

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
**ЗИНДОБРОГО ВИКТОРА ДМИТРИЕВИЧА “ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ В ПАЛЕОЗОЕ”** по специальности 1.6.1 – Общая
и региональная геология. Геотектоника и геодинамика, 1.6.3 – Петрология, вулканология
на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Диссертационная работа В.Д. Зиндоброго посвящена установлению основных закономерностей тектонического строения, геодинамики и венд-палеозойской эволюции аккреционно-коллизийной Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны. В основе работы лежит фактический материал, собранный автором в экспедиционных исследованиях в 2022-2024 гг. Диссертантом проведен отбор образцов на петролого-геохронологические исследования. Автор самостоятельно изучил петрографические шлифы пород на оптическом микроскопе и изучил химический состав минералов метаморфических пород на сканирующем электронном микроскопе с последующей реконструкцией их *P-T* условий формирования, проинтерпретировал результаты петрогеохимических и геохронологических исследований. Автор освоил пробоподготовку минералов для геохронологических исследований, самостоятельно провел U-Pb датирование цирконов. Постановка цели и задач, определение объектов и методов исследований, а также интерпретация полученных результатов осуществлялись непосредственно автором. На основе совокупности полученных и ранее опубликованных данных предложена геодинамическая модель формирования восточной части Горного Алтая.

Актуальность проведенных исследований обусловлена необходимостью расширения представлений о строении и истории формирования геологических структур Восточной части Горного Алтая. Наиболее значимый объект региона представляет собой Улаганский сегмент сутурно-сдвиговой зоны, расположенный в сложном тектоническом узле проявления позднепалеозойских надвигов и сдвигов, разделяющих ее на 3 блока (Телецкий, Саратанский и Чульчинский). Выявление возраста, строения, структурного положения и геодинамических обстановок формирования метаморфических, гранитоидных и офиолитовых комплексов восточной части Горного Алтая важно для составления геодинамической модели их формирования в единой ранне-среднепалеозойской Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоне, сформированной на месте венд-кембрийского задугового бассейна Таннуольской островной дуги Палеоазиатского океана.

Объектами исследования выбраны ключевые Телецкий, Саратанский и Чульчинский метаморфические комплексы, плутоны Каракудюрского и Кубадринского магматических комплексов и офиолиты Кабак-Тайгинского массива. **Цель исследования** – на основе комплекса геологических, петролого-геохимических и геохронологических данных определить возраст, структурное положение и геодинамические обстановки формирования вышеуказанных геологических объектов, составить геодинамическую модель их формирования в единой ранне-среднепалеозойской Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоне.

Основные задачи исследования: 1. Охарактеризовать структурное положение и строение метаморфических комплексов. 2. Определить вещественный состав, характер метаморфического преобразования, возможные протолиты и возраст пород, провести реконструкцию *P-T* условий их образования. 3. Выявить геодинамическую обстановку и время внедрения гранитоидных массивов в метаморфические породы Телецкого комплекса. 4. Установить структурное положение, определить геодинамическую природу и возраст офиолитовой ассоциации Кабак-Тайгинского массива. 5. Построить геодинамическую модель формирования и эволюции структурно-вещественных комплексов восточной части Горного Алтая в палеозое.

Очень важно, что в решении поставленных задач автором применен комплексный подход с использованием современных методов исследований. Для выполнения поставленных целей и

задач работы использовались стандартные методы: геологическое картирование в процессе полевых работ, петрографическое описание шлифов пород, определение вещественного состава пород, изучение химического состава силикатных и рудных минералов, слагающих метаморфические и магматические породы, и применение на их основе геотермобарометрических инструментов расчета P - T -условий метаморфизма пород, а также U/Pb и $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирование цирконов, амфиболов и слюд, соответственно.

1. Автором проведены полевые натурные наблюдения в 3 ключевых участках (Телецком, Чульчинском и Саратанском), на которые составлены детальные геологические схемы 1:25 000 масштаба. Отобрано 613 проб и образцов из метатерригенных и магматических разновозрастных пород. 2. В процессе подготовки работы изучено около 170 петрографических шлифов исследуемых образцов, получено более 100 петро- и геохимических анализов, проведенных методами рентгенофлуоресцентного и ICP-MS в Центре коллективного пользования научным оборудованием Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН) (г. Новосибирск). 3. Изучение минерального состава рудных минералов проводилось в ЦКП МИИ СО РАН, химического состава силикатных минералов – там же и в ресурсном центре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург). Получено более 1000 анализов составов амфиболов, полевых шпатов, пироксенов, хлоритов, эпидотов, а также рудных и акцессорных минералов, результаты которых легли в основу расчета P - T параметров метаморфизма на основе плагиоклаз-роговообманковых термометров (Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994), амфиболовых барометров (Schmidt, 1992; Ague, 1997; Mutch, 2016) и хлоритовых термометров (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991). 4. U - Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из метаосадочных толщ методом LA-ICP-MS проводились в отделении Наук о Земле университета г. Гонконг (Китай), исследования цирконов из магматических пород – в отделении Аналитической химии университета г. Гент (Бельгия). Всего данным методом исследовано 9 образцов. 5. $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирование метаморфических минералов проводилось в ЦКП МИИ СО РАН по методике ступенчатого прогрева, подробно описанной в работе (Травин, 2016). Исследовано по 1 пробе мусковита и роговой обманки. 6. На основе этих данных и фотодокументации обнажений были уточнены и созданы 3 карты и схемы геологического строения различных районов (Телецкий, Чульчинский и Саратанский) восточной части Горного Алтая 1: 25 000 масштаба, построены и детализированы 3 геологических разреза, изменены и дополнены 3 стратиграфических колонки, составлена геодинамическая реконструкция юго-западного складчатого обрамления Сибирского кратона на венд-палеозойский период. Наиболее информативные из них приведены в диссертации.

