

*На правах рукописи*



Яковлев Владислав Александрович

**Раннепалеозойские минглинг дайки  
Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилен (ЮВ Тува)**

1.6.3. – Петрология, вулканология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

**Научный руководитель** к.г.-м.н., доцент, с.н.с. ИГМ СО РАН Кармышева Ирина Владимировна

**Официальные оппоненты:**

**Скляр Евгений Викторович**, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института земной коры СО РАН (г. Иркутск)

**Осипова Татьяна Алексеевна**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН (г. Екатеринбург).

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) (г. Москва)

Защита состоится «15» мая 2025 года в 10.00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.050.01, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН [https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles\\_dzubenko/yakovlevVlad/dis-YakovlevVA.pdf](https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/yakovlevVlad/dis-YakovlevVA.pdf).

Автореферат разослан «11» апреля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.050.01, к.г.-м.н.

А.В. Котляров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Понимание механизмов, обуславливающих разнообразие изверженных пород, является фундаментальной научной проблемой петрологии. Согласно современным представлениям, смешение мафических и салических магм, как следствие мантийно-корового взаимодействия, рассматривается в качестве одного из таких механизмов (Hibbard, 1981; Anderson, 1982; Sparks, Marshall, 1986; Wiebe, 1994; Perugini, Poli, 2005; Reubi, Blundy, 2009; Kent et al., 2010; и др.). Минглинг дайки, наравне с магматическими микрогранулярными включениями в гранитоидных массивах, являются типичным примером композитных магматических систем, формирующихся за счет смешения контрастных по составу магм.

Многочисленные исследования мафических включений (Baxter, Feely, 2002; Barbarin, 2005; Скляров, Федоровский, 2006; Sarjoughian et al., 2012; Burmakina, Tsygankov, 2013; Clemens, Bezuidenhout, 2014; Torkian, Jacob et al., 2015; Furman, 2015; Yang et al., 2016; Chen et al., 2016, и др.) позволили сформулировать четкие критерии для идентификации композитных систем, а также обозначить основные термодинамические параметры, контролирующие поведение магм. Условия формирования минглинг даек отличны от таковых для мафических включений, что делает актуальным ряд вопросов, касающихся как механизмов взаимодействия контрастных магм в дайковых условиях, так и влияния магматического смешения на конечные составы пород.

Поскольку одним из ключевых факторов, определяющих образование дайковых комплексов, является тектоника, изучение минглинг даек раскрывает проблему влияния данного фактора на внедрение и становление композитных магматических систем.

### Объекты исследования

Объектами исследования являются минглинг дайки, локализованные в пределах Эрзинской тектонической зоны на юго-западной окраине Тувино-Монгольского массива (Западный Сангилен, ЮВ Тува).

### Цель и задачи исследования

*Цель работы* – на основе сопоставления данных о геологической позиции, составе и возрасте минглинг даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилена выявить характерные черты и реконструировать условия взаимодействия контрастных по составу магм композитных дайковых систем, формирующихся в коллизионной обстановке (юго-западная окраина Тувино-Монгольского массива, Центрально-Азиатский складчатый пояс).

*Задачи:* 1) охарактеризовать внутреннее строение, петрографический и минералогический состав пород минглинг даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилена, провести их систематику; 2) обобщить имеющиеся данные о возрасте пород минглинг даек; 3) выявить характеристики магматических источников пород минглинг даек; 4) выяснить влияние процессов магматического смешения на конечные составы пород минглинг даек; 5) провести сравнительный анализ

вещественных характеристик и возраста пород минглинг даек с плутоническими комплексами Западного Сангилена.

### **Научная новизна**

1. Проведена систематика минглинг даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилена, выделены группы комбинированных и синплутонических даек. Для всех даек предложены собственные механизмы формирования.

2. Впервые обобщены геохронологические данные по синхронному базит-гранитному дайковому магматизму в раннепалеозойских структурах Западного Сангилена. Выявлены факторы, влияющие на пространственно-временную локализацию минглинг даек региона исследований.

3. Определен петрогенезис и охарактеризованы источники всех разновидностей пород минглинг даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилена, проведено сравнение с разновозрастными базитовыми и гранитоидными комплексами региона. Показано, что при смешении в дайковых условиях возможно не только механическое взаимодействие контрастных по составу магм, но и их гибридизация.

4. Установлено, что формирование минглинг даек является синкинематическим процессом. Деформации являются одним из факторов, обеспечивающих благоприятные условия для возникновения областей сосуществования контрастных по составу магм, и во многом определяют морфологию даек.

### **Практическая значимость**

Результаты исследований минглинг даек Западного Сангилена дополняют существующие представления о связи базитового и гранитоидного коллизионного магматизма региона. Полученные результаты могут быть использованы для выделения и корреляции магматических комплексов, а также при определении основных этапов эволюции аккреционно-коллизионных систем.

### **Защищаемые положения**

1. Становление минглинг даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилена произошло в период 495-485 млн лет на среднекоровом уровне глубинности (4-5 кбар) в обстановках синдвигового растяжения. Взаимодействие контрастных по составу магм происходило при формировании комбинированных (заполнение композитной магматической смесью слепых трещин во вмещающих породах) и синплутонических (внедрение базитовой магмы в кристаллизующиеся плутоны кислого состава) даек.

2. Мафические породы комбинированных и синплутонических даек идентичны по химическому составу, формирование их материнских расплавов протекало за счет плавления субдукционно-метасоматизированной литосферной мантии. Салические породы комбинированных даек разнообразны по составу и являются продуктом плавления неоднородного корового субстрата (метаморфических пород эрзинского комплекса).

3. Основным механизмом взаимодействия контрастных по составу магм при образовании минглинг даек Западного Сангиленга является механическое смешение. Свидетельства магматической гибридации зафиксированы в одной комбинированной дайке и идентифицируются по обогащению базитов HFSE, LILE, Th. Данные особенности состава гибридных пород являются следствием изменения физико-химических условий кристаллизации контрастных магм при их взаимном диспергировании на стадии перемещения композитной магматической смеси по ослабленным зонам.

#### **Фактический материал и личный вклад**

Основой работы является коллекция образцов пород базитовых, гранитоидных и минглинг даек Западного Сангиленга, отобранных при участии автора в ходе экспедиционных работ 2015-2018 гг. Всего опробовано 23 минглинг дайки (92 образца, в том числе, породы базитового ряда – 56, гранитоиды – 36); 10 базитовых и 6 гранитоидных даек. Авторские материалы дополнены данными сотрудников ИГМ СО РАН (В.Г. Владимиров, И.В. Кармышевой, Д.В. Семенов, М.Л. Куйбида). В процессе работы был получен представительный аналитический материал. Автором было изучено и описано более 150 шлифов и пластинок. При участии автора было выполнено 3 определения абсолютного возраста U-Pb методом. Используются результаты 92 рентгено-флюоресцентных определений на содержание главных компонентов в породах даек, 48 масс-спектрометрических анализов на содержание редких элементов, около 500 анализов состава минералов.

#### **Апробация работы и публикации**

По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты исследований были представлены на совещаниях: Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (ИГМ СО РАН, 2014); Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике (ГИН СО РАН, 2015); Петрология магматических и метаморфических комплексов (ТГУ, 2016); Строение литосферы и геодинамика (ИЗК СО РАН, 2017); Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ, 2017); Корреляция Алтаид и Уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения (ИГМ СО РАН, 2018); Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит (ДВГИ ДВО РАН, 2018); Геология на окраине континента (ДВГИ ДВО РАН, 2019); Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского (ПГНИУ, 2020).

#### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Диссертация изложена на 160 страницах, содержит 61 иллюстрацию и 22 таблицы. Список литературы включает 233 наименования. Сокращения названий минералов приведены по (Warr, 2021).

## Благодарности

Диссертация подготовлена в лаборатории Структурной петрологии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. Неоценимую помощь и поддержку на всех этапах работы оказала научный руководитель И.В. Кармышева. Автор благодарен В.Г. Владимирову за замечания, помощь и консультации в ходе подготовки публикаций и диссертации. Р.А. Шелепаеву, М.Л. Куйбиде, Я.В. Куйбиде, А.Е. Смоляковой, А.А. Цыганкову, Г.Н. Бурмакиной, В.Б. Хубанову за продуктивные дискуссии в ходе совместных экспедиционных и камеральных работ. Д.В. Семенову за проведение изотопно-геохронологических исследований, Н.Г. Кармановой и И.В. Николаевой за определение валового состава пород, Е.Н. Нигматулиной за помощь в определении состава минералов. За ценные замечания и критику автор благодарен сотрудникам ИГМ СО РАН А.Э. Изоху, О.М. Туркиной, С.Н. Рудневу, А.Г. Дорошкевич, Н.Н. Круку, С.В. Хромых. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400176-0).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** описаны методические подходы и аналитические методы исследования. В диссертации используются результаты рентгено-флюоресцентных определений на содержание главных компонентов, масс-спектрометрических анализов на содержание редких элементов, а также анализов состава минералов. Аналитические исследования выполнены в Центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН.

