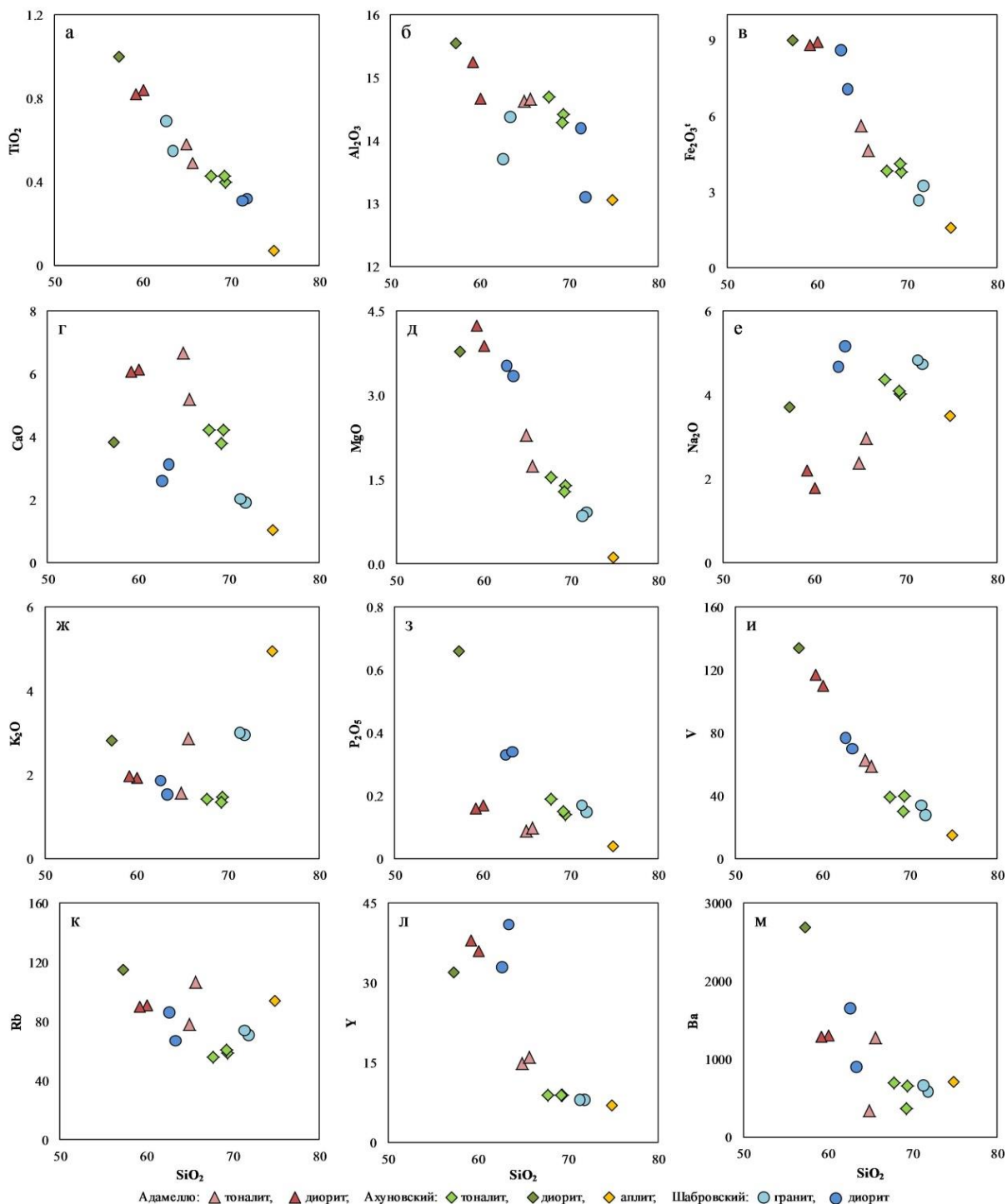


Рис. 10. Диаграммы А. Харкера для гранитоидов из массивов Адамелло, Ахунувский и Шабровский (петрогенные оксиды в мас.%, элементы в г/т)

Fig. 10. A. Harker diagrams for granitoids from the Adamello, Akhun and Shabry massifs (petrogenic oxides in wt.%, elements in ppm)

Результаты и обсуждение

Обзор петрологических представлений о взаимосвязи гранитоидов и мафических включений в массивах Адамелло, Ахуновский и Шабровский

Породы массива Адамелло были изучены достаточно детально. Для объяснения происхождения матричных гранитоидов предложены три основные модели: 1) за счет фракционной кристаллизации пикритового базальта (Bulmer et al., 1983); 2) за счет смешения мафитовой и фельзитовой магм из разных источников, т. е. мантии и нижней коры соответственно (Borsi et al., 1977); 3) за счет ассимиляционной фракционной кристаллизации магмы мантийного происхождения, например, высокоалюминиевого базальта или пикритового базальта с коровым материалом (Macera et al., 1983). В работе (Relvini et al., 2022) по данным валовой геохимии и Sr-Nd изотопии сделан вывод о том, что происхождение тоналитов плутона Корно Альто (массив Адамелло) могло быть связано как с коровым анатексисом, так и с ассимиляцией и фракционной кристаллизацией мафитовой магмы в син- и посторогенной обстановке. А для мафических включений, в том числе диоритов, предполагается мантийное происхождение, в основном в результате фракционирования пикробазальтового расплава.

Породы Ахуновского плутона исследовались менее детально. В работе (Жданов и др., 2003) в составе ахуново-карагайского двухфазного комплекса все разновидности пород рассматриваются как единая закономерно эволюционировавшая ассоциация, а мафические включения никак не охарактеризованы. По мнению В. В. Холоднова и др. (2021) гранитоиды ахуново-карагайского комплекса являются продуктами корового анатексиса при воздействии на кору континентальной окраины мантийного плюма, но при вероятном участии надсубдукционного флюида. Таким образом, в настоящей работе впервые на современном аналитическом уровне рассматриваются мафические включения в гранитоидах Ахуновского плутона.

Породы Шабровского массива довольно детально охарактеризованы в работе (Прибавкин, 2000). По мнению данного автора, наиболее богаты ксенолитами гранодиориты южной части массива, а сами мафические включения представляют собой либо фрагменты (эллипсоидные, размером несколько десятков сантиметров) синплутонических даек, либо крупные автолиты гранодиоритов (до 5 м) округлой или уплощенной формы, либо ксенолиты пород основного состава в виде крупных блоков (до 300 м). Сделан вывод о происхождении синплутонических даек за счет смешения мафитовой магмы с гранитовой или гранодиоритовой, а автолитов за счет локального фракционирования амфибола и плагиоклаза при росте содержания воды в магме гранодиоритов-гранитов.

Минералогические и петролого-геохимические закономерности в гранитоидах и мафических включениях

В рассмотренных гранитоидных системах Урала и Альп в парах "матричная порода – включение" типов "гранит – диорит" и "тоналит – диорит" установлены одни и те же минералы практически одного и того же состава, включая аксессуарные, что свидетельствует в пользу их генетического единства. Однако несмотря на сочетающиеся тренды на диаграммах А. Харкера для всей рассмотренной выборки, минералогические данные, подробно рассмотренные выше, свидетельствуют о некоторых петрогенетических различиях между массивами. Так, резко выделяется состав плагиоклаза из массива Адамелло, имеющего состав, характерный для габброидов (An до 75 мол.%). Данный факт может свидетельствовать либо о первично базитовом составе родоначальной магмы, при дифференциации которой имела место задержка кристаллизации плагиоклаза и фракционирование мафических минералов типа оливина и пироксена, либо о существовании факторов, обусловивших высокую кальциевость плагиоклаза. Такими факторами могли быть высокая водонасыщенность расплава, поскольку с повышением количества воды происходит увеличение анортитового минала в кристаллизующемся плагиоклазе (Feig et al., 2006), и ассимиляция пород типа известняков и доломитов, широко развитых в итальянских Альпах и окружающих массив Адамелло. Из всей выборки несомненно породы Адамелло имеют наиболее высокое содержание кальция и магния (табл. 2). По нашему мнению, именно второй сценарий является наиболее вероятным, но и родоначальная магма скорее всего была более мафитовой, чем для других рассмотренных массивов. Дополнительно в пользу этого свидетельствует состав аксессуарного апатита, в котором в небольшом количестве, но присутствует примесь хлора (до 0,18 мас.%), характерного для базитовых магм (Холоднов и др., 2002). Состав же плагиоклазов из Ахуновского и Шабровского массивов вполне отвечает типичной эволюции гранитоидных систем, производных от средне-кислых магм, как и состав апатита (фтористого), в котором не обнаружен хлор. Возможно, что постепенное повышение содержания воды в расплаве обеспечило близкий состав плагиоклаза в тоналит-гранитах и диоритах, т. е. не произошло резкого сдвига в пользу натриевого состава.

Информативными в изученных породах являются биотит и амфибол. Широкие вариации состава, в особенности содержания Mg# и TiO₂ в этих минералах, указывают на различные P-T-fO₂ условия их кристаллизации и/или на реакцию с водным флюидом. Мы полагаем, что оба этих фактора оказали

большое влияние. Во-первых, широкие вариации количества титана в амфиболе и биотите вместе с наличием как включений в них кварца и полевых шпатов, так и включений биотита и амфибола в полевых шпатах, вероятно, связаны с широким диапазоном кристаллизации (в большом температурном диапазоне). Во-вторых, большие вариации состава в пределах единых кристаллов (пятнистое распределение максимальных и минимальных содержаний элементов) указывают на реакцию биотита и амфибола с водным флюидом, скорее всего на позднемагматической или даже гидротермальной стадии. Учитывая то, что в изученной выборке присутствуют как достаточно свежие, так и слабо-умереннометасоматизированные образцы, взаимодействие с флюидом происходило и на син-, и на постмагматической стадии.

Для биотита также выполнен подробный разбор индикаторных геохимических характеристик (рис. 11). Диаграмма $10\text{TiO}_2\text{-FeO+MnO-MgO}$ (рис. 11, а) показывает, что абсолютное большинство анализов отвечает переуравновешенному первичному биотиту, что может быть связано как с реакцией минерала с вновь поступившими порциями расплава, так и с водным флюидом. В особенности наименее близки к первичному биотиту анализы из шабровских пород, а в породах Адамелло лучше всего сохранился первичный биотит. Дискриминационная диаграмма $\text{Fe}\#\text{-Fe}^{2+}$ (рис. 11, б) демонстрирует соответствие изученных составов минерала типичным I-гранитам, что согласуется с валовой геохимией пород. Наконец, согласно диаграмме $\text{Al-Fe}\#$ (рис. 11, в) биотит кристаллизовался в относительно окисленных условиях, соответствующих магнетитовой серии ($\lg\Delta\text{QFM} > 1$).

