

ПЕТРОГЕНЕЗИС КОМБИНИРОВАННЫХ ДАЕК В ГРАНИТОИДАХ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Г.Н. Бурмакина¹, А.А. Цыганков^{1,2}, В.Б. Хубанов^{1,2}

¹Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

²Бурятский государственный университет, 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия

В результате проведенных исследований выделены две разновидности комбинированных даек, различающихся морфологией и внутренним строением, зависящих от: 1) пропорций салического и базитового компонентов; 2) реологического состояния вмещающей среды. Последняя может быть представлена как твердым субстратом с открытыми трещинами, так и расплавом различных стадий кристаллизации. Установлен изотопный возраст даек в Шалутинском массиве, составляющий 290.8 ± 2.7 и 283.4 ± 3.4 млн лет, коррелирующий с временем формирования плутона, а также возраст комбинированной дайки, прорывающей метаморфические образования на восточном побережье оз. Байкал, — 284.10 ± 0.96 млн лет. Массовое формирование комбинированных даек в Западном Забайкалье коррелирует с позднепалеозойским этапом магматизма, в результате которого образовалась одна из крупнейших на Земле гранитоидных провинций. Внедрение даек не было одномоментным событием. Оно растянуто во времени как минимум на 10–12 млн лет. Есть все основания полагать, что формирование даек в каждом конкретном случае связано непосредственно с внедрением крупных объемов салических магм и становлением отдельных гранитоидных плутонов. Значительно реже встречаются раннемезозойские комбинированные дайки, ассоциирующие с щелочно-гранитоидными плутонами позднекуналейского магматического комплекса, формировавшегося с 230 до 210 млн л. н.

Образование базитовых магм комбинированных даек происходило на глубинах более 75 км за счет плавления модифицированного (обогащенного коровыми компонентами) мантийного источника. Салические компоненты даек, независимо от их геологического положения, в целом близки по составу к гранитоидам плутонической фации, а имеющиеся отличия обусловлены, по-видимому, процессами гибридизации в глубинных условиях.

Комбинированные дайки, гранитоиды, смешение, источники магм, U–Pb изотопный возраст, условия формирования, Западное Забайкалье.

PETROGENESIS OF COMPOSITE DIKES IN GRANITOIDS OF WESTERN TRANSBAIKALIA

G.N. Burmakina, A.A. Tsygankov, and V.B. Khubanov

The performed studies have revealed two varieties of composite dikes differing in morphology and internal structure depending on (1) the proportions of salic and basic components and (2) the rheologic state of the host environment. The latter can be both a solid substrate with open fractures and a melt at different stages of crystallization. The evaluated isotopic age of dikes in the Shaluta massif, 290.8 ± 2.7 Ma and 283.4 ± 3.4 Ma, is correlated with the time of the pluton formation. The age of the composite dike breaking through the metamorphic deposits on the eastern shore of Lake Baikal is 284.10 ± 0.96 Ma. The mass formation of composite dikes in western Transbaikalia is correlated with the Late Paleozoic magmatism, which resulted in one of the Earth's largest granitoid provinces. The intrusion of dikes was not a single-stage event; it lasted at least 10–12 Myr and was apparently related to the repeated intrusion of large volumes of salic magmas and the formation of granitoid plutons. Early Mesozoic composite dikes associated with alkali-granitoid plutons of the Late Kunalet igneous complex (230–210 Ma) are much scarcer.

Basic magmas of the composite dikes were generated at depths greater than 75 km as a result of the melting of a modified (enriched in crustal components) mantle source. Salic components of the dikes, independently of their geologic position, are generally similar in composition to the granitoids of the plutonic facies, and the differences are apparently due to hybridization proceeding at great depths.

Composite dikes, granitoids, mixing, sources of magmas, U–Pb isotopic age, formation conditions, western Transbaikalia

ВВЕДЕНИЕ

Комбинированные дайки, состоящие из «одновременных» пород контрастного состава [Wiebe, 1973; Wiebe, Ulrich, 1997], представляют собой прямое геологическое доказательство сосуществования и взаимодействия мантийных базитовых и коровых салических магм. Повышенный интерес к этим об-

разованиям обусловлен прежде всего спецификой условий и механизмов взаимодействия магм, кардинально различающихся реологическими свойствами и составом [Попов, 1984; Furman, Spera, 1985; Enclaves..., 1991; Wiebe, Ulrich, 1997; Wilcox, 1999; Складов, Федоровский, 2006; Litvinovsky et al., 2012]. Вместе с тем в последние годы становится все более очевидным тот факт, что комбинированные дайки так или иначе связаны с формированием крупных гранитных батолитов или целых гранитоидных провинций, например, Западное Забайкалье или Западный Сангилен [Литвиновский и др., 1993, 1995а,б; Zanzilevich et al., 1995; Титов и др., 1998, 2000; Litvinovsky et al., 2012; Кармышева и др., 2015]. Этот факт прежде всего указывает на наличие очагов базитовых магм, являющихся источником (главным/дополнительным) тепла и, вероятно, вещества (в том числе флюидов), необходимых для корового плавления и объясняющих многие геохимические характеристики гранитоидов, что, в свою очередь, является важным аргументом в дискуссии о природе широкомасштабного внутриконтинентального гранитоидного магматизма [Розен, Федоровский, 2001; Chen, Grapes, 2007; Добрецов и др., 2010; Добрецов, 2011; Litvinovsky et al., 2011; Yarmolyuk et al., 2014; Кузьмин, Ярмолук, 2014; Ярмолук и др., 2016].

Кроме того, базитовая составляющая комбинированных даек несет геохимическую информацию о составе и условиях плавления мантийного источника, что, в свою очередь, может быть использовано при тестировании геодинамических моделей (плюмовая, деламинационная, надсубдукционная) [Halliday et al., 1995; Condie, 1997, 2005; Козловский и др., 2006; Zhang et al., 2008; Коваленко и др., 2009а,б].

По геологическому строению комбинированные дайки принято разделять на два типа [Wiebe, Ulrich, 1997], различающихся строением и условиями формирования. К первому типу относят дайки, состоящие из базитовой краевой части, как правило, с зоной закалки на контакте с вмещающими образованиями, и салической части, обычно доминирующей по объему. Переход от базитовой к салической части дайки постепенный, через всю гамму промежуточных разностей. Второй тип комбинированных даек имеет принципиально иное строение. Их основной объем сложен пиллоуподобными базитовыми обособлениями (нодулями, глобулами), сцементированными салическим материалом. При этом с вмещающими породами всегда контактирует салическая часть дайки, хотя ее доля может быть невелика — не более 10–15 % от общего объема дайки.

В Западном Забайкалье комбинированные дайки распространены достаточно широко. Они представлены обоими указанными выше типами [Литвиновский и др., 1993, 1995а,б; Zanzilevich et al., 1995; Титов и др., 1998, 2000; Хубанов, 2009; Litvinovsky et al., 2012; Врублевская и др., 2013], однако абсолютно доминируют дайки второго типа, которые и являются предметом настоящего исследования.

Основываясь на новых геологических, минералого-геохимических и изотопно-геохронологических данных, мы намерены обсудить возможные механизмы формирования даек второго типа, обосновать этапы дайкового магматизма, рассмотреть взаимосвязь с плутоническими комплексами, установить геохимический тип мантийного источника (или источников) базитовых магм.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В Западном Забайкалье выходы комбинированных даек группируются в полосу северо-восточного простираения, протягивающуюся от нижнего течения р. Хилок (правый приток р. Селенга) до п-ова Святой Нос (оз. Байкал) и правобережья нижнего течения р. Баргузин (рис. 1). Протяженность этой полосы составляет около 350 км, в ее пределах обнаружено порядка 10 проявлений комбинированных даек второго типа (далее будем называть их просто комбинированными дайками (CD), или минглинг-дайками, поскольку первый тип в данной статье не рассматривается). Некоторые из этих выходов были известны и изучены ранее [Литвиновский и др., 1993, 1995а,б; Zanzilevich et al., 1995; Титов и др., 1998, 2000; Litvinovsky et al., 2012], часть обнаружена нами впервые. Очевидно, что этим количеством комбинированных даек не ограничивается. Возможно, их распространение имеет не линейный, а ареальный характер, однако пока такие данные отсутствуют.

В подавляющем большинстве случаев CD располагаются внутри плутонов, сложенных кварцевыми сиенитами и кварцевыми монцонитами, принадлежащими к чивыркуйскому, зазинскому и нижнеселенгинскому комплексам (см. рис. 1) [Цыганков и др., 2010], сформировавшимся в конце карбона—начале перми (\approx с 305 до 280 млн л. н.). В районе сел. Харитоново (нижнее течение р. Хилок) комбинированные дайки залегают среди щелочно-полевошпатовых сиенитов Харитоновского массива [Zanzilevich et al., 1995], изотопный возраст которого составляет 230 млн лет [Reichow et al., 2010]. На противоположном окончании полосы выходов комбинированных даек они обнаружены среди докембрийских (?) биотит-амфиболовых кристаллических сланцев и гнейсов таланчанской и катковской свит (юго-восточное побережье Баргузинского залива (участок Максимиха), м. Нижнее Изголовье п-ова Святой Нос).

Несмотря на принадлежность к одному типу (второй тип, по [Wiebe, Ulrich, 1997]), CD существенно различаются по морфологии и внутреннему строению. Первая разновидность (CD₁) — это субгоризонтальные силло- или дайкоподобные тела с варьирующим соотношением салической и базитовой составляющих, иногда переходящие в синплутонические базитовые интрузии. Наиболее типичный при-

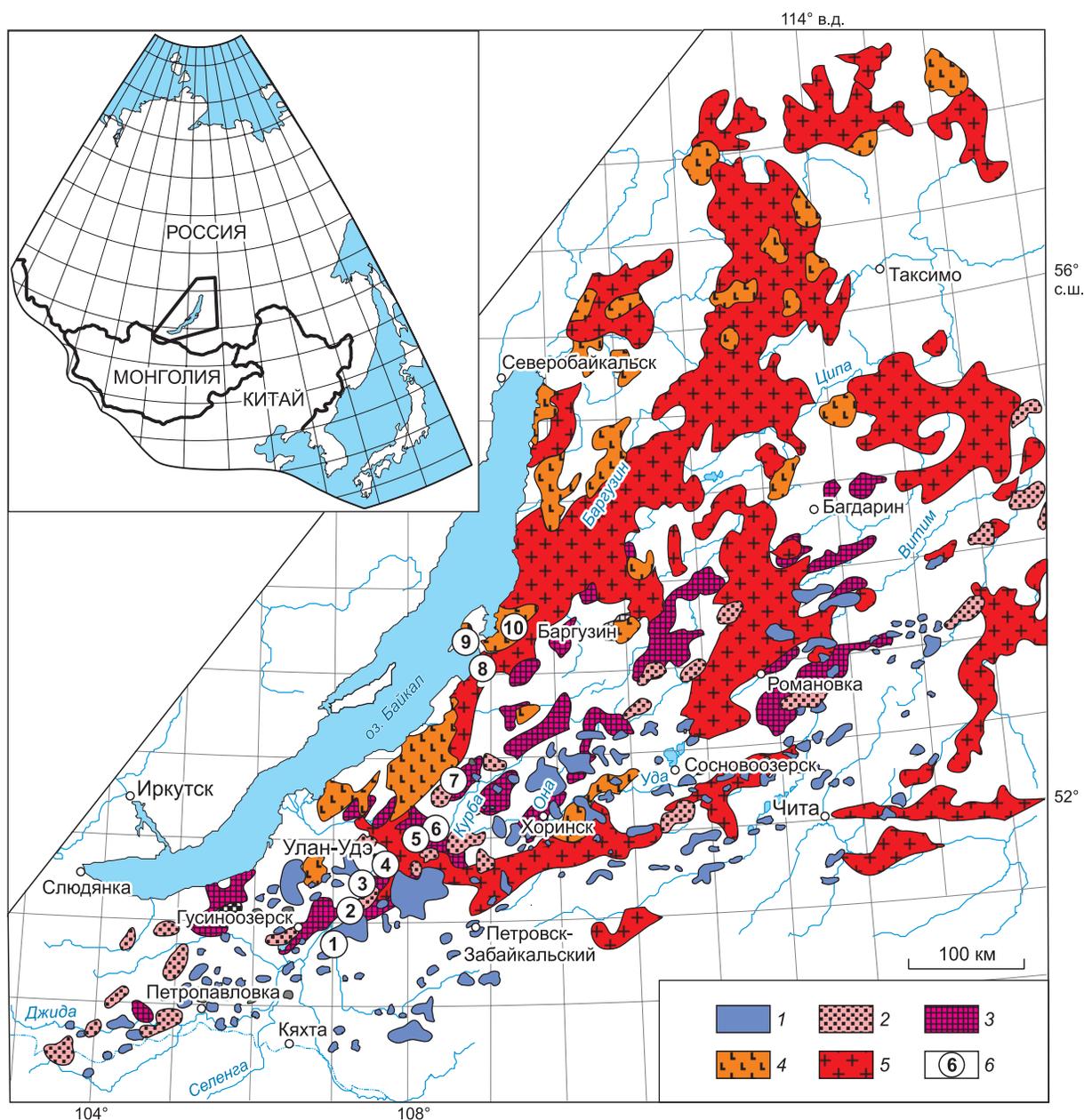


Рис. 1. Схема расположения герцинских гранитоидов Западного Забайкалья, составлена на основе [Карта..., 1989] с изменениями [Цыганков и др., 2010] и дополнениями.

На врезке показан контур изучаемого региона. 1 — щелочно-полевошпатовые и щелочные граниты и сиениты Монголо-Забайкальского вулканоплутонического пояса (ранне- и позднекуналейский комплексы (280—273 и 230—210 млн лет) без разделения); 2 — высококальцевая монцитит-сиенит-кварцево-сиенитовая с синплутоническими базитами интрузивная серия (нижнеселенгинский комплекс — 285—278 млн лет); 3 — граниты и кварцевые сиениты с синплутоническими базитами (засинский комплекс — 305—285 млн лет); 4 — известково-щелочные кварцевые сиениты, кварцевые монцититы и габброиды (чивыркуйский комплекс — 305—285 млн лет); 5 — известково-щелочные граниты (баргузинский комплекс — 330—290 млн лет); 6 — выходы комбинированных даек, участки: 1 — Харитоновский, 2 — Усть-Хилокский, 3 — Жиримский, 4 — Шалутинский, 5 — хр. Улан-Бургасы (реки Сухарка, Солонечная), 6 — Курбинский, 7 — Хасуртинский, 8 — Максимиha, 9 — Святой Нос, 10 — Нестерихинский.

мер — дайка в левом борту р. Селенга в районе дер. Старые Шалуты, описанная в работах [Литвиновский и др., 1995a; Litvinovsky et al., 2012]. Рассматриваемая дайка (рис. 2, а) залегает среди массивных среднезернистых кварцевых сиенитов первой фазы Шалутинского кварцево-сиенит-гранитного массива засинского интрузивного комплекса [Цыганков и др., 2010]. Содержание базитового материала по простиранию дайки варьирует от долей процента до 30—40 % общего объема дайки. Этот материал пред-

ставлен неправильными, часто пламевидными (свидетельство пластического течения) или изометричными базитовыми нодулями размером от 1—2 до 15—20 см по длинной оси (см. рис. 2, *a*). Зоны закалки в нодулях не зафиксированы. Характерны редкие порфиробласты розового калиевого полевого шпата (пелитизированного), четко выделяющиеся на фоне зеленовато-черной тонкозернистой массы



Рис. 2. Детали внутреннего строения комбинированных даек (темное — базитовая составляющая, светлое — салическая).

