

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Талтыкин Юрий Викторович

Распределение ильменитовой и магнетитовой серий магматических пород мел–палеогенового возраста в Сихотэ–Алиньском орогенном поясе

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена в лаборатории тектоники осадочных бассейнов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный Руководитель *Диденко Алексей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН*

Официальные оппоненты: *Тевелев Александр Вениаминович, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор;*

Буслов Михаил Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, лаборатория геодинамики и магматизма, главный научный сотрудник, заведующий;

Касаткин Сергей Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН, лаборатория региональной геологии и тектоники, руководитель, старший научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «23» мая 2025 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, геологический факультет, ауд. 415

E-mail: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3402>

Автореферат разослан «___» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

Ю.А. Гатовский

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и степень её разработанности. Механизм возникновения и дальнейшего формирования региональных зон, различающихся окислительно-восстановительными условиями (редокс-условиями) кристаллизации магматических пород не вполне ясен. Считается, что породы ильменитовой серии (ИС), кристаллизующиеся в восстановительной обстановке, образуются в зонах сжатия, а магнетитовая серия (МС), кристаллизующаяся в окислительных условиях - в зонах растяжения, хотя существуют и другие представления [Guo et al., 2022]. **С ильменитовыми образованиями, чаще всего, связаны месторождения олова и вольфрама, а с магнетитовыми – золото-медно-порфировые. Таким образом, редокс-условия кристаллизации оказывают значительное влияние на рудную специализацию магматических образований и поэтому являются важным предметом геологических исследований.** Формирование ИС и МС в Сихотэ-Алиньском орогенном поясе (САОП) изучено пока недостаточно хорошо. По мнению [Ishihara, 1998] немагнитные гранитоиды (ИС), чаще всего S-типа, образуются в орогенных поясах за счет переработки органики из аккреционных комплексов. Однако известное на данный момент региональное распределение ильменитовых и магнетитовых магматитов Циркум-Пацифики не всегда можно объяснить подобным механизмом. Не ясно в рамках данной гипотезы происхождение мощной магнетитовой зоны в орогенах Кордильер и Анд, где известны значительные объемы аккреционных образований. Кроме того, эффузивные аналоги гранитоидов могут также быть разделенными на ильменитовую и магнетитовую серии [Мишин и др., 2003].

Цель и задачи исследования. Целью работы является выяснение времени формирования и дальнейшего существования региональных зон распространения ильменитовой и магнетитовой серий магматических пород в САОП в течение десятков миллионов лет. Для этого были поставлены и решены несколько задач:

- отработана методика выделения пород ильменитовой и магнетитовой серии на основе ряда геолого-геохимических и геофизических признаков;
- построена схема редокс-зональности магматических пород Сихотэ-Алиньского орогенного пояса для выяснения её связи с петрохимическим составом пород, их геохимическим типом, глубиной кристаллизации и возрастом образования магматических тел;
- проанализировано влияние дегазации мантии, а также процессов дегидратации погружающейся океанической плиты при субдукции на редокс-условия в земной коре;

- исследованы геодинамические условия кристаллизации гранитоидов САОП в мел-палеогеновое время.

Объект и предмет исследования. Объект исследования - магматические породы мел-палеогенового возраста Сихотэ-Алиньского орогенного пояса. Предметом исследований являются окислительно-восстановительные условия кристаллизации этих пород.

Научная новизна. Показано, что возникшее при орогенезе распределение окислительно-восстановительных условий кристаллизации магматических пород находит свое отражение в структуре гранитно-метаморфического слоя новой континентальной коры. При последующих тектонических перестройках в САОП это распределение и связанные с ним региональные металлогенические провинции сохраняются.

Теоретическая и практическая значимость. Предложен иной, чем у Ш. Ишихара [Ishihara, 1977], механизм возникновения редокс-зональности магматических пород при субдукции. Он удовлетворительно описывает основные закономерности распределения редокс-зональности в Циркум-Пацифике (и в САОП в частности). Практически, знание типов магматических образований позволит более целенаправленно определять участки, перспективные на то или иное оруденение. В настоящий момент не всегда известно, к какому типу (ИС или МС) относятся магматические образования в отдельных регионах. Для этого необходимо проводить площадное районирование территорий по редокс-условиям кристаллизации магматических пород, тем более что при составлении геологических карт в настоящее время проводятся измерения магнитной восприимчивости (MS) магматитов. В комплексе с другими геолого-геофизическими методами изучение регионального распределения редокс-зональности магматических пород позволяет строить модели тектонических обстановок прошлого.

Защищаемые положения. Результаты исследований позволяют утверждать следующее:

1. Магматические породы Сихотэ-Алиньского орогенного пояса разделяются на региональные зоны преимущественного развития ильменитовой или магнетитовой серий. В этих зонах присутствуют идентичные по петрохимическому составу, степени фракционирования, типу, глубине кристаллизации и возрасту магматические образования.