**Вторая глава** посвящена литературному обзору сведений о смешении контрастных по составу магм. Описаны факторы, контролирующие смешение, охарактеризованы петрографические свидетельства сосуществования магм, дана типизация геологических объектов с признаками магматического смешения, а также рассмотрены различные классификации минглинг даек.

**В третьей главе** систематизированы литературные данные о геологическом строении Западного Сангилена. Вещественные комплексы региона сформировались в раннем палеозое в ходе коллизионного сучивания разнородных фрагментов коры: Таннуольской островной дуги, Агардагского задугового бассейна и Тувино-Монгольского микроконтинента (Гоникберг, 1997, 1999; Козаков и др., 1999; Гишпер и др., 2000; Кузьмичев, 2004; Владимиров и др., 2005). Нижний структурный ярус региона исследованной обладает блоковым строением (Приложение 1): выделяются Мугуро-Чинчилигский и Эрзин-Нарынский тектонические блоки, а также Эрзинская и Кокмолгаргинская сдвиговые (тектонические) зоны. Последние представляют собой проникающие области высокотемпературной милонитизации и вязко-пластичного течения горных пород (Владимиров и др., 2005). Геологические комплексы региона были сформированы в ходе аккреционно-островодужного (570-535 млн лет) и коллизионного (535-440 млн лет) этапов тектоногенеза. Рубеж 495 млн лет характеризуется сменой тектонического режима транспрессии на транстенсию, идентифицируемый по смене кинематики деформаций со взбросовой на левосдвиговую (Владимиров и др., 2005, 2017).

**В четвертой главе** приводится характеристика внутреннего строения, петрографического и минерального состава пород простых и минглинг даек, проведена типизация минглинг даек, обоснована их синкинематическая природа и оценен глубинный уровень внедрения. Изученные минглинг дайки разделены на группы синплутонических (участки Восточный, Стрелка) и комбинированных (участки Матут, Баянкол, РЛС, Тавыт-Даг, Сайзырал). Комбинированные дайки отличаются от простых тем, что это композитные магматические тела, сложенные базитами и гранитоидами с минглинг взаимоотношениями. Как и простые дайки, они имеют секущие контакты с вмещающими породами. Синплутонические дайки также сложены базитами и гранитоидами, однако, в отличие от комбинированных, не имеют секущих контактов с вмещающими породами. Это обусловлено тем, что в качестве салической компоненты синплутонических даек выступают непосредственно вмещающие гранитоиды: граниты Нижнеэрзинского массива (участок Стрелка), параавтохтонные граниты эрзинского комплекса (участок Восточный).

Комбинированные дайки участков Матут, Баянкол и РЛС устроены относительно просто: а) контакты с вмещающими породами секущие; б) в объеме даек преобладают мафические породы, занимающие центральные части даек; в) гранитоиды сосредоточены в краевых частях, а также выполняют маломощные «прожилки» в базитах; г) в салических породах краевых частей даек встречаются мелкие (до 5 см) нодулы базитов преимущественно округлой формы; д) контакты контрастных пород в центральных частях даек сложные (фестончатые, лопастевидные, пламенеvidные), в краевых – линейные; е) зоны переходного состава на контакте базитов и гранитоидов отсутствуют.

Комбинированные дайки участка Тавыт-Даг – это система слепых эшелонированных крутопадающих разрывов, заполненных преимущественно мафическими породами. Контакты с вмещающими гранитами Матутского массива секущие. В строении дайки выделяется две зоны. Осевая часть дайки более чем на 90% сложена мафическими породами, граниты формируют тонкие (до 5 см) прожилки, разделяя базиты на фрагменты, обуславливая сетчатый облик зоны. Данное распределение мафических и салических пород является признаком синкинематического образования сетчатой структуры (Владимиров и др., 2019). Зона пластичности (краевая зона) сложена мафическими и салическими породами в соотношении 2:1. Размер базитовых фрагментов, по сравнению с осевой частью дайки, значительно уменьшается. В обеих зонах морфология контактов как сложная, так и линейная.

Комбинированная дайка участка Сайзырал сечет параавтохтонные граниты эрзинского комплекса и падает полого, согласно ориентировке полосчатости во вмещающих породах. Дайка разделена на три части, нижняя часть дайки сложена диоритами и габбро, пронизанных жилами гранитоидов. Контакты между диоритами и габбро прослеживаются по текстурным особенностям пород: диориты насыщены гломероскоплениями *Amr* и *Vt*. Мощность гранитоидных жил варьирует от 1 до 20 см, их контакты с мафическими породами фестончатые. В наиболее крупных жилах фиксируются округлые фрагменты диоритов. Средняя часть комбинированной дайки

сложена лейкогранитами с включениями диоритов и гломероскоплениями темноцветных минералов. Здесь типичны синмагматические структуры отрыва фрагментов диоритов от основной массы диоритов нижней части дайки. Контакты лейкогранитов и диоритов всегда сложно устроены, в единичных случаях наблюдаются узкие (до 3 см) переходные зоны, сложенные породами с промежуточным цветовым индексом. Верхняя часть дайки сложена лейкогранитами с единичными мелкими включениями диоритов и широко распространенными гломероскоплениями темноцветных минералов.

Синплутонические дайки участка Стрелка – это серия субвертикальных тел базитового состава, имеющих минглинг взаимоотношения с вмещающими гранитоидами Нижнеэрзинского массива. Дайки с невыдержанным простиранием и видимой протяженностью от нескольких десятков до сотен метров. В их строении преобладают мафические породы, граниты образуют сеть маломощных «прожилков», структурно и петрографически неотличимых от вмещающих гранитоидов. Форма и размер мафических тел крайне разнообразна, наблюдаются изометричные, вытянутые в одном или двух направлениях, дендроидной формы с элементами вязкого будинирования фрагменты размером от долей см до нескольких метров. Морфология контактов контрастных пород практически всегда имеет лопастевидный, фестончатый и пламенивидный характер, прямолинейные контакты встречаются крайне редко. Часто наблюдаются сложно устроенные контактовые зоны, четко фиксирующиеся по изменению состава и зернистости пород.

Строение участка Восточный включает в себя мигматиты и параавтохтонные гнейсограниты эрзинского комплекса, крупно- и гигантопорфировые гранитоиды ухадагского комплекса, а также минглинг дайки. Минглинг структуры фиксируются на контакте гнейсогранитов и мафических пород. В мигматитах распространены индикаторные деформационные структуры, отвечающие горизонтальному транспорту вещества. Контакт мигматитов и гнейсогранитов неявный, фиксируется по исчезновению в последних полосчатости и повышению лейкократовости. Базиты в гнейсогранитах образуют как изолированные фрагменты размером от первых сантиметров до метра, так и S-образные цепочки, ориентировка которых соответствует кинематике деформаций в мигматитах. Контакты контрастных по составу пород как сложные, так и линейные.

Базиты простых даек представлены роговообманковыми габбро с содержаниями  $S_{rx}$  до 40 % ( $S_{rx}$  20-40 %,  $Pl$  50-65 %,  $Amr$  5-10 %,  $Vt$  5-10 %), в то время как петрографический состав мафических пород минглинг даек варьирует от роговообманковых габбро с содержаниями  $S_{rx}$  <10 % ( $S_{rx}$  5-10 %,  $Pl$  40-50%,  $Amr$  30-40%,  $Vt$  5-10%) до кварцевых диоритов ( $Pl$  40-50%,  $Amr$  10-15%,  $Vt$  25-30%,  $Qz$  5-15%).  $S_{rx}$  в мафических породах минглинг даек встречается крайне редко и всегда частично замещен амфиболом. Все породы с гломеропорфировой структурой ( $Amr$ ,  $Vt$ - $Amr$  скопления). Акцессорные минералы представлены оксидами  $Fe$  в  $S_{rx}$ -содержащих габбро, ксеноморфным титанитом и игольчатым апатитом в остальных разновидностях пород.

По петрографическому составу гранитоиды комбинированных даек разделены на две группы: а) двуслюдяные двуполевошпатовые лейкограниты, идентичные лейкогранитам простых даек; б) Bt-Amp и Bt граниты. Салическими породами синплутонических даек являются гранитоиды Нижнеэрзинского массива (участок Стрелка) и параавтохтонные граниты эрзинского комплекса (участок Восточный). Все изученные породы без признаков деформирования, за исключением габбро комбинированной дайки участка Сайзырал, обладающие свидетельствами внутрикристаллических деформаций – в плагиоклазах наблюдаются деформационные двойники, в амфиболах присутствуют полосы излома.

Проанализированы составы амфиболов, полевых шпатов и слюд всех разновидностей горных пород минглинг даек участков Сайзырал и Стрелка. Амфиболы диоритов и переходных пород комбинированной дайки Сайзырал идентичны по составу и соответствуют магнезиальной роговой обманке ( $\#Mg = 0.56-0.63$ ). Амфиболы из габбро имеют  $\#Mg$  0.56-0.73. Биотит распространен во всех типах пород, по железистости выделяется три группы: биотиты габбро, диоритов и переходных пород, лейкогранитов. Состав плагиоклазов габбро сильно варьирует: составы ядер ( $An_{58}-An_{37}$ ) и промежуточных зон ( $An_{59}-An_{35}$ ) отвечают андезину и лабрадору, краевых зон – андезину, олигоклазу и альбиту ( $An_{34}-An_8$ ). Состав плагиоклазов из лейкогранитов более выдержан: ядра представлены олигоклазом ( $An_{21}-An_{13}$ ), промежуточные зоны олигоклазом и альбитом ( $An_{20}-An_1$ ), краевые зоны – олигоклазом, альбитом и анортоклазом ( $An_{21}-An_2$ ). Составы плагиоклазов из диоритов и гибридных пород идентичны и являются наиболее постоянными (лабрадорит и андезин,  $An_{60}-An_{36}$ ).