Апробация результатов диссертации. Сделаны 8 докладов на международных и российских конференциях.

Публикации. Опубликовано 11 научных работ, в том числе по теме диссертации 11, из них 3 в журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки России.

Достоверность результатов обеспечивается геокартированием, анализом большого массива статистических данных по геологии, результатами петрологических, термохронологических и изотопных аналитических исследований, публикациями и апробацией результатов на российском и международном уровнях.

Состав и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 235 наименований, общим объемом 184 страницы, иллюстрирована 74 рисунками, 22 таблицами, включая 10 таблиц 5 приложений.

Глава 1. История геологического изучения восточной части Горного Алтая

В главе приведены общие сведения о более чем двухсотлетней истории изучения геолого-тектонического строения региона, приводятся ссылки на фундаментальные исследования.

Отмечено, что при изучении геодинамики и тектоники исследуемого района выделялось два этапа, связанных с использованием двух различных тектонических моделей, приводящих к некоторым разногласиям, возникающим при определении количества структурных этажей, их границ, тектонической природы и истории развития: геосинклинальный (В.А. Кузнецов, В.П. Нехорошев и другие) и плейт-тектонический (Л.П. Зоненшайн, А.А. Моссаковский, А.Б. Дергунов, Н.Л. Добрецов, Н.А. Берзин и многие другие). Опираясь на последнюю, была разработана модель тектонической эволюции Алтаид, согласно которой Алтае-Саянский регион интерпретируется как аккреционно-коллизийная зона, состоящая из различных геодинамических единиц разного возраста (микроконтиненты, древние островные дуги, субдукционные клинья и т.п.), совмещенных в результате перемещений вдоль крупных дугообразных сдвиговых зон. Телецкий регион в рамках данной модели попадает в пределы двух тектонических единиц: Горно-Алтайской (раннепалеозойский аккреционный клин, магматическая дуга, перекрытая среднепалеозойской магматической дугой, к западу – среднепалеозойский аккреционный клин с преддуговым бассейном) и Восточно-Алтайской (предалтаидская континентальная кора, раннепалеозойская магматическая дуга и аккреционный комплекс, включая крупные фрагменты симаунтов). Согласно мобилистской модели и на основе террейнового анализа, в тектонической структуре района разными авторами (Берзин, Кунгурцев, 1996; Berzin et al., 1999) выделялся ряд террейнов различной природы: Курайский (островодужный), Западно-Саянский (турбидитовый, континентальной окраины), Уйменско-Лебедской (островодужный) и Телецкий (аккреционного клина, преимущественно турбидитовый).

В главе анализируется история изучения ключевых для понимания геологического развития - Телецкого горста/блока и Оройского горста/Саратанского блока/горста. Они сложены преимущественно палеозойскими метаморфическими толщами и плутонами гранитоидов, рассмотрены сложные вопросы стратиграфии (палеонтологический аспект), связи и взаимоотношения процессов метаморфизма, блоковой тектоники, геодинамики и изотопного датирования (К-Ar, Ar-Ar и U-Pb методы) комплексов пород.

Диссертант делает вывод, что за почти вековую историю геологического изучения восточной части Горного Алтая геологами создана объемная база геологических и аналитических данных, нуждающаяся в обобщении и дополнении сведениями, полученными с помощью современных методов и методик.

Замечания. В тексте главы в ссылках на публикации исследователей и в списке литературы автором упущены некоторые значимые публикации: *Путеводитель Алтайской геологической экскурсии (составитель В.В. Волков и др., Новосибирск, 1986) по магматическим комплексам Горного Алтая; Чиков Б.М. Сдвиговое стресс-структурообразование в литосфере: разновидности, механизмы, условия // Геология и геофизика. 1992. № 9. С. 3-39.*

Глава 2. Геологическое строение восточной части Горного Алтая

На основе исследований предшественников в работе приняты следующие наиболее крупные тектонические элементы структур Горного Алтая в северо-западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса на юго-западе Сибирской платформы: 1. *Венд-палеозойские окраинно-континентальные комплексы*, расположенные на западной окраине Сибирского континента (в современных координатах) и состоящие из венд-раннеордовикской Кузнецко-Алтайской островной дуги, комплексов пород ордовик-раннедевонской пассивной окраины и девон-раннекаменноугольной активной окраины и палеозойских островодужных систем (Восточно-Казахстанской, Джунгарской, Горно-Алтайской и Восточно-Саянской). В аккреционных клиньях островной дуги подробно представлены фрагменты океанической коры (офиолиты и палеоокеанические поднятия), типичные для окраинных комплексов современной Тихоокеанской плиты. 2. *Казахстанско-Байкальский составной континент (коллизийный ороген)*, фундамент