Дайки CD_1 типа: *a* — Шалутинский массив, дайка CD_1 , хорошо видна вытянутая, часто с расщепляющимися окончаниями (пламевидная) форма базитовых нодулей; *b* — комбинированная дайка Жиримского участка (Усть-Хилокский массив); *в* — зоны закалки (темные каймы) в базитовых нодулях комбинированной дайки Харитоновского щелочно-гранитоидного массива; дайки CD_2 типа: *г* — фрагмент комбинированной дайки (CD) в амфиболитах (Amph) п-ова Святой Нос: красная штриховая линия — контакт дайки с амфиболитами, срезающий лейкогранитную (Gr) жилу; *д* — дайка CD_2 Шалутинского массива, характерна округлая форма и большие размеры базитовых нодулей, в черном прямоугольнике — ксенолит среднезернистых амфиболовых габбро; *е* — текстуры течения в дайке Усть-Хилокского массива. Остальные пояснения см. в тексте.

нодулей. Последние «цементированы» мелкозернистым гранитом. Типична сложная, извилистая форма контактов с вмещающими кварцевыми сиенитами. Видимая протяженность этого тела составляет 100—150 м, мощность варьирует по простиранию, но в среднем не превышает 2—3 м.

На Жиримском участке, расположенном в правом борту р. Селенга примерно в 55 км к юго-западу от г. Улан-Удэ (см. рис. 1), наблюдается переход комбинированной дайки (см. рис. 2, б) в синплутоническую базитовую интрузию. Комбинированная дайка на этом участке залегает среди кварцевых сиенитов и гибридных кварцевых монцонитов Усть-Хилокского массива нижнеселенгинского интрузивного комплекса [Цыганков и др., 2010], U-Pb изотопный возраст которого (массива) составляет, по одним данным [Reichow et al., 2010], 280 млн лет, по другим [Цыганков и др., 2016а], — 289 млн лет. Жиримская дайка отличается крайне сложной морфологией, ее мощность достигает первых десятков метров, доля базитового материала составляет 80 – 85 % общего объема.

К подобному морфологическому типу относятся комбинированные дайки в Харитоновском щелочно-гранитоидном массиве (позднекуналейский комплекс [Zanvilevich et al., 1995]). Здесь, в левом борту р. Хилок, среди крупнозернистых щелочно-полевошпатовых сиенитов залегает несколько субгоризонтальных дайковых тел, на 85 – 90 % состоящих из базитового материала, расчлененного кварцево-сиенитовыми «прожилками» на отдельные округлые нодули. На выклинивании эти дайки расщепляются на отдельные апофизы, общая протяженность даек достигает 500 м, мощность не менее 3—4 м. Базитовые нодули сложены афировыми тонко- и мелкозернистыми диабазами. Краевые части нодулей имеют характерные фестончатые очертания, часто наблюдаются хорошо различимые зоны закалки (см. рис. 2, в). В центральной части дайки почти на 100 % состоят из базитового материала, тогда как краевым частям свойственны типичные минглинг-структуры.

Таким образом, наиболее характерной особенностью даек CD₁ является их сложная морфология, варьирующее по простиранию соотношение базитовой и салической составляющей вплоть до переходов в базитовые синплутонические интрузии, в совокупности указывающие на внедрение базитового расплава либо базит-гранитоидной (по составу) смеси в кристаллизующуюся гранитоидную магматическую камеру. Среди метаморфических пород подобные дайки не зафиксированы.

Второй геолого-морфологический тип даек (CD₂) представлен крутопадающими (30–50°) (участки Шалугинский, хр. Улан-Бургасы, бассейн р. Курба, см. рис. 1) или субгоризонтальными (Максимиха, Святой Нос) телами с четкими линейными секущими контактами (см. рис. 2, г). Мощность даек рассматриваемого типа достигает 9—10 м. Внутреннее строение этих даек аналогично рассмотренным выше, однако существенных вариаций в соотношении салического и базитового материала, доля которого составляет 80—90 % объема, не зафиксировано. В целом характерна более изометричная пиллоуподобная форма базитовых нодулей, вплоть до шарообразных (см. рис. 2, д), с зонами закалки (не всегда) и фестончатыми краями, свидетельствующими о сосуществовании двух жидкостей [Enclaves ..., 1991]. Кроме того, салическая часть даек содержит диспергированный базитовый материал в виде отдельных кристаллов фемических минералов или их небольших сегрегаций, а также угловатые ксенолиты подстилающих или вмещающих пород (см. рис. 2, д). Иногда хорошо выражены текстуры течения (см. рис. 2, е).

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Комбинированные дайки, как следует из их названия и приведенного выше описания, состоят из двух контрастных по составу типов пород — базитов и гранитоидов. При этом петрография и химический состав как базитов, так и салической части даек, независимо от их пространственного расположения, возраста и геологической ситуации, изменяются мало. Поэтому ниже приведена их обобщенная краткая петрографическая характеристика, без разделения по участкам и морфологическим разновидностям.

Базитовая составляющая комбинированных даек по химическому составу варьирует от габбро и монцогаббро до монцонитов (см. ниже). Петрографически – это мелко- и тонкозернистые массивные, иногда порфирированные (Pl, Kfs) темные, зеленовато-серые амфибол-биотит-плагиоклазовые породы с микродиабазовой, диабазовой или габбро-диабазовой (в наиболее раскристаллизованных разновидностях) микроструктурой. Контакты с салической частью неровные, заливообразные, фестончатые. Часто вблизи контакта (не более 1.0—1.5 см) наблюдается отчетливое уменьшение зернистости (закалка), сопровождающееся увеличением количества биотита. Содержание плагиоклаза в породах составляет 48—65 об. %. Его состав варьирует от лабрадора (58—66 мас. % An), слагающего резорбированные ядра зональных вкрапленников, до олигоклаза, образующего краевые части зональных кристаллов и мелкие зерна основной массы, что четко фиксируется двумя основными модами на гистограммах распределения основности плагиоклаза (рис. 3), иногда (Харитоновский массив) осложненными дополнительными максимумами. Альбит образует тонкие каймы, вероятно, постмагматического происхождения.

Суммарное количество главных фемических минералов (амфибола и биотита) составляет 35—40 об. %, при этом первый, как правило, преобладает над вторым. На контакте с салическими породами это соотношение может меняться на обратное. В большинстве случаев амфибол отвечает составу низко-

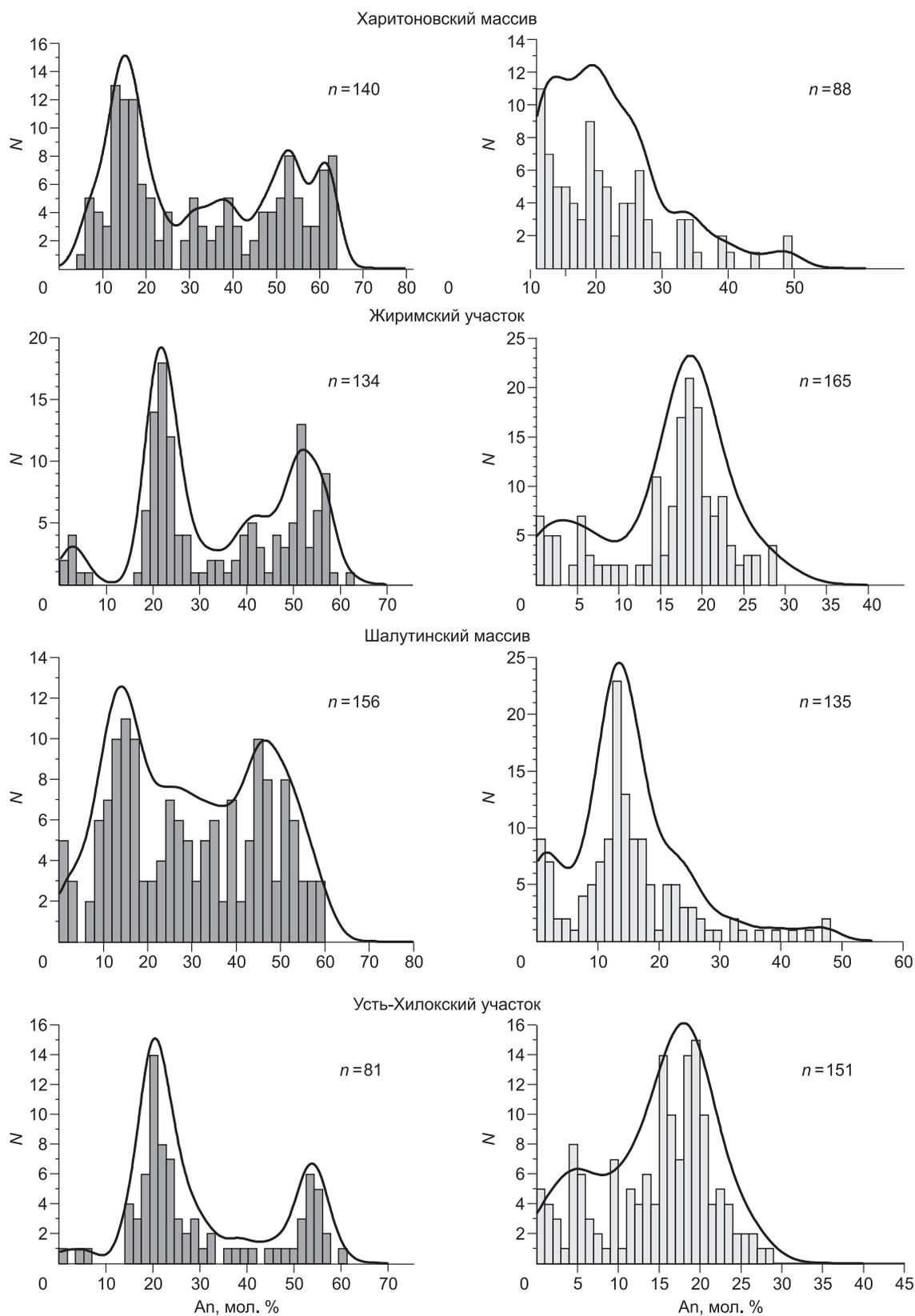
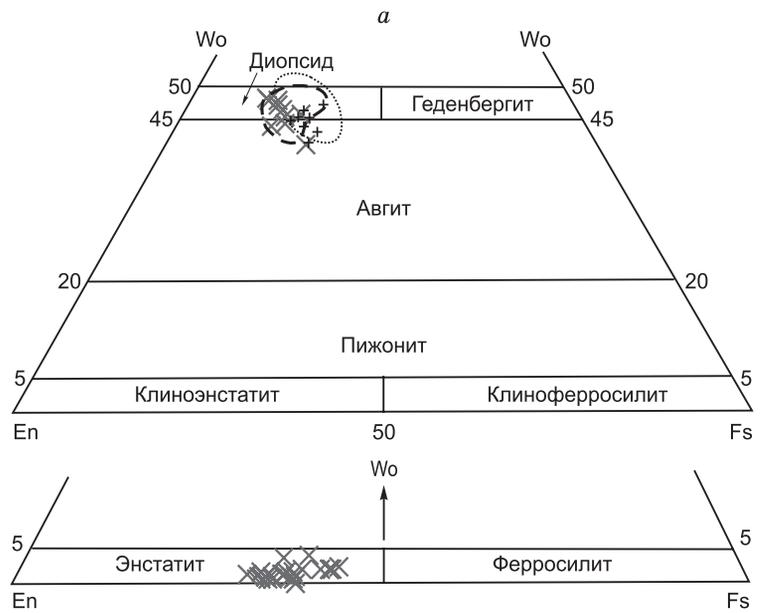


Рис. 3. Гистограммы частоты встречаемости (N) плагиоклазов разного состава в комбинированных дайках Харитоновского, Шалутинского, Усть-Хилокского (Усть-Хилокский и Жири́мский участки) массивов.

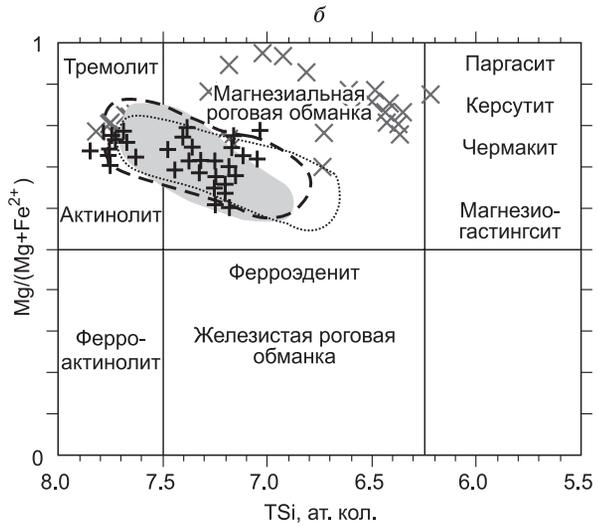
Левая колонка — базитовая, правая — салическая составляющая комбинированных даек, n — количество определений. Кривые плотности распределения вероятности построены с помощью программы ISOPLOT [Ludwig, 2003].

Рис. 4. Классификационные диаграммы для пироксенов (а), амфиболов (б) и биотитов (в) из пород комбинированных даек Западного Забайкалья.

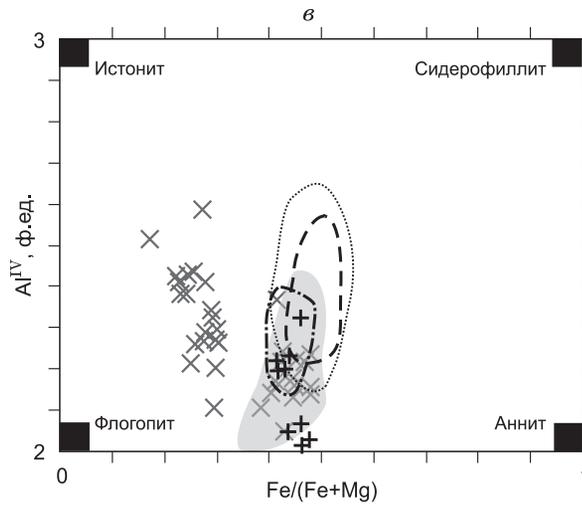
Харитоновский массив: 1 — базитовая и 2 — салическая составляющие даек; Усть-Хилокский массив: 3 — базитовая и 4 — салическая составляющая даек Жиримского и Усть-Хилокского участков; 5 — дайки CD₁ и CD₂ Шалутинского массива без разделения; 6 — дайки бассейна р. Курба (южные склоны хр. Улан-Бургасы). Границы полей на части а — по [Morimoto, 1989], на части б — по [Leake et al., 1997].



титанистой (0.3—1.6 мас. % TiO₂), магниальной роговой обманки (рис. 4, б), которая замещается актинолитом [Leake et al., 1997]. Состав биотитов всех изученных даек (независимо от возраста и геологического положения) отвечает изоморфному ряду флогопит—аннит с железистостью от 0.35 до 0.60 при более широких вариациях Al^{IV} от 2.00 до 2.65 ф.ед. (см. рис. 4, в). Содержание TiO₂ в основном составляет 2—5 мас. %. В Шалутинской и Жиримской дайках биотиты базитовой части заметно более железистые по сравнению с биотитами их салической части, тогда как в других дайках таких различий не выявлено.



В наиболее богатых кремнеземом и калием разностях, отвечающих монцонитам, в заметном количестве присутствуют пертитовый калиевый полевой шпат, образующий интерстициальные выделения или крупные порфиробласты, и интерстициальный кварц. Иногда в виде реликтов в роговой обманке или мелких идиоморфных зерен встречается моноклинный пироксен, количество которого не превышает 1—2 мас. %. В Харитоновской дайке отмечается ромбический пироксен (En_{61.5}Wo_{1.4}Fs_{37.0}) и оливин (60—70 мол. % Fo). Состав моноклинного пироксена в разных дайках различается мало (см. рис. 4, а) и варьирует в следующих пределах: En_{35.8-40.6}Wo_{45.5-47.2}Fs_{14.5-18.1}. В дайках Усть-Хилокского участка зафиксирован нефелин.