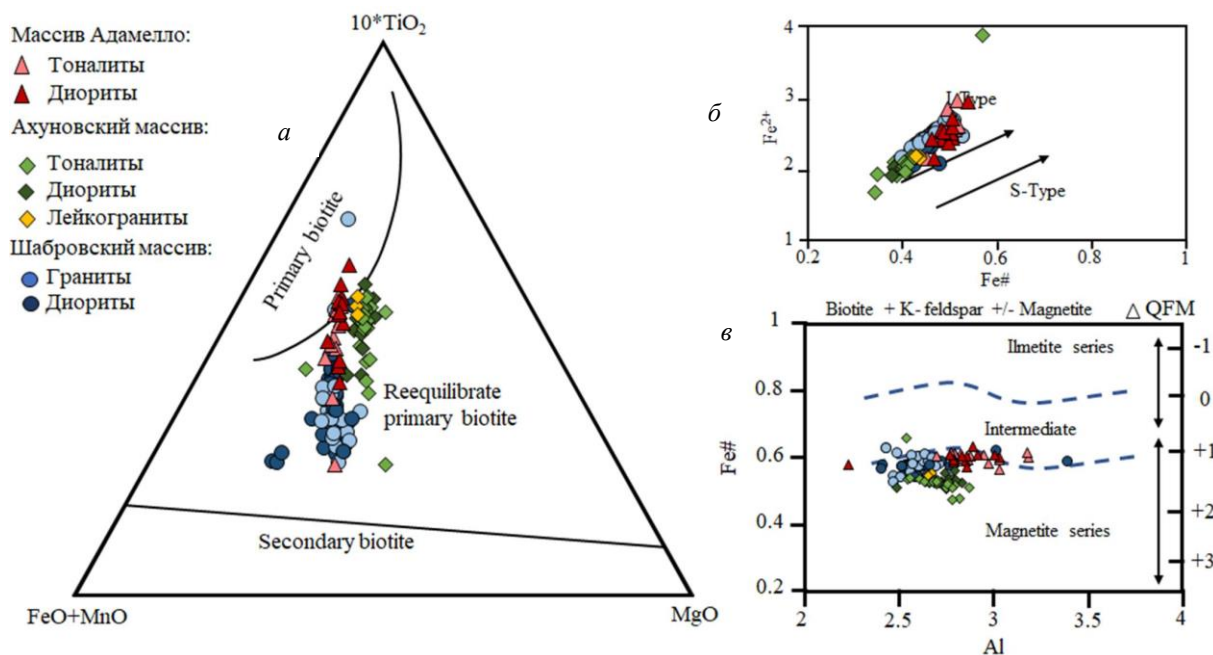


Рис. 11. Дискриминационные диаграммы для биотита из пород гранитоидных массивов Адамелло, Ахунувский и Шабровский: а – $10\text{TiO}_2\text{-FeO+MnO-MgO}$ (Nachit et al., 2005); б – $\text{Fe}\#\text{-Fe}^{2+}$ (Villaseca et al., 2017); в – $\text{Al-Fe}\#$ (Anderson et al., 2008)

Fig. 11. Discrimination diagrams for biotite from rocks of the Adamello, Akhun and Shabry granitoid massifs: а – $10\text{TiO}_2\text{-FeO+MnO-MgO}$ according to (Nachit et al., 2005); б – $\text{Fe}\#\text{-Fe}^{2+}$ according to (Villaseca et al., 2017); в – $\text{Al-Fe}\#$ according to (Anderson et al., 2008)

Оценки температур равновесия для сосуществующих амфибола и плагиоклаза показали, что величины значительно перекрываются для всей выборки, но закономерно для более кислых пород Шабровского массива получены пониженные значения, а для пород из массива Адамелло с высококальциевым плагиоклазом – наиболее высокие значения (до $850\text{ }^\circ\text{C}$). В связи с соответствием большей части биотита переуравновешенному, мы не стали использовать биотитовые термометры для оценки условий его кристаллизации.

Исходя из вышеизложенного, рассмотренные диоритовые включения в тоналитах и гранитах являются либо автолитами, либо участками интрузий, in situ прореагировавшими с порцией родственного расплава или флюида. С одной стороны, угловатая морфология включений указывает на механизм типа автокластических брекчий, т. е. разрыв закристаллизованных ниже более мафитовых частей интрузивной камеры, например, кумулятивного горизонта. С другой стороны, округлая морфология указывает на подхватывание гранитной магмой порций диоритовой магмы. И тот, и другой механизмы вполне могли сочетаться во время единого процесса при внедрении кислых магм. Отсутствие проникающих жил или

иных "шлейфов" (например, метасоматических ореолов), которые могли "питать" мафические включения, исключают их возникновение за счет альтернативных источников. Также сложно представить их происхождение за счет продвижения флюидов и реакции с ними, иначе они оставили бы более рассеянный след, а не четко ограниченные участки. Можно допустить лишь модель переработки магмой ксенолитов вмещающих пород, например, глинисто-терригенного состава, в результате которой происходило локальное переплавление, дегазация и кристаллизация. Но и этому противоречит тот факт, что в составах минералов нет каких-либо заметных различий с матрицей, нет принципиально иных минеральных фаз и следов переработки ксенолитов, например фрагментов недорасплавленных пород и участков гибридизации. Таким образом, именно сценарий подхватывания более кислой магмой фрагментов среднекислой магмы, частично или полностью раскристаллизованных, в пределах одного и того же магматического канала (магматической камеры), является наиболее предпочтительным для объяснения природы рассмотренных мафических включений. Зачастую в диоритовых включениях размеры кристаллов мельче, чем в матричной породе, что может быть связано с кристаллизацией этих фрагментов вблизи границ с высоким градиентом. Согласно математической модели (Полянский и др., 2017) подъем базитового расплава гранитной магмой возможен за счет водонасыщенности первого и за счет разницы в плотности и вязкости между ними.

По химическому составу изученные гранитоиды наиболее близки к гранитам I-типа (рис. 9, з, д), что согласуется с выводами по составу биотита. В качестве источников родоначальных магм гранитоидов предполагается базитовый/метабазитовый субстрат, аналогичный амфиболитам (рис. 9, е), который мог слагать нижнюю часть коры, подстилавшей зоны консолидации массивов. Иной (например, метаосадочный) источник, возможно, имеет жильный аплит, секущий и матричную породу, и включения в ахуновских образцах. Единообразие многих трендов на диаграммах А. Харкера (рис. 10), в котором точки составов одних массивов продолжают другими, вероятно, указывает как на однотипность эволюции этих гранитных систем, так и на разные интервалы однотипных процессов в каждом из массивов.

Выводы

Проведенные минералогические и геохимические исследования тоналитов и гранитов из массивов Адамелло (Южные Альпы), Ахуновский (Южный Урал) и Шабровский (Средний Урал) и диоритов из включений в них позволили получить новые данные о закономерностях их формирования. Полученные результаты и обсуждение позволили нам сделать основные выводы:

- минеральный состав и вариации составов минералов в матричных тоналит-гранитах и диоритовых включениях однотипны;
- широкий диапазон вариаций породообразующих минералов, особенно плагиоклаза, биотита и амфибола, связан как с длительной историей их кристаллизации, так и с реакцией с водным флюидом, отделившимся от расплава на позднемагматической стадии;
- угловатые диоритовые включения по механизму образования близки к автокластическим брекчиям, округлые включения связаны с захватом частично раскристаллизованного расплава из нижней части единой интрузивной камеры. Изученные диоритовые включения во всех трех массивах являются автолитами;
- по химическому составу изученные породы наиболее близки к I типу гранитов.

Данное исследование показало, что в орогенных гранитоидах, независимо от их возраста и структурно-тектонической привязки, происходят однотипные процессы, которые иногда трактуются по-разному.

Благодарности

Работа выполнена за счет государственного задания Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (ИГ УФИЦ РАН) № FMRS-2025-0015.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Валуи Г. А. Автолиты в гранитах Восточного Сихотэ-Алиня – результат дифференциации расплава (по данным Nd-Sr изотопии) // Литосфера. 2012. № 2. С. 55–66. EDN: PCUDOZ.
- Владимиров В. Г., Яковлев В. А., Кармышева И. В. Механизмы магматического минглинга в композитных дайках: модели диспергирования и сдвиговой дилатации // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 2. С. 325–345. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0417>. EDN: QOОВMP.
- Жданов А. В., Ободов В. А., Макарьев Л. Б., Матюшков А. Д. [и др.]. Геологическое доизучение масштаба 1 : 200000 и подготовка к изданию госгеолкарты-200 территории листа N-40-XXVIII (Учалинская площадь). Отчет по темам № 608 и № 140 : в 2 кн. СПб., 2003. Кн. 1. 284 с.