которого сформирован в позднем докембрии - ордовике в результате субдукции Палеоазиатской океанической плиты, включающей докембрийские микроконтиненты и террейны Гондванской группы (Тувинно-Монгольский, Завханский, Кокчетавский, Актау-Джунгарский, Центрально-Тянь-Шанский и др.), под Сибирский континент с формированием Казахстанско-Тувинно-Монгольской островодужной системы, находящейся на его юго-восточной (в современных координатах) периферии. Субдукция с последующей коллизией микроконтинентов с островной дугой привели к упрочнению и утолщению земной коры и формированию фундамента составного континента. В западной части Алтае-Саянской складчатой области (АССО), на территории Горного Алтая, Казахстанско-Байкальский составной континент (коллизийный ороген) представлен Алтае-Монгольским террейном, в пределах которого широко развиты раннепалеозойские турбидиты. 3. *Ранне-среднепалеозойская Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянская сутурно-сдвиговая зона*, разделяющая окраинно-континентальные комплексы Казахстанско-Байкальского и Сибирского континентов. В основе ее строения в Алтае-Саянском регионе лежат фрагменты поздней венд-раннеордовикской океанической коры Обь-Зайсанского океана, ордовик-силурийские турбидиты (Буслов и др., 2003; Волкова и др., 2005; Добрецов, Буслов, 2007; Буслов, 2011; Buslov et al., 2004, 2022), ордовикские голубые сланцы, а также поздние силур-раннедевонские коллизийные граниты и метаморфические породы зон смятий, которые формируются в пределах северной части Алтае-Монгольского террейна (Буслов и др., 2013; Добрецов и др., 2017). 4. *Позднепалеозойские покровно-сдвиговые и сдвиговые зоны*, формирующие комплексы террейнов, образованные в позднем девоне - раннем карбоне при трансформной аккреции с последующей коллизией Казахстанско-Байкальского составного континента с Сибирским континентом, создавший единый Северо-Азиатский континент, и образованные в позднем карбоне-перми при столкновении Восточно-Европейского с Северо-Азиатским континентом. Позднепалеозойские деформации, проявленные в том числе в виде поперечных к простиранию палеозойских аккреционно-коллизийных зон крупно-амплитудных сдвигов, сильно осложнили структуру Центрально-Азиатского складчатого пояса, придав ей облик мозаично-блокового строения.

В строении зоны сочленения Горного Алтая и Западного Саяна выделены три тектонические зоны: Горно-Алтайская, Западно-Саянская и Телецкая, нарушенные Северо-Саянской, Телецко-Башкаусской, Кубадринско-Курайской, Шапшальской и Телецко-Курайской сдвиговыми зонами (Буслов, Синтубин, 1995; Смирнова, 2002; Буслов и др., 2003; Владимиров и др., 2005; Добрецов, Буслов, 2011; Буслов и др., 2013; Dehandschutter et al., 2002; Buslov et al., 2004; Buslov, Cai, 2017). Автором, на основе детального изучения опорных участков и разрезов, подробно рассмотрено и обосновано сложное строение тектонических пластин и слагающие их геодинамические комплексы.

Делается вывод, что зона сочленения Горного Алтая и Западного Саяна представляет собой сложную структуру, содержащую фрагменты венд-раннепалеозойских офиолитов, ранне- и среднепалеозойских островных дуг и океанических островов и преддуговых прогибов. В рамках данной работы выдвигается предположение, что *эта зона является частью крупной среднепалеозойской Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны*. Окончательно эта структура была сформирована в пермском периоде в результате закрытия океанического бассейна Палеоазиатского океана и столкновения Сибирского и Казахстанско-геологического континентов (Буслов, Синтубин, 1995; Смирнова и др., 2002; Буслов и др., 2003; Буслов, 2011; Буслов и др., 2013).

Глава 3. Методика и методы, используемые в работе

В процессе подготовки работы изучено около 170 петрографических шлифов исследуемых образцов, получено более 100 петро- и геохимических анализов, проведенных методами рентгенофлуоресцентного и ICP-MS в Центре коллективного пользования научным оборудованием Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН) (г. Новосибирск). Изучение минерального состава рудных минералов проводилось в ЦКП

МИИ СО РАН, химического состава силикатных минералов – там же и в ресурсном центре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург). Получено более 1000 анализов составов амфиболов, полевых шпатов, пироксенов, хлоритов, эпидотов, а также рудных и акцессорных минералов, результаты которых легли в основу расчета P - T параметров метаморфизма на основе плагиоклаз-роговообманковых термометров (Blundy, Holland, 1990; Holland, Blundy, 1994), амфиболовых барометров (Schmidt, 1992; Ague, 1997; Mutch, 2016) и хлоритовых термометров (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991). U-Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из метаосадочных толщ методом LA-ICP-MS проводились в отделении Наук о Земле университета г. Гонконг (Китай), исследования цирконов из магматических пород – в отделении Аналитической химии университета г. Гент (Бельгия). Всего данным методом исследовано 9 образцов. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование метаморфических минералов проводилось в ЦКП МИИ СО РАН по методике ступенчатого прогрева, подробно описанной в работе (Травин, 2016). Исследовано по 1 пробе мусковита и роговой обманки.

Для выполнения поставленных целей и задач работы использовались такие стандартные базовые методы как геологическое картирование и петрографическое описание шлифов пород, определение вещественного состава пород, изучение химического состава силикатных и рудных минералов, возраста минералов, слагающих метаморфические и магматические породы.

Химические методы анализа (РФА, ICP-MS). Определение химического состава исследуемых пород проводилось в две стадии: 1. Определение содержания 15 оксидов порообразующих элементов в 30 пробах metabазальтов, 18 пробах метатерригенных пород, 11 пробах габбро-долеритов и 9 пробах гранитоидов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. 2. Определение содержания 25 редкоземельных и рассеянных элементов в 24 пробах metabазальтов, 18 пробах метатерригенных пород, 10 пробах габбро-долеритов и 9 пробах гранитоидов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Минеральная термобарометрия. Показано, что в основе минеральной термобарометрии лежит знание зависимости состава сосуществующих минералов от внешних условий минералообразования (температуры, давления, фугитивности кислорода и т.п.). Многочисленные геотермобарометры, разработанные на сегодняшний день, основаны на экспериментальных и теоретических калибровках, и требуют тщательного соблюдения различных ограничений при их применении. Эти ограничения могут касаться PT -диапазона использования минеральных термобарометров, состава пород (как химического, так и минерального), а иногда и их генезиса. Соблюдение этих ограничений является залогом получения корректных результатов. Но главным условием применения минеральных термобарометров является достижение химического равновесия между используемыми парами минералов. Автором подробно изложена методика и методы и успешно применены плагиоклаз-роговообманковая и хлоритовая термометрия и амфиболовая барометрия.