Характерно повышенное количество аксессуарных минералов, достигающее 7—8 об. %. Это магнетит, титаномагнетит с 12—13 мас. % TiO₂, апатит, содержащий 3—4 мас. % F, титанит, ильменит с 4.0—5.5 мас. % Mn, циркон.



Салическая часть даек представлена в основном светло-желтовато-белыми массивными или порфировидными (зональный Pl, Kfs), неравномерно мелко- и среднезернистыми кварцевыми сиенитами, субщелочными гранитами или лейкогранитами с гипидиоморфно-зернистой, иногда гранобластовой микроструктурой. Часто наблюдаются директивные структуры, обусловленные расположением чешуек биотита субпараллельно контактам с базитовыми глобулами. При этом уменьшение размера зерен в контакте с базитами не наблюдается. Рассматриваемые породы сложены калиевым полевым шпатом (35—55 об. %), плагиоклазом (33—62 об. %) и кварцем (13—29 об. %), причем для плагиоклазов, в отличие от базитовой части даек, типично унимодальное распределение основности с главным максимумом в области олигоклаза (см. рис. 3). Дополнительный максимум в области альбита обусловлен большей частью постмагматической альбитизацией по трещинам и в краевых частях зерен. Наиболее интенсивно этот процесс проявлен в Харитоновской дайке. Иногда отмечается андезин, представляющий, по-видимому, «захваченные» кристаллы. Количество темноцветных минералов – биотита и иногда амфибола (\pm реликты Crx) — не превышает нескольких процентов, причем состав амфибола не отличается от базитов, что указывает на его «захваченное» происхождение. Очень характерно большое количество и крупные размеры кристаллов титанита, часто приуроченных к контакту с базитовыми обособлениями. Наиболее тонкие салические «прожилки», разделяющие базитовые глобулы, заметно более крупнозернистые, в них меньше кварца, практически отсутствует биотит, место которого занимают крупные идиоморфные кристаллы амфибола. Акцессорные минералы — магнетит, титанит, апатит, циркон.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМБИНИРОВАННЫХ ДАЕК

Химический состав представительных проб комбинированных даек разных участков приведен в табл. 1. На рис. 5—7 показаны все имеющиеся в нашем распоряжении данные, а также состав пород плутонических комплексов, с которыми комбинированные дайки ассоциируют.

Базитовая составляющая комбинированных даек Западного Забайкалья по химическому составу, как отмечалось, варьирует от габбро и монцогаббро (49.0—51.5 мас. % SiO_2 , 4.5—5.0 мас. % $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) до монцонитов (57—59 мас. % SiO_2 , 8.5—9.0 мас. % $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) [Петрографический кодекс..., 2009] (см. рис. 5, а). Магнезиальность пород ($\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^*) \times 100$ мол. %) составляет 53—38 %, корреляция с SiO_2 отсутствует. Салическая часть даек варьирует от граносиенитов и сиенитов до умеренно щелочных и щелочных гранитов (65—72 мас. % SiO_2 , 9—11 мас. % $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$), при этом щелочные минералы в дайках отсутствуют. Магнезиальность составляет 33—8 мол. %.

Породы комбинированных даек характеризуются повышенной калиевой щелочностью, занимая в основном поле высококалиевой известково-щелочной серии (см. рис. 5, б), с отклонением некоторых проб в сторону шошонитовой или умеренно калиевой серий. Несмотря на это, отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ в базитах всегда <1 , тогда как в салической части, за исключением одной пробы, >1 . Салическая часть даек также высококалиевая известково-щелочная (см. рис. 5, б), индекс насыщения алюминием (A/CNK) варьирует от 0.90 до 1.08 мол. %.

Петрографическое сходство дайковых пород разных участков вполне очевидно, однако их химический состав заметно различается, что в наибольшей степени свойственно базитам. На графиках соотношения петрогенных оксидов с кремнеземом (см. рис. 6) точки составов базитов даек разных участков образуют почти не перекрывающиеся ареалы, хотя и элементы сходства, безусловно, присутствуют. Кроме того, обращает внимание резкое различие составов пород (особенно базитов) даек CD_1 и CD_2 типов Шалутинского участка. Эти различия в сочетании с разной морфологией даек, вероятно, свидетельствуют об их формировании из самостоятельных источников, поскольку они не могут быть выведены одна из другой посредством дифференциации единого исходного расплава.

В целом (см. рис. 6) следует отметить сравнительно низкое содержание TiO_2 в базитах, составляющее 0.8—1.8 мас. %. От этих значений отличается Харитоновская дайка, где содержание TiO_2 достигает 3 мас. %. Кроме того, для даек характерна повышенная глиноземистость — 16—19 мас. % Al_2O_3 в базитах и 14.0—18.5 мас. % в салической части. Содержание P_2O_5 в базитах составляет 0.40—0.85 мас. % с отклонением некоторых проб в большую (до 1.46 мас. %) или меньшую (0.28 мас. %) сторону; салическая часть даек содержит не более 0.2 мас. % P_2O_5 .

Корреляция содержаний петрогенных оксидов с кремнеземом на каждом участке проявлена в разной степени. Она может отсутствовать вовсе (дайки Усть-Хилокского и Харитоновского массивов) либо быть достаточно четко выраженной (дайки Шалутинского массива). Скорее всего, корреляционные связи (где они есть) петрогенных оксидов с SiO_2 обусловлены процессами взаимодействия салического и базитового расплавов, масштабы которого в разных дайках различны. Петрографические данные (см. выше) являются прямым подтверждением этого предположения. В целом описанные выше закономерности в полной мере проявляются и в распределении некоторых элементов-примесей (Rb, Ba, Sr, Zr, Nb, Y) (см. рис. 7).

Таблица 1. Химический состав представительных проб комбинированных даек Западного Забайкалья

Компонент	К-08-10	К-08-12	К-08-9	К-08-7f	К-08-8b	К-08-8с	К-08-6	К-12-3/2	К-12-4	К-08-13а	К-08-13с	К-08-13е
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂ , мас. %	52.00	51.10	51.20	52.10	50.70	49.90	65.20	56.10	65.00	58.50	54.50	56.40
TiO ₂	1.41	1.43	1.40	1.60	1.79	1.72	0.51	0.93	0.53	0.96	1.20	0.92
Al ₂ O ₃	17.90	17.65	18.40	18.25	17.95	17.30	17.55	17.00	15.80	17.80	17.90	18.40
Fe ₂ O ₃	3.09	3.30	3.33	3.15	3.75	4.03	1.60	3.96	3.18	3.53	3.55	3.22
FeO	5.35	5.34	5.50	4.82	5.18	5.38	1.73	3.38	1.61	2.84	4.57	3.23
MnO	0.14	0.13	0.13	0.12	0.14	0.14	0.02	0.19	0.12	0.10	0.13	0.13
MgO	4.17	4.16	4.31	3.42	4.56	5.60	0.76	3.12	0.73	2.10	2.97	2.40
CaO	6.63	6.85	6.33	5.80	6.81	6.92	2.40	5.33	2.45	4.25	6.00	4.30
Na ₂ O	4.68	4.35	4.25	5.00	4.90	4.35	4.83	5.51	4.64	4.79	4.81	5.08
K ₂ O	2.35	3.44	3.06	3.72	2.05	2.18	4.70	2.50	4.67	3.91	3.06	4.25
P ₂ O ₅	0.72	0.81	0.61	0.74	0.66	0.58	0.19	0.54	0.19	0.58	0.52	0.56
П.п.п.	1.69	1.63	1.85	1.33	1.77	1.90	0.59	1.02	0.48	0.85	0.88	0.92
Сумма	100.13	100.19	100.37	100.05	100.26	100.00	100.08	99.58	99.40	100.21	100.09	99.81
Ba, г/г	1332	1415	1213	1459	342	420	3031	733	1002	1677	1354	1766
Rb	82	153	101	94	90	97	77	107	203	124	102	132
Sr	1116	1192	1139	1215	1108	1054	1129	770	547	1204	1105	1223
Ga	21.00	21.00	19.00	21.00	24.00	21.00	21.00	24.00	23.00	20.00	20.00	19.00
Ta	0.66	0.69	0.62	0.56	0.63	0.57	1.84	1.79	2.56	0.94	0.62	0.80
Nb	12.8	14.7	12.5	10.5	10.3	9.7	20.0	32.0	37.0	16.0	11.7	14.4
Hf	1.12	1.90	0.85	2.86	2.79	1.67	9.70	5.60	14.00	4.49	3.33	4.42
Zr	94	251	231	205	73	126	393	237	651	146	189	153
Y	24	25	22	14	16	17	15	40	40	24	21	25
Th	5.40	5.20	4.68	4.43	3.80	4.19	19.00	12.50	47.00	14.50	11.00	11.80
U	1.20	1.19	1.02	1.02	2.40	1.87	1.80	2.70	4.16	3.55	3.59	3.31
Co	26	25	27	23	31	35	6	46	69	10	20	9
Sc	16.0	17.0	14.3	13.0	16.0	19.0	3.1	—	—	6.6	12.6	7.3
V	160	170	136	185	233	214	51	139	66	77	162	76
Pb	17	16	15	11	8	7	16	14	18	21	16	21
La	62	66	49	43	29	26	59	110	174	63	57	66
Ce	122	131	97	88	59	63	102	227	309	114	108	121
Pr	13.9	14.7	11.1	10.2	8.9	7.4	11.1	22.0	28.0	15.0	11.8	15.0
Nd	54	56	44	43	33	34	43	78	91	58	45	56
Sm	9.1	9.5	7.7	7.5	7.9	5.9	5.7	12.1	12.4	9.7	7.5	9.7
Eu	2.29	2.45	1.99	2.19	2.38	2.16	1.24	2.35	1.61	2.26	2.01	2.38
Gd	7.10	7.30	6.30	5.50	6.20	5.60	5.20	9.40	9.40	6.80	6.10	6.80
Tb	0.95	1.03	0.83	0.67	0.68	0.74	0.61	1.22	1.17	0.87	0.82	0.88
Dy	4.89	5.20	4.10	3.21	4.27	3.91	2.75	6.90	6.80	5.40	4.19	5.50
Ho	0.95	0.98	0.89	0.58	0.81	0.69	0.54	1.31	1.32	1.09	0.82	1.09
Er	2.40	2.49	2.11	1.28	1.79	1.72	1.27	3.84	3.99	2.74	2.04	2.85
Tm	0.32	0.33	0.30	0.18	0.25	0.23	0.21	0.56	0.61	0.41	0.30	0.41
Yb	1.85	2.02	1.79	0.99	1.41	1.47	1.19	3.90	4.34	2.58	1.96	2.62
Lu	0.27	0.27	0.24	0.14	0.19	0.21	0.21	0.60	0.67	0.39	0.29	0.39
Eu/Eu*	0.84	0.87	0.85	1.00	1.00	1.13	0.68	0.65	0.44	0.81	0.88	0.85
(La/Yb) _n	24.0	23.4	19.6	31.2	14.8	12.7	35.6	20.2	28.8	17.5	20.9	18.1
NK/A	0.57	0.62	0.56	0.67	0.57	0.55	0.74	0.69	0.80	0.68	0.63	0.70
A/CNK	0.80	0.76	0.84	0.80	0.79	0.78	1.01	0.79	0.92	0.90	0.81	0.89

Компонент	S-08-16	S-08-15a	S-08-11	B-22-11	B-23-11	B-23-11	K-12-6	Kd-08-1	Kd-08-3	Kd-08-5	K-08-2a	K-08-2b
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SiO ₂ , мас. %	53.00	70.40	54.30	55.00	51.90	71.70	71.20	49.00	51.40	51.20	68.30	69.40
TiO ₂	0.96	0.29	0.93	1.07	1.16	0.28	0.23	1.55	2.27	2.51	0.42	0.43
Al ₂ O ₃	17.50	14.00	16.90	17.40	18.70	14.80	15.20	18.90	16.90	16.50	16.00	15.80
Fe ₂ O ₃	2.37	1.61	2.87	2.79	2.82	0.89	0.67	1.79	4.11	3.92	1.48	1.04
FeO	5.07	0.99	4.87	4.54	5.26	0.73	0.81	6.78	5.68	6.38	1.20	1.15
MnO	0.11	0.02	0.12	0.14	0.15	0.01	0.02	0.14	0.14	0.15	0.04	0.03
MgO	3.92	0.63	4.00	3.66	3.67	0.36	0.10	6.70	3.67	3.67	0.57	0.56
CaO	6.04	2.13	6.12	5.70	6.43	1.21	1.19	8.57	5.76	5.88	1.70	1.22
Na ₂ O	4.34	3.28	4.82	4.23	3.94	3.88	3.78	3.50	4.88	4.53	5.00	4.45
K ₂ O	4.10	5.99	3.43	3.14	3.33	5.13	5.28	1.23	2.57	2.93	4.18	5.23
P ₂ O ₅	0.54	0.11	0.64	0.54	0.57	0.11	0.09	0.35	0.82	0.86	0.13	0.12
П.п.п.	1.54	0.91	1.36	1.26	1.50	0.62	0.69	1.37	1.75	1.80	0.61	0.67
Сумма	99.49	100.36	100.36	99.47	99.43	99.72	99.26	99.88	99.95	100.33	100.26	100.10
Ba, г/т	1409	1489	1345	922	1575	1839	1620	399	1114	943	1227	1091
Rb	195	219	112	178	134	134	88	17	92	90	84	88
Sr	1464	796	1096	1079	1460	990	730	744	795	823	420	380
Ga	20.83	16.42	0.00	23.00	23.00	16.00	—	17.00	21.00	21.00	—	—
Ta	2.37	0.90	—	0.77	0.62	1.08	—	0.38	0.92	1.01	—	—
Nb	9.6	9.8	76.0	18.0	16.0	13.5	9.6	5.9	16.0	14.3	10.0	13.0
Hf	5.21	5.88	—	5.40	5.20	5.50	—	2.54	2.20	1.86	—	—
Zr	170	223	177	248	242	250	170	178	301	330	240	209
Y	18	10	11	25	27	17	13	23	33	37	16	16
Th	4.14	19.31	—	7.40	6.10	17.00	—	1.33	2.95	4.69	—	—
U	1.56	1.92	—	2.53	2.20	2.57	—	0.29	1.00	1.24	—	—
Co	0	0	—	39	30	58	58	38	27	26	—	—
Sc	11.6	1.9	—	—	—	—	—	23.0	17.0	17.0	—	—
V	0	0	—	130	176	34	35	159	194	161	—	—
Pb	13	15	15	14	14	21	19	4	11	12	14	20
La	40	54	—	55	53	71	—	19	56	42	—	—
Ce	81	91	—	112	107	117	—	47	113	92	—	—
Pr	9.6	8.8	—	12.1	12.4	10.9	—	5.1	13.2	11.4	—	—
Nd	37	28	—	49	51	37	—	23	52	49	—	—
Sm	6.5	3.7	—	8.2	9.1	5.4	—	4.9	9.9	9.8	—	—
Eu	1.89	1.10	—	2.16	2.32	1.07	—	1.93	3.13	2.94	—	—
Gd	5.40	2.81	—	6.80	7.60	4.25	—	5.50	8.70	8.80	—	—
Tb	0.70	0.43	—	0.86	0.92	0.55	—	0.87	1.23	1.29	—	—
Dy	3.45	1.77	—	4.75	5.10	3.03	—	5.10	6.80	7.20	—	—
Ho	0.61	0.36	—	0.89	0.92	0.57	—	0.94	1.30	1.53	—	—
Er	1.72	0.99	—	2.34	2.54	1.69	—	2.55	3.44	3.81	—	—
Tm	0.22	0.17	—	0.33	0.35	0.24	—	0.36	0.48	0.56	—	—
Yb	1.48	1.03	—	2.16	2.32	1.73	—	2.48	2.96	3.20	—	—
Lu	0.21	0.18	—	0.34	0.35	0.26	—	0.36	0.41	0.46	—	—
Eu/Eu*	0.95	1.00	—	0.86	0.83	0.66	—	1.14	1.01	0.95	—	—
(La/Yb) _n	19.4	37.3	—	18.3	16.4	29.4	—	5.5	13.6	9.4	—	—
NK/A	0.66	0.85	0.69	0.60	0.54	0.81	0.79	0.38	0.64	0.64	0.80	0.82
A/CNK	0.78	0.89	0.74	0.84	0.86	1.05	1.08	0.83	0.79	0.77	1.01	1.04

Примечание. 1—3 — Жиримский, 4—7 — Усть-Хилокский участки одноименного массива; 8, 9 — дайка CD₁, 10—12 — CD₂ Шалутинского массива; 13—15 — бассейн р. Курба; 16—18 — уч. Максимиха; 19—24 — дайка Харитоновского массива. Eu/Eu* = Eu_n/(Sm_n × Gd_n)^{1/2}; NK/A = (Na₂O + K₂O)/Al₂O₃, мол. %; A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O), мол. %.