- Каллистов Г. А., Осипова Т. А. Геология и геохимия синплутонических даек в Челябинском гранитоидном массиве (Южный Урал) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 2. С. 331–345. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0244>. EDN: ZBPSYL.
- Полянский О. П., Семенов А. Н., Владимиров В. Г., Кармышева И. В. [и др.]. Численная модель магматического минглинга (на примере Баянкольской габбро-гранитной серии, Сангилен, Тува) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 2. С. 385–403. DOI: <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-2-0247>. EDN: ZBPSZP.
- Прибавкин С. В. Петрология основных пород в гранитоидах Шабровского и Шарташского массивов : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2000. 244 с. EDN: QDGHZH.
- Прибавкин С. В., Пушкарев Е. В. Возраст поздних орогенных гранитоидов Урала по данным U-Pb-изотопии цирконов (на примере Шарташского и Шабровского массивов) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438, № 3. С. 369–373. EDN: NWDCNB.
- Прибавкин С. В., Пушкарев Е. В., Готтман И. А., Вилисов В. А. Клинопироксениты, горнблендиты и габброиды, ассоциированные с гранитоидами Шабровского массива (Средний Урал) // Ежегодник-1997. 1998. Вып. 145. С. 104–108.
- Ферштатер Г. Б. Орогенный гранитоидный магматизм Урала. Миасс : УрО РАН, 1994. 250 с.
- Ферштатер Г. Б. Эмпирический плагиоклаз-амфиболовый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328–335.
- Ферштатер Г. Б., Беа Ф., Зинькова Е. А. Латеральная геохимическая зональность Верхисетского батолита (Средний Урал) // Ежегодник-1995. 1996. Вып. 143. С. 111–114.
- Холоднов В. В., Бушляков И. Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург, 2002. 392 с.
- Холоднов В. В., Шагалов Е. С., Каллистов Г. А., Шардакова Г. Ю. [и др.]. Ахуново-Петропавловский гранитоидный ареал как окраинно-континентальный центр длительного мантийно-корового взаимодействия: роль субдукционных и рифтогенно-плюмовых источников // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 6. С. 800–820. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig2020155>. EDN: WLHZPF.
- Anderson J. L., Barth A. P., Wooden J. L., Mazdab F. Thermometers and thermobarometers in granitic systems // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. Vol. 69, Iss. 1. P. 121–142. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.4>.
- Borsi S., Callegari E., Del Moro A., Ferrara G. [et al.]. Geochronological investigations on the Adamello-Presanella massif // Proceedings of the 5th ECOG, Pisa, Italy, 5–10 September 1977.
- Bulmer P., Callegari E., Sonderegger U. C. Genesis of the magic and ultramafic rocks and their genetical relations to the tonalitic-trondhjemitic granitoids of the southern part of the Adamello batholith (Northern Italy) // Memoir of the Geological Society of America. 1983. Vol. 26. P. 171–222.
- Chen Y. D., Price R. C., White A. J. R., Chappell B. W. Mafic inclusions from the Glenbog and Blue Gum granite suites, southeastern Australia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1990. Vol. 95, Iss. B11. P. 17757–17785. DOI: <https://doi.org/10.1029/jb095ib11p17757>.
- Deer W. A., Howie R., Zussman J. An introduction to the rock-forming minerals. Pearson Education Limited : London, UK, 1992. 712 p.
- Feig S. T., Koepeke J., Snow J. E. Effect of water on tholeiitic basalt phase equilibria: An experimental study under oxidizing conditions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2006. Vol. 152. P. 611–638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0123-2>.
- Frost R. B., Barnes C. G., Collins W., Jarculus R. J. [et al.]. A geochemical classification for granitic rocks // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42, Iss. 11. P. 2033–2048. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.
- Hey M. H. A new review of the chlorites // Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society. 1954. Vol. 30, Iss. 224. P. 277–292. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1954.030.224.01>.
- Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1994. Vol. 116. P. 433–447. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.
- Kartashov P. M. Classification diagram for REE-bearing members of the epidote group based on crystallochemical data // Workshop on accessory minerals : Conference. University of Warsaw, September 2014. P. 19–21.
- Kumar S. Schedule of mafic to hybrid magma injections into crystallizing felsic magma chambers and resultant geometry of enclaves in granites: New field and petrographic observations from Ladakh Batholith, Trans-Himalaya, India // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. Article number: 551097. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.551097>.
- Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D. [et al.]. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // American Mineralogist. 1997. Vol. 82, N 9–10. P. 1019–1037.
- Lindline J., Crawford W. A., Crawford M. L. A bimodal volcanic-plutonic system: The Zarembo Island extrusive suite and the Burnett Inlet intrusive complex // Canadian Journal of Earth Sciences. 2004. Vol. 41, N 4. P. 355–375. DOI: <https://doi.org/10.1139/e04-009>.

- Mascera P., Ferrara G., Pescia A., Callegari E. A geochemical study on the acid and basic rocks of the Adamello batholith // *Memorie della Società Geologica Italiana*. 1983. Vol. 26. P. 223–259.
- Maniar P. D., Piccoli P. M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. 1989. Vol. 101, Iss. 5. P. 635–643. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2).
- Nachit H., Ibhi A., Abia E. H., Ben Ohoud M. Discrimination between primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites, and neofomed biotites // *Comptes Rendus. Geoscience*. 2005. Vol. 337, N 16. P. 1415–1420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.09.002>.
- O'Connor, J. T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // *US Geological Survey Professional Paper*. 1965. Vol. 525B. P. 79–84.
- Patiño Douce A. E. Generation of metaluminous A-type granites by low pressure melting of calc-alkaline granitoids // *Geology*. 1997. Vol. 25, Iss. 8. P. 743–746. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2).
- Peccerillo A., Taylor S. R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976. Vol. 58. P. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00384745>.
- Relvini A., Martin S., Carvalho B. B., Prosser G. [et al.]. Genesis of the Eastern Adamello Plutons (Northern Italy): Inferences for the Alpine Geodynamics // *Geosciences*. 2022. Vol. 12. Article number: 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences12010013>.
- Schoene B., Schaltegger U., Brack P., Latkoczy C. [et al.]. Rates of magma differentiation and emplacement in a ballooning pluton recorded by U-Pb TIMS-TEA, Adamello batholith, Italy // *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. Vol. 355–356. P. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.08.019>.
- Strecheisen A. To each plutonic rock its proper name // *Earth-Science Reviews*. 1976. Vol. 12, Iss. 1. P. 1–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0).
- Villaseca C., Ruíz-Martínez V. C., Pérez-Soba C. Magnetic susceptibility of Variscan granite-types of the Spanish central system and the redox state of magma // *Geologica Acta*. 2017. Vol. 15, N 4. P. 379–394. DOI: <https://doi.org/10.1344/geologicaacta2017.15.4.8>.
- Yang F., Xue F., Ren W., Bagas L. [et al.]. Cretaceous mafic magmatic enclaves and host granites in the Luanchuan ore cluster, East Qinling, China: Insights into Mo mineralisation and tectonic evolution // *Ore Geology Reviews*. 2025. Vol. 182. Article number: 106670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106670>.

References

- Valuy, G. A. 2012. Autoliths in granites of the Eastern Sikhote-Alin – the result of melt differentiation (according to Nd-Sr isotope data). *Lithosphere (Russia)*, 2, pp. 55–66. EDN: PCUDOZ. (In Russ.)
- Vladimirov, V. G., Yakovlev, V. A., Karmysheva, I. V. 2019. Mechanisms of magmatic mingling in composite dikes: models of dispersion and shear dilation. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(2), pp. 325–345. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0417>. EDN: QOQBMP. (In Russ.)
- Zhdanov, A. V., Obodov, V. A., Makaryev, L. B., Matyushkov, A. D. et al. 2003. Additional geological study at a scale of 1 : 20000 and preparation for publication of the state geologic map-200 of the territory of sheet N-40-XXVIII (Uchalinskaya area). Report on topics N 608 and N 140 in 2 books. St. Petersburg, Book 1, 284 p. Inv. No. 13646. (In Russ.)
- Kallistov, G. A., Osipova, T. A. 2017. Geology and geochemistry of synplutonic dikes in the Chelyabinsk granitoid massif (Southern Urals). *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(2), pp. 331–345. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0244>. EDN: ZBPSYL. (In Russ.)
- Polyansky, O. P., Semenov, A. N., Vladimirov, V. G., Karmysheva, I.V. et al. 2017. Numerical model of magmatic mingling (using the example of the Bayankol gabbro-granite series, Sangilen, Tuva). *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(2), pp. 385–403. DOI: <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-2-0247>. EDN: ZBPSZP. (In Russ.)
- Pribavkin, S. V. 2000. Petrology of basic rocks in granitoids of the Shabrovsky and Shartash massifs. Ph.D. Thesis. Ekaterinburg. EDN: QDGHZH. (In Russ.)
- Pribavkin, S. V., Pushkarev, E. V. 2011. Age of late orogenic granitoids of the Urals based on U-Pb zircon isotope data (using the Shartash and Shabrovsky massifs as an example). *Dokl. RAS*, 438(3), pp. 369–373. EDN: NWDCNB. (In Russ.)
- Pribavkin, S. V., Pushkarev, E. V., Gottman, I. A., Vilisov, V. A. 1998. Clinopyroxenites, hornblendites, and gabbroids associated with granitoids of the Shabrovsky massif (Middle Urals). *Yearbook-1997*, 145, pp. 104–108. (In Russ.)
- Fershtater, G. B. 1994. Orogenic granitoid magmatism of the Urals, Miass. (In Russ.)
- Fershtater, G. B. 1990. Empirical plagioclase-amphibole barometer. *Geokhimiya*, 3, pp. 328–335. (In Russ.)
- Fershtater, G. B., Bea, F., Zinkova, E. A. 1996. Lateral geochemical zoning of the Verkhisetsky batholith (Middle Urals). *Yearbook-1995 of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 143, pp. 111–114. (In Russ.)
- Kholodnov, V. V., Bushlyakov, I. N. 2002. Halogens in endogenous ore formation. Ekaterinburg. (In Russ.)

- Kholodnov, V. V., Shagalov, E. S., Kallistov, G. A., Shardakova, G. Yu. et al. 2021. Akhunovo-Petropavlovsk granitoid area as a marginal-continental center of long-term mantle-crust interaction: The role of subduction and rift-plume magmatic and fluid sources. *Russian Geology and Geophysics*, 62(6), pp. 800–820. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig2020155>. EDN: WLHZPF. (In Russ.)
- Anderson, J. L., Barth, A. P., Wooden, J. L., Mazdab, F. 2008. Thermometers and thermobarometers in granitic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), pp. 121–142. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.4>.
- Borsi, S., Callegari, E., Del Moro, A., Ferrara, G. et al. 1977. Geochronological investigations on the Adamello-Presanella massif. *Proceedings of the 5th ECOG*, Pisa, Italy, 5–10 September 1977.
- Bulmer, P., Callegari, E., Sonderegger, U. C. 1983. Genesis of the magic and ultramafic rocks and their genetical relations to the tonalitic-trondhjemitic granitoids of the southern part of the Adamello batholith (Northern Italy). *Memoir of the Geological Society of America*, 26, pp. 171–222.
- Chen, Y. D., Price, R. C., White, A. J. R., Chappell, B. W. 1990. Mafic inclusions from the Glenbog and Blue Gum granite suites, southeastern Australia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B11), pp. 17757–17785. DOI: <https://doi.org/10.1029/jb095ib11p17757>.
- Deer, W. A., Howie, R., Zussman, J. 1992. An introduction to the rock-forming minerals. Pearson Education Limited, London, UK.
- Feig, S. T., Koepke, J., Snow, J. E. 2006. Effect of water on tholeiitic basalt phase equilibria: An experimental study under oxidizing conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152, pp. 611–638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0123-2>.
- Frost, R. B., Barnes, C. G., Collins, W., Jarculus, R. J. et al. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11), pp. 2033–2048. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>.
- Hey, M. H. 1954. A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, 30(224), pp. 277–292. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.1954.030.224.01>.
- Holland, T., Blundy, J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116, pp. 433–447. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.
- Kartashov, P. M. 2014. Classification diagram for REE-bearing members of the epidote group based on crystallochemical data. Workshop on accessory minerals : Conference. University of Warsaw, September, pp. 19–21.
- Kumar, S. 2020. Schedule of mafic to hybrid magma injections into crystallizing felsic magma chambers and resultant geometry of enclaves in granites: New field and petrographic observations from Ladakh Batholith, Trans-Himalaya, India. *Frontiers in Earth Science*, 8. Article number: 551097. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.551097>.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D. et al. 1997. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist*, 82(9–10), pp. 1019–1037.
- Lindline, J., Crawford, W. A., Crawford, M. L. 2004. A bimodal volcanic-plutonic system: The Zarembo Island extrusive suite and the Burnett Inlet intrusive complex. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(4), pp. 355–375. DOI: <https://doi.org/10.1139/e04-009>.
- Macera, P., Ferrara, G., Pescia, A., Callegari, E. 1983. A geochemical study on the acid and basic rocks of the Adamello batholith. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 26, pp. 223–259.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5), pp. 635–643. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2).
- Nachit, H., Ibhi, A., Abia, E. H., Ben Ohoud, M. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites, and neoformed biotites. *Comptes Rendus. Geoscience*, 337(16), pp. 1415–1420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.09.002>.
- O'Connor, J. T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Paper*, 525B, pp. 79–84.
- Patiño Douce, A. E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25(8), pp. 743–746. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2).
- Peccerillo, A., Taylor, S. R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, pp. 63–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00384745>.
- Relvini, A., Martin, S., Carvalho, B. B., Prosser, G. et al. 2022. Genesis of the Eastern Adamello Plutons (Northern Italy): Inferences for the Alpine Geodynamics. *Geosciences*, 12. Article number: 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences12010013>.