Амфиболы всех разновидностей пород синплутонических даек участка Стрелка имеют идентичные составы, отвечая магнезиальной роговой обманке. Биотиты всех разновидностей пород также идентичны по составу. Плагиоклазы диоритов и пород переходных зон незональные, по составу идентичны и отвечают андезину. Плагиоклазы двуполевошпатовых гранитов также не зональные, их состав варьирует от андезина до олигоклаза.

*Оценка глубины смешения контрастных магм.* Для оценки глубины смешения контрастных магм были определены РТ-условия кристаллизации пород комбинированной дайки Сайзырал и синплутонических даек участка Стрелка. Для вычислений использовались составы центральных частей амфиболов и плагиоклазов из габбро и диоритов дайки Сайзырал, диоритов и двуполевошпатовых гранитов Нижнеэрзинского массива. Расчеты проведены с использованием Amp-P1 термобарометра (Holland, Blundy, 1994), Amp термометра (Putirka, 2016) и Amp барометра (Rudolfi, Renzulli, 2012), результаты приведены на Рисунке 1.

**Пятая глава** посвящена обзору опубликованных изотопно-геохронологических данных по лейкогранитным и минглинг дайкам, выявлена геологическая позиция минглинг даек. Выводы об абсолютном возрасте основываются на результатах изучения цирконов из мафических и салических пород даек участков Тавыт-Даг ( $479 \pm 24$  млн лет – гранит;  $490 \pm 16$  млн лет – диорит) (Tsygankov et al., 2019); Сайзырал ( $495 \pm 5$  млн лет – лейкогранит;  $485 \pm 12$  млн лет –

диорит) (Tsygankov et al., 2019); ( $487 \pm 3$  млн лет – лейкогранит) (Yakovlev et al., 2024); лейкогранитов дайки, секущей мигматиты эрзинского комплекса ( $486 \pm 2$  млн лет) (Karmysheva et al., 2021); двуполовошпатовых гранитов Нижнеэрзинского массива ( $487 \pm 2$  млн лет) (Кармышева и др., 2022а). Возраст синплутонических даек участка Восточный отвечает времени формирования параавтохтонных гранитов эрзинского комплекса (~ 485 млн лет) (Karmysheva et al., в печати). Результаты изотопно-геохронологических исследований указывают на формирование изученных минглинг даек в возрастном диапазоне ~ 495-485 млн лет на позднеколлизийном этапе развития геологических структур Западного Сангилене.

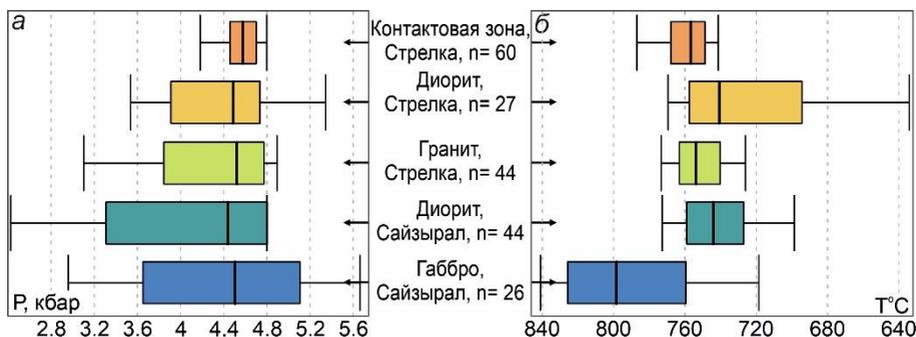


Рисунок 1. Обобщенные результаты вычислений давления и температур кристаллизации пород минглинг даек участков Сайзырал и Стрелка.

Геологическая позиция минглинг даек. Медианные значения давления кристаллизации всех разновидностей пород минглинг даек близки и составляют ~ 4.6 кбар. С учетом того, что 1 кбар литостатического давления отвечает 3.3 км земной коры, усредненная глубина смещения контрастных магм оценивается в 15-16 км, что отвечает уровню средней коры (Рисунок 2 а). Полученные результаты не противоречат опубликованным данным по глубинности становления крупных габбро-монцодиоритовых массивов Западного Сангилене (Egorova et al., 2006). Полученные оценки давления кристаллизации пород минглинг даек (с учетом погрешности, 4-5 кбар) ниже таковых для тесхемского и эрзинского метаморфических комплексов (5.3-7.2 кбар) (Рисунок 2 а). Данный эффект можно объяснить как общим изостатическим утонением коры, так и образованием областей локального понижения давления при внедрении даек. Поскольку полученные значения идентичны для комбинированных и синплутонических даек, вклад понижения общего давления представляется доминирующим.

Согласно (Владимиров и др., 2005, 2017), на Западном Сангилене смена тектонической обстановки транспресии на трансенсию, идентифицируемая по смене кинематики деформаций со взбросовой на сдвиговую, отвечает возрастному рубежу ~ 495 млн лет. Так как внедрение минглинг даек происходило в интервале ~ 495-485 млн лет, то можно констатировать, что относительно низкие давления кристаллизации пород минглинг даек являются следствием их формирования в условиях позднеколлизийного растяжения. Иными словами, одним из факторов,

обеспечивших массовое образование минглинг даек в регионе, является переход от тектонических обстановок сжатия к обстановкам растяжения.

На внедрение минглинг даек синхронно со сдвиговыми деформациями указывают особенности их внутреннего строения: на участках Восточный и Тавыт-Даг зафиксированы хрупко-пластичные индикаторные структуры сдвигового генезиса. Другим свидетельством приуроченности изученных минглинг и простых даек к позднеколлизионному этапу развития структур региона является широкое распространение среди салических пород даек сильнопералюминиевых лейкогранитов (Pitcher, 1983; Chappell et al., 1988; Sylvester, 1998).

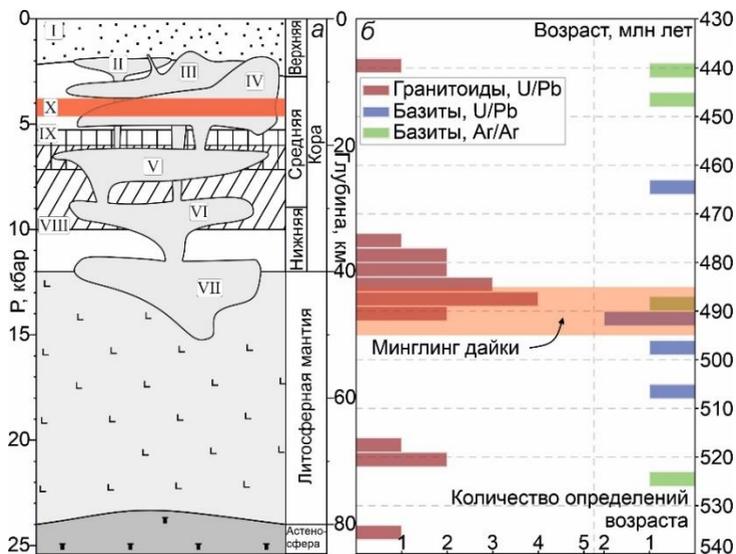


Рисунок 2. а – позиция минглинг даек на схематичном разрезе земной коры и литосферной мантии на ЮЗ окраине ТММ в раннем палеозое (Egorova et al., 2006, с изменениями). I – вулканогенно-осадочные комплексы кембрия, II – Правотарлашкинский массив; III, IV – Башкымугурский массив: III – габброиды, IV – монцодиориты; V-VII – промежуточные магматические камеры; VIII – моренский метаморфический комплекс (Владимиров, 1987; Каргополов, 1997; Козаков, 1986); IX – тесемский и эрзинский комплексы (Karmysheva et al., 2021; Полянский и др., 2023); X – минглинг дайки; б – обобщенные гистограммы возраста гранитоидных и базитовых комплексов Западного Сангилена.

Внедрение минглинг даек протекало синхронно с образованием крупных базитовых и гранитоидных массивов Западного Сангилена (Рисунок 2 б). Период ~ 495-485 млн лет отвечает времени внедрения габбро-монцодиоритовых Баянкольского (~ 497-489 млн лет) и Эрзинского (~ 492 млн лет) массивов (Козаков и др., 1999, 2001; Изох и др., 2001). Особенности химического состава мафических пород не позволяют рассматривать простые базитовые и комбинированные дайки в качестве питающих каналов для преимущественно габброидных массивов региона.