Химический состав пород определен в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ), элементы-примеси — ICP-MS методом в ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Прочерк — нет данных.

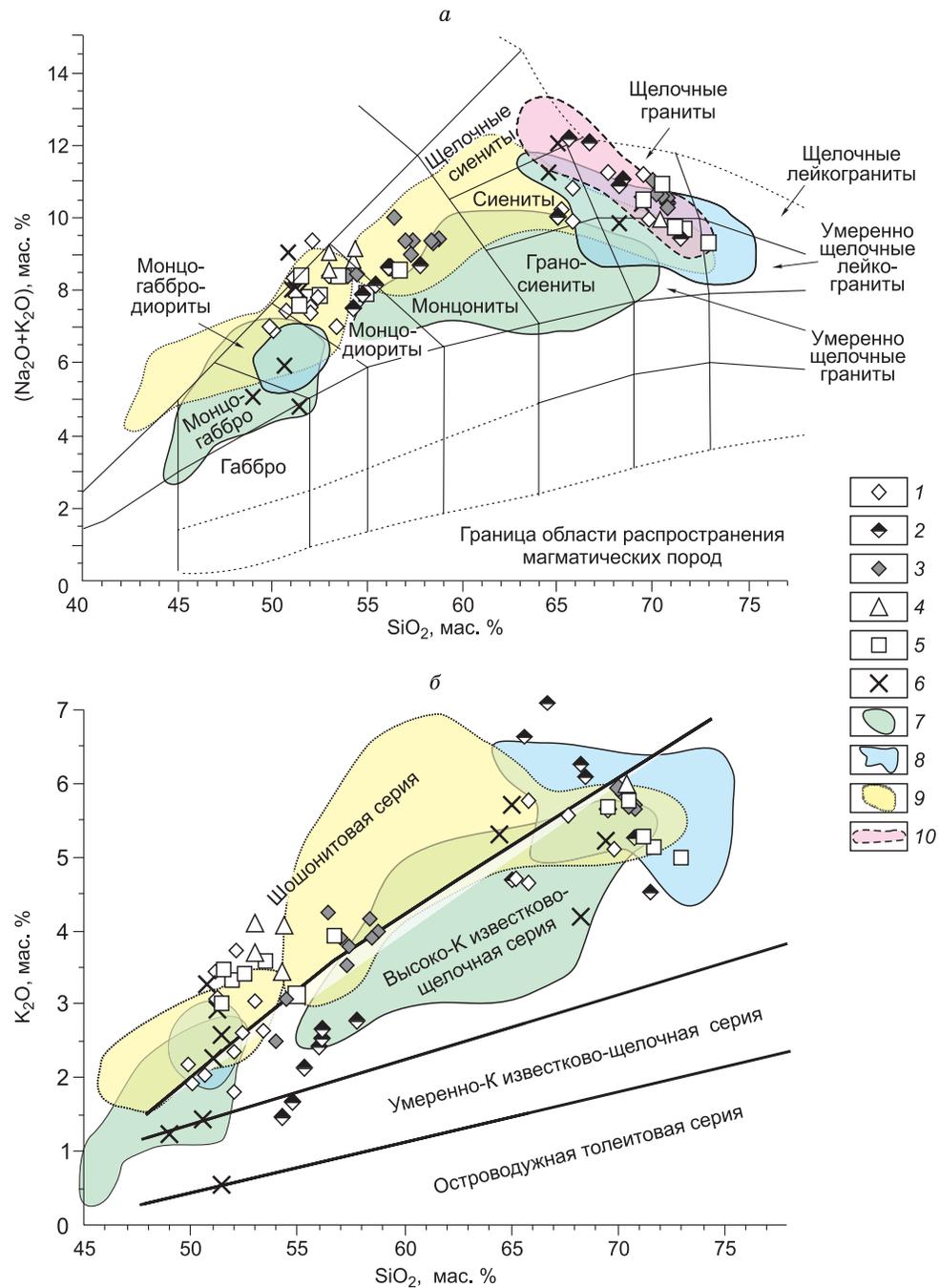


Рис. 5. TAS-диаграмма (SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)) (а) и соотношение K_2O – SiO_2 (б) для пород комбинированных даек Западного Забайкалья.

Для сравнения показаны ареалы составов базитов и гранитоидов магматических комплексов [Цыганков и др., 2010], вмещающих минглинг-дайки. Границы полей на части а — по [Петрографический кодекс..., 2009], на части б — по [Rickwood, 1989]. 1 — Жиримский и Усть-Хилокский участки Усть-Хилокского массива нижнеселенгинского комплекса; 2 — CD₁ и 3 — CD₂ дайки Шалутинского массива зазинского комплекса; 4 — дайки бассейна р. Курба, прорывающие гранитоиды чивыркуйского комплекса; 5 — дайки в кристаллических сланцах таланчанской свиты (участок Максимиha); 6 — дайки в Харитоновском раннемезозойском щелочно-гранитоидном массиве позднекуналейского комплекса; 7–10 — комплексы: 7 — чивыркуйский, 8 — зазинский, 9 — нижнеселенгинский, 10 — позднекуналейский.

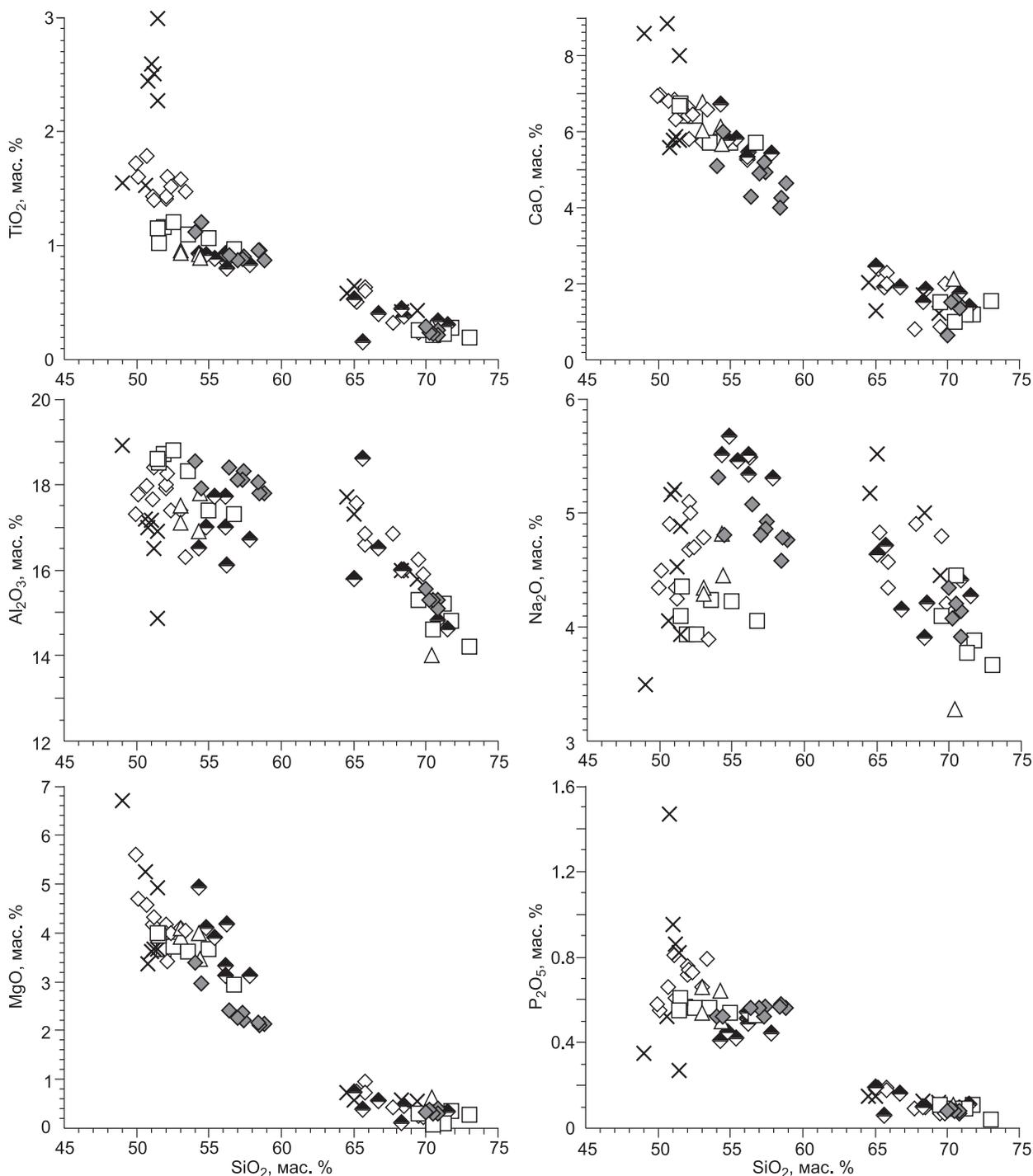


Рис. 6. Соотношение петрогенных оксидов с SiO_2 в породах комбинированных даек.

Усл. обозн. см. на рис. 5.

Типичны значительные вариации содержаний большинства элементов, достигающие кратных значений, а также отсутствие корреляции с кремнеземом, подчеркивающие различия состава даек разных участков и незначительный вклад процессов дифференциации при их формировании.

Распределение REE в базитовой составляющей даек одногипно (рис. 8). Им свойственны относительно высокое суммарное содержание REE (> 200 г/т \sum REE), дефицит HREE относительно LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_n = 14\text{--}20$); Eu-аномалия в большинстве случаев отсутствует. Исключение составляют дайки Шалутинского участка, дайка CD_1 типа, в которой четко выражена отрицательная Eu-аномалия ($\text{Eu}/\text{Eu}^* =$

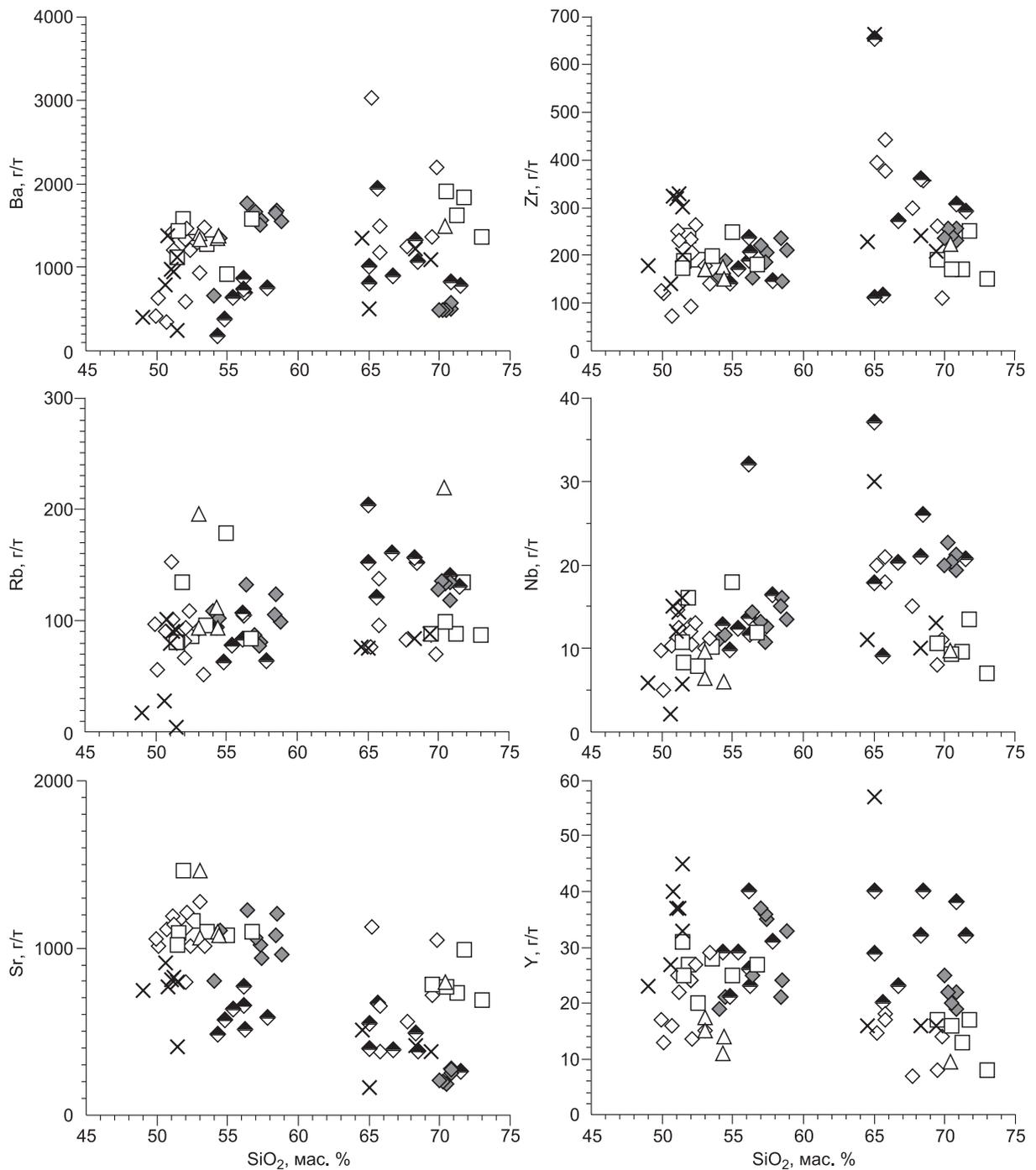


Рис. 7. Соотношение некоторых элементов-примесей с SiO_2 .

Усл. обозн. см. на рис. 5.

= 0.65), свидетельствующая о фракционированном характере расплава. Однако, учитывая приведенные выше соображения, можно предположить, что это фракционирование могло происходить лишь на уровне промежуточной камеры. Базиты этой дайки (CD_1) заметно обогащены всеми REE, суммарное количество которых достигает 480 г/т.

Графики распределения REE для салических частей даек в целом сходны с базитами, за исключением дайки CD_1 Шалутинского участка, где салическая составляющая содержит заметно больше $\sum\text{REE}$ (до 640 г/т) и имеет более глубокую отрицательную Eu-аномалию ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.51\text{--}0.44$).