- Schoene, B., Schaltegger, U., Brack, P., Latkoczy, C. et al. 2012. Rates of magma differentiation and emplacement in a ballooning pluton recorded by U-Pb TIMS-TEA, Adamello batholith, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 355–356, pp. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.08.019>.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), pp. 1–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0).
- Villaseca, C., Ruíz-Martínez, V. C., Pérez-Soba, C. 2017. Magnetic susceptibility of Variscan granite-types of the Spanish central system and the redox state of magma. *Geologica Acta*, 15(4), pp. 379–394. DOI: <https://doi.org/10.1344/geologicaacta2017.15.4.8>.
- Yang, F., Xue, F., Ren, W., Bagas, L. et al. 2025. Cretaceous mafic magmatic enclaves and host granites in the Luanchuan ore cluster, East Qinling, China: Insights into Mo mineralisation and tectonic evolution. *Ore Geology Reviews*, 182. Article number: 106670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106670>.

Сведения об авторах

Рахимов Ильдар Рашитович – ул. Карла Маркса, 16/2, г. Уфа, Россия, 450077;
Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: rigel92@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-2402-9473>

Идар R. Rakhimov – 16/2 Karl Marx Str., Ufa, Russia, 450077; Institute of Geology,
Ufa Federal Research Centre RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher;
e-mail: rigel92@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-2402-9473>

Васильев Андрей Максимович – ул. Карла Маркса, 16/2, г. Уфа, Россия, 450077;
Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
мл. науч. сотрудник;
e-mail: andvas02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9632-7605>

Andrey M. Vasiliev – 16/2 Karl Marx Str., Ufa, Russia, 450077;
Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre RAS, Junior Researcher;
e-mail: andvas02@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9632-7605>

Самигуллин Айдар Альфридович – ул. Карла Маркса, 16/2, г. Уфа, Россия, 450077;
Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
мл. науч. сотрудник, аспирант;
e-mail: samigullinaidar85@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3089-0799>

Aidar A. Samigullin – 16/2 Karl Marx Str., Ufa, Russia, 450077;
Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre RAS, Junior Researcher;
e-mail: samigullinaidar85@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3089-0799>

Приложение

Таблица 1. Химический состав и формульные коэффициенты амфибола из гранитоидных массивов Адамелло¹, Ахуновский² и Шабровский³

Table 1. Chemical composition and formula units of amphibole from Adamello¹, Akhun², and Shabry³ granitoid massifs

№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Total
1 ¹	Тоналит/А-1	47	1,4	8,6	16,4	0,4	11,5	1,21	0,5	12,5	99,6
2 ¹	Тоналит/А-1	47,1	1,3	8,4	16,4	0,5	12	0,84	0,5	12,3	99,3
3 ¹	Тоналит/А-1	47,7	1,3	8,6	16,9	0,6	11,6	1,2	0,4	12,4	100,7
4 ¹	Тоналит/А-1	54,1	0	2,1	12,6	0,5	13,1	0	0	16,1	98,4
5 ¹	Тоналит/А-1	41,8	0,9	11,3	19,9	0,6	12,2	1,3	1,2	9,8	99
6 ¹	Диорит/А-3	47,6	0,5	7,5	18	0,6	12,6	0,7	0,5	11,8	99,9
7 ¹	Диорит/А-3	49	0,6	5,9	17,3	0,7	12,3	0,7	0,5	12,6	99,7
8 ¹	Диорит/А-3	42,4	1	10,7	19,5	0,6	12,5	1,2	1,0	10,5	99,6
9 ¹	Диорит/А-3	49,1	0,5	4,7	15,4	0,7	11,9	0,6	0,4	13,3	96,6
10 ¹	Диорит/А-3	45	1,3	8	16,8	0,6	11,7	0,9	0,5	11,1	96
11 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	44	0,6	12,6	13,5	0,6	11,1	1	0,5	12,6	96,6
12 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	41,5	0,8	11,7	13,4	0,6	10,7	1	0,5	11,7	92
13 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	46,4	0,9	13,5	13,4	0,6	11,7	0,9	0,5	13,5	101,4
14 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	46,5	1	13,4	14,1	0,6	11,6	1,1	0,3	13,4	102,1
15 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	44,2	0,7	12,8	13,2	0,6	12,2	0,9	0,5	12,8	98
16 ²	Тоналит/А ₂₅ -2а	47,2	1	13,3	14,6	0,6	12	1	0,4	13,3	103,4
17 ²	Тоналит/А ₂₅ -2а	47,8	0,8	13,8	14,3	0,6	12,1	1,1	0,5	13,8	104,7
18 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	49,6	0,7	6,5	14,6	0,6	12,7	0,9	0,5	14,2	100,3
19 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	47,9	0,8	7,1	14,9	0,6	12,1	1	0,5	13,7	98,6
20 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	46,5	0,7	6,5	13,8	0,5	11,6	0,9	0,4	13,6	94,5
21 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	48,3	0,7	6,6	14,3	0,6	12	1,1	0,3	13,9	98
22 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	47,5	0,8	7,3	14,6	0,7	12,3	1,2	0,5	14,7	99,4
23 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	47,2	0,8	7,3	14,7	0,6	12,4	1,2	0,5	14,5	99,3
24 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	47	0,9	8	14,9	0,7	12,2	1,3	0,5	13,5	99
25 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	47,6	0,9	6,7	15	0,7	11,8	1,3	0,4	13,3	97,7
26 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	48,1	0,7	6,7	15,1	0,7	12,2	1,1	0,5	13,8	98,9
27 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	40,8	1,2	10,5	20,7	0,6	12	2	1,1	9,9	99,1
28 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	44,5	0,6	7,7	18,9	0,6	11,9	1,6	0,8	11,5	98
29 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	46,9	0,9	7,5	18,6	0,6	11,6	1,6	0,9	11,4	100,1

30 ³	Диорит/E ₂₅ -3	42,9	1,5	10,9	21	0,7	11,6	2,1	1,3	8,8	100,8		
31 ³	Диорит/E ₂₅ -3	51,9	0	3,1	14,5	0,6	12,4	0,7	0,3	14,8	98,1		
32 ³	Диорит/E ₂₅ -4	44,1	1	7,7	17,6	0,5	11,1	1,7	0,9	10,8	95,3		
33 ³	Диорит/E ₂₅ -4	40,3	1,3	9,6	18,7	0,6	11	1,9	1,1	9	93,4		
34 ³	Диорит/E ₂₅ -4	42,1	1,1	7,9	17,1	0,5	11	1,6	1,0	10,3	92,5		
35 ³	Диорит/E ₂₅ -4	44,6	0,9	8,2	18,1	0,5	11,5	1,7	1,0	11	97,5		
36 ³	Диорит/E ₂₅ -4	44	0,9	7,6	17,1	0,5	11,3	1,5	0,9	11,1	95		
№ п/п	Образец	Si	Ti	Al ^{IV+}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Ca	Na(A+B)	K	Mg	Mg#
1 ¹	Тоналит/A-1	6,7	0,0	1,3	0,2	0,8	1,1	0,1	1,8	0,3	0,1	2,7	0,7
2 ¹	Тоналит/A-1	6,8	0,0	1,2	0,2	0,7	1,3	0,1	1,9	0,2	0,1	2,6	0,7
3 ¹	Тоналит/A-1	6,7	0,0	1,3	0,2	0,9	1,1	0,1	1,8	0,3	0,1	2,6	0,7
4 ¹	Тоналит/A-1	7,7	0,0	0,3	0,0	0,3	1,2	0,1	2,0	0,0	0,0	3,4	0,7
5 ¹	Тоналит/A-1	6,2	0,0	1,8	0,2	0,9	1,5	0,1	1,9	0,4	0,2	2,2	0,6
6 ¹	Диорит/A-3	6,9	0,0	1,1	0,2	0,6	1,5	0,1	1,9	0,2	0,1	2,5	0,6
7 ¹	Диорит/A-3	7,1	0,0	0,9	0,1	0,7	1,4	0,1	1,9	0,2	0,1	2,7	0,7
8 ¹	Диорит/A-3	6,2	0,0	1,8	0,1	0,9	1,4	0,1	2,0	0,3	0,2	2,3	0,6
9 ¹	Диорит/A-3	7,2	0,0	0,8	0,0	0,6	1,3	0,1	1,9	0,2	0,1	2,9	0,7
10 ¹	Диорит/A-3	6,8	0,0	1,2	0,2	0,6	1,5	0,1	1,9	0,3	0,1	2,5	0,6
11 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	6,4	0,0	1,6	0,5	1,2	0,4	0,1	1,7	0,3	0,1	2,7	0,9
12 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	6,3	0,0	1,7	0,4	1,1	0,6	0,1	1,7	0,3	0,1	2,7	0,8
13 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	6,4	0,0	1,6	0,5	1,1	0,4	0,1	1,7	0,2	0,1	2,8	0,9
14 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	6,3	0,0	1,7	0,5	1,2	0,4	0,1	1,7	0,3	0,1	2,7	0,9
15 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	6,4	0,0	1,6	0,5	0,9	0,7	0,1	1,9	0,2	0,1	2,7	0,8
16 ²	Тоналит/A ₂₅ -2a	6,4	0,0	1,6	0,5	1,1	0,5	0,1	1,7	0,3	0,1	2,7	0,8
17 ²	Тоналит/A ₂₅ -2a	6,4	0,0	1,6	0,5	1,2	0,4	0,1	1,7	0,3	0,1	2,7	0,9
18 ²	Диорит/A ₂₅ -2a	7,0	0,0	1,0	0,1	0,5	1,2	0,1	1,9	0,3	0,1	3,0	0,7
19 ²	Диорит/A ₂₅ -2a	6,9	0,0	1,1	0,1	0,7	1,1	0,1	1,9	0,3	0,1	2,9	0,7
20 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	7,0	0,0	1,0	0,1	0,7	1,0	0,1	1,9	0,3	0,1	3,0	0,7
21 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	7,0	0,0	1,0	0,1	0,7	1,1	0,1	1,9	0,3	0,1	3,0	0,7
22 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	6,8	0,0	1,2	0,0	0,9	0,8	0,1	1,9	0,3	0,1	3,1	0,8
23 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	6,7	0,0	1,2	0,0	0,9	0,9	0,1	1,9	0,3	0,1	3,1	0,8
24 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	6,8	0,0	1,2	0,1	0,7	1,1	0,1	1,9	0,4	0,1	2,9	0,7
25 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	6,9	0,0	1,1	0,1	0,6	1,2	0,1	1,8	0,4	0,1	2,9	0,7
26 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	6,9	0,0	1,1	0,1	0,7	1,2	0,1	1,9	0,3	0,1	3,0	0,7