Геохронологические методы анализа. Рассмотрены методика и методы $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (калийсодержащие амфиболы, мусковит и биотит) и U/Pb (цирконы магматические, метаморфические, детритовые) датирования возраста пород и возраста осадконакопления (MDA) (цирконы детритовые) метаосадочных пород.

Использованный комплекс геологических, петролого-геохимических, минералогических, термобарометрических и геохронологических методов анализа и литературные данные, позволили определить состав протолитов и P - T условия формирования метаморфических и магматических комплексов, слагающих восточную часть Горного Алтая.

Замечания. Текст главы достаточно подробный, но: 1) при описании аргон-аргонового метода упущена информация про биотит и 2) не описывается термобарометрия с участием граната в терригенных метапелитах (таблица 4.4.5). При просмотре микрофото рисунка 4.4.5 отчетливо видно 2 типа гранатов по морфологии и размеру: крупный, замещенный хлоритом, и мелкий «чистый». Не исключено, что последний

образовался в парагенезисе с хлоритом и может интерпретироваться как проявление локального метаморфизма.

Глава 4. Метаморфические комплексы восточной части Горного Алтая

В главе детально рассмотрены петрография, минералогия, петрогеохимия минеральная термобарометрия и возраст метасланцев. Метаморфические комплексы восточной части Горного Алтая по минеральному составу и структурно-текстурным признакам образуют два типа пород (табл. 4.1.1), слагающих тектонические пластины мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен метров:

1. Метабазальты, представленные Pl- и Pl-Cpx порфиридами и афировыми базальтами, метаморфизованными в условиях фации зеленых сланцев и сохранившими первичные магматические признаки. Порфириды содержат вкрапленники плагиоклаза и клинопироксена, практически полностью замещенного амфиболом; основная масса представлена эпидотом, хлоритом, плагиоклазом, редко амфиболом. В составе афировых метабазальтов преобладает амфибол.

2. Метатерригенно-кремнистые породы, представленные средне-мелкозернистыми ритмично-слоистыми и массивными Qz-Chl-Ser, Qz-Amp-Ep и Qz-Ep-Bt песчаниками и алевролитами. Мощность ритмов достигает первых десятков сантиметров, часто они завершаются прослоями кремнистых пород мощностью до нескольких миллиметров. Для массивных метасланцев характерны слабоокатанные обломки, в основном, кварца, плагиоклаза и амфибола.

Изучение амфиболов из метабазальтов и терригенных сланцев показало, что они относятся к кальциевым амфиболом и, как правило, их кристаллы являются зональными. В этом случае составы их центральных частей отвечают актинолитам и низкощелочным магнезиальным роговым обманкам, а краевых – высокощелочным магнезиальным роговым обманкам и паргаситам (рис. 3). Амфиболы, представленные однородными по химическому составу кристаллами, являются паргаситами.

По результатам минералогической геотермобарометрии терригенных сланцев, выполненной с помощью плагиоклаз-роговообманковых термометров и роговообманковых барометров, установлено, что максимальные значения P - T параметров метаморфизма достигали 563-715°C и 3-8 кбар, что соответствует условиям, переходным от эпидот-амфиболитовой к амфиболитовой фации.

Базальтовые лавы на диаграмме $FeO^*/MgO-TiO_2$ образуют большое поле точек и соответствуют тренду базальтов срединно-океанических хребтов и приурочены к полю данных по задуговому бассейну Вудларк (юго-запад Тихого океана). На диаграмме TiO_2-K_2O (Миронов, 1990; Симонов, 1993; Зоненшайн и др., 1995; Симонов и др., 1999; Добрецов и др., 2005; Dril et al., 1997) составы базальтовых лав располагаются в областях пород (BABB+E-MORB), N-MORB и OIB, полностью перекрываясь полем данных по бассейну Вудларк (рис. 4). По геохимическим показателям метабазальты образуют четыре группы пород (рис. 5). Базальты первой из них демонстрируют слабонаклонные спектры распределения REE и мультиэлементные спектры, слегка обогащенные LREE относительно HREE. У базальтов второй группы более «крутые» спектры распределения REE и хорошо выраженные на спайдер-диаграммах К- и Р-минимумы. В третью группу входит один базальт, обладающий 13 практически плоскими редкоземельным и мультиэлементным спектрами. Четвертая группа представлена двумя базальтами, обладающими положительными спектрами распределения REE и Nb-Ta-минимумами на спайдер-диаграмме. Однако на редкоземельных диаграммах и на диаграмме Zr-Y базальты находятся вблизи поля данных по базальтам, стеклам и расплавленным включениям бассейна Вудларк, за исключением двух проб, лежащих в поле NMORB базальтов. Близкая картина наблюдается и на диаграмме Zr/Y-Nb/Y, где базальтовые лавы находятся вблизи поля OIB в области с плюмовым источником.

Метатерригенно-кремнистые породы, формируют две группы (рис. 6). К первой из них относятся кварц-амфиболовые сланцы, имеющие слабо отрицательные спектры распределения REE, и песчаник с более «крутым» спектром. Породы данной группы не имеют выраженных Eu-аномалий, а на мультиэлементной диаграмме наблюдаются низкие концентрации LILE, сильные К-минимумы, умеренные Р-минимумы и отсутствие Ti-минимумов. Ко второй группе относятся метасадочные породы Телецкого и Саратанского комплексов, обладающие отрицательными спектрами распределения редкоземельных элементов. Также у них наблюдается сильная отрицательная Eu-аномалии, а на мультиэлементных диаграммах проявлена различная степень дифференциации LILE и отчетливо выраженные Nb-Ta-, Р- и Ti-минимумы. Кроме того, на диаграммах Р.М. Бхатия (Bhatia, Crook, 1986) изученные точки составов метатерригенных пород из Телецкого и Саратанского комплексов, в целом, попадают в области песчаников задуговых бассейнов и островных дуг. Полученные результаты макро- и микроэлементного анализа метабазальтов и метатерригенно-кремнистых пород позволяют утверждать, что базальты из Телецкой зоны Горного Алтая являются толеитовыми базальтами задуговых бассейнов ВАНВ типа, а протолитом метасадочных пород послужили продукты выветривания надсубдукционных магматических пород, накопившиеся в пределах задугового бассейна.