Иными словами, комбинированные дайки являются телами жильного типа, сформировавшихся при заполнении композитным материалом слепых трещин во вмещающих породах. В случае синплутонических даек внедрение базитовой магмы происходило не в консолидированные породы за счет нарушения их сплошности, а в кристаллизующиеся плутоны кислого состава. В данном ключе, образование комбинированных и синплутонических даек является прямым доказательством существования в период ~ 495-485 млн лет базитового очага (промежуточной камеры или камер) на уровне средней коры. Привнос тепла от базитов промежуточных камер являлся одним из факторов, обеспечивших плавление неоднородного эрзинского комплекса и формирование различных по составу гранитоидных магм – салической компоненты комбинированных даек.

**Шестая глава** посвящена характеристике вещественного состава пород простых и минглинг даек, определению петрогенезиса пород и характеристике магматических источников, выявлению особенностей взаимодействия контрастных по составу магм.

*Магматический источник мафических пород минглинг и простых даек.* Состав диоритов комбинированной дайки Сайзырал во многом является отражением процессов магматической гибридизации и рассмотрен отдельно в следующем разделе. Базиты простых, комбинированных и синплутонических даек характеризуются содержаниями  $\text{SiO}_2$  от 45.2 до 57.1 мас. %, широким диапазоном ( $\text{Mg\#} = 46.5-73.1$ ,  $\text{MgO} = 2.4-9.8$  мас. %), высокими концентрациями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (среднее 16.2 мас. %) и  $\text{TiO}_2$  (среднее 1.3 мас. %). Для пород характерны тренды, отвечающие фракционной кристаллизации: отмечается рост концентраций  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , легких РЗЭ и Nb, снижение CaO при снижении Mg#.

Вариации химического состава базитов простых даек согласуются с их петрографическим составом: породы с наибольшими содержаниями амфибола и биотита характеризуются повышенными  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ , в то время как содержания  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  и CaO растут с увеличением доли Crx в породах. В то же время, подавляющее большинство мафических пород минглинг даек представлены Vt-Amp диоритами и кварцевыми диоритами без Crx и значительными содержаниями Qz (до 15 %). Особенностью данных пород является то, что они обладают концентрациями  $\text{SiO}_2$  и MgO на уровне амфиболовых габбро простых даек, в которых Crx является доминирующим темноцветным минералом. Несоответствие петрографического и петрохимического составов мафических пород в композитных системах объясняется моделью гидратационной кристаллизации (Beard et al., 2004). Поскольку ключевое отличие минглинг даек от простых базитовых даек заключается в их формировании при совместной кристаллизации мафических и салических магм, особенности петрографического состава базитов минглинга объясняются дополнительным привносом  $\text{H}_2\text{O}$  из гранитной магмы в процессе кристаллизации габброидов: ранние безводные ассоциации  $\text{Crx} + \text{Orx} + \text{Ca-Pl} + \text{Fe-Ti}$  оксиды замещаются ассоциацией  $\text{Pl} + \text{Amp} + \text{Bt} + \text{Qz} + \text{Ttn}$ .

Для всех образцов мафических пород даек характерно фракционированное распределение как легких, так и тяжелых РЗЭ:  $(\text{La/Sm})_n = 1.45-3.34$ ,  $(\text{Gd/Yb})_n = 1.45-$

3.81, на спайдер-диаграммах наблюдается обогащение LILE и обеднение HFSE с четко проявленными Nb-Ta и Zr-Hf минимумами (за исключением диоритов участка Сайзырал) (Рисунок 3 а-д).

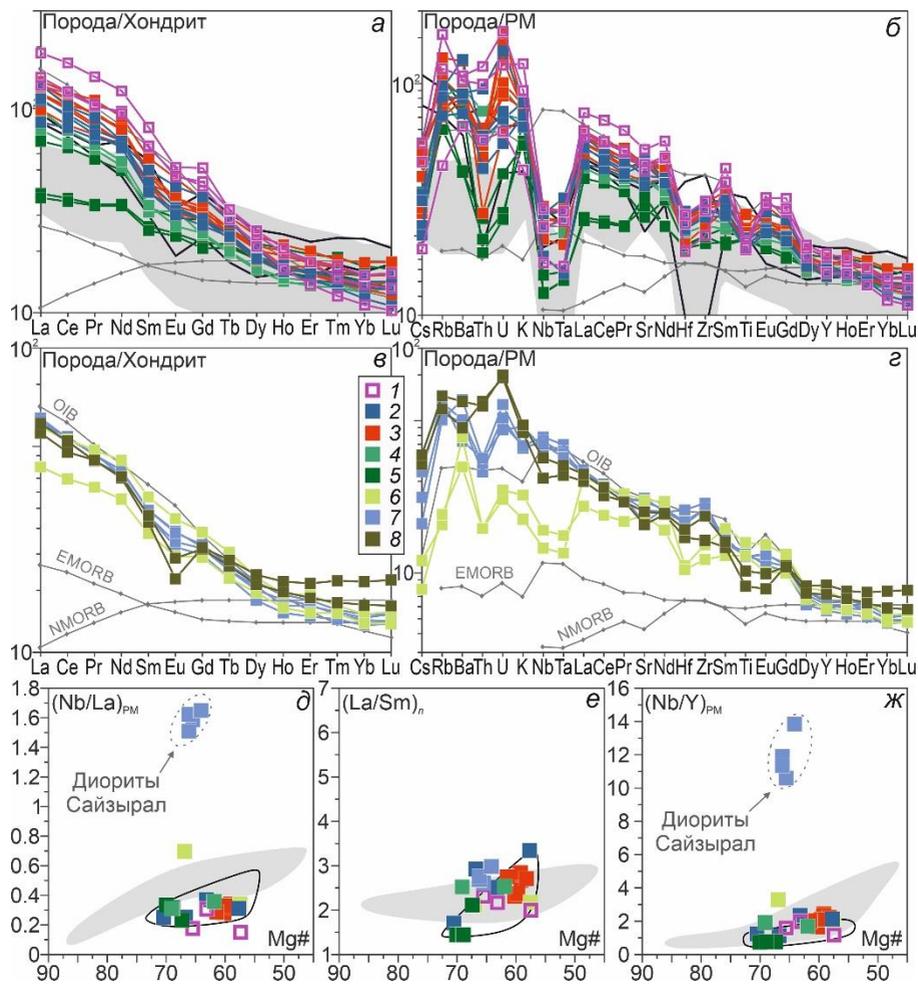


Рисунок 3. Спектры РЗЭ (а, в) спайдер-диаграммы (б, г) для мафических пород даек (здесь и далее данные для хондрита и примитивной мантии по (Sun, McDonough, 1989)), д-ж – вариации индикаторных соотношений редких элементов в мафических породах даек относительно Mg#. 1 – простые дайки, 2 – Матуг, Баянкол, РЛС, 3 – Тавыт-Даг, 4 – Стрелка, 5 – Восточный, 6–8 – Сайзырал: 6 – габбро, 7 – диориты, 8 – переходные зоны. Серое поле (габбронориты) и черный контур (монзодиориты) – породы Баянкольского и Эрзинского массивов по (Shelepaev et al., 2018).

Поведение индикаторных соотношений  $(\text{Nb/La})_{\text{PM}}$ ,  $(\text{La/Sm})_n$  и  $(\text{Nb/Y})_{\text{PM}}$  при снижении  $\text{Mg\#}$  свидетельствует в пользу того, что привнос корового материала в магматический источник и/или взаимодействие с салическими магмами не оказали существенного влияния на конечный редкоэлементный состав пород (Рисунок 3 д-ж). На диаграмме  $\text{Th/Yb-Nb/Yb}$  точки составов лежат выше поля мантийной последовательности, на классификационной диаграмме для базальтов различных геодинамических обстановок базиты даек соответствуют базальтам островных дуг. На диаграмме  $\text{Nb/La-Nb}$  точки составов базитов даек расположены в поле литосферной мантии, на диаграмме  $\text{Th/Nb-TiO}_2/\text{Yb}$  – в поле субдукционно-модифицированной литосферной мантии.  $\text{Rb/Nb}$  отношения пород отвечают трендам обогащения за счет воздействия флюида при подчиненной роли расплава (Рисунок 4).

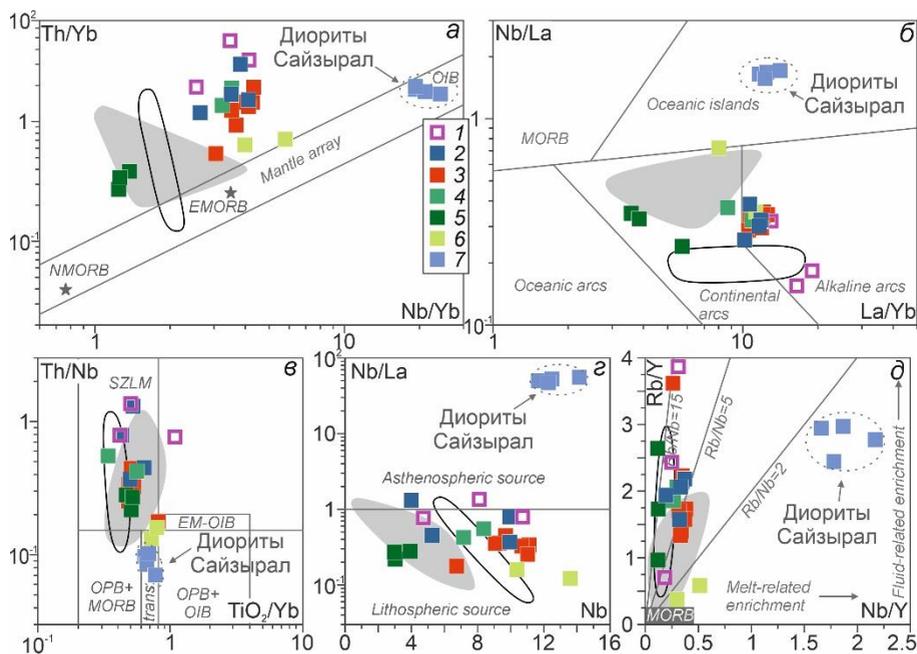


Рисунок 4. Дискриминационные диаграммы базитов даек. а – Pearce, 2008; б – Hollocher, 2012; в – Pearce et al., 2021; г – Smith et al., 1999; д – Temel et al., 1998. Легенда аналогична Рисунок 3.