27 ³	Диорит/E ₂₅ -3	6,1	0,0	1,9	0,0	1,0	1,6	0,1	1,9	0,6	0,2	2,2	0,6
28 ³	Диорит/E ₂₅ -3	6,6	0,0	1,3	0,0	0,9	1,5	0,1	1,9	0,5	0,2	2,5	0,6
29 ³	Диорит/E ₂₅ -3	6,8	0,0	1,2	0,1	0,6	1,6	0,1	1,8	0,5	0,2	2,5	0,6
30 ³	Диорит/E ₂₅ -3	6,3	0,0	1,7	0,2	0,6	2,0	0,1	1,8	0,6	0,2	1,9	0,5
31 ³	Диорит/E ₂₅ -3	7,5	0,0	0,5	0,0	0,4	1,3	0,1	0,2	0,1	3,2	0,7	0,7
32 ³	Диорит/E ₂₅ -4	6,7	0,0	1,3	0,1	0,6	1,6	0,1	1,8	0,5	0,2	2,5	0,6
33 ³	Диорит/E ₂₅ -4	6,4	0,0	1,6	0,2	0,6	1,8	0,1	1,9	0,6	0,2	2,1	0,5
34 ³	Диорит/E ₂₅ -4	6,7	0,0	1,3	0,1	0,6	1,7	0,1	1,9	0,5	0,2	2,4	0,6
35 ³	Диорит/E ₂₅ -4	6,7	0,0	1,3	0,1	0,7	1,6	0,1	1,8	0,5	0,2	2,5	0,6
36 ³	Диорит/E ₂₅ -4	6,7	0,0	1,3	0,1	0,6	1,6	0,1	1,8	0,4	0,2	2,5	0,6

Примечание. Рассчитано на 13 атомов кислорода.

Таблица 2. Химический состав и формульные коэффициенты биотита из гранитоидных массивов Адамелло¹, Ахуновский² и Шабровский³
Table 2. Chemical composition and formula units of biotite from Adamello¹, Akhun², and Shabry³ granitoid massifs

№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	SnO ₂	O=F,Cl	Cl	Total
1 ¹	Тоналит/A-1	35,2	3,1	15,4	19,5	0,4	10,2	0	0	9,5	0,5	0	0	0	97,6
2 ¹	Тоналит/A-1	37,6	2,8	15,6	20,4	0,4	11,2	0	0	9,8	0	0	0	0	96,5
3 ¹	Тоналит/A-1	36,2	3,7	15,8	20	0,4	10,6	0	0	9,9	0	0	0	0	96,3
4 ¹	Тоналит/A-1	38,2	0,9	17,5	17,1	0,4	11,5	0	0	9,6	0	0	0	0	97,5
5 ¹	Диорит/A-3	33,9	3,2	14,5	18,8	0,3	10,1	0	0	9,3	0	0	0	0	97,1
6 ¹	Диорит/A-3	34,5	3,4	15,6	18,3	0,3	10,3	0	0	9,4	0	0	0	0	96,8
7 ¹	Диорит/A-3	38,2	2	17,8	19,2	0,4	12,3	0	0	9,7	0	0	0	0	96,3
8 ¹	Диорит/A-3	29,2	2,5	13,3	18,9	0,4	9,5	0	0	6,7	0	0,3	0	0	97,5
9 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	35,9	3,2	14,6	15,7	0,4	12,7	0	0	9,7	0	0	0	0	97,9
10 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	35,9	0,9	15,9	14,7	0,4	15,4	0	0	9,7	0	0	0	0	97,4
11 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	36	3	14,6	15,3	0,5	12,4	0	0	9,7	0	0	0	0	96,1
12 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	35,4	2,5	15,3	16,5	0,5	12,8	0	0	9,9	0,3	0	0	0	98
13 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	35,7	3	14,5	17,1	0,3	12,2	0	0	9,6	0	0	0	0	96,2
14 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	35,3	2,7	14,8	16,9	0,3	12	0	0	9,8	0	0	0	0	96,4
15 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	36,1	3,1	14,8	16,7	0,4	12,2	0	0	9,9	0	0	0	0	97,6
16 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	35,6	2	15,5	16	0,5	13	0,2	0	8,8	0	0	0	0	96
17 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	36,4	3,6	15,8	15,2	0,4	11,9	0	0	10,1	0	0	0	0	97,7
18 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	36,6	2,2	15,6	15,6	0,3	13,1	0	0	9,6	0,3	0	0	0	97,2
19 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	36,5	2,8	15,5	15,7	0,4	12,9	0	0	9,6	0	0	0	0	98

20 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	36,1	2,8	14,9	15,2	0,4	12,8	0	0	9,7	0	0,3	0	0	96,8	
21 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	36,5	1,7	15,6	15,3	0,3	13,5	0	0	9,7	0	0,3	0	0	97,4	
22 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	36,3	3,3	15,2	15,2	0,5	12,5	0	0	9,6	0,4	0	0	0	97,9	
23 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	36,9	3	14,8	15,9	0,4	12,6	0	0	9,4	0	0	0	0	98	
24 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	36,7	2,9	15,1	15,8	0,5	12,4	0	0	9,6	0	0	0	0	97,7	
25 ⁵	Тоналит/А ₂₅ -4	36,9	3,2	14,3	16,8	0,3	12,9	0	0	9,2	0	0	0	0	98	
26 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	37,6	3,1	14,7	17	0,3	12,9	0	0	9,6	0	0	0	0	97,7	
27 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	36,6	2,9	15,2	16,1	0,5	13,1	0	0	8,9	0	0	0	0	97,3	
28 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -4	36,8	3,3	15,1	15,1	0,5	12,2	0	0,2	9,6	0	0	0	0,1	97,9	
29 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -5	36,4	3,2	14,9	16,7	0,5	11,9	0	0	9,7	0	0	0	0	97,5	
30 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -6	36,9	3,4	15,1	16,7	0,5	11,8	0	0	9,6	0	0	0	0	98	
31 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	35,6	3,3	13,4	19,8	0,3	10,4	0	0	9,6	0	0	0	0	96,1	
32 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	36,2	1,5	14,7	19,5	0,4	11,5	0	0	9,7	0,3	0	0	0	97,5	
33 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	36,5	1,4	14,6	19	0,4	11,5	0	0	9,7	0,3	0	0	0	97,8	
34 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	35,6	1,9	14,1	19,8	0,4	10,7	0	0	9,7	0,6	0	0	0	96,5	
35 ³	Гранит/Е ₂₅ -2	37,2	1,9	14,5	19,4	0,4	12	0	0	9,9	0	0	0	0	98	
36 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,1	2,4	14,5	19,6	0,4	10,9	0	0	9,8	0,6	0	0	0	97,6	
37 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	35,9	1,3	14,1	18,7	0,4	11,3	0	0	9,7	0	0	0	0	96	
38 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,2	1,5	14,9	18,9	0,4	11,4	0	0	9,9	0,3	0	0	0	97,9	
39 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,7	2,2	13,3	19	0,3	12	0	0	9,5	0	0,4	0	0	97,2	
40 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36	1,8	14,2	18,9	0,4	11,7	0	0	9,6	0,5	0,3	0	0	97,4	
41 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	35,3	1,9	14,2	18,9	0,5	11,1	0	0	9,7	0,5	0	0	0	96,4	
42 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,3	1,7	14,2	18,8	0,4	11,9	0	0	9,1	0,4	0	0	0	97,7	
43 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	37,7	1,4	17,2	19,6	0,3	10,1	0	0	5,8	0	0,7	0	0	97,3	
44 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	37,5	1,2	14,4	18,1	0,4	12,5	0	0	8,5	0	0	0	0	97,6	
45 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,3	2	15,4	17,6	0,4	11,3	0	0	10	0	0	0	0	97,5	
46 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37,7	3,3	13,5	17,7	0,3	11,8	0	0	8,5	0	0	0	0	97,9	
47 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37,4	1,1	14,6	17,7	0,4	12,8	0	0	8,2	0	0	0	0	96,5	
48 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37,5	1,4	14,6	17,2	0,4	13,1	0	0	8	0	0,6	0	0	97,1	
49 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	36	1,6	14,7	18,8	0,4	11,8	0	0	9,7	0,5	0	0	0	97,4	
50 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37	1,6	13,9	18,6	0,3	12,1	0	0	9,6	0	0	0	0	98	
№ п/п	Порода/Обр	Si	Ti	Al ^{iv}	Al ^{vi}	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Li*	OH*	F	Cl	Total
1 ¹	Тоналит/А-1	5,5	0,4	2,5	0,3	2,3	0,1	2,7	0	0	1,5	0,5	4	0	0	19,8
2 ¹	Тоналит/А-1	5,4	0,3	2,6	0,4	2,5	0,1	2,7	0	0	1,3	0,2	4	0	0	19,6
3 ¹	Тоналит/А-1	5,4	0,3	2,6	0,4	2,5	0,1	2,8	0	0	1,1	0,2	4	0	0	19,4
4 ¹	Тоналит/А-1	5,5	0,4	2,5	0,5	2	0,2	2,4	0	0,1	1,7	0,6	4	0	0	19,8