Общие закономерности распределения литофильных элементов определяются обогащенностью пород LIL элементами относительно HFSE (рис. 9), при несколько более высоких концентрациях боль-

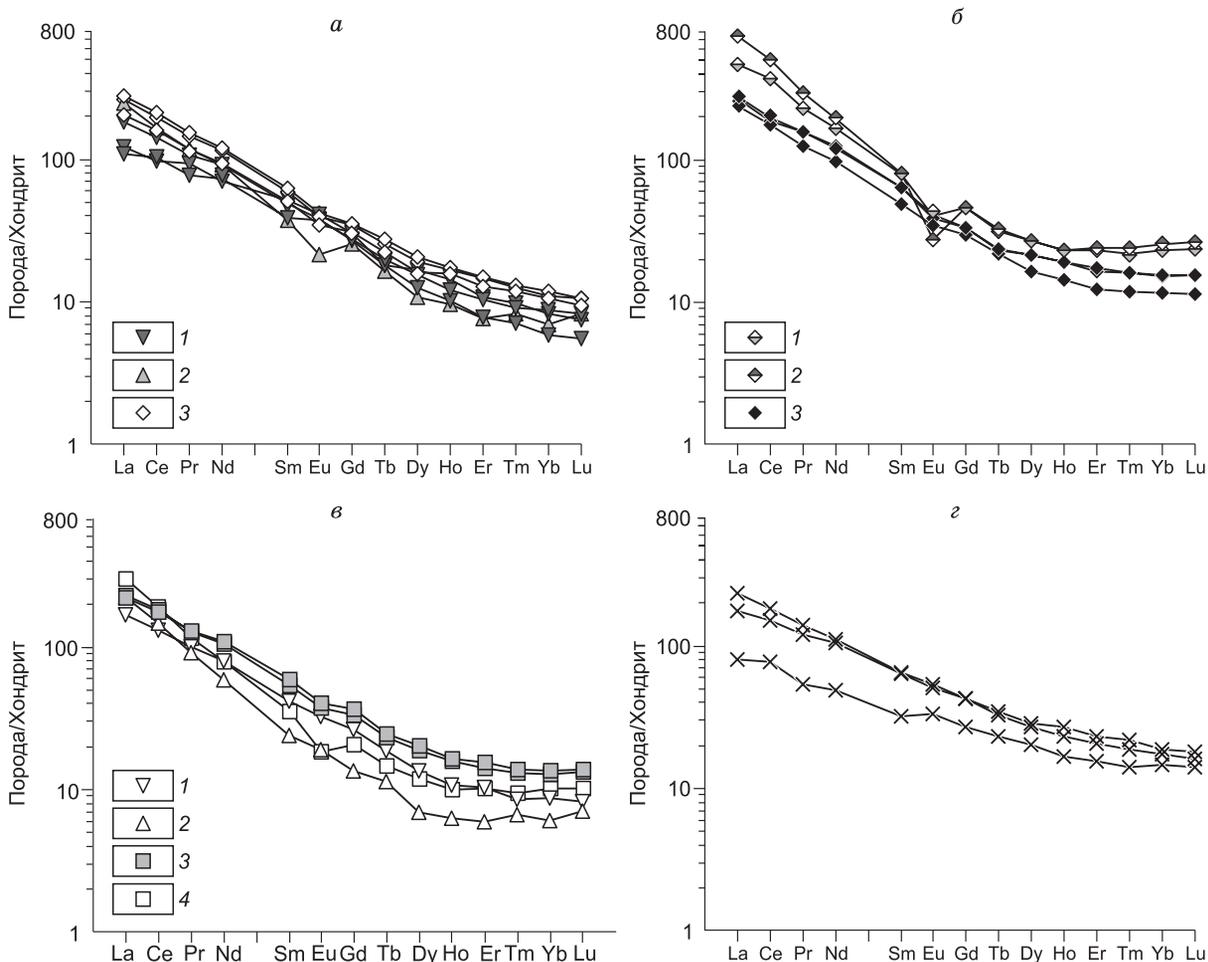


Рис. 8. Распределение редкоземельных элементов в породах комбинированных даек Западного Забайкалья.

а — Усть-Хилокский массив: 1 — базитовая и 2 — салическая составляющие Усть-Хилокского участка, 3 — базиты Жиримского участка; *б* — Шалутинский массив: 1 — базитовая и 2 — салическая составляющие дайки CD₁ типа, 3 — базиты дайки CD₂; *в* — дайки бассейна р. Курба: 1 — базитовая и 2 — салическая составляющие; 3 — базитовая и 4 — салическая составляющие дайки уч. Максимиha; *г* — базиты Харитоновской дайки. Нормировано по хондриту [Sun, McDonough, 1989].

шинства элементов в салической части даек, что особенно типично для дайки CD₁ Шалутинского участка. Кроме того, для всех разновидностей пород, включая салические, характерен резкий Nb-Ta минимум. В некоторых дайках наблюдаются отрицательные аномалии Hf, Zr и Ti. Иногда отмечаются небольшие максимумы Pb и Sr.

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов проводились в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором (LA-SF-ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR, фирмы Thermo Scientific (Германия). Детали аналитической процедуры приведены в [Хубанов и др., 2016].

Для U-Pb изотопно-геохронологических исследований комбинированных даек были отобраны цирконы из салической составляющей даек Шалутинского массива (пр. D1-13, D2-13) и из салической части комбинированной дайки уч. Максимиha (пр. Kd-14). Результаты U-Pb изотопных исследований приведены в табл. 2. Цирконы в пр. D1-13 (дайка CD₁) представлены бледно-розовыми, почти прозрачными длиннопризматическими кристаллами размером 200—180 мкм по длинной оси и коэффициентом удлинения, варьирующим от 1.5—2.0 до 3.0. Содержание HfO₂, по данным ЭДС PCMA, менее 0.5 мас. %. U-Pb изотопный возраст, полученный по 13 точкам, составляет 290.8 ± 2.7 млн лет, MSWD = 0.63 (рис. 10, *а*). Цирконы в пр. D2-13 (дайка CD₂) представлены светло-оранжевыми, мутноватыми дипира-

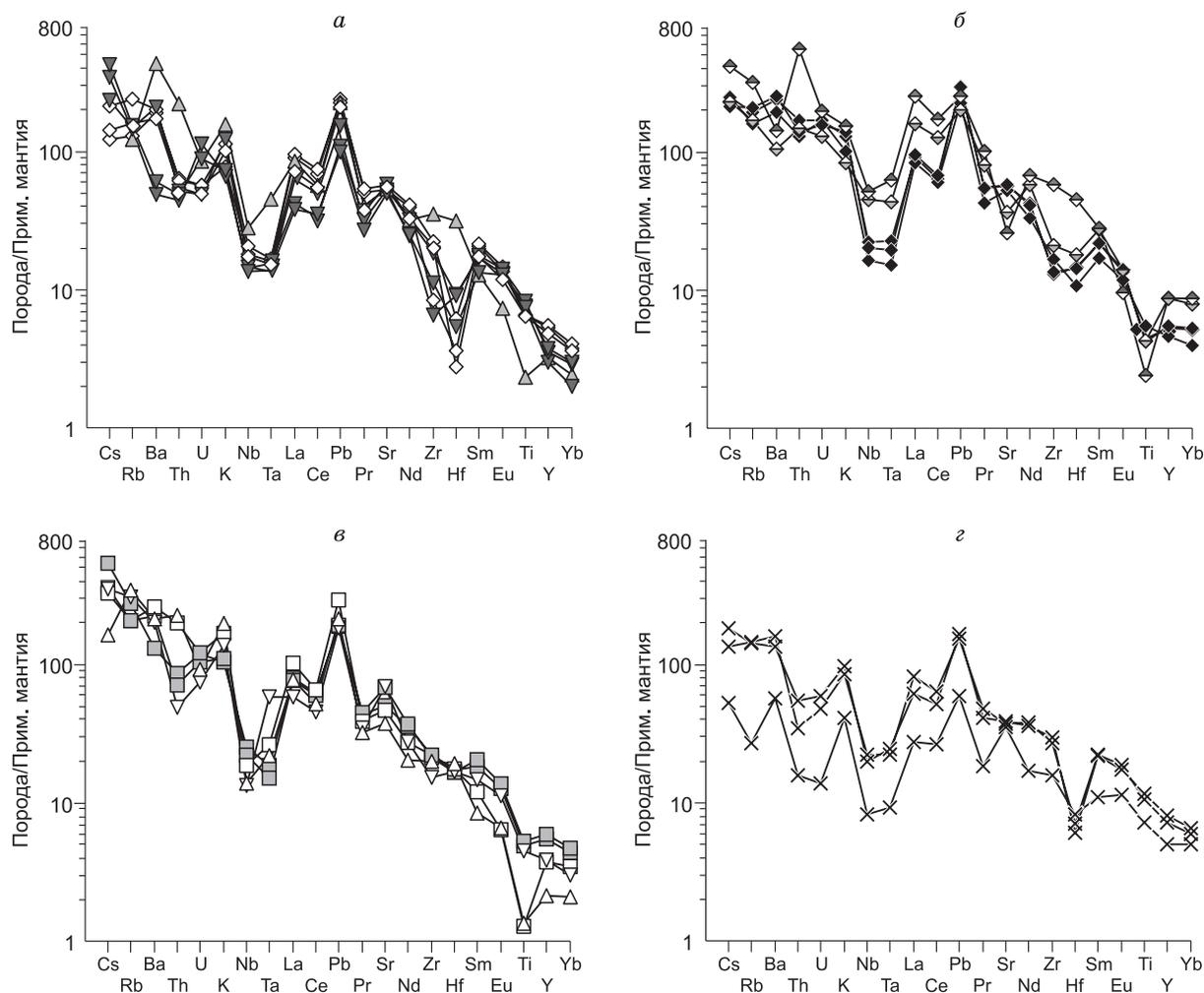


Рис. 9. Спайдер-диаграммы для пород комбинированных даек Западного Забайкалья.

Усл. обозн. см. на рис. 8. Нормировано по примитивной мантии [Palme, O'Neill, 2003].

мигдалитными кристаллами размером 165—100 мкм и коэффициентом удлинения 1.3—2.8. Часто присутствуют включения рутила. Содержание HfO_2 около 0.5 мас. %. U-Pb изотопный возраст, полученный по 22 точкам, составляет 283.4 ± 3.4 млн лет, $\text{MSWD} = 2.1$ (см. рис. 10, б). В пр. Kd-14 (уч. Максимиха) цирконы представлены дипирамидально-призматическими кристаллами размером не более 100 мкм с коэффициентом удлинения от 1.4 до 2.8. Цвет цирконов интенсивно коричневый, зерна практически непрозрачные. Содержание HfO_2 в цирконах варьирует от 0.5 до 1.8 мас. %. По 43 точкам получен конкордантный возраст 284.1 ± 0.96 млн лет, $\text{MSWD} = 4.8$ (см. рис. 10, в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Геохронология

Комбинированные дайки, как правило, ассоциируют с крупными гранитоидными комплексами [Enclaves..., 1991]. В соответствии с этим возрастом комбинированных даек считается время формирования вмещающих plutonic образований. Обоснованием служат геологические взаимоотношения, указывающие на синхронности кристаллизации даек и вмещающих гранитоидов. Примером таких соотношений является описанная выше комбинированная дайка CD₁ Шалутинского кварцево-сиенит-гранитного массива, а также комбинированные дайки Харитоновского щелочно-гранитоидного плутона. Гораздо сложнее ситуация с дайками, внедрившимися в полностью консолидированные plutonic или метаморфогенные образования. Примерами таких образований являются дайка CD₂ типа в Шалутинском массиве, интрузирующая гибридные габбро-монзониты, и дайки с побережья оз. Байкал

Таблица 2. Результаты U-Pb изотопных исследований цирконов из комбинированных даек Шалутинского массива (дайки CD₁ и CD₂) и уч. Максимиха LA-ICP-MS методом

№ п/п	Изотопные отношения				Коэффициент корреляции	Возраст, млн лет				D, %	Th/U	±1σ
	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ, %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ, %		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ			
	Пр. D1-13											
1	0.33764	2.72	0.04767	1.51	0.56	295.40	6.96	300.20	4.45	-1.60	1.62	0.02722
2	0.33885	3.79	0.04710	1.76	0.47	296.30	9.73	296.70	5.09	-0.13	1.24	0.02127
3	0.33320	2.53	0.04566	1.49	0.59	292.00	6.41	287.80	4.21	1.46	0.77	0.01304
4	0.32556	2.99	0.04517	1.59	0.53	286.20	7.45	284.80	4.42	0.49	0.73	0.01242
5	0.36129	4.30	0.04761	1.89	0.44	313.20	11.57	299.80	5.56	4.47	1.32	0.02306
6	0.33247	3.28	0.04570	1.66	0.51	291.40	8.30	288.10	4.69	1.15	1.73	0.02985
7	0.30776	5.23	0.04525	2.08	0.40	272.40	12.50	285.30	5.79	-4.52	0.95	0.01718
8	0.33483	3.18	0.04654	1.65	0.52	293.20	8.11	293.20	4.74	0.00	0.22	0.00387
9	0.32791	3.22	0.04649	1.66	0.51	288.00	8.07	293.00	4.76	-1.71	1.44	0.02535
10	0.32543	3.38	0.04600	1.70	0.50	286.10	8.43	289.90	4.82	-1.31	0.99	0.01752
11	0.34276	3.08	0.04520	1.66	0.54	299.30	7.97	285.00	4.63	5.02	0.91	0.01624
12	0.33793	3.58	0.04631	1.79	0.50	295.60	9.18	291.80	5.12	1.30	1.22	0.02244
13	0.33214	3.65	0.04543	1.80	0.50	291.20	9.23	286.40	5.08	1.68	0.43	0.00807
	Пр. D2-13											
1	0.34120	5.01	0.04411	1.81	0.36	298.10	12.94	278.30	4.91	7.11	1.56	0.02949
2	0.32495	4.46	0.04245	1.93	0.43	285.70	11.11	268.00	5.05	6.60	1.69	0.03249
3	0.32483	5.42	0.04386	2.14	0.40	285.60	13.49	276.70	5.82	3.22	1.55	0.03033
4	0.33271	5.00	0.04409	2.06	0.41	291.60	12.68	278.10	5.64	4.85	1.00	0.01969
5	0.32217	4.77	0.04392	2.03	0.43	283.60	11.80	277.10	5.47	2.35	1.03	0.02013
6	0.33436	5.39	0.04526	2.23	0.41	292.90	13.70	285.30	6.20	2.66	0.75	0.01516
7	0.33202	4.16	0.04520	1.95	0.47	291.10	10.53	285.00	5.42	2.14	1.01	0.02004
8	0.33757	10.89	0.04817	3.07	0.28	295.30	27.90	303.30	9.09	-2.64	0.22	0.00547
9	0.30603	4.74	0.04525	2.10	0.44	271.10	11.28	285.30	5.84	-4.98	1.66	0.03346
10	0.31625	4.84	0.04588	2.14	0.44	279.00	11.82	289.20	6.04	-3.53	1.31	0.02670
11	0.31303	4.43	0.04380	2.10	0.47	276.50	10.72	276.30	5.67	0.07	1.35	0.02792
12	0.30432	4.78	0.04669	2.18	0.46	269.80	11.33	294.20	6.27	-8.29	1.61	0.03356
13	0.31561	5.19	0.04537	2.31	0.45	278.50	12.64	286.00	6.45	-2.62	0.98	0.02067
14	0.31241	6.09	0.04383	2.56	0.42	276.00	14.72	276.50	6.89	-0.18	1.31	0.02828
15	0.31649	4.84	0.04625	2.27	0.47	279.20	11.81	291.50	6.44	-4.22	1.85	0.03935
16	0.32835	5.23	0.04601	2.43	0.47	288.30	13.13	290.00	6.87	-0.59	1.38	0.03017
17	0.30717	5.05	0.04530	2.41	0.48	272.00	12.05	285.60	6.74	-4.76	0.52	0.01169
18	0.30680	5.56	0.04562	2.56	0.46	271.70	13.26	287.60	7.19	-5.53	1.49	0.03348
19	0.30244	5.99	0.04582	2.66	0.44	268.30	14.12	288.80	7.55	-7.10	1.04	0.02369
20	0.30773	7.10	0.04598	3.04	0.43	272.40	16.96	289.80	8.62	-6.00	1.19	0.02847
21	0.34615	7.65	0.04790	3.28	0.43	301.80	19.98	301.60	9.66	0.07	1.25	0.03075
22	0.29736	6.70	0.04720	3.01	0.45	264.30	15.59	297.30	8.74	-11.10	1.35	0.03290
	Пр. Kd-14											
1	0.35678	3.04	0.04533	0.90	0.30	309.80	8.10	285.80	2.54	8.40	0.30	0.00555
2	0.32532	3.92	0.04514	0.91	0.23	286.00	9.77	284.60	2.50	0.49	0.39	0.00733
3	0.32044	4.24	0.04478	1.03	0.24	282.20	10.46	282.40	2.81	-0.07	0.20	0.00386
4	0.32083	2.43	0.04491	0.82	0.34	282.50	6.00	283.20	2.25	-0.25	0.09	0.00161
5	0.32385	5.22	0.04512	1.26	0.24	284.90	12.96	284.50	3.54	0.14	0.16	0.00337
6	0.35467	4.32	0.04717	1.08	0.25	308.20	11.48	297.10	3.15	3.74	0.08	0.00169
7	0.31788	2.66	0.04488	0.85	0.32	280.30	6.52	283.00	2.34	-0.95	0.19	0.00362
8	0.33084	3.07	0.04450	0.85	0.28	290.20	7.76	280.70	2.37	3.38	0.17	0.00327
9	0.32515	3.97	0.04494	0.98	0.25	285.90	9.89	283.40	2.69	0.88	0.45	0.00874
10	0.32614	2.85	0.04504	0.87	0.30	286.60	7.11	284.00	2.39	0.92	0.10	0.00192