При U/Pb датировании детритовых цирконов из амфиболовых сланцев Телецкого и Саратанского комплексов установлено, что выделяются две возрастные популяции: неопротерозойская с пиками на 851 и 786 млн лет и кембрийская с пиками на 522 и 516 млн лет. Цирконы имеют осцилляторную зональность и высокое U/Th отношение (0.12-1.88 и 0.1-1.49 соответственно), что позволяет считать протолитами метатерригенных пород магматические породы Кузнецко-Алтайской и Таннуольской островных дуг и осадочные породы Алтае-Монгольского террейна, содержащие неопротерозойские детритовые цирконы. Максимальный возраст осадконакопления рассчитывался по методике (Dickinson, Gehrels, 2009) как средневзвешанное по группе из трех наиболее молодых зерен циркона. Для метатерригенных пород Телецкого и Саратанского комплексов он составил соответственно 492.5 ± 11.0 и 505.4 ± 8.6 млн лет, что указывает на то, что верхней возрастной границей формирования терригенных пород является средний-поздний кембрий.

Замечания. 1) При описании метаморфических комплексов не проанализирована крупная обобщающая монография (Лепезин Г.Г. *Метаморфические комплексы Алтае-Саянской складчатой области.* – Новосибирск: Наука. – 1978. – 231 с.), где также для региона Горного Алтая выделены типы и фации метаморфизма.

2) Отсутствует должная информация по контактовому метаморфизму и зональности контактового метаморфизма со стороны, например, Онышского плутона гранитоидов. Здесь по направлению к гранитам, детально отобраны 9 проб (и шлифы) в экзоконтакте плутона (рис. 2.2.2 и таблица 4.4.1), но каких-то суждений о контактовом метаморфизме, например, пород типа Б-17-129 в непосредственном контакте - не приводится. Кроме того, на всех рисунках автора вокруг гранитных массивов (по результатам картирования) не показан «контактовый» кран.

3) Фраза «...на их формирование при Р-Т условиях до амфиболитовой фации метаморфизма», которая применена здесь (стр. 82) и по всей работе (вплоть до Заключения), не конкретна и не отвечает качественной оценке Р-Т условий каждого из трех рассматриваемых метакомплексов.

Глава 5. Интрузивные и офиолитовые комплексы восточной части Горного Алтая

В главе рассмотрены геологическое строение, петрография, петрогеохимия и геохронология важнейших интрузивных и офиолитовых комплексов региона.

Кабак-Тайгинский гипербазит-габбро-долеритовый массив изучен в его крайней восточной части, на правом берегу р. Башкаус, где представлен серпентинитовым меланжем с блоком

габбро-долеритов, прорванных дайкой и жилами плагиолейкогранитов мощностью до 20 см. Офиолиты залегают в основании Саратанского аккреционного комплекса, образующего широкую полосу до 50-60 км, расположенную к юго-востоку от них, в бассейне р. Башкаус, и представленного тектоническими пластинами метатерригенно-кремнистых пород и базальтов, метаморфизованных в зеленосланцевой фации. Серпентинитовый меланж и тектонические пластины базальтов и турбидитов погружаются на юг под углами 60-70°. Видимая мощность блока габбро-долеритов составляет около 40-50 м, серпентинитов – около 30-40 м, а меланжа в целом – около 350 м (рис. 7, 8).

В результате петрогеохимических исследований мафитовых пород массива установлено, что они образованы в условиях задугового бассейна. Данные о составе лейкоплагиогранитов из дайки, прорывающей блок габбро, указывают на то, что они образованы в надсубдукционной обстановке. U/Pb возраст цирконов из габбро-долерита и лейкоплагиогранита демонстрируют раннекембрийский (533 ± 14 млн лет) и среднекембрийский (505 ± 12 млн лет) возрасты, соответственно.

Метаморфические комплексы восточной части Горного Алтая прорваны *Каракудюрским и Кубадринским гранитоидными комплексами*. Породы Каракудюрского комплекса представлены диоритами, кварцевыми диоритами и тоналитами, реже – габбро, характеризуются широким диапазоном значений кремнекислотности и образуют толеитовый тренд. Породы Кубадринского комплекса представлены гранодиоритами, гранитами и лейкогранитами, образующими Алтынтаусский, Онышский, Кубадринский и более мелкие массивы. Согласно петрогеохимическим данным породы обоих комплексов являются коллизионными.

Время внедрения гранитоидных массивов этих комплексов определялось по Каракудюрскому и Кубадринскому массивам. Гранодиориты и лейкогаббро Каракудюрского массива демонстрируют LA-ICP-MS конкордантные возрасты цирконов на уровне 419 ± 4 и 413 ± 5 млн лет соответственно. Кварцевые диориты Кубадринского массива имеют схожие значения возрастов: 410 ± 13 и 422 ± 7 млн лет соответственно (Glorie et al., 2011). Цирконы из гранитов Алтынтаусского массива, согласно данным (De Grave et al., 2009), имеют SHRIMP-возраст, равный 419 ± 11 млн лет. Гранитоиды Каракудюрского и Кубадринского комплексов внедрялись в позднем силуре-раннем девоне и маркируют завершение процессов формирования аккреционной структуры Улаганского сегмента Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны и начало коллизионного этапа.