Имеющиеся геохронологические данные не позволяют однозначно определить время окончания субдукционных процессов в регионе исследований. Метабазиты Агардаг-Тес-Хемского офиолитового комплекса (~570 млн лет, Pfander et al., 1998) обладают геохимическими особенностями, свойственными базальтам островных дуг и задуговых бассейнов (Pfander et al., 2002). В то же время, согласно (Владимиров и др., 2005, 2017; Семенова и др., 2024), время ~520 млн лет, соответствующее завершению метаморфизма St-Ку типа, отвечает уже раннеколлизийному периоду. Согласно полученным геохронологическим данным, подтверждающихся

структурными наблюдениями, внедрение даек протекало в диапазоне 495-485 млн лет на позднеколлизийном этапе развития структур Западного Сангилена.

Таким образом, наблюдаемые геохимические особенности мафических пород даек нельзя ассоциировать с островодужным магматизмом. Материнские магмы базитов комбинированных, синплутонических и простых даек формировались из единого источника при плавлении материала субдукционно-метасоматизированной литосферной мантии. Исследования базитового магматизма Западного Сангилена (Shelepaev et al., 2018) показали, что материнские магмы пород Баянкольского и Эрзинского массивов также формировались за счет плавления метасоматически-измененной литосферной мантии. Геохимические характеристики мафических пород даек и разновозрастных габброноритов и монцодиоритов крупных массивов близки (Рисунки 4, 5), что позволяет предполагать для них общий источник.

Петрогенезис диоритов комбинированной дайки Сайзырал. Относительно составов габбро, диориты дайки Сайзырал обогащены LILE, HFSE, Th и U. Содержания высокозарядных элементов в диоритах комбинированной дайки Сайзырал контрастно отличаются не только от диоритов других минглинг даек, но и от габбро, распространенных в подошвенной части дайки (Рисунок 3 в-ж). Присутствие признаков деформирования в габбро и их отсутствие в диоритах свидетельствует о том, что процессы деформирования габбро происходили до кристаллизации диоритов. В данном ключе, габбро можно рассматривать в качестве наиболее ранних продуктов кристаллизации (автолитов), которые впоследствии были подвержены деформированию и постмагматическим изменениям с привнесом кремнезема, щелочей и воды, на что указывают развитие вторичного биотита и резкое увеличение Ab компоненты в краевых зонах плагиоклазов. Поскольку лейкограниты и диориты дайки имеют минглинг взаимоотношения, в качестве возможного объяснения нетипичного геохимического состава последних может выступать гибридизация. Так как LIL элементы и U являются мобильными в водном растворе, они могли быть привнесены из лейкогранитной магмы на стадии смешения. Однако, обогащение диоритов Th и HFSE не может быть объяснено таким способом. Главными акцессорными фазами диоритов являются ксеноморфный титанит и игольчатый апатит – концентраторы данных элементов.

Согласно экспериментальным данным (Perugini et al., 2006, 2008), диффузионное фракционирование редких элементов при смешении контрастных по составу расплавов контролируется адвекцией и химической диффузией. Чем выше адвекция, тем больше площадь соприкосновения расплавов и, как следствие, интенсивность диффузионного фракционирования. Скорость химической диффузии конкретного элемента зависит от значения его коэффициента диффузии. В статичных системах интенсивность диффузионного фракционирования низкая, поскольку в первую очередь определяется значением коэффициента диффузии, а вклад адвекции минимален. В то же время, если химическая диффузия протекает в хаотичных условиях магматического потока, это значительно повышает адвекцию и, как следствие, интенсивность диффузионного фракционирования редких элементов при наличии градиента их концентрации. Важным следствием магматической

гибридизации, протекающей в таких условиях, является нелинейное распределение концентраций редких элементов в продуктах смешения – гибридных расплавах (Perugini et al., 2008).

Концентрации Th и HFSE в габбро, диоритах и лейкогранитах комбинированной дайки Сайзырал не образуют линейных трендов, из чего следует, что ключевую роль в обогащении гибридного расплава данными элементами сыграл механизм, обеспечивший интенсификацию адвекции и, как следствие, диффузионного фракционирования. Поскольку в других минглинг дайках подобного обогащения базитов консервативными элементами не наблюдается, это требует специфичных условий смешения, в которых возможно значительное усиление роли адвекции. Особенности строения комбинированной дайки Сайзырал указывают на то, что перемещение контрастной базит-гранитной смеси по ослабленным зонам сопровождалось взаимным механическим диспергированием (рассеянием) контрастных по составу магм. Иными словами, в процессе транспорта композитной смеси за счет увеличения площади соприкосновения контрастных расплавов происходило усиление вклада адвекции.

*Источники и петрогенезис гранитоидов минглинг и лейкогранитных даек.* По петрографическому составу и петрогеохимическим характеристикам гранитоиды комбинированных и простых даек разделены на две группы: *группа I* – лейкограниты комбинированных и простых даек; *группа II* – биотит-роговообманковые граниты комбинированной дайки участка Тавыг-Даг и биотитовые граниты комбинированных даек участков Магут, Баянкол и РЛС.

*Группа I – лейкограниты комбинированных и простых даек.* Содержания петрогенных элементов в лейкогранитах варьируют в рамках, установленных для сильнопералюминиевых гранитов (Sylvester, 1998):  $\text{SiO}_2 = 71.8-76.3$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.09-0.3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.7-14.1$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} = 1.1-2.7$ ,  $\text{MgO} = 0.16-0.6$ ,  $\text{CaO} = 0.5-1.8$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 2.8-3.7$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 3.8-5.5$ . Данные концентрации, с учетом низких значений  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , указывают на то, что данные породы являются продуктом кристаллизации магм, сформировавшихся при плавлении метаосадочного источника (Le Fort et al., 1987; White, Chappell, 1988). Породы пералюминиевые (преимущественно сильнопералюминиевые), магнезиальные), известково-щелочные и щелочно-известковистые, с глубокими отрицательными Eu и Sr аномалиями, обогащены легкими РЗЭ ( $(\text{La}/\text{Yb})_n = 2-10.2$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_n = 2-4.3$ ), с высокими содержаниями тяжелых РЗЭ и Y ( $\text{Yb} = 3.4-5.8$  г/т,  $\text{Y} = 36.2-60.3$  г/т) (Рисунок 5 а-д). Наблюдается тенденция к росту  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  отношения со снижением  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , что говорит об их происхождении из расплавов, полученных при плавлении насыщенного плагиоклазом источника (Рисунок 5 е) (Holtz, Johannes, 1991; Patiño Douce, Beard, 1995; Skjerlie, Johnston, 1996). Это подтверждается особенностями редкоэлементного состава пород: на диаграмме Rb/Ba – Rb/Sr точки составов расположены в поле источника, бедного глинистым материалом (Рисунок 5 ж).

Среднее содержание  $\text{TiO}_2$  в лейкогранитах составляет 0.2 мас. %, что указывает на высокие температуры плавления источника (превышающие температуру дегидратационного плавления мусковита в 760–830°C) (King et al., 2011; Liu et al.,

2014). Это подтверждается температурами насыщения цирконием ( $T_{Zr}$ ) (Watson, Harrison, 1983), составляющие 767-842°C при среднем значении 822°C ( $n = 8$ ). Для лейкогранитов характерны существенные вариации Rb/Sr соотношения при менее значительных вариациях содержаний Ba (Рисунок 5 з), что указывает на то, что эти породы являются продуктами кристаллизации расплавов, сформировавшихся при дегидратационном плавлении биотита (Harris, Inger, 1992).