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	0.32335	2.84	0.04518	0.86	0.30	284.50	7.04	284.90	2.40	-0.14	0.31	0.00592
12	0.32102	2.51	0.04518	0.82	0.33	282.70	6.19	284.90	2.29	-0.77	0.31	0.00600
13	0.32511	3.28	0.04446	0.94	0.29	285.80	8.17	280.40	2.56	1.93	0.41	0.00802
14	0.32160	3.15	0.04521	0.93	0.29	283.10	7.78	285.10	2.57	-0.70	0.31	0.00611
15	0.33973	3.30	0.04438	0.92	0.28	297.00	8.50	279.90	2.53	6.11	0.34	0.00679
16	0.32497	5.11	0.04515	1.20	0.23	285.70	12.74	284.70	3.31	0.35	0.60	0.01212
17	0.32369	2.48	0.04522	0.82	0.33	284.70	6.16	285.10	2.28	-0.14	0.32	0.00639
18	0.32673	5.29	0.04500	1.11	0.21	287.10	13.24	283.80	3.07	1.16	0.46	0.00948
19	0.32119	3.65	0.04497	1.00	0.27	282.80	9.01	283.60	2.77	-0.28	0.22	0.00458
20	0.32202	2.54	0.04519	0.82	0.32	283.50	6.27	284.90	2.30	-0.49	0.45	0.00898
21	0.35051	3.43	0.04609	0.95	0.28	305.10	9.05	290.50	2.72	5.03	0.21	0.00442
22	0.32057	2.65	0.04487	0.85	0.32	282.30	6.53	283.00	2.32	-0.25	0.54	0.01097
23	0.32317	2.51	0.04525	0.82	0.33	284.30	6.23	285.30	2.29	-0.35	0.55	0.01123
24	0.32640	2.65	0.04514	0.84	0.32	286.80	6.62	284.60	2.33	0.77	0.27	0.00552
25	0.35134	3.01	0.04500	0.89	0.30	305.70	7.94	283.80	2.47	7.72	0.25	0.00518
26	0.35538	3.24	0.04546	0.92	0.29	308.80	8.63	286.60	2.59	7.75	0.37	0.00775
27	0.32083	2.76	0.04560	0.86	0.31	282.50	6.81	287.40	2.40	-1.70	0.35	0.00733
28	0.32503	3.77	0.04503	0.95	0.25	285.80	9.39	283.90	2.65	0.67	0.35	0.00738
29	0.31049	2.81	0.04631	0.86	0.31	274.60	6.75	291.80	2.45	-5.89	0.31	0.00648
30	0.32110	2.89	0.04494	0.87	0.30	282.80	7.12	283.40	2.41	-0.21	0.29	0.00617
31	0.32106	3.58	0.04486	0.96	0.27	282.70	8.82	282.90	2.63	-0.07	0.28	0.00614
32	0.32446	3.71	0.04450	0.97	0.26	285.30	9.24	280.60	2.67	1.67	0.29	0.00632
33	0.32662	6.63	0.04552	1.52	0.23	287.00	16.57	286.90	4.24	0.03	0.13	0.00324
34	0.34257	3.72	0.04462	0.99	0.27	299.10	9.64	281.40	2.70	6.29	0.16	0.00366
35	0.32284	3.74	0.04485	1.00	0.27	284.10	9.26	282.80	2.76	0.46	0.13	0.00298
36	0.31921	3.67	0.04453	0.92	0.25	281.30	9.00	280.90	2.54	0.14	0.15	0.00342
37	0.32288	3.05	0.04483	0.89	0.29	284.10	7.57	282.70	2.46	0.50	0.34	0.00743
38	0.31944	5.66	0.04466	1.28	0.23	281.50	13.90	281.60	3.50	-0.04	0.15	0.00362
39	0.35641	3.15	0.04534	0.90	0.29	309.50	8.40	285.80	2.53	8.29	0.47	0.01038
40	0.31890	4.34	0.04457	1.03	0.24	281.10	10.66	281.10	2.82	0.00	0.17	0.00391
41	0.31852	3.45	0.04472	0.94	0.27	280.80	8.47	282.00	2.62	-0.43	0.46	0.01056
42	0.31923	3.33	0.04476	0.94	0.28	281.30	8.19	282.30	2.57	-0.35	0.38	0.00870
43	0.32389	3.67	0.04449	0.97	0.26	284.90	9.11	280.60	2.66	1.53	0.16	0.00365

Примечание. LA-ICP-MS U-Pb изотопное датирование цирконов выполнено в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре Element XR (Thermo Science, Германия) с лазерной приставкой UP-213 (NewWave, США). Описание методики приведено в [Хубанов и др., 2016]. Погрешности даны на уровне 1σ . D — дискордантность: $D = 100 \cdot [(\text{возраст } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$.

(уч. Максимиха) и п-ова Святой Нос, прорывающие докембрийские кристаллические сланцы и гнейсы. Очевидно, что единственным способом определения возрастного положения таких даек является их изотопный возраст.

В связи с этим возникает проблема хронологии дайкового магматизма и его взаимосвязи (генетической/парагенетической) с гранитоидными комплексами. К настоящему времени имеется лишь несколько определений изотопного возраста минглинг-даек Западного Забайкалья [Цыганков и др., 2016б], которые указывают на синхронность внедрения базитового и салического расплавов, а также на то, что становление минглинг-даек не было «оторвано» от формирования массива. В Шалутинском плутоне ситуация более сложная. Дайка CD_1 с возрастом цирконов из салической части 290.8 ± 2.7 млн лет (мы принимаем одинаковым возраст салического и базитового компонентов) внедрялась, судя по всему, в еще не полностью раскристаллизованную магматическую камеру. Такой же изотопный возраст ($291.3 \pm 2.4 - 289.7 \pm 2.1$ млн лет, Ar-Ar, амфибол) имеют габбро синплутонической интрузии в этом массиве [Цыганков и др., 2016б], залегающей гипсометрически выше дайки CD_1 . Химический состав базитов из этих образований

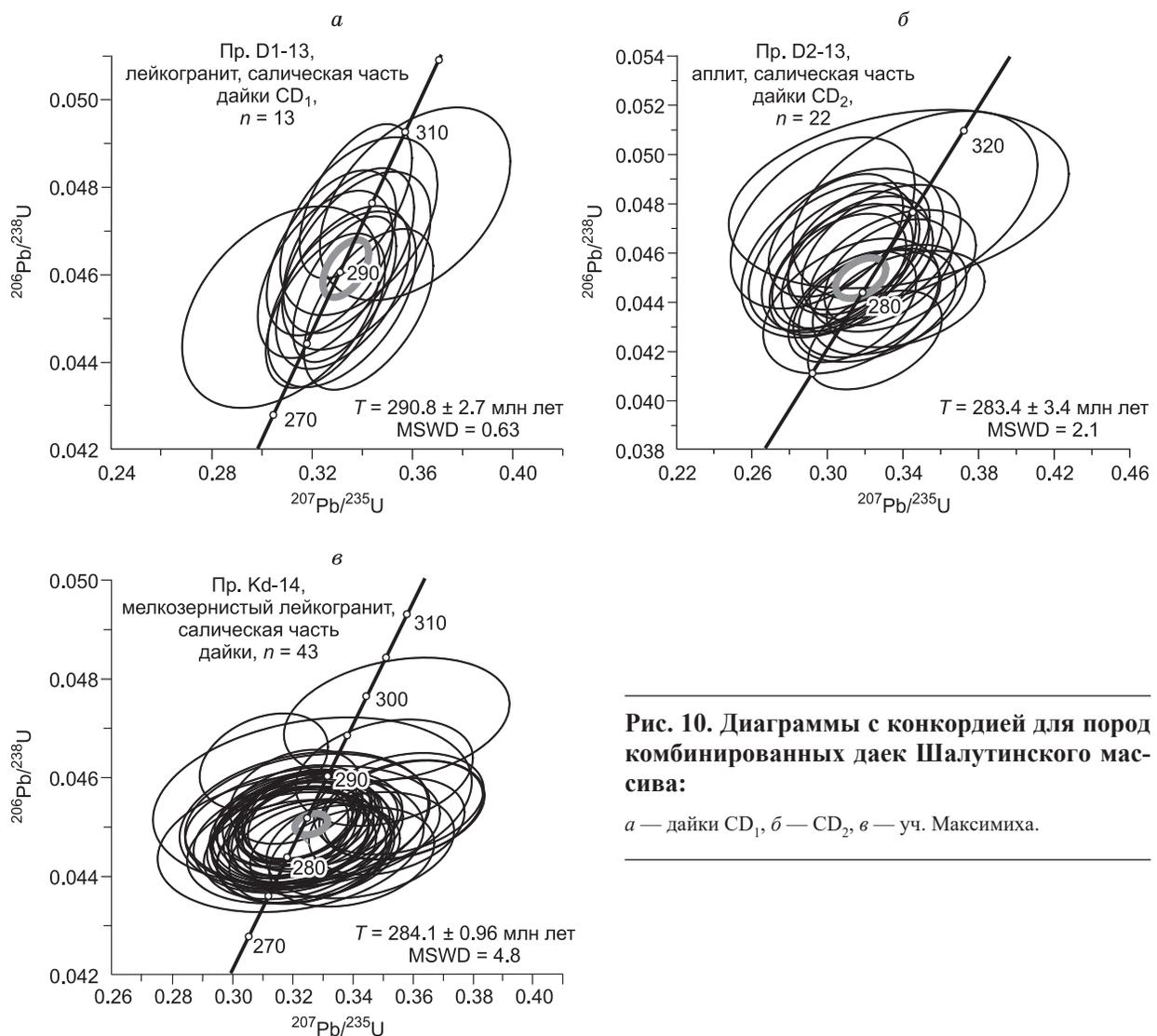


Рис. 10. Диаграммы с конкордией для пород комбинированных даек Шалутинского массива:

а — дайки CD₁, *б* — CD₂, *в* — уч. Максимиха.

практически одинаков, что дает основание полагать не только синхронность внедрения, но и генетическое родство. При этом возраст вмещающих кварцевых сиенитов Шалутинского массива составляет $293 \pm 2.5 - 291 \pm 1.9$ млн лет [Litvinovsky et al., 2012]. Из этого следует, что внедрение базитов в виде разнообъемных инъекций происходило еще на стадии кристаллизации магматической камеры.

Дайка CD₂ внедрялась в консолидированные габбро-монциты. U-Pb возраст цирконов из салической части дайки составляет 283.4 ± 3.4 млн лет, что даже с учетом погрешности определения заметно моложе дайки CD₁ и кварцевых сиенитов, вмещающих в том числе и гибридные габбро-монциты.

Таким образом, в Шалутинском массиве фиксируются два эпизода внедрения базитовых магм: ранний — на стадии кристаллизации магматической камеры и поздний — после ее полного затвердевания.

На участках Максимиха и Святой Нос минглинг-дайки прорывают биотит-амфиболовые кристаллические сланцы и гнейсы таланчанской и катковской свит. Непосредственной пространственной связи с какими-либо гранитоидными или базитовыми интрузиями не установлено, по крайней мере, на уровне современного эрозионного среза. Тем не менее U-Pb изотопный возраст максимихинской дайки, составляющий 284.1 ± 0.96 млн лет, «укладывается» в общий интервал базитового (291—279 млн лет) магматизма Западного Забайкалья [Цыганков и др., 2010, 2016], продолжавшегося около 12 млн лет. При этом разновременность формирования комбинированных даек проявляется не только в разных частях ареала их распространения, но и в процессе становления отдельных гранитоидных массивов, где внедрение минглинг-даек может иметь пульсационный характер [Литвиновский и др., 1995a].

Для комбинированных даек Харитоновского щелочно-гранитоидного массива [Zanvilevich et al., 1995] изотопно-геохронологические данные пока отсутствуют, однако их возраст *a priori* не может быть древнее самого массива ($230.1 \pm 0.7 - 229.1 \pm 0.6$ млн лет [Reichow et al., 2010]), а геологические взаимоотношения (см. выше) указывают на синхронность с вмещающими щелочно-полевошпатовыми сиенитами (аналог CD₁).

Таким образом, имеющиеся изотопно-геохронологические и геологические данные позволяют зафиксировать два периода формирования комбинированных даек в Западном Забайкалье. Первый коррелирует с позднепалеозойским этапом массового гранитообразования, в результате которого сформировалась одна из крупнейших на Земле гранитоидных провинций. Примечательно, что базитовый магматизм этого этапа в целом и комбинированные дайки в частности приурочены к завершающей стадии гранитоидного магматизма [Цыганков, 2014; Цыганков и др., 2016б]. Есть все основания предполагать, что формирование даек в каждом конкретном случае связано непосредственно с внедрением крупных объемов салических магм и становлением отдельных гранитоидных плутонов. Если это так, то дайки в метаморфических образованиях, скорее всего, располагаются над кровлей нескрытых эрозией гранитоидных массивов.

Второй период образования комбинированных даек связан с раннемезозойским щелочно-гранитоидным магматизмом, продукты которого объединяются в позднекуналейский магматический комплекс, формировавшийся с 230 до 210 млн л. н. [Цыганков и др., 2010; Litvinovsky et al., 2012].

Источники магм

Проблема источников магм позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья и ассоциирующихся с ними базитов в разных формах проявления в последние годы обсуждалась неоднократно [Цыганков и др., 2007, 2010, 2016б; Хубанов, 2009; Litvinovsky et al., 2011; Бурмакина, Цыганков, 2013; Цыганков, 2014]. Основной вывод, следующий из этих работ, заключается в том, что одни гранитоиды имеют исключительно коровое происхождение, другие сформировались за счет смешанных мантийно-коровых источников с разной долей ювенильного компонента. Ситуация с магмами мантийного происхождения еще более неопределенна. Для позднепалеозойских базитов в целом типичны так называемые «надсубдукционные» геохимические характеристики, такие как высокое отношение LILE/HFSE, отрицательные Nb-Ta-аномалии на графиках распределения литофильных элементов, а также отрицательные значения ϵ_{Nd} , идентичные таковым в гранитоидах мантийно-корового типа.