Замечание. На схемах геологического строения (рис. 5.1.1), например, вокруг Атуркольских гранитов не обозначены и не охарактеризованы роговики, не обозначена степень контактово-термального воздействия гранитов на вмещающие породы.

Глава 6. Эволюция восточной части Горного Алтая в венде-палеозое

Проведена корреляция и установлены следующие структурно-тектонические и тектоно-термальные события, приведшие к формированию современного структурного плана региона. В венд-палеозойской истории формирования восточной части Горного Алтая, как части Алтае-Саянской складчатой области, отчетливо выделяется 5 этапов (рис. 9):

1. *Венд-среднекембрийский этап.* На фоне субдукции литосфер Палеоазиатского океана под юго-восточную окраину Сибирского кратона (Buslov, Cai, 2017; Buslov et al., 2022) в тыловой части Таннуольской островной дуги формируется задуговой бассейн, фиксируемый по metabазальтам Телецкого, Саратанского и Чульчинского метаморфических комплексов, офиолитам Кабак-Тайгинского массива на Горном Алтае, Душкуннугского, Шатского, Копсекского и других массивов Тувы (Котляров, 2010; Монгуш и др., 2011, 2023; Зиндобрый и др., 2025а,б; и другие).

2. *Позднекембрийско-раннедевонский этап.* Продолжается субдукция литосфер Палеоазиатского океана под юго-восточную окраину Сибирского кратона, приведшая к аккреции и последующей коллизии Тувино-Монгольского микроконтинента с Таннуольской

островной дугой. В результате давления микроконтинента в северо-западном направлении происходит закрытие задугового бассейна и погружение новообразованной океанической коры под Таннуольскую островодужную систему, что привело к формированию аккреционного комплекса Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны (Берзин и др., 1994; Симонов и др., 1994; Берзин, Кунгурцев, 1996; Буслов, Ватанабе, 1996; Буслов и др., 1998; Буслов, 2011; Буслов и др., 2013; Buslov et al., 1993; Buslov et al., 2002; Dobretsov et al., 2004; Buslov et al., 2022).

3. *Позднеордовикско-раннедевонский этап.* Давление микроконтинента привело к надвиганию островной дуги на аккреционный комплекс, в пределах которого началось формирование покровно-надвиговой структуры. Согласно полученным результатам термобарометрии по метаосадочным породам и metabазальтам их метаморфизм происходил при температурах 563-715°C и давлении 6-8 кбар. Одновременно протекали процессы эксгумации метаморфических пород с наложением пренит-пумпеллиитовой фации метаморфизма. Таким образом, базальты задугового бассейна и осадочные породы глубоководного желоба восточной части Горного Алтая Телецкой зоны претерпели 3 стадии метаморфизма (первая метаморфизм фации зелёных сланцев, вторая – метаморфизм эпидот-амфиболитовой фации, заключительная стадия – метаморфизм пренит-пумпеллиитовой фации), образующие *P-T-t* тренд «против часовой стрелки» (рис. 6.2). Завершение этапа характеризуется погружением в зону субдукции окраинно-континентальной части Сибирского кратона, представленного шельфом задугового бассейна, что привело к утолщению земной коры с формированием покровно-надвиговой структуры и внедрением гранитоидных массивов Каракудюрского и Кубадринского магматических комплексов (422 ± 7 - 410 ± 13 млн. лет).

4. *Девонско-раннекаменноугольный этап.* Продолжается субдукция литосфер Палеоазиатского океана с юго-востока (в современных координатах) под Тувино-Монгольский микроконтинент и его коллизия с Таннуольской островодужной системой. Согласно результатам $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования амфиболов и слюд из кристаллических сланцев (Буслов и др., 2003; Абилдаева и др., 2019; Фидлер, Семенова, 2021; Фидлер, 2023; Buslov et al., 2004) Курайского метаморфического комплекса, являющегося южным продолжением Телецкого метаморфического комплекса (рис. 2), покровно-надвиговые и сдвиговые деформации протекали в девоне (415.5 ± 8.9 - 355.6 ± 4.6 млн лет по амфиболу) и раннем карбоне (344.2 ± 4.9 - 331.7 ± 5.8 млн лет по мусковиту и 347.6 ± 4.5 - 317.2 ± 4.0 млн лет по биотиту). Данные по U/Pb датированию метаморфических кайм цирконов из гранито-гнейсов (Гусев, Шокальский, 2010; Фидлер, Семенова, 2021) также указывают на позднедевонское время проявления деформаций (367.8 ± 2.3 и 380.1 ± 7.4 млн лет назад). Данные об $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрасте мусковитов из метатурбидитов Телецкого комплекса и роговых обманок из metabазальтов Чульчинского комплекса (400.4 ± 4.3 и 406 ± 3 млн лет, соответственно) близки к возрасту покровно-надвиговых и сдвиговых деформаций в Курайском метаморфическом комплексе. В Телецко-Башкаусской сдвиговой зоне, разделяющей Улаганский сегмент сутурно-сдвиговой зоны на Телецкий, Саратанский и Чульчинский комплексы, деформации позднего девона-раннего карбона зафиксированы в формировании амфиболов (375.0 ± 5.0 млн лет) и биотитов (в диапазоне 328.5 ± 1.7 - 365.7 ± 2.0 млн лет назад) в кристаллических сланцах и бластомилонитах (Смирнова и др., 2002).

5. *Позднекаменноугольно-раннепермский этап.* В позднем карбоне–ранней перми созданная в результате ранне-среднепалеозойских субдукционно-коллизионных процессов структура Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской зоны по сдвигам и сдвиго-надвигам, к числу которых относятся Телецкий, Северо-Саянский, Телецко-Курайский, Телецко-Башкаусский, Кубадринско-Курайский, Шапшальский (рис. 2), была разделена на несколько фрагментов (Буслов, Синтубин, 1995; Смирнова, 2002; Буслов и др., 2003; Владимиров и др., 2005; Добрецов, Буслов, 2011; Буслов и др., 2013; Dehandschutter et al., 2002; Buslov et al., 2004; Buslov, Cai, 2017).