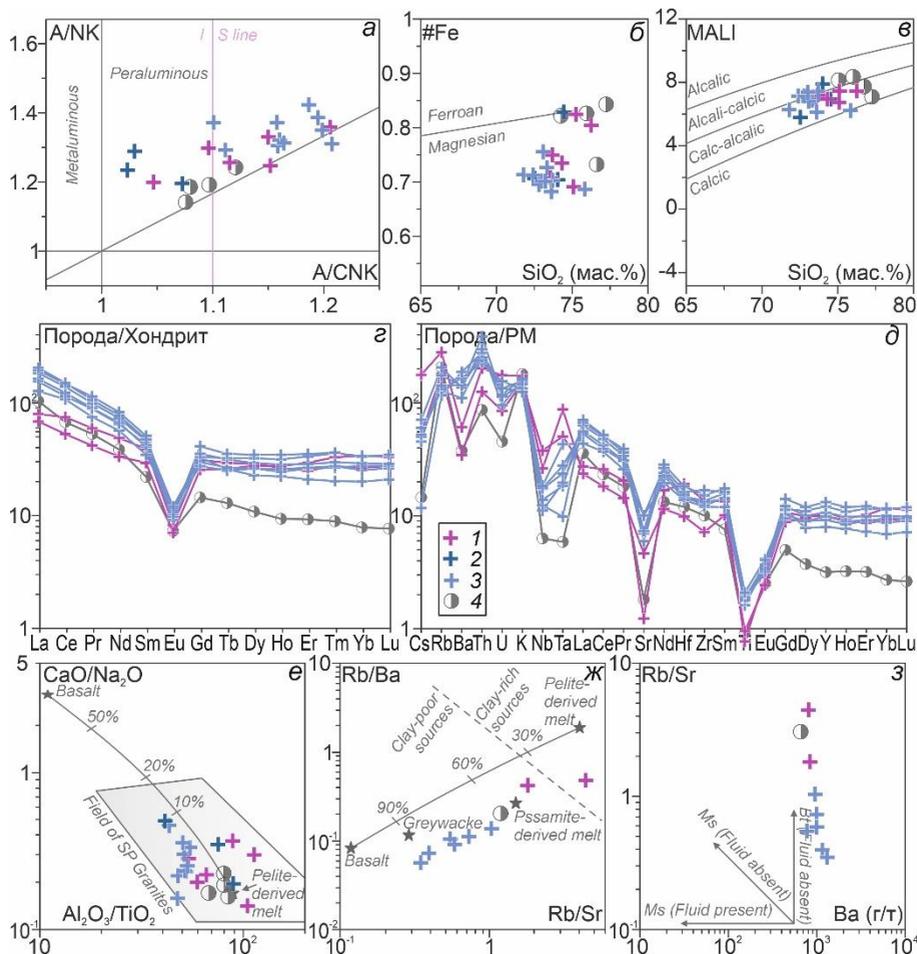


Рисунок 5. Вещественный состав лейкогранитов даек. а – I-S линия по Chappell, White, 2001; б, в – Frost et al., 2001; е, ж – Sylvester, 1998; з – Harris, Inger, 1992. 1 – простые дайки; 2 – Матут, Баянкол, РЛС; 3 – Сайзырал; 4 – монцолейкограниты ухадагского комплекса (Кармышева и др., 2022а).

Лейкограниты обладают высокими содержаниями тяжелых РЗЭ и Y, что указывает на отсутствие граната в качестве реститовой фазы и предполагает низкие

(<5 кбар) давления плавления (Vielzeuf, Montel, 1994). Исходя из геологии региона, наиболее вероятным протолитом для лейкогранитов комбинированных и простых даек являются метатерригенные породы эрзинского комплекса (кристаллические сланцы, гнейсы). Согласно (Козаков и др., 2005), в качестве источника для метаморфитов эрзинского комплекса выступают продукты размыва вулканических пород андезит-дацитового состава. Наиболее крупным проявлением гранитоидного магматизма на Западном Сангиле являются гранитоиды ухадагского комплекса (~485 млн лет), в составе которого выделяется самостоятельная фаза монцолейкогранитов (Кармышева и др., 2022а). Петрогеохимические характеристики лейкогранитов даек и монцолейкогранитов ухадагского комплекса близки (Рисунок 5), что позволяет говорить об идентичном составе протолита.

*Группа II – Vt-Амп граниты участка Тавыт-Даг и Vt граниты участков Матут, Баянкол и РЛС.* Относительно лейкогранитов, граниты с меньшими концентрациями SiO<sub>2</sub>, но с повышенными содержаниями TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>, MgO и CaO. Породы высококальциевые, магнезиальные, металюминиевые и слабопералюминиевые (Рисунок 6).

С учетом низких значений Rb/Zr (0.27-0.67) и низких содержаний Sr (186-439 г/т), данные петрохимические характеристики указывают на происхождение гранитов за счет плавления корового источника (White, Chappell, 1988; Patiño Douse, 1999). На дискриминационных диаграммах точки составов гранитов располагаются в областях расплавов, полученных при дегидратационном плавлении источников грауваккового и амфиболитового состава (Рисунок 7).

Породы имеют низкие значения Mg# (19-32), и высокие K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 1-1.7, что предполагает высокие содержания K<sub>2</sub>O в протолите (Rapp, Watson, 1995; Sisson et al., 2005). В эрзинском метаморфическом комплексе присутствуют линзовидные тела амфиболитов с содержаниями K<sub>2</sub>O 1-2.2 мас. %, которые могли выступать в качестве составной части протолита гранитов. T<sub>Zr</sub>, полученные для 5 образцов, составляют 801-857°C, среднее = 829°C. Данная температура отвечает нижней границе диапазона 825-925°C, когда при низкобарическом (<7 кбар) дегидратационном плавлении метабазитового источника был получен гранитный расплав (Sisson et al., 2005). Таким образом, биотитовые и биотит-амфиболовые граниты комбинированных даек являются продуктом плавления неоднородного корового источника. В качестве протолита выступали метатерригенные породы (кристаллические сланцы, гнейсы) и амфиболиты эрзинского метаморфического комплекса. Относительно лейкогранитов, граниты с низкими содержаниями тяжелых РЗЭ и Y (Рисунок 6 з, д), что, с учетом присутствия метабазитов в протолите, является следствием наличия реститового амфибола. По вещественному составу граниты комбинированных даек идентичны одновозрастным параавтохтонным гранитам эрзинского комплекса (Кармышева и др., 2017), что позволяет рассматривать граниты даек как часть данного комплекса.

*Синплутонические дайки участков Стрелка и Восточный.* Гранитоиды синплутонических даек обоих участков сильно варьируют по содержанию SiO<sub>2</sub>: (62.3-73.8 мас. % - Стрелка; 67.0-76.2 мас. % - Восточный). Породы с высокими содержаниями K<sub>2</sub>O (Восточный – 3.3-4.9, Стрелка – 3.1-5.2 мас. %), известково-

щелочные и щелочно-известковистые, магнезиальные, слабопералюминиевые (Рисунок 6 а-в). Гранитоиды обладают спектрами распределения РЗЭ с отрицательным наклоном и отрицательными европиевыми аномалиями (Рисунок 6 г, д). Химический состав гранитов синплутонических даек участков Стрелка и Восточный идентичен гранитам Нижнеэрзинского массива и параавтохтонным гранитам эрзинского комплекса, соответственно.

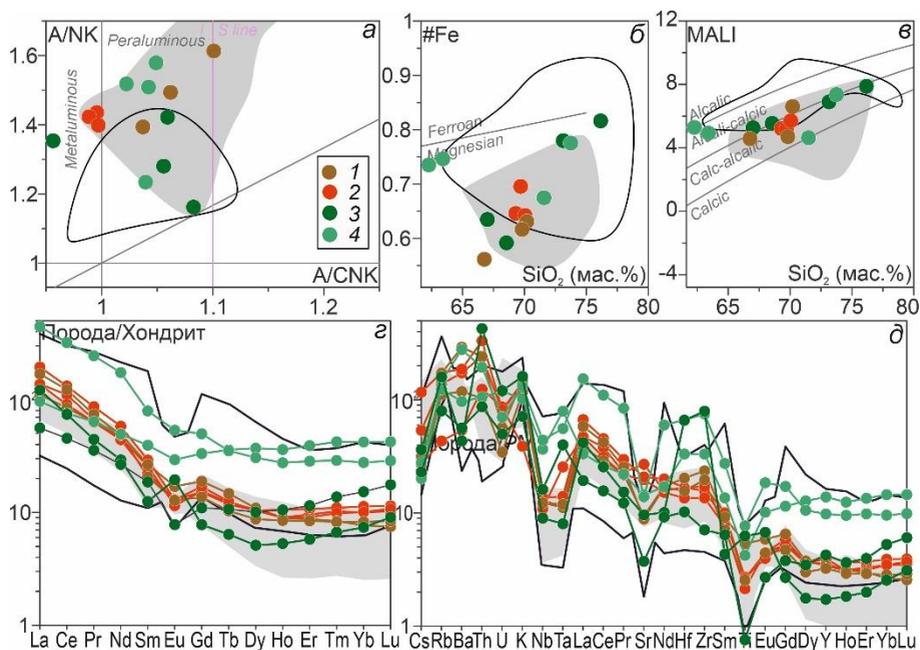


Рисунок 6. Вещественный состав гранитов комбинированных даек (группа II) и гранитоидов синплутонических даек. а – I-S линия по Chappell, White, 2001; б, в – Frost et al., 2001. 1 – Тавыт-Даг, 2 – Матут, Баянкол, РЛС, 3 – Восточный; 4 – Стрелка. Серое поле – параавтохтонные граниты эрзинского комплекса (Кармышева и др., 2017), черный контур – гранитоиды ухадагского комплекса (Кармышева и др., 2022а).