Полученные нами новые минералогические, геохимические и изотопные данные по комбинированным дайкам рассматриваемого региона позволяют вновь вернуться к проблеме источников магм, в первую очередь базитовых, имея в виду, что при отсутствии вулканических пород соответствующего возраста именно дайки в наибольшей степени могли сохранить информацию об исходном составе мантийных магм и их мантийных источниках.

Макрокомпонентный состав базитов комбинированных даек, как было показано выше, довольно сильно различается. В целом для них характерны низкая магнезиальность и часто повышенное содержание SiO_2 , достигающее 58—59 мас. %. Обычно такие петрохимические параметры рассматриваются как свидетельство дифференциации магм. Учитывая небольшой размер базитовых глобул, мелко- и тонкозернистую структуру пород и отсутствие какой-либо вещественной зональности внутри даже относительно крупных глобул, можно сделать вывод, что дифференциация расплавов если и имела место, то могла происходить лишь в промежуточных камерах. Этому, однако, противоречит отсутствие аномалий Eu на графиках распределения REE, а также отсутствие корреляции магнезиальности и содержаний петрогенных оксидов. Исходя из этого, можно предположить, что указанные выше особенности состава базитов комбинированных даек обусловлены взаимодействием с салическим расплавом, которое, скорее всего, происходило еще в глубинных условиях и в ограниченном масштабе могло продолжаться *in situ*. Активное взаимодействие основных и кислых магм при формировании комбинированных даек подтверждается минерало-петрографическими данными: 1) наличие порфиробластов калиевого полевого шпата и интерстициального кварца; 2) резорбированные вкрапленники основного плагиоклаза с олигоклазовой каймой и олигоклаз в основной массе; 3) «захваченные» кристаллы пироксена и основного плагиоклаза в салической части даек; 4) широкие вариации содержаний петрогенных оксидов, в первую очередь SiO_2 , как в базитовой, так и в салической составляющей даек. Очевидно, что в каждом конкретном случае масштабы взаимодействия были различны, чем, по нашему мнению, и определяются наблюдаемые вариации состава пород как внутри даек, так и между разными дайками. При этом минимальное воздействие испытали базиты Харитоновской дайки, повышенная магнезиальность некоторых проб из которой, вероятно, обусловлена аккумуляцией оливина, а наибольшее – базиты из даек Шалутинского массива, содержание SiO_2 в которых максимально.

На рис. 11 представлена серия диаграмм отношений высоконесовместимых элементов с нанесенными полями базальтов разных геохимических типов и составами источников магм, в том числе коровых. На диаграмме Ce/U—Ba/Ce (рис. 11, а) точки состава базитов комбинированных даек (< 60 мас. % SiO_2) частично попадают в поле OIB, но большей частью выходят за его пределы. Дайки разных участков несколько различаются между собой, однако эти различия не превышают дисперсии состава эталонных образований. На рис. 11, б базиты комбинированных даек образуют компактный ареал, явно тяготеющий к полю океанических осадков. Вариации канонических отношений на диаграмме Th/Ta—La/Yb

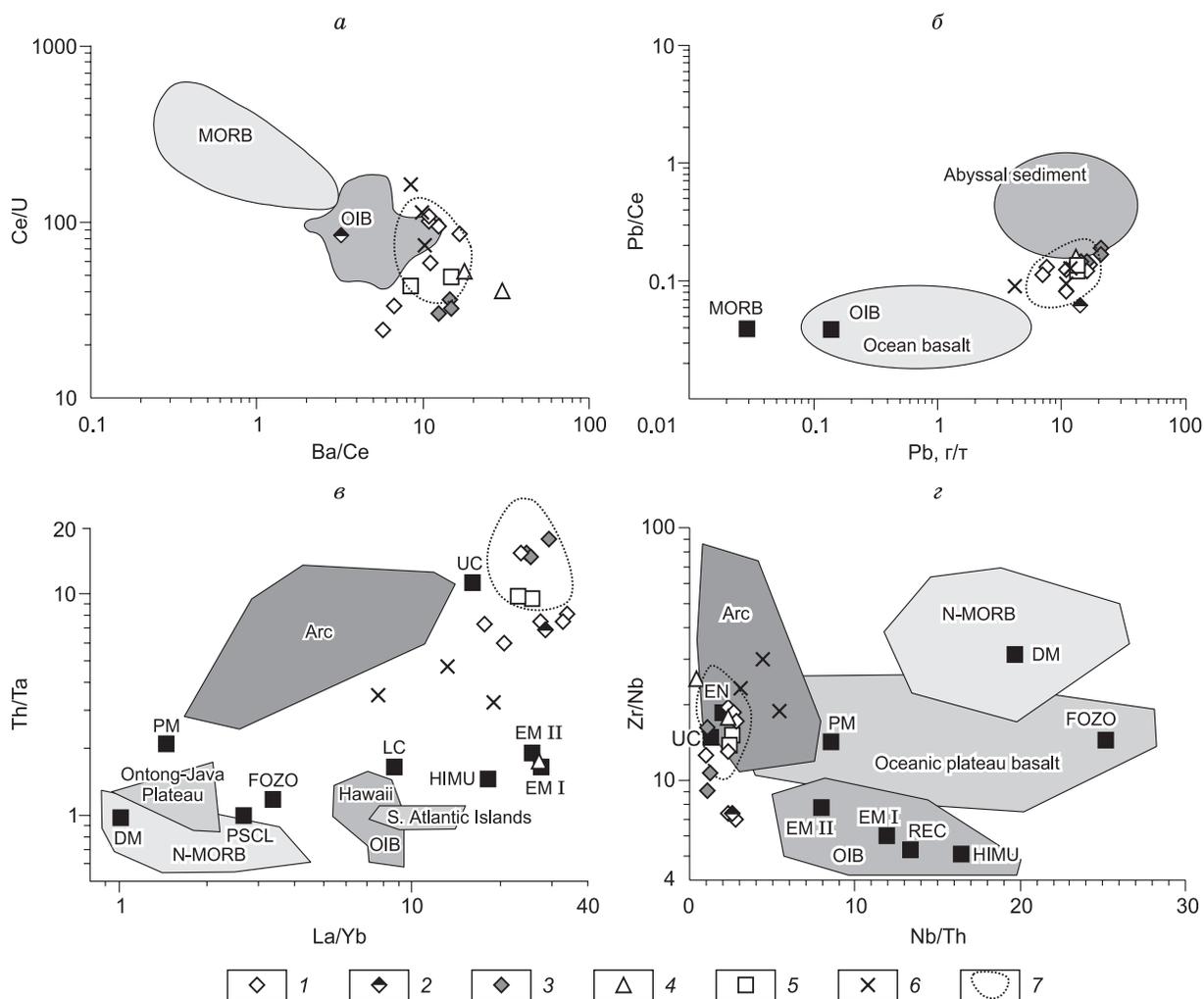


Рис. 11. Положение точек составов базитов комбинированных даек Западного Забайкалья на дискриминационных диаграммах Ba/Ce—Ce/U (а), Pb—Pb/Ce (б), La/Yb—Th/Ta (в), Nb/Th—Zr/Nb (г).

1 — Жиримский и Усть-Хилокский участки Усть-Хилокского массива нижнеселенгинского комплекса; 2 — CD₁ и 3 — CD₂ дайки Шалутинского массива зазинского комплекса; 4 — дайки бассейна р. Курба, прорывающие гранитоиды чивыркуйского комплекса; 5 — дайки в кристаллических сланцах таланчанской свиты (уч. Максимиха); 6 — дайки в Харитоновском раннемезозойском щелочно-гранитоидном массиве позднекуналейского комплекса; 7 — синплутонические амфиболовые габбро Шалутинского массива [Цыганков и др., 20166]. Положение составов магматических источников и базальтов из различных геодинамических обстановок заимствовано из [Halliday et al., 1995; Condie, 1997, 2005; Zhang et al., 2008]. UC — верхняя континентальная кора; PM — примитивная мантия; DM — деплетированная мантия; HIMU — мантийный источник с высоким U/Pb; EM I и EM II — обогащенные мантийные источники; FOZO — нижнемантийный деплетированный источник; PSCL — постаршейская субконтинентальная литосфера; EN — обогащенный компонент; REC — рециклинговый компонент; Arc — островодужные базальты; N-MORB — базальты COX; OIB — базальты океанических островов.

значительно шире. Основная часть точек тяготеет к составу верхней континентальной коры, тогда как базиты раннемезозойской Харитоновской дайки смещены в сторону обогащенных мантийных источников, а состав базитов из Курбинской дайки в точности соответствует EM I мантийному резервуару. На рис. 11, г в координатах Zr/Nb—Nb/Th большая часть точек ложится в поле базальтоидов островных дуг, перекрываясь с составами верхнекорового и обогащенного компонентов.

Изотопные данные (табл. 3) также указывают на присутствие корового компонента в составе базитов комбинированных даек. В частности, $\epsilon_{Nd}(T)$ варьирует в диапазоне от -4.5 до -3.8 (рис. 12), причем изотопный состав салической части даек ничем не отличается от базитовой, а также от вмещающих гранитоидов мантийно-корового типа. Единственное исключение составляет дайка CD₁ Шалутинского массива, в салической части которой $\epsilon_{Nd}(T)$ составляет 1.95, тогда как в базитовой -4.35 . Кроме того, модельный возраст мелкозернистых лейкогранитов салической части этой дайки составляет 910 млн лет, что заметно отличается от остальных даек с более древним модельным возрастом — около 1450 млн

Таблица 3. Nd изотопные данные по породам комбинированных даек Западного Забайкалья

Номер пробы	Порода	Участок/массив	Возраст, млн лет	Sm	Nd	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	T(DM-2), млн лет
				г/г					
К-12-3/2	Базит	Шалутинский, дайка CD ₁	290	10.225	65.392	0.094510	0.512221	-4.35	—
К-12-4	Мелкозернистый лейкогранит	»	290	0.570	3.897	0.088424	0.512532	1.95	910
К-08-13с	Базит	Шалутинский, дайка CD ₂	283	7.497	44.011	0.102957	0.512267	-3.85	—
К-08-13а	Аплит	»	283	9.739	50.214	0.117231	0.512269	-4.33	1426
S-08-10/15а	Мелкозернистый кварцевый сиенит	Бассейн р. Курба	≈290	7.625	46.085	0.100006	0.512223	-4.49	1447
В-23/1-15	Базит	Максимиха	284	8.051	43.227	0.112574	0.512250	-4.45	—
В-23-11	Мелкозернистый лейкогранит	»	284	4.511	31.933	0.085386	0.512194	-4.54	1449

Примечание. Среднее значение на период измерений по стандарту Judi-1 = 0.512090 ± 9 (n = 9). Определения выполнены в ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты) под руководством Т.Б. Баяновой.

лет. Причины такого отличия пока до конца не ясны, скорее всего, это связано с плавлением разных коровых протолитов.

Таким образом, на всех представленных диаграммах в составе базитов комбинированных даек четко фиксируется присутствие верхнекорового компонента, оценить количественно вклад которого пока не представляется возможным. Кроме того, не ясен механизм обогащения мантийных базальтовых магм веществом континентальной коры. Традиционно рассматриваются два крайних варианта: контаминация собственно магм, несомненно, имевшая место (см. выше), и контаминация источника (через субдукцию) либо сочетание обоих факторов. В рассматриваемом контексте ключевое значение имеют субдукционные геохимические маркеры, о которых упоминалось выше. Прежде всего, это высокие отношения LILE/HFSE в породах и отрицательные Nb-Ta-аномалии на мультиэлементных графиках. Эти маркеры четко проявлены в раннепалеозойских габброидах островодужного типа, фрагментарно встречающихся среди гранитоидов Ангаро-Витимского батолита [Цыганков и др., 2016а]. Они сохраняются во всех без исключения базитах позднепалеозойского этапа магматизма Западного Забайкалья [Хубанов, 2009; Цыганков и др., 2010, 2016б; Litvinovsky et al., 2011; Бурмакина, Цыганков, 2013; Цыганков, 2014] и прослеживаются вплоть до позднемеловых базальтов, связанных с внутриконтинентальным рифтогенезом [Воронцов и др., 2016]. Представляется, что такая унаследованность геохимических характеристик может быть связана только с особенностями состава мантийного источника, обогащенного не только «коровыми» литофильными элементами, но и водой, что обеспечивает гидратированные условия плавления и, как следствие, отрицательные Nb-Ta-аномалии [Цыганков и др., 2016б].

Кроме разной степени взаимодействия базитовых и салических магм, геохимической гетерогенности мантийного источника, связанной с его субдукционным обогащением, определенную роль в вариациях состава базитов минглинг-даек может играть и разная глубина выплавления магм. Показателем глубины плавления, точнее, фации глубинности, являются отношения $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{PM}}$, $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{PM}}$, величины которых > 2.0 и 1.8 соответственно указывают на присутствие граната в мантийном источнике, меньше этих величин – на плавление в области стабильности шпинели [Macdonald et al., 2001; Wang et al., 2002; Furman et al., 2004].

В базитах комбинированных даек отношение $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ варьирует от 2.0 до 4.7 (за исключением одной пробы), $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ – от 1.8 до 3.0 (кроме той же пробы). При этом минимальные значения характерны для раннемезозойской Харитоновской дайки, более высокие – для позднепалеозойских даек. Из этого можно сделать вывод, что выплавление базитовых магм происходило на глубине более 75 км в поле стабильности граната [Эрнст и др., 2016], причем глубина плавления со временем, по-видимому, несколько уменьшалась.

Пространственно-временная связь комбинированных даек с крупными гранитоидными плутонами однозначно указывает на происхождение салического компонента даек. Судя по геологическим взаимоотношениям и геохронологическим данным, внедрение даек происходило в магматические камеры на стадии их кристаллизации либо сразу после их полной консолидации. Последнее, с петрологической точки зрения, равнозначно внедрению в метаморфические образования, но в любом случае внедрение даек происходило после внедрения основных объемов салических (гранитоидных) магм, давших крупные плутоны. Следовательно, в комбинированные дайки могли «захватываться» только остаточные

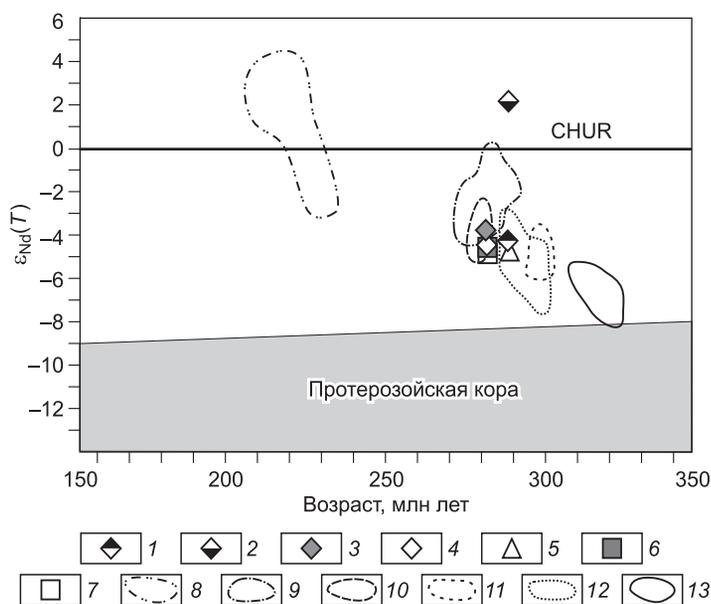


Рис. 12. Диаграмма зависимости $\epsilon_{Nd}(T)$ от возраста для комбинированных даек Западного Забайкалья и вмещающих гранитоидных комплексов.