5 ¹	Диорит/А-3	5,5	0,4	2,5	0,4	1,9	0,2	2,6	0	0,1	1,7	0,8	4	0	0	20
6 ¹	Диорит/А-3	5,5	0,4	2,5	0,4	1,9	0,2	2,6	0	0	1,7	0,7	4	0	0	19,8
7 ¹	Диорит/А-3	5,5	0,3	2,5	0,5	2,4	0,1	2,4	0	0,1	1,3	0,4	4	0	0	19,5
8 ¹	Диорит/А-3	5,9	0,4	2,1	0,3	1,8	0,1	2,4	0	0,1	1,4	1,6	4	0	0	20,1
9 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	5,4	0,4	2,6	0,4	2,1	0,2	2,3	0	0,1	1,8	0,6	4	0	0	19,9
10 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	5,4	0,1	2,6	0,3	1,9	0,1	3,5	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,4
11 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	5,6	0,3	2,4	0,3	2	0,1	2,9	0	0	1,9	0,5	4	0	0	19,9
12 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	5,4	0,3	2,6	0,2	2,1	0,1	2,9	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,2
13 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	5,6	0,4	2,4	0,2	2,2	0	2,8	0	0	1,9	0,3	4	0	0	19,8
14 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	5,5	0,3	2,5	0,3	2,2	0	2,8	0	0	2	0,3	4	0	0	19,9
15 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	5,5	0,3	2,5	0,2	2,1	0	2,8	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,1
16 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	5,5	0,2	2,5	0,3	2,1	0,1	3	0	0	1,7	0,4	4	0	0	19,9
17 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	5,5	0,4	2,5	0,3	1,9	0,1	2,7	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,1
18 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	5,5	0,2	2,5	0,3	2	0	2,9	0	0	1,8	0,9	4	0	0	20,2
19 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	5,5	0,3	2,5	0,3	2	0,1	2,9	0	0	1,8	0,6	4	0	0	20
20 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	5,6	0,3	2,4	0,3	2	0,1	2,9	0	0	1,9	0,5	4	0	0	20
21 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	5,5	0,2	2,5	0,3	1,9	0	3	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,2
22 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	5,5	0,4	2,5	0,2	1,9	0,1	2,8	0	0	1,8	0,9	4	0	0	20,1
23 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	5,6	0,3	2,4	0,2	2	0,1	2,8	0	0	1,8	0,9	4	0	0	20,1
24 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	5,5	0,3	2,5	0,3	2	0,1	2,8	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,1
25 ⁵	Тоналит/А ₂₅ -4	5,6	0,4	2,4	0,1	2,1	0	2,9	0	0	1,8	0,7	4	0	0	20
26 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	5,6	0,3	2,4	0,1	2,1	0	2,8	0	0	1,8	0,8	4	0	0	20,1
27 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	5,5	0,3	2,5	0,2	2	0,1	3	0	0	1,7	0,7	4	0	0	20
28 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -4	5,6	0,4	2,4	0,3	1,9	0,1	2,7	0	0,1	1,9	0,8	4	0	0	20,1
29 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -5	5,5	0,4	2,5	0,2	2,1	0,1	2,7	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,1
30 ²	Лейко гранит/А ₂₅ -6	5,6	0,4	2,4	0,2	2,1	0,1	2,7	0	0	1,8	0,7	4	0	0	20
31 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	5,6	0,4	2,4	0,1	2,6	0	2,5	0	0	1,9	0,3	4	0	0	19,8
32 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	5,6	0,2	2,4	0,2	2,5	0	2,6	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,2
33 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	5,6	0,2	2,4	0,2	2,4	0	2,6	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,2
34 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	5,6	0,2	2,4	0,3	2,6	0	2,5	0	0	2	0,2	4	0	0	19,9
35 ³	Гранит/Е ₂₅ -2	5,6	0,2	2,4	0,2	2,4	0,1	2,7	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,2
36 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,3	2,4	0,2	2,5	0,1	2,5	0	0	1,9	0,6	4	0	0	20,1
37 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,7	0,2	2,3	0,3	2,5	0,1	2,7	0	0	1,9	0,5	4	0	0	20,1
38 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,2	2,4	0,3	2,5	0	2,6	0	0	2	0,6	4	0	0	20,1
39 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,7	0,2	2,3	0,1	2,5	0	2,7	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,1

40 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,2	2,4	0,2	2,4	0,1	2,7	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,2
41 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,2	2,4	0,2	2,5	0,1	2,6	0	0	2	0,4	4	0	0	20
42 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,2	2,4	0,1	2,4	0,1	2,7	0	0	1,8	1	4	0	0	20,3
43 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,6	0,2	2,4	0,7	2,5	0	2,2	0	0	1,1	1	4	0	0	19,7
44 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,7	0,1	2,3	0,3	2,3	0	2,8	0	0	1,6	0,7	4	0	0	20
45 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	5,5	0,2	2,5	0,3	2,3	0,1	2,6	0	0	1,9	0,9	4	0	0	20,2
46 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	5,7	0,4	2,3	0,1	2,2	0	2,7	0	0	1,6	0,9	4	0	0	20
47 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	5,8	0,1	2,2	0,4	2,3	0	2,9	0	0	1,6	0,3	4	0	0	19,8
48 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	5,6	0,2	2,4	0,2	2,2	0	2,9	0	0	1,5	1	4	0	0	20,2
49 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	5,5	0,2	2,5	0,2	2,4	0	2,7	0	0	1,9	0,8	4	0	0	20,3
50 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	5,7	0,2	2,3	0,2	2,4	0	2,8	0	0	1,9	0,7	4	0	0	20,1

Примечание. Рассчитано на 20 атомов кислорода.

Таблица 3. Химический состав и формульные коэффициенты Са-На-К полевых шпатов из гранитоидных массивов Адамелло¹, Ахунувский² и Шабровский³
Table 3. Chemical composition and formula units of Ca-Na-K feldspars from Adamello¹, Akhun², and Shabry³ granitoid massifs

№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Ab	Or	Si	Ti	Al	Fe ²⁺	Ca	Na	K	Total
1 ¹	Тоналит/А-1	53,4	0	27,2	0,3	9,6	5,7	0	96,2	48,2	51,8	0	10	0	6	0	1,9	2,1	0	20
2 ¹	Тоналит/А-1	53	0	28,5	0,2	11,1	5,4	0,2	98,4	52,5	46,5	1	9,9	0	6,3	0	2,2	2	0	20,5
3 ¹	Тоналит/А-1	48,1	0	32,1	0,2	15,1	2,8	0,1	98,3	74,6	25	0,4	9	0	7,1	0	3	1	0	20,2
4 ¹	Тоналит/А-1	59,7	0	25,5	0	7,2	7,8	0,2	100,3	33,3	65,7	1	11,2	0	5,6	0	1,4	2,8	0	21,1
5 ¹	Тоналит/А-1	56,3	0	28,9	0,1	10,4	5,7	0,1	101,6	49,8	49,5	0,7	10,5	0	6,4	0	2,1	2,1	0	21,1
6 ¹	Диорит/А-3	54,4	0	28	0,2	10,8	5,6	0,1	99,1	51,3	48	0,7	10,2	0	6,2	0	2,2	2	0	20,6
7 ¹	Диорит/А-3	54,5	0	26,9	0,3	9,2	5,8	0,3	97	46,1	52,4	1,5	10,2	0	5,9	0,1	1,9	2,1	0,1	20,2
8 ¹	Диорит/А-3	54,7	0	28,4	0,2	10,6	5,9	0,2	100	49,1	49,8	1,1	10,2	0	6,3	0	2,1	2,2	0	20,8
9 ¹	Диорит/А-3	54,8	0	26,6	0,2	8,9	6	0,2	96,7	44,5	54,4	1,1	10,3	0	5,9	0	1,8	2,2	0	20,2
10 ¹	Диорит/А-3	54,5	0	29	0,2	10,8	5,4	0,2	100	52,1	47	0,9	10,2	0	6,4	0	2,2	2	0	20,8
11 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	62,3	0	22,8	0,2	4,7	8,4	0,3	98,7	23,2	74,9	1,9	11,7	0	5	0	0,9	3	0,1	20,8
12 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	65,1	0	21,5	0	3,4	9	0,1	99,1	17,1	82,2	0,7	12,2	0	4,7	0	0,7	3,3	0	20,9
13 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	56	0	21,5	0	4,4	7,6	0,2	89,7	23,7	74,8	1,5	10,5	0	4,7	0	0,9	2,8	0,1	18,9
14 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	56,7	0	20,8	0,1	3,7	7,8	0,3	89,5	20,2	77,6	2,2	10,6	0	4,6	0	0,7	2,8	0,1	18,9
15 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	57,6	0	25,5	0,2	7	7,1	0,2	97,5	35	63,8	1,2	10,8	0	5,6	0	1,4	2,6	0,1	20,4
16 ²	Тоналит/А ₂₅ -2а	61,5	0	23	0,2	4,3	8,5	0,2	97,7	21,5	77,2	1,4	11,5	0	5,1	0	0,9	3,1	0,1	20,6
17 ²	Тоналит/А ₂₅ -2а	62,4	0	23,7	0,2	4,4	8,5	0,1	99,3	21,9	77,4	0,7	11,7	0	5,2	0	0,9	3,1	0	20,9