Происхождение промежуточных зон на контакте контрастных пород минглинг даек участков Сайзырал и Стрелка. В комбинированной дайке Сайзырал на контакте диоритов и лейкогранитов в средней части дайки зафиксированы породы промежуточного петрографического состава. Механизмы изохимической закалки (Blake et al., 1965; Didier, 1973; Furman, Spera, 1985; Wiebe et al., 1996; Barbarin, 2005) и in-situ магматической дифференциации базитовой магмы (Eberz, Nicholls, 1990), предложенные для мафических включений, неприменимы, поскольку протекают на самых ранних стадиях взаимодействия контрастных магм. Дополнительными ограничениями для привлечения данных моделей является отсутствие индикаторных петрографических признаков: не наблюдается резкого снижения размерности

кристаллов в породах промежуточных зон относительно диоритов; присутствует четкий контакт между диоритами и породами гибридных зон; отсутствует резкое увеличение доли темноцветов в гибридных зонах.

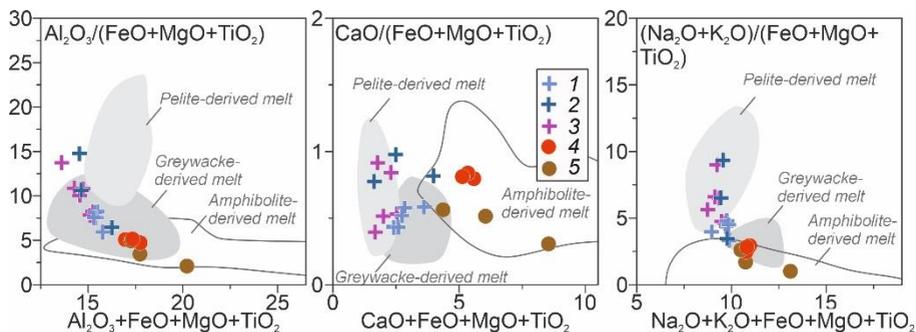


Рисунок 7. Диаграммы для характеристики протолитов грантоидов (Patiño Douce, 1999; Rollinson, 2015). 1-3 – лейкограниты: 1 – Сайзырал; 2 – Матут, Баянкол, РЛС; 3 – простые дайки; 4, 5 – граниты: 4 – Тавыт-Даг, 5 – Матут, Баянкол, РЛС.

Другим возможным механизмом образования приконтактовых гибридных зон, является рекристаллизация краевых частей включений (в данном случае – фрагментов диоритов) после их консолидации (Farnet et al., 2014). Важным аргументом в пользу данного сценария является отсутствие линейного тренда по содержаниям  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$  и  $K_2O$  и редких элементов в ряду базит – промежуточная зона – гранит. По данным элементам породы переходных зон дайки Сайзырал формируют линейные тренды с диоритами и лейкогранитами, а составы породообразующих минералов из гибридных пород идентичны минералам диоритов (Рисунок 8 а, б). Таким образом, узкие переходные зоны на контакте диоритов и лейкогранитов дайки Сайзырал являются продуктом исключительно механического взаимодействия контрастных магм.

Контакты контрастных пород синплутонических даек участка Стрелка имеют сложное строение, что выражается в широком распространении изолированных фрагментов пород преимущественно среднего состава с различными соотношениями породообразующих минералов и гломероскоплениями амфибола. В то же время, содержания петрогенных оксидов в породообразующих минералах диоритов, гранитов и пород промежуточных зон идентичны (Рисунок 8 в, г). Данное явление не может быть следствием гибридизации, поскольку, во-первых: валовые содержания главных и редких элементов в мафических и салических породах даек не образуют трендов, отвечающих магматическому смешению, а формируют изолированные группы; во-вторых: в базитах отсутствуют петрографические признаки, характерные для пород, кристаллизовавшихся из гибридного расплава. Наиболее вероятным объяснением идентичного состава породообразующих минералов пород является достижение температурного равновесия между взаимодействующими магмами, обеспечивавшегося за счет длительного времени их сосуществования. В качестве

механизма формирования контактовых зон между габбро и гранитоидами даек участка Стрелка выступает механическое смешение.

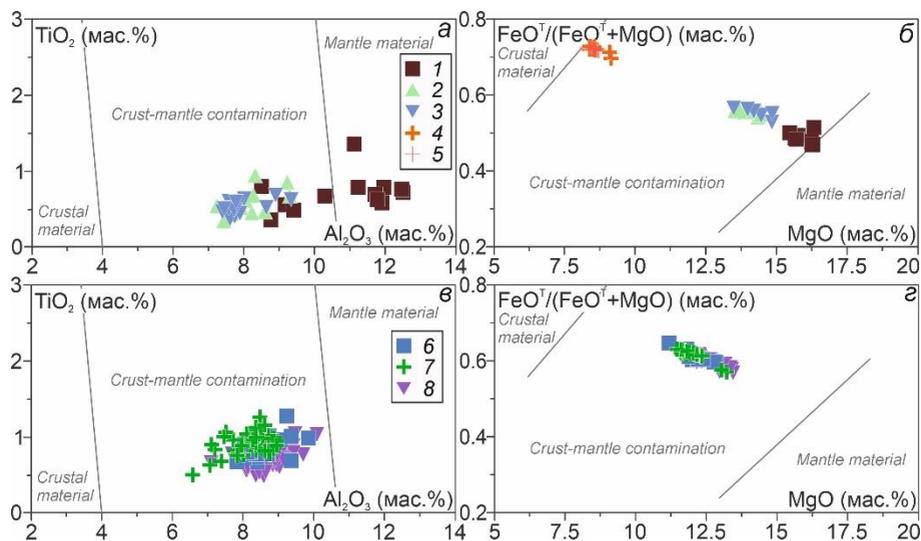


Рисунок 8. Генетические диаграммы для амфиболов (а, в, Jiang, An, 1984) и биотитов (б, г, Guo et al., 2017) даек участков Сайзырал (а, б) и Стрелка (в, г). 1-5 – Сайзырал: 1 – габбро, 2 – диорит, 3 – породы переходных зон, 4, 5 – лейкогранит: 4 – основная масса, 5 – гломероскопления. 6-8 – Стрелка: 1 – диорит, 2 – гранит, 3 – породы переходных зон.

**В седьмой главе** обобщены результаты проведенных исследований, сформулированы модели образования минглинг даек Западного Сангиленя.

*Комбинированные дайки участков Баянкол, Матут, РЛС.* Согласно классическим моделям дайкообразования (Wylie, Lister, 1995; Gonnermann, Taisne, 2015), относительно низкая температура вмещающих пород приводит к возникновению температурной и вязкостной гетерогенности расплава. В то же время, в композитных системах интенсивность образования сложных контактов зависит от контраста вязкости сосуществующих жидкостей (Perugini, Poli, 2005). Для комбинированных даек участков Баянкол, Матут и РЛС характерно сочетание сложных и линейных контактов. При этом, сложно организованные контакты чаще встречаются в центральных частях даек, а линейные – в краевых. В данном ключе, закономерности распределения контрастных пород в комбинированных дайках могут рассматриваться как следствие гетерогенности, возникающей в ходе транспорта композитной магматической смеси по трещинам.

*Комбинированные дайки участка Тавыт-Даг.* Основываясь на особенностях внутреннего строения комбинированных даек участка, в работе (Владимиров и др., 2019) была предложена модель их образования – сдвиговая дилатация. Синтектоническое инжецирование базитового расплава обеспечивается сдвиговыми

условиями, когда формируются эшелонированные или единичные трещины растяжения над магматической камерой основного состава. Появление трещин растяжения, с одной стороны, обеспечивает условия для экспонирования базитовых магм, с другой - способствует локальному кратковременному понижению общего литостатического давления в зоне дилатации. Автоклавный эффект со стороны кислого расплава на бортах жилы приводит к раздавливанию консолидирующейся базитовой магмы, которая при этом либо пластически деформируется, либо претерпевает хрупкие разрывы с заполнением трещин кислым материалом.

*Комбинированная дайка Сайзырал.* Возникновение локальных зон пониженного давления, конформных плоскостным структурам в гнейсогранитах эрзинского комплекса инициировало одновременное внедрение лейкогранитной и базитовой магм, последняя содержала в себе автолиты габбро. В процессе перемещения композитной смеси габбро подверглись слабым деформациям и вторичным изменениям, а базитовая и гранитоидная магмы смешивались, в первую очередь, механически. При этом, за счет привноса воды и интенсификации эффекта адвекции произошло обогащение базитовой магмы редкими элементами (LIL, HFS, Th). Далее происходит осаждение более плотных фрагментов базитов в базальную часть дайки и формирование минглинг структур и узких зон переходного состава.

*Синплутонические дайки участка Стрелка.* Сценарий образования синплутонических даек участка Стрелка опирается на результаты численного моделирования (Полянский и др., 2017) и особенности вещественного состава пород промежуточных зон даек. (I) внедрение мафической магмы в базальную часть кристаллизующегося гранитоидного плутона; (II) ремобилизация гранитоидов за счет теплового воздействия базитов; (III) возникновение возмущения на границе раздела сред, инициируемое тектоническими движениями; (IV) механическое смешение магм, приводящее к образованию менее плотной, относительно окружающих гранитоидов, композитной базит-гранитной смеси; (V) подъем композитной смеси и совместная кристаллизация, образование сложно устроенных контактовых зон за счет сохраняющегося контраста вязкости сосуществующих магм.