Шалутинский массив: дайка CD_1 — 1 — базитовая, 2 — салическая составляющие; дайка CD_2 — 3 — базитовая, 4 — салическая составляющие; 5 — комбинированная дайка бассейна р. Курба; уч. Максимиха: 6 — базитовая, 7 — салическая составляющие; магматические комплексы, по [Litvinovsky et al., 2011; Цыганков, 2014]: 8 — позднекуналейский, 9 — раннекуналейский, 10 — нижнеселенгинский, 11 — зазинский, 12 — чивыркуйский, 13 — баргузинский.

порции салических магм. Иначе говоря, изначально салический компонент даек — это аналог вмещающих гранитоидов, в разной степени «обогащенный» базитовым материалом, в том числе в виде отдельных кристаллов (пироксен, основной плагиоклаз, роговая обманка). Подтверждением этому служат петрогеохимические (см. рис. 5—7) и изотопные (см. рис. 12) данные.

Механизм формирования

Для понимания механизмов формирования комбинированных даек ключевое значение имеют их геолого-морфологические особенности. Обсуждаются несколько моделей формирования даек: а) впрыскивание отдельных порций основных магм в кислый магматический резервуар [Sparks et al., 1977; Marshall, Sparks, 1984; Blake, 1984; Литвиновский и др., 1993]; б) фрагментация синплутонических базитовых интрузий «вторичным» ремобилизованным салическим расплавом, образовавшимся при подплавлении раскристаллизованных на 70—80 % вмещающих гранитоидов [Lipman, 1963; Furman, Spera, 1985; Литвиновский и др., 1995б]; в) внедрение гетерогенной смеси базальтового и салического расплавов [Титов и др., 2000]; г) конвективное рассеяние базитового материала в стратифицированной магматической камере [Huppert et al., 1984; Kouchi, Sunagava, 1985]. Очевидно, что последний механизм в большей мере относится к мафическим включениям (ММЕ) в гранитоидах, чем к собственно комбинированным дайкам. Кроме того, необходимо иметь в виду, что, несмотря на описанные выше существенные различия в строении и морфологии даек (CD_1 и CD_2), в тех и других с вмещающими породами контактирует салическая составляющая дайки. Наиболее наглядно это проявлено в дайках CD_2 типа, но при детальном наблюдении выявляется и в первой разновидности. Кроме того, нередко в дайках встречаются ксенолиты подстилающих пород. Наконец, дайки, залегающие в метаморфических толщах, ничем не отличаются от залегающих в плутонических образованиях, в частности, в гранитоидах. Все это, на наш взгляд, вполне определенно свидетельствует о внедрении гетерогенной смеси — своего рода эмульсии кислого и базитового расплавов при формировании комбинированных даек. При этом различия их морфологии и внутреннего строения зависят от пропорций салического и базитового компонентов, но главным образом от реологического состояния вмещающей среды, которая может быть представлена твердыми породами с открытыми трещинами (дайки CD_2 типа) либо кристаллизующимся расплавом (дайки CD_1 типа).

Очевидно, что механизм впрыскивания отдельных порций основных магм в кислый магматический резервуар также имеет место [Литвиновский и др., 1993]. Однако в этом случае образуются синплутонические интрузии, как, например, в Шалутинском [Цыганков и др., 2016б] или в Нестерихинском плутонах. В последнем описанные А.Б. Литвиновским с соавторами [1993] комбинированные дайки представляют собой, по сути, те же синплутонические интрузии, только небольших размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выделено две разновидности комбинированных даек, различающихся морфологией и внутренним строением, зависящих от: а) пропорций салического и базитового компонентов; б) реологического состояния вмещающей среды. Последняя может быть пред-

ставлена как твердым субстратом с открытыми трещинами, так и расплавом различных стадий кристаллизации.

Установлен изотопный возраст даек в Шалутинском массиве, составляющий 290.8 ± 2.7 и 283.4 ± 3.4 млн лет, совпадающий в пределах погрешности определения с временем формирования плутона, а также возраст комбинированной дайки, прорывающей метаморфические образования на восточном побережье оз. Байкал, — 284.10 ± 0.96 млн лет.

Массовое формирование комбинированных даек в Западном Забайкалье коррелирует с позднепалеозойским этапом магматизма, в результате которого сформировалась одна из крупнейших на Земле гранитоидных провинций. Внедрение даек не было одномоментным событием. Оно растянуто во времени как минимум на 10—12 млн лет. Есть все основания полагать, что формирование даек в каждом конкретном случае связано непосредственно с внедрением крупных объемов салических магм и становлением отдельных гранитоидных плутонов. Значительно реже встречаются раннемезозойские комбинированные дайки, связанные с щелочно-гранитоидным магматизмом, продукты которого объединяются в позднекуналейский магматический комплекс, формировавшийся в период с 230 до 210 млн л. н.

Образование базитовых магм комбинированных даек происходило на глубинах более 75 км за счет плавления модифицированного (обогащенного коровыми компонентами) мантийного источника. Салические компоненты даек в целом близки по составу к гранитоидам плутонической фации, а имеющиеся отличия связаны, по-видимому, с процессами гибридизации в глубинных условиях.

Авторы благодарны рецензентам Е.В. Складкову и Е.А. Васюковой за конструктивные замечания, способствовавшими улучшению статьи, Т.Б. Баяновой, под руководством которой выполнены определения изотопного состава пород.

Проведенные исследования поддержаны грантами РФФИ-Сибирь № 15-45-04208 (минералогия, геохимия); РФФИ (грант 14-05-00498) (геологическое строение, петрография); грантом Российского научного фонда № 15-17-10010 (геохронология, изотопия).

ЛИТЕРАТУРА

Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Мафические включения в позднепалеозойских гранитоидах Западного Забайкалья (Бургасский кварцево-сиенитовый массив): состав, петрогенезис // *Петрология*, 2013, т. 21, № 3, с. 309—334.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Комарицына Т.Ю. Позднемезозойский-раннекайнозойский рифтогенный магматизм Удинского сектора (Западное Забайкалье) // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (5), с. 920—946.

Врублевская Т.Т., Хубанов В.Б., Цыренов Б.Ц. Образование трахиандезитов и трахидацитов при смешении контрастных магм в сложных дайках // *Отечественная геология*, 2013, № 2, с. 55—64.

Добрецов Н.Л. Раннепалеозойская тектоника и геодинамика Центральной Азии: роль раннепалеозойских мантийных плюмов // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52 (12), с. 1957—1973.

Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51 (9), с. 1159—1187.

Кармышева И.В., Владимиров В.Г., Владимиров А.Г., Шелепаев Р.А., Яковлев В.А., Васюкова Е.А. Тектоническая позиция минглинг-даек в аккреционно-коллизийной системе ранних каледонид Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува) // *Геодинамика и тектонофизика*, 2015, т. 6, вып. 3, с. 289—310.

Карта магматических формаций юга Сибири и Северной Монголии. М-б 1:1 500 000 / Г.Я. Абрамович, В.В. Булдыгеров, Н.А. Срывцев, А.П. Таскин. М., МинГео, 1989.

Коваленко В.И., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. Отношения элементов-примесей как отражение смесимости источников и дифференциации магм щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // *Петрология*, 2009а, т. 17, № 2, с. 175—196.

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко Д.В., Козловский А.М., Андреева И.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Вариации изотопного состава неодайма и канонических отношений содержания несовместимых элементов как отражение смешения источников щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // *Петрология*, 2009б, т. 17, № 3, с. 249—275.

Козловский А.М., Ярмолюк В.В., Саватенков В.М., Ковач В.П. Источники базальтоидного магматизма в условиях рифтогенеза на активной континентальной окраине (на примере бимодальной

ассоциации хребтов Ноён и Тост позднепалеозойской Гоби-Тяньшаньской рифтовой зоны, Южная Монголия) // Петрология, 2006, т. 14, № 4, с. 358—383.

Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 153—184.

Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алакшин А.М., Подладчиков Ю.Ю. Ангаро-Витимский батолит – крупнейший гранитоидный плутон. Новосибирск, Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993, 141 с.

Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Калманович М.А. Многократное смешение сосуществующих сиенитовых и базитовых магм и его петрологическое значение, Усть-Хилокский массив, Забайкалье // Петрология, 1995а, т. 3, № 2, с. 133—157.

Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Ляпунов С.М., Биндеман И.Н., Дэвис А.М., Калманович М.А. Условия образования комбинированных базит-гранитоидных даек (Шалутинский массив, Забайкалье) // Геология и геофизика, 1995б, т. 36 (7), с. 3—22.

Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2009, 200 с.

Попов В.С. Смешение магм – важный петрогенетический процесс // Зап. ВМО, 1984, ч. 113, вып. 2, с. 229—240.

Розен О.М., Федоровский В.С. Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры (примеры кайнозойских, палеозойских и протерозойских коллизионных систем). М., Научный мир, 2001, 188 с.

Скляр Е.В., Федоровский В.С. Тектонические и геодинамические аспекты механического смешения магм (магматического минглинга) // Геотектоника, 2006, № 2, с. 47—64.

Титов А.В., Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н. *P-T* условия и механизмы взаимодействия контрастных магм в Шалутинском плутоне, Забайкалье (по результатам исследования включений в минералах) // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (3), с. 350—360.

Титов А.В., Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Шадаев М.Г. Явления гибридизации в комбинированных базит-лейкогранитных дайках Усть-Хилокского массива (Забайкалье) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (12), с. 1714—1728.

Хубанов В.Б. Бимодальный дайковый пояс центральной части Западного Забайкалья: геологическое строение, возраст, состав и петрогенезис: Автореф. дис. ... к. г.-м.н. Улан-Удэ, 2009, 23 с.

Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ₃-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 241—258.

Цыганков А.А. Позднепалеозойские гранитоиды Западного Забайкалья: последовательность формирования, источники магм, геодинамика // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 197—227.

Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц., Хромов А.А., Сергеев С.А. Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (1), с. 156—180.

Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования) // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1249—1276.

Цыганков А.А., Удоргина О.В., Бурмакина Г.Н., Анциферова Т.Н., Кобл М.А. Раннепалеозойский базитовый магматизм Западного Забайкалья: состав, изотопный возраст (U-Pb, SHRIMP-RG), источники магм, геодинамика // Петрология, 2016а, т. 24, № 4, с. 396—422.

Цыганков А.А., Хубанов В.Б., Травин А.В., Лепехина Е.Н., Бурмакина Г.Н., Анциферова Т.Н., Удоргина О.В. Позднепалеозойские габброиды Западного Забайкалья: U-Pb и Ar-Ar изотопный возраст, состав, петрогенезис // Геология и геофизика, 2016б, т. 57 (5), с. 1005-1027.

Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Седерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 833—855.

Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кузьмин М.И. Зональные магматические ареалы и анорогенное батолитообразование в Центрально-Азиатском складчатом поясе: на примере позднепалеозойской Хангайской магматической области // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 457—475.

Blake S. Magma mixing and hybridization processes at the alkali, silicic Torfajökull central volcano triggered by tholeiitic Veidivöth fissuring, South Iceland // J. Volcan. Geotherm. Res., 1984, v. 22, p. 1—31.

Chen G.-N., Grapes R. Granite genesis: In situ melting and crustal evolution. Springer, 2007, 277 p.

- Condie K.C.** Source of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios // *Precambrian Res.*, 1997, v. 81, p. 3—14.
- Condie K.C.** High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*, 2005, v. 79, p. 491—504.
- Enclaves and granite petrology** / Eds. J. Didier, B. Barbarin. Amsterdam, Elsevier, 1991, 625 p.
- Furman T., Spera F.J.** Co-mingling of acid and basic magma with the implication for the origin of mafic I-type xenolith field and petrochemical relations of an unusual dike complex at Eagle Lake, Sequoia National Park, California, USA // *Volcanol. Geotherm. Res.*, 1985, v. 24, p. 151—178.
- Furman T., Bryce J.G., Karson J., Iotti A.** East African Rift System (EARS) plume structure: insights from Quaternary mafic lavas of Turkana, Kenya // *J. Petrol.*, 2004, v. 45, № 5, p. 1069—1088.
- Halliday A.N., Lee D.-C., Tommasini S.** Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, v. 133, p. 379—395.
- Huppert H.E., Sparks R.S.J., Turner J.S.** Some effects of viscosity on the dynamics of replenished magma chambers // *J. Geophys. Res.*, 1984, v. 89 B, p. 6857—6877.
- Kouchi A., Sunagava I.A.** A model for mixing basaltic and dacitic magmas as deduced from experimental data // *Contr. Miner. Petrol.*, 1985, v. 89, p. 17—23.
- Leake B.E., Woolley A.R., Apps C.E.** Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee of the Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // *Can. Miner.*, 1997, v. 35, p. 219—246.
- Lipman P.W.** Gipson Peak pluton: a discordant composite intrusion in the southeastern Trinity Alps, northern California // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1963, v. 74, p. 1259—1280.
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y.** Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia) // *Lithos*, 2011, v. 125, p. 845—874.
- Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Katzir Y.** Formation of composite dykes by contact remelting and magma mingling: The Shaluta pluton, Transbaikalia (Russia) // *Asian Earth Sci.*, 2012, v. 60, p. 18—30.
- Ludwig K.R.** User's manual for ISOPLOT/Ex 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication № 4, 2455 Ridge Road, Berkeley CA 94709, USA, 2003, 70 p.
- Macdonald R., Rogers N.W., Fitton J.G., Black S., Smith M.** Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya rift, East Africa // *J. Petrol.*, 2001, v. 42, № 5, p. 877—900.
- Marshall L.A., Sparks R.S.J.** Origin of some mixed-magma and net-veined ring intrusions // *J. Geol. Soc.*, London, 1984, v. 141, p. 171—182.
- Morimoto N.** Nomenclature of pyroxenes // *Can. Miner.*, 1989, v. 27, p. 143—156.
- Palme H., O'Neill H.St.** Cosmochemical estimates of mantle composition // *Treatise on geochemistry*, Amsterdam, Elsevier, v. 2, 2003, p. 1—32.
- Reichow M.K., Litvinovsky B.A., Parrish R.R., Saunders A.D.** Multi-stage emplacement of alkaline and peralkaline syenite-granite suites in the Mongolian-Transbaikalian Belt, Russia: Evidence from U-Pb geochronology and whole rock geochemistry // *Chem. Geol.*, 2010, v. 273, p. 120—135.
- Rickwood P.C.** Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // *Lithos*, 1989, v. 22, p. 247—263.
- Sparks R.S.J., Sigurdsson H., Wilson L.** Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruption // *Nature*, 1977, v. 267, № 5609, p. 315—318.
- Sun S.S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geological Society of London, Special Publication, 1989, v. 42, p. 313—345.
- Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.I.** A mantle melting profile across the Basing and Range, SW USA // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107, № B1, doi: 10.1029/2001JB000209.
- Wiebe R.A.** Relations between coexisting basaltic and granitic magmas in composite dike // *Amer. J. Sci.*, 1973, v. 273, p. 130—151.
- Wiebe R.A., Ulrich R.** Origin of composition dikes in the Gouldsboro granite, coastal Maine // *Lithos*, 1997, v. 40, p. 157—178.
- Wilcox R.E.** The idea of magma mixing: history of struggle for acceptance // *J. Geol.*, 1999, v. 103, № 2, p. 127—145.
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Ernst R.E.** Intraplate geodynamics and magmatism in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt // *J. Asian Earth Sci.*, 2014, v. 93, p. 158—179.

Zanvilevich A.N., Litvinovsky B.A., Wickham S.M., Bea F. Genesis of alkaline and peralkaline syenite-granite series: the Kharitonovo pluton (Transbaikalia, Russia) // *J. Geol.*, 1995, v. 103, p. 127—145.

Zhang L.C., Zhou X.H., Ying J.F., Wang F., Guo F., Wan B., Chen Z. Geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xingan Range, NE China: Implication for their origin and mantle source characteristics // *Chem. Geol.*, 2008, v. 256, p. 12—23.

*Рекомендована к печати 31 мая 2017 г.
А.Э. Изухом*

*Поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.,
после доработки — 14 марта 2017 г.*