18 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	60,9	0	23,3	0,1	4,7	8,4	0,1	97,5	23,6	75,5	0,8	11,4	0	5,1	0	0,9	3	0	20,6
19 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	61,4	0	22,6	0,2	4,1	8,5	0,3	97,1	20,8	77,1	2	11,5	0	5	0	0,8	3,1	0,1	20,5
20 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	63	0	23,1	0,1	5,4	8,1	0,1	99,8	26,5	72,9	0,5	11,8	0	5,1	0	1,1	2,9	0	21
21 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	63,5	0	22,5	0	4,3	8,7	0,2	99,2	21,1	77,5	1,4	11,9	0	5	0	0,9	3,1	0,1	20,9
22 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	60	0	24,3	0	5,8	7,9	0,1	98,1	28,9	70,5	0,6	11,2	0	5,4	0	1,2	2,9	0	20,6
23 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	59,5	0	24	0,1	5,5	8	0,2	97,3	27,1	71,9	0,9	11,1	0	5,3	0	1,1	2,9	0	20,5
24 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	55,7	0	27,3	0,1	8,8	6,3	0,2	98,3	43,1	55,7	1,2	10,4	0	6	0	1,8	2,3	0	20,5
25 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	63,3	0	23,2	0,2	4,8	8,7	0,4	100,6	22,7	74,8	2,5	11,9	0	5,1	0	1	3,2	0,1	21,2
26 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	62,6	0	23,4	0	4,2	9	0,2	99,3	20,2	78,7	1,1	11,7	0	5,2	0	0,8	3,3	0	21
27 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	55,6	0	24,1	0,2	8	7,5	0,1	95,5	37,2	62,3	0,5	10,4	0	5,3	0	1,6	2,7	0	20,1
28 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	62,9	0	23,1	0,2	4,6	8,9	0,2	99,9	21,8	76,9	1,2	11,8	0	5,1	0	0,9	3,2	0,1	21,1
29 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	63,1	0	22,8	0	3,6	9,2	0,5	99,3	17,2	79,8	3	11,8	0	5	0	0,7	3,3	0,1	21
30 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	62,9	0	24	0,3	5,3	8,8	0,2	101,4	25	74,1	0,9	11,8	0	5,3	0	1,1	3,2	0	21,4
31 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	63,7	0	23,1	0	4,8	9	0,2	100,9	22,6	76,2	1,2	11,9	0	5,1	0	1	3,3	0,1	21,3
32 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	66,8	0	20,5	0	1,4	10,8	0	99,6	6,7	93,3	0	12,5	0	4,5	0	0,3	3,9	0	21,2
33 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	63,5	0	23	0	4,4	9,1	0,2	100,3	20,9	77,8	1,3	11,9	0	5,1	0	0,9	3,3	0,1	21,2
34 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	64,8	0	22,5	0,2	4	9,4	0,4	101,3	18,4	79,6	2	12,1	0	5	0	0,8	3,4	0,1	21,4
35 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	67,5	0	21,6	0	2	10,7	0,2	102	9,3	89,7	0,9	12,6	0	4,8	0	0,4	3,9	0	21,7
36 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	63,9	0	22,7	0	3,8	9,3	0,3	100,1	18,1	80,1	1,9	12	0	5	0	0,8	3,4	0,1	21,2
37 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	64,4	0	22,2	0	3,5	9,7	0,2	99,8	16,4	82,5	1,1	12	0	4,9	0	0,7	3,5	0	21,2
38 ³	Гранит/E ₂₅ -1	59,5	0	21,2	0,1	3	8,6	0,2	92,7	16,2	82,5	1,3	11,1	0	4,7	0	0,6	3,1	0	19,6
39 ³	Гранит/E ₂₅ -1	62,7	0	20,7	0	1,8	9,8	0,1	95,2	9,2	90,2	0,7	11,7	0	4,6	0	0,4	3,5	0	20,3
40 ³	Гранит/E ₂₅ -1	66,8	0	20	0	0,4	10,7	0,1	98	2,1	97,2	0,7	12,5	0	4,4	0	0,1	3,9	0	20,9
41 ³	Гранит/E ₂₅ -1	57,4	0	20,3	0,1	2,9	8,3	0,1	89,2	16,1	83,1	0,8	10,7	0	4,5	0	0,6	3	0	18,9
42 ³	Гранит/E ₂₅ -1	71,1	0	9,6	0	0,3	5,7	0	86,7	2,5	97,5	0	13,3	0	2,1	0	0,1	2,1	0	17,6
43 ³	Гранит/E ₂₅ -2	62,5	0	21,8	0,1	2,9	9,35	0,2	87,5	14,6	84,5	1	11,7	0	4,8	0	0,6	3,4	0	20,5
44 ³	Гранит/E ₂₅ -2	65,4	0	22,2	0	3,5	9,3	0,1	100,5	17,1	82,3	0,6	12,2	0	4,9	0	0,7	3,4	0	21,2
45 ³	Гранит/E ₂₅ -2	60,7	0	23,4	0,1	4,7	8,4	0,1	97,4	23,2	76	0,8	11,4	0	5,2	0	0,9	3,1	0	20,6
46 ³	Гранит/E ₂₅ -3	65	0	21,7	0,2	2,3	9,9	0,1	99,2	11,4	87,8	0,8	12,2	0	4,8	0	0,5	3,6	0	21,1
47 ³	Гранит/E ₂₅ -3	64,8	0	22,1	0,1	2,5	10,1	0,1	99,8	12	87,3	0,7	12,1	0	4,9	0	0,5	3,7	0	21,2
48 ³	Гранит/E ₂₅ -3	66,9	0	20	0	0,4	11	0,1	98,3	1,7	97,7	0,6	12,5	0	4,4	0	0,1	4	0	21
49 ³	Гранит/E ₂₅ -3	65,1	0	19,7	0	0,5	10,6	0,1	96	2,5	97,1	0,4	12,2	0	4,3	0	0,1	3,9	0	20,5
50 ³	Гранит/E ₂₅ -3	64,8	0	21,8	0,2	3,2	9,3	0,2	99,4	16	83,1	0,9	12,1	0	4,8	0	0,6	3,4	0	21
51 ³	Диорит/E ₂₅ -3	68,7	0	20,4	0	0,3	11,1	0	100,5	1,5	98,5	0	12,9	0	4,5	0	0,1	4	0	21,4
52 ³	Диорит/E ₂₅ -3	65,7	0	21,6	0,1	3,4	9	0,2	100	17	82,1	0,9	12,3	0	4,8	0	0,7	3,3	0	21,1
53 ³	Диорит/E ₂₅ -3	60,5	0	22,6	0,2	4,1	8,6	0,2	96,1	20,5	78,3	1,2	11,3	0	5	0	0,8	3,1	0	20,3
54 ³	Диорит/E ₂₅ -3	67,7	0	20	0,3	0,2	10,9	0,1	99,3	1,2	98,2	0,6	12,7	0	4,4	0	0	4	0	21,2

55 ³	Диорит/E ₂₅ -3	65,1	0	21,7	0,2	2,6	9,9	0,2	99,7	12,7	86,3	1	12,2	0	4,8	0	0,5	3,6	0	21,2
56 ³	Диорит/E ₂₅ -4	65,3	0	19,5	0,2	0,4	10,5	0,1	95,9	1,8	97,4	0,7	12,2	0	4,3	0	0,1	3,8	0	20,5
57 ³	Диорит/E ₂₅ -4	59,9	0	23,3	0,1	4,6	8,3	0,1	96,2	23,3	76,1	0,7	11,2	0	5,1	0	0,9	3	0	20,3
58 ³	Диорит/E ₂₅ -4	62	0	21,9	0	3,1	9	0,1	96,1	16	83,5	0,5	11,6	0	4,8	0	0,6	3,3	0	20,3
59 ³	Диорит/E ₂₅ -4	66,3	0	20	0	0,6	10,4	0,1	97,4	3,1	96,2	0,7	12,4	0	4,4	0	0,1	3,8	0	20,7
60 ³	Диорит/E ₂₅ -4	65,7	0	22,4	0,1	2,8	9,8	0,2	101	13,4	85,8	0,9	12,3	0	4,9	0	0,6	3,6	0	21,4
Kfs																				
№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Ab	Or	Si	Ti	Al	Fe ²⁺	Ca	Na	K	Total
61 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	64,1	0	18,4	0,1	0	0,5	15,7	98,8	0	5	95	12	0	4,1	0	0	0,2	3,7	20
62 ²	Тоналит/A ₂₅ -2а	65,2	0	19,6	0	0	0,4	16,7	101,9	0	3,8	96,2	12,2	0	4,3	0	0	0,2	4	20,7
63 ²	Тоналит/A ₂₅ -2а	61,4	0	18,3	0	0	0,6	15,7	96	0	5,8	94,2	11,5	0	4	0	0	0,2	3,7	19,5
64 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	62,8	0	18,7	0	0	0,5	16,2	98,1	0	4,5	95,5	11,7	0	4,1	0	0	0,2	3,9	19,9
65 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	64	0	18,9	0	0	0,3	16,4	99,6	0	2,6	97,4	12	0	4,2	0	0	0,1	3,9	20,2
66 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	63,2	0	18,8	0	0	0,3	16,4	98,7	0	3,1	96,9	11,8	0	4,1	0	0	0,1	3,9	20
67 ²	Тоналит/A ₂₅ -3	63,4	0	18,8	0	0	0,4	16,5	99,1	0	3,3	96,7	11,9	0	4,2	0	0	0,1	3,9	20,1
68 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	64,9	0	18,4	0	0	0,4	16,1	99,8	0	3,5	96,5	12,1	0	4,1	0	0	0,1	3,8	20,2
69 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	64,9	0	18,4	0	0	0,4	16	99,7	0	3,3	96,7	12,2	0	4,1	0	0	0,1	3,8	20,2
70 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	64,4	0	18,5	0	0	0,5	15,9	99,2	0	4,2	95,8	12	0	4,1	0	0	0,2	3,8	20,1
71 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	65,4	0	18,5	0	0	0,4	16	100,4	0	3,8	96,2	12,2	0	4,1	0	0	0,2	3,8	20,3
72 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	65,1	0	18,4	0	0	0,5	16,2	100,3	0	4,5	95,5	12,2	0	4,1	0	0	0,2	3,9	20,3
73 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	65	0	18,2	0	0	0,5	16,3	99,9	0	4,1	95,9	12,2	0	4	0	0	0,2	3,9	20,2
74 ²	Лейкогранит/A ₂₅ -4	65	0	18,4	0	0	0,4	16,3	100	0	3,4	96,6	12,2	0	4,1	0	0	0,1	3,9	20,2
75 ²	Гранит/E ₂₅ -3	64	0	18,7	0	0	0,4	16,6	99,8	0	3,9	96,1	12	0	4,1	0	0	0,2	4	20,2
76 ²	Гранит/E ₂₅ -3	63,5	0	18,5	0	0	0,4	16,1	98,5	0	4	96	11,9	0	4,1	0	0	0,2	3,8	20
77 ²	Гранит/E ₂₅ -3	63,3	0	18,7	0	0	0,5	16,4	98,9	0	4	96	11,8	0	4,1	0	0	0,2	3,9	20,1
78 ²	Гранит/E ₂₅ -3	64	0	18,8	0	0	0,5	16,5	99,7	0	4,7	95,3	12	0	4,1	0	0	0,2	3,9	20,2
79 ²	Гранит/E ₂₅ -3	63	0	19,4	0	0	0,5	16,8	99,7	0	4,6	95,4	11,8	0	4,3	0	0	0,2	4	20,3
80 ²	Диорит/E ₂₅ -3	63,5	0	18,8	0,1	0	0,5	16,6	99,5	0	4,3	95,7	11,9	0	4,2	0	0	0,2	4	20,2
81 ²	Диорит/E ₂₅ -4	62,4	0	18,3	0,2	0	0,5	16,1	97,4	0	4,3	95,7	11,7	0	4	0	0	0,2	3,8	19,7
82 ²	Диорит/E ₂₅ -4	63,4	0	18,6	0	0	0,5	16,6	99	0	4	96	11,9	0	4,1	0	0	0,2	4	20,1
83 ²	Диорит/E ₂₅ -4	63,6	0	18,4	0,2	0	0,4	16,5	99,1	0	3,9	96,1	11,9	0	4,1	0	0	0,2	3,9	20,1
84 ²	Диорит/E ₂₅ -4	65,8	0	18,3	0	0	0,4	16,3	100,7	0	3,5	96,5	12,3	0	4	0	0	0,1	3,9	20,4

Примечание. Рассчитано на 20 атомов кислорода.