*Синплутонические дайки участка Восточный.* Особенности внутреннего строения даек позволяют предложить сценарий их образования: (I) плавление мигматитов на фоне левосдвиговых деформаций и дополнительного привноса тепла от базитовых интрузий – образование пластовых тел гнейсогранитов эрзинского комплекса; (II) достижение гнейсогранитами второго реологического порога с последующим образованием трещин и их заполнением базитовой магмой; (III) совместная кристаллизация мафической и гранитоидной магмы на фоне продолжающихся деформаций; (IV) консолидация композитной системы.

**В заключении** сформулированы основные выводы работы.

1. Взаимоотношения контрастных по составу пород минглинг даек являются следствием одновременной кристаллизации контрастных по составу магм.

2. Минглинг дайки разделены на группы синплутонических и комбинированных. Дайки первого типа образуются за счет внедрения базитовой

магмы в базальные части плутонов гранитоидного состава и последующего подъема контрастной смеси. Комбинированные дайки формируются при внедрении композитной магматической смеси по ослабленным зонам в консолидированных вмещающих породах.

3. Особенности внутреннего строения и взаимоотношений с вмещающими породами указывают на формирование минглинг даек синхронно со сдвиговыми деформациями в пределах Эрзинской тектонической зоны.

4. Петрографический состав мафических пород минглинг даек варьирует от роговообманковых габбро до кварцевых диоритов. Главным фактором, обуславливающим данную вариативность, является их рекристаллизация под воздействием флюида кислых магм. Гранитоиды комбинированных даек представлены лейкогранитами, биотит-амфиболовыми и биотитовыми гранитами. Салической компонентой синплутонических даек являются гранитоиды Нижнеэрзинского массива и параавтохтонные граниты эрзинского комплекса.

5. Минглинг дайки внедрились на среднекоровом уровне глубинности (4-5 кбар) в возрастном диапазоне 495-485 млн лет назад. Наравне с крупными гранитоидными комплексами региона минглинг дайки являются индикаторами перехода от транспрессионного к транстензионному этапу развития структур Западного Саяна.

6. Геохимический состав базитов комбинированных (кроме диоритов дайки Сайзырал) и синплутонических даек идентичен. Формирование их материнских расплавов протекало за счет плавления субдукционно-метасоматизированной литосферной мантии. Геохимические характеристики мафических пород даек и разновозрастных базитов Баянкольского и Эрзинского массивов идентичны, что позволяет предполагать для них общий источник.

7. По химическому составу салические породы комбинированных даек разделены на две группы: I) сильнопералюминиевые лейкограниты, II) слабопералюминиевые граниты. Наблюдаемое разнообразие обусловлено тем, что материнские расплавы формировались при плавлении неоднородного корового субстрата (кристаллические сланцы, гнейсы и амфиболиты эрзинского комплекса). Салическими породами синплутонических даек являются гранитоиды Нижнеэрзинского массива и параавтохтонные граниты эрзинского комплекса.

8. Взаимодействие контрастных по составу магм при образовании комбинированных и синплутонических даек характеризуется преобладанием механического смешения, процессы гибридизации проявлены незначительно. Исключением являются те случаи, когда смешение происходит при совместном перемещении композитной смеси по ослабленным зонам и сопровождается взаимным рассеянием магм (участок Сайзырал). В этом случае возможно обогащение базитовой магмы HFSE, LILE и Th.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кармышева И.В., Владимиров В.Г., Владимиров А.Г., Шелепаев Р.А., Яковлев В.А., Васюкова Е.А. Тектоническая позиция минглинг-даек в аккреционно-коллизивной системе ранних каледонид Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) // Геодинамика и тектонофизика, 2015; т. 6(3), с. 289-310. doi: 10.5800/GT-2015-6-3-0183

2. Полянский О.П., Семенов А.Н., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Владимиров А.Г., Яковлев В.А. Численная модель магматического минглинга (на примере Баянкольской габбро-гранитной серии, Сангилен, Тува) // Геодинамика и тектонофизика. 2017, т. 8(2), с. 385-403. doi: 10.5800/GT-2017-8-2-0247

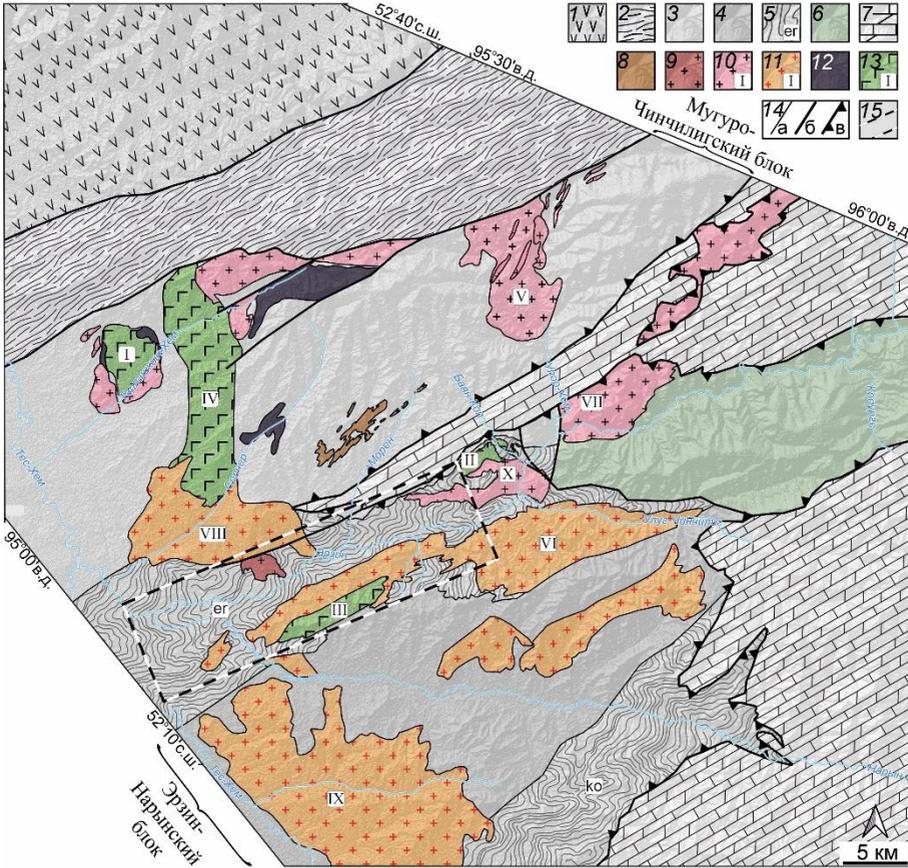
3. Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Термохронология минглинг-даек Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): свидетельства развала коллизивной системы на Северо-Западной окраине Тувино-Монгольского массива // Геодинамика и тектонофизика, 2017, т. 8(2), с. 283-310. doi: 10.5800/GT-2017-8-2-0242

4. Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Яковлев В.А., Хубанов В.Б., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Буянтуев М.Д. Состав и U-Pb (LA-ICP-MS) изотопный возраст цирконов комбинированных даек Западного Сангилен (Тувино-Монгольский массив) // Геология и геофизика, 2019, т. 1, с. 55-78. doi:10.15372/GiG2019004

5. 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:10.5800/GT-2019-10-2-0417

6. Яковлев В.А., Кармышева И.В., Владимиров В.Г., Семенова Д.В. Геологическое положение, источники и возраст комбинированных даек СЗ окраины Тувино-Монгольского массива (Западный Сангилен, ЮВ Тува) // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (2), с. 222–243. doi: 10.15372/GiG2023158

Схема геологического строения Западного Сангилена  
(по Владимиров и др., 2005, 2017; Кармышева и др., 2022a)



1 – Таннуольская островная дуга; 2 – офиолиты Агардагской зоны; 3–6 – метаморфические комплексы: 3 – моренский, 4 – тесхемский, 5 – эрзинский, 6 – чинчиллигский; 7 – породы сангиленской серии; 8–11 – гранитоидные массивы: 8 – ортоадьрского комплекса, 9 – Магутский гнейсогранитный I-типа, 10 – прочие массивы I-типа; 11 – ухадагского комплекса (А-тип); 12 – гипербазитовые массивы; 13 – габбро-монцодиоритовые массивы; 14 – геологические границы: а – магматических и метаморфических комплексов, б – крутонападающие разломы, в – надвиги; 15 – область исследований. Буквенные обозначения – породы эрзинского комплекса в пределах Эрзинской (er) и Кокмолгаргинской (ko) тектонических зон. Римские цифры – магматические массивы: I – Правотарлашкинский, II – Баянкольский габбро-монцодиоритовый, III – Эрзинский, IV – Башкымугурский, V – Улорский, VI – Нижнеэрзинский, VII – Нижнеулорский, VIII – Ухадагский, IX – Тесхемский, X – Баянкольский гранодиоритовый.