Синтез полученных геологических, петрологических и геохронологических, а также опубликованных литературных данных позволяет утверждать, что восточная часть Горного Алтая является частью крупной ранне-среднепалеозойской Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны, представляющей собой единый задуговой палеобассейн, развивавшийся в венде - среднем кембрии в тылу Таннуольской островной дуги. Структурно-вещественные комплексы восточной части Горного Алтая слагают ранне-среднепалеозойскую аккреционно-коллизийную зону, нарушенную позднепалеозойскими сдвиго-надвигами. В ордовике-раннем силуре зона формировалась как аккреционный комплекс при погружении кембрийского задугового бассейна под венд-кембрийскую Таннуольскую островную дугу. В позднем силуре-раннем девоне зона формировалась как коллизийная покровнонадвиговая структура с внедрением плутонов Каракудюрского и Кубадринского магматических комплексов.

Замечания. 1) Вне внимания диссертанта оказались актуальные неопротерозойские и венд-кембрийские геодинамические события, рассмотренные в работе академика В.В. Ярмолюка с соавторами. Например, Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Рыцк Е.Ю., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Ранние стадии формирования Палеоазиатского океана: результаты геохронологических, изотопных и геохимических исследований позднерифейских и венд-кембрийских комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса // Докл. АН. 2006. Т. 410, № 5. С. 657-663. И другие. 2) При оценке температуры и давления пород показано (рис. 6.2), что автор придерживается схемы фаций метаморфизма по Yardley, 1990, но непонятно, какие уточнения внёс диссертант в данную схему? И как соотносится приведённая схема с отечественной схемой «Фаций метаморфизма» под ред. акад. В.С. Соболева (1970), которой нет в списке литературы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований впервые для региона расшифрована геологическая история восточной части Горного Алтая, которая является одним из ключевых объектов для проведения палеогеодинамических реконструкций Алтае-Саянской складчатой области. Получены новые геологические, петрологические и геохронологические данные. На их основе и на литературных данных определены обстановки, условия и временные рубежи формирования структурно-вещественных комплексов восточной части Горного Алтая. Установлено, что метаморфические породы (Телецкий, Саратанский и Чульчинский комплексы) формируют покровно-надвиговые структуры, в основании которых залегают серпентинитовые меланжи с фрагментами офиолитовой ассоциации (блоки и тектонические пластины гипербазит-габбро-пироксенитов и габбро-долеритов). Геологическим картированием установлено, что наиболее крупными меланжами являются Карагольский и Кабак-Тайгинский, протяженность которых достигает 40 км, ширина до 6 км. Петрогеохимическими исследованиями доказано, что габбро-долериты Кабак-Тайгинского массива относятся к умереннотитанистым толеитам, базальты Телецкого, Саратанского и Чульчинского комплексов – к умеренно-щелочным высокотитанистым вулканитам. Микроэлементный состав исследованных пород, а также особенности состава хромшпинелидов из серпентинитов, указывают на их совместное формирование в задуговом бассейне.

В результате изучения протолитов метаморфических пород установлено, что по петрографическому составу они являются базальтами и осадочными кремнистыми породами, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фаций. Составы амфиболов из них указывают на две стадии прогрессивного метаморфизма (зеленосланцевую и эпидот-амфиболитовую). Проведенные геохимические исследования показали, что metabазальты Телецкого, Саратанского и Чульчинского комплексов обладают характеристиками ВABV. Метатерригенно-кремнистые породы являются продуктами выветривания, диагенеза и метаморфизма надсубдукционных магматических пород, накопившихся в тыловой части островной дуги.

На основе прямых наблюдений, впервые полученных геохронологических данных установлено, что покровно-надвиговая структура современной восточной части Горного Алтая была сформирована в позднем силуре - раннем девоне, что маркируется значениями $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста минералов из метаморфических пород и U/Pb значениями возраста цирконов из гранитоидных массивов, сложенных породами с коллизионными характеристиками. Дальнейшее развитие этой структуры происходило в позднем девоне - перми (Буслов, Синтубин, 1995; Смирнова и др., 2002; Буслов и др., 2003; Буслов, 2011; Буслов и др., 2013), когда в результате сдвиговых смещений покровно-надвиговая структура была разделена на серию блоков.

Таким образом показано, что восточная часть Горного Алтая является важным связующим звеном между хорошо изученными Уймонской зоной Горного Алтая и Куртушибинским поясом Западного Саяна с характерными чертами аккреционных образований (субдукционные голубые сланцы, офиолитовые меланжи, тектонические пластины базальтов океанической коры и терригенно-кремнистых пород глубоководного желоба),

Замечание. *Список литературы оформлен не по ГОСТу.*

Защищаемые положения.

1. Метаморфические комплексы восточной части Горного Алтая представлены тектоническим чередованием метавулканогенных и ритмично-слоистых метатерригенно-кремнистых пород, сформированных при *P-T* условиях до амфиболитовой фации метаморфизма;

2. Метавулканогенные породы и габбро-долериты Кабак-Тайгинского серпентинитового меланжа характеризуются как ранне-среднекембрийские магматические породы офиолитов задугового бассейна Таннуольской островной дуги Палеоазиатского океана. Протолитом метатерригенных пород послужили позднекембрийско-раннесилурийские надсубдукционные магматические образования.