Таблица 4. Химический состав и формульные коэффициенты эпидота из гранитоидных массивов Адамелло¹, Ахуновский² и Шабровский³
 Table 4. Chemical composition and formula units of epidote from granitoid massifs Adamello¹, Akhun², and Shabry³

№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	MnO ₂	Sc ₂ O ₃	Total			
1 ¹	Тоналит/А-1	38,3	24,4	12,5	0,0	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,3	100,0			
2 ¹	Тоналит/А-1	37,4	22,7	13,1	0,0	23,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	97,1			
3 ¹	Тоналит/А-1	37,4	23,4	11,1	0,4	18,0	1,7	4,8	0,0	2,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,7	0,0	99,8			
4 ¹	Тоналит/А-1	32,5	17,5	13,2	1,0	13,6	4,8	9,6	1,1	1,8	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	97,4			
5 ¹	Диорит/А-3	36,6	22,4	12,6	0,0	21,0	1,2	2,7	0,0	0,9	0,7	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	98,5			
6 ¹	Диорит/А-3	33,8	18,3	13,3	0,9	14,3	3,8	9,4	1,1	2,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,4			
7 ¹	Диорит/А-3	35,4	21,0	13,2	0,0	19,8	2,0	3,6	0,0	1,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	97,1			
8 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	36,1	21,0	14,8	0,0	22,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	95,1			
9 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	36,2	21,1	14,5	0,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	95,0			
10 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	37,3	24,8	12,2	0,0	24,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	99,3			
11 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	38,6	22,2	15,2	0,0	24,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	100,9			
12 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	38,1	22,7	14,5	0,0	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	99,9			
13 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	37,9	23,7	13,2	0,0	23,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	99,2			
14 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	37,7	23,0	14,1	0,0	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	99,2			
15 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	40,2	23,6	13,0	0,0	23,2	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	100,7			
16 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	38,0	22,0	14,9	0,0	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	98,4			
17 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	38,1	25,3	12,2	0,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	100,0			
18 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	37,4	22,3	14,0	0,0	23,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	97,4			
19 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	37,5	24,0	12,2	0,0	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	97,3			
20 ³	Гранит/Е ₂₅ -2	37,8	22,8	13,9	0,0	23,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	98,3			
21 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	36,9	22,2	13,7	0,0	23,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	96,1			
22 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	37,2	22,6	13,8	0,0	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	97,2			
23 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	37,9	23,1	13,9	0,0	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	98,9			
24 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	38,1	23,1	14,0	0,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	99,6			
25 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	37,8	23,6	13,2	0,0	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	98,7			
26 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37,7	23,3	13,1	0,0	23,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	97,8			
27 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	37,7	23,9	12,6	0,0	23,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	98,0			
№ п/п	Порода/Обр	Si	Al	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Ca	La	Ce	Pr	Nd	Th	Ti	P	V	Mn	REE	Total _(apfu)
1 ¹	Тоналит/А-1	3,0	2,2	0,0	2,2	0,7	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
2 ¹	Тоналит/А-1	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
3 ¹	Тоналит/А-1	3,2	2,3	0,0	2,3	0,6	0,1	0,0	1,6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	8,0
4 ¹	Тоналит/А-1	3,6	2,3	0,0	2,3	0,6	0,0	0,2	0,0	0,3	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	8,0

5 ¹	Диорит/А-3	3,7	2,7	0,0	2,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	8,0
6 ¹	Диорит/А-3	4,0	2,6	0,0	2,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	8,0
7 ¹	Диорит/А-3	3,7	2,5	0,0	2,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	8,0
8 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
9 ²	Тоналит/А ₂₅ -1	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
10 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	2,9	2,2	0,1	2,2	0,8	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
11 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	3,0	2,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
12 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
13 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	3,0	2,2	0,0	2,2	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
14 ²	Диорит/А ₂₅ -2а	3,0	2,1	0,1	2,0	0,9	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
15 ²	Тоналит/А ₂₅ -3	3,1	2,1	0,0	2,1	0,2	0,7	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
16 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	3,0	2,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
17 ²	Тоналит/А ₂₅ -4	3,0	2,3	0,0	2,3	0,7	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
18 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
19 ³	Гранит/Е ₂₅ -1	3,0	2,2	0,0	2,2	0,8	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
20 ³	Гранит/Е ₂₅ -2	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
21 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
22 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
23 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	3,0	2,2	0,0	2,2	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
24 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	3,0	2,1	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
25 ³	Диорит/Е ₂₅ -3	3,0	2,2	0,0	2,2	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
26 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	3,0	2,2	0,0	2,2	0,9	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
27 ³	Диорит/Е ₂₅ -4	3,0	2,2	0,0	2,2	0,8	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0

Примечание. Рассчитано на 12,5 атомов кислорода.

Таблица 5. Химический состав и формульные коэффициенты хлорита из гранитоидных массивов Адамелло¹, Ахунувский²
Table 5. Chemical composition and formula units of chlorite from granitoid massifs Adamello¹, Akhun²

№ п/п	Порода/Обр	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Total
1 ¹	Тоналит/А-1	24,7	0,0	19,8	24,7	0,6	14,2	0,0	0,0	84,1
2 ¹	Тоналит/А-1	26,6	0,0	19,4	26,2	0,6	15,1	0,1	0,0	88,0
3 ¹	Тоналит/А-1	28,1	0,0	22,2	26,5	0,7	16,7	0,0	0,0	94,2
4 ¹	Тоналит/А-1	24,7	0,0	18,9	24,0	0,6	14,3	0,0	0,1	82,6
5 ¹	Тоналит/А-1	26,0	0,0	20,7	21,4	0,7	17,2	0,0	0,1	86,1
6 ¹	Диорит/А-3	26,6	0,0	22,9	23,1	0,7	17,5	0,0	0,0	90,8
7 ¹	Диорит/А-3	27,9	0,0	22,0	24,1	0,8	18,1	0,0	0,0	92,8
8 ¹	Диорит/А-3	28,8	0,0	22,6	24,4	0,7	18,4	0,0	0,1	95,0

9 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	27,9	0,0	19,1	21,6	0,3	19,1	0,0	0,0	87,9				
10 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	28,4	0,1	19,2	21,6	0,6	19,4	0,1	0,0	89,4				
11 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	30,6	0,1	20,5	22,2	0,6	21,1	0,1	0,1	95,3				
12 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	29,8	0,0	20,4	22,6	0,4	20,4	0,1	0,0	93,7				
13 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	26,5	0,0	18,6	17,3	0,6	20,2	0,0	0,1	83,3				
14 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	25,5	0,0	17,6	22,6	0,5	16,4	0,0	0,0	82,6				
15 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	26,4	0,1	17,2	20,8	0,5	17,6	0,0	0,2	82,7				
16 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	28,6	0,3	17,5	18,8	0,6	20,8	0,3	0,2	87,1				
17 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	28,8	0,0	18,0	17,8	0,6	21,4	0,0	0,2	86,8				
18 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	27,8	0,0	19,3	19,2	0,7	20,4	0,0	0,0	87,4				
№ п/п	Порода/Обр	Si	Ti	Al ^{iv}	Al ^{vi}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	#Fe	Fe ²⁺ +Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	K	Total
1 ¹	Тоналит/A-1	5,5	0,0	2,6	2,6	0,0	4,5	0,5	4,6	0,1	4,7	0,0	0,0	36,0
2 ¹	Тоналит/A-1	5,6	0,0	2,4	2,5	0,0	4,6	0,5	4,6	0,1	4,8	0,0	0,0	36,0
3 ¹	Тоналит/A-1	5,5	0,0	2,5	2,6	0,1	4,3	0,5	4,3	0,1	4,9	0,0	0,0	35,9
4 ¹	Тоналит/A-1	5,5	0,0	2,5	2,5	0,0	4,5	0,5	4,5	0,1	4,8	0,0	0,1	36,0
5 ¹	Тоналит/A-1	5,5	0,0	2,5	2,6	0,0	3,7	0,4	3,8	0,1	5,4	0,0	0,0	36,0
6 ¹	Диорит/A-3	5,3	0,0	2,7	2,7	0,0	3,8	0,4	3,9	0,1	5,2	0,0	0,0	36,0
7 ¹	Диорит/A-3	5,5	0,0	2,5	2,6	0,0	3,9	0,4	4,0	0,1	5,3	0,0	0,0	36,0
8 ¹	Диорит/A-3	5,5	0,0	2,5	2,6	0,1	3,8	0,4	3,9	0,1	5,2	0,0	0,0	35,9
9 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	5,7	0,0	2,3	2,4	0,0	3,7	0,4	3,7	0,0	5,9	0,0	0,0	36,0
10 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	5,8	0,0	2,3	2,3	0,1	3,6	0,4	3,7	0,1	5,8	0,0	0,0	35,9
11 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	5,8	0,0	2,2	2,3	0,1	3,4	0,4	3,5	0,1	5,9	0,0	0,1	35,9
12 ²	Тоналит/A ₂₅ -1	5,7	0,0	2,3	2,4	0,1	3,6	0,4	3,6	0,1	5,9	0,0	0,0	35,9
13 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	5,7	0,0	2,3	2,4	0,0	3,1	0,3	3,1	0,1	6,4	0,0	0,1	36,0
14 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	5,7	0,0	2,3	2,3	0,0	4,2	0,4	4,2	0,1	5,4	0,0	0,0	36,0
15 ²	Диорит/A ₂₅ -2а	5,8	0,0	2,2	2,3	0,0	3,8	0,4	3,8	0,1	5,7	0,0	0,1	36,0
16 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	5,9	0,1	2,1	2,1	0,0	3,2	0,3	3,2	0,1	6,4	0,1	0,1	36,0
17 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	5,9	0,0	2,1	2,2	0,0	3,0	0,3	3,0	0,1	6,5	0,0	0,1	36,0
18 ²	Тоналит/A ₂₅ -4	5,7	0,0	2,3	2,4	0,0	3,3	0,4	3,3	0,1	6,2	0,0	0,0	36,0

Примечание. Рассчитано на 28 атомов кислорода.