3. Структурно-вещественные комплексы восточной части Горного Алтая составляют ранне-среднепалеозойскую аккреционно-коллизионную зону, нарушенную позднепалеозойскими сдвиго-надвигами. В ордовике-раннем силуре зона формировалась как аккреционный комплекс при погружении кембрийского задугового бассейна под венд-кембрийскую Таннуольскую островную дугу. В позднем силуре-раннем девоне зона формировалась как коллизионная покровно-надвиговая структура с внедрением плутонов Каракудюрского и Кубадринского магматических комплексов.

Замечание. *В ЗП 3 не обозначены абсолютные возрасты образования минералов (млн лет), геодинамических событий. Предлагается подкорректировать слова «кембрийского задугового бассейна», вставив «комплекса пород задугового....».*

Научная новизна.

1. Предложена модель сочленения покровно-надвиговых структур Горного Алтая и Куртушибинским поясом Западного Саяна, как предполагается, образующая единую Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянскую сутурно-сдвиговую зону. Представленные в диссертации новые результаты восполняют недостаток имеющихся данных об Улаганском сегменте, создавая целостную картину об эволюции сутурно-сдвиговой зоны.

2. Выявлено, что метاپороды Телецкого метаморфического комплекса представлены тектоническим чередованием метавулканогенных и ритмично-слоистых метатерригенно-кремнистых пород, по петрогеохимическому составу протолитами которых соответственно являются базальты (метабазиты) и терригенно-осадочные породы (метапелиты), характерные для аккреционных геодинамических обстановок.

3. Результатами минералогической термобарометрии по амфиболам (паргасит, роговая обманка) и альбитам Телецкого метаморфического комплекса доказаны и определены *P-T* условия формирования его пород, достигающие начала амфиболитовой фации метаморфизма

(до 8 кбар и до 715°C). Составы амфиболов из них указывают на две стадии прогрессивного метаморфизма - зеленосланцевую и эпидот-амфиболитовую

4. Установлено, что структурно-вещественные комплексы восточной части Горного Алтая представляют собой ранне-среднепалеозойскую аккреционно-коллизийную зону, нарушенную позднепалеозойскими сдвиги-надвигами. В ордовике-раннем силуре она формировалась как аккреционный комплекс в процессе погружения океанической коры кембрийского задугового бассейна под венд-кембрийскую Таннуольскую островодужную систему Палеоазиатского океана, в позднем силуре-раннем девоне – как коллизийная покровно-надвиговая структура с утолщением земной коры, метаморфизмом пород аккреционного комплекса в пределах от пренит-пумпеллиитовой до амфиболитовой фации, их плавлением с образованием Каракудюрского и Кубадринского плутонов.

Теоретическая и практическая значимость. Установление закономерностей строения структуры Восточной части Горного Алтая важно тем, что регион является связующим звеном между хорошо изученными Уймонской зоной Горного Алтая и Куртушибинским поясом Западного Саяна с характерными чертами аккреционных образований (субдукционные голубые сланцы, офиолитовые меланжи, тектонические пластины базальтов океанической коры и терригенно-кремнистых пород глубоководного желоба), образующими, как предполагается (Буслов, 2011; Добрецов, Буслов, 2007, 2011; Буслов и др., 2013; Buslov, Cai, 2017; Buslov et al., 2022; и данная работа), единую Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянскую сутурно-сдвиговую зону. Представленные в диссертации новые результаты восполняют недостаток имеющихся данных об Улаганском сегменте, создавая целостную картину строения и эволюции сутурно-сдвиговой зоны. Выявление структурно-вещественных характеристик ультрабазит-базитовых и metabазитовых пород Кабак-Тайгинского офиолитового меланжа Улаганского сегмента дает возможность обнаружить здесь колчеданное рудопроявление по аналогии с Кызыл-Таштыгским месторождением Восточной Тувы, расположенном в Саянском сегменте сутурно-сдвиговой зоны. Таким образом, проведенные исследования имеют стратегическое значение для экономической и сырьевой безопасности освоения Восточной части Горного Алтая Российской Федерации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты работы и самооценки её автором соответствуют паспортам научных специальностей: 1.6.1. «Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика», пунктам № 3, 4, 15 и 1.6.3. «Петрология, вулканология», пунктам № 1, 2, 5, 6.

Заключение

Диссертационная работа В.Д. Зиндоброго является завершённым фундаментальным научным исследованием на актуальную тему, выполнена на высоком научном уровне с использованием современных методов. В диссертации решена крупная геологическая научная задача по выявлению закономерностей тектонического строения и венд-палеозойской эволюции структур Восточной части Горного Алтая.

Все выводы и рекомендации автора в целом обоснованы, частично являются дискуссионными. Указанные в отзыве замечания не умаляют и не снижают высокой научной значимости диссертационного исследования В.Д. Зиндоброго и не затрагивают существа диссертационной работы. Выполненные исследования не ставят под сомнение представленные в работе результаты и сформулированные на их основе выводы.

При анализе содержания диссертации В.Д. Зиндоброго признаков плагиата не обнаружено. В диссертации все цитирования и научные заимствования сопровождаются корректными и адекватными ссылками на первоисточники данных и научных идей.

Диссертация В.Д. Зиндоброго и представленный автореферат полностью отвечают формальным требованиям к квалификационным работам подобного рода и заслуживает высокой оценки.

Соискатель Виктор Дмитриевич Зиндобрый, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальностям 1.6.1 – «Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика», 1.6.3 – «Петрология, вулканология».

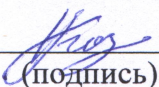
Официальный оппонент

Козлов Павел Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории региональной геологии и геотектоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН).

Адрес: 620110, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15.
Тел.: (343) 2879012; Fax: (343) 2879012; E-mail: kozlov@igg.uran.ru

Я, Козлов Павел Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«30» октября 2025 г.


(подпись)

Подпись П.С. Козлова заверяю:

Зав. Отделом кадров ИГГ УрО РАН



С.В. Верхоглядова