2. Ильменитовые породы I этапа магматизма (133-120 млн лет) относятся к коллизионным, а магнетитовые породы V этапа (моложе 52 млн лет) к надсубдукционным. Остальные магматические породы II - IV этапов относятся к «смешанным сериям».

3. Образовавшаяся в результате орогенеза новая континентальная кора в пределах САОП сохранила магнитные свойства, существовавшие в литосфере при формировании гранитно-метаморфического слоя в альб-сеноманское время.

Все три защищаемых положения обоснованы в Главе 4.

Фактический материал. В основу диссертационной работы положены результаты исследований свыше 500 образцов магматических пород (Таблица №1), материалы по профильным замерам магнитной восприимчивости в коренных выходах пород (с шагом 2-20 метров в зависимости от обнаженности местности), а также многочисленные замеры MS, выполненные в пограничных массивах, представленных породами ИС и МС, во время детальных маршрутов (протяженностью более 65 км). Проведено определение возрастов ильменитовых и магнетитовых образцов 2 массивов (Приисковский и Южный Сидимийский). В Таблице №2 представлены результаты определения возраста магматических пород САОП U-Pb методом по литературным источникам.

Личный вклад автора. Исследования с 2016 г. по 2022 г. проводилась автором под руководством научного руководителя д.г.-м.н. Л.Ф. Мишина, затем под руководством д.г.-м.н., чл.-корр. РАН А.Н. Диденко. Все эти годы автор участвовал в планировании и проведении полевых работ, отборе образцов (430 образцов из 507, представленных в Таблице №1, получены при непосредственном участии автора в 2016-2024 гг.) и проведении части (порядка 80%) маршрутных съемок MS на Аксакинском, Южном Сидимийском и Приисковом массивах. Также автор принимал непосредственное участие в составлении карт и схем зональности редокс-условий кристаллизации магматических пород САОП. Автор лично проанализировал материалы (как экспериментальные измерения, так и теоретические модели) по окислительно-восстановительному состоянию литосферы в зонах конвергентных окраин и предложил свою модель возникновения редокс-зональности в зонах субдукции, которая удовлетворительно описывает различные формы этих зон в Циркум-Пацифике.

Во всех статьях (1-11), написанных в соавторстве, автор лично принимал участие в сборе полевых материалов, самостоятельно и вместе с соавторами участвовал в обработке полевой информации и подготовке публикаций, в обобщении материалов и формулировке выводов. Вклад соискателя состоит в разработке проблемы возникновения и дальнейшего существования региональных редокс-зон, их металлогении и связи с геодинамическими и тектоническими процессами в мел-палеогеновое время.

Методология и методы диссертационного исследования. Одной из задач данного исследования являлось сопоставление схемы зональности окислительно-восстановительных условий кристаллизации магматических пород Сихотэ-Алиня, построенной: а) по осредненным результатам определения коэффициента окисленности железа [Мишин и др., 2003; Меркулова, Мишин, 2015] и б) по магнитной восприимчивости образцов магматических образований САОП [Талтыкин и др., 2024; Taltykin et al., 2024]. В результате стало ясно, что обе схемы вполне сопоставимы, но MS даёт более детальную картину распределения редокс-условий кристаллизации магматических пород.

Кроме измерений MS образцов и замеров в окрестностях точки отбора, были проведены лабораторные исследования в лаборатории физико-химических методов исследований ИТиГ ДВО РАН. Для большинства образцов (385) выполнены рентгено-флуоресцентный анализ (РФА) и анализы (441) масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), изучены шлифы (около 200), измерен вес (в процентах массы) магнитной фракции (259) и определена железистость (в долях от веса магнитной фракции) темноцветных минералов (155). На основании этих работ была выработана методика определения пород ИС и МС по комплексу признаков [Мишин и др., 2020; Mishin et al., 2020].

Эти исследования позволили также построить ряд петрофизических и петрохимических диаграмм, в том числе и график связи MS с коэффициентом окисленности железа в интрузивных породах САОП [Талтыкин и др., 2024; Taltykin et al., 2024].

Достоверность полученных результатов обеспечивается достаточным объемом выборки исследуемого фактического материала, применением современного высокоточного оборудования (для большинства образцов сделаны РФА (385) и ИСП-МС (441) анализы, также изучены шлифы (~200), измерен вес магнитной фракции (259) и определена железистость темноцветных минералов (155)). Схема редокс-зон по MS удовлетворительно сходится с зональностью, определенной по коэффициенту окисленности железа [Мишин и др., 2003]. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в базы данных RSCI и Scopus.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных статей, в том числе 6 в рецензируемых изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ имени М.В. Ломоносова.

По результатам работы было сделано 27 докладов на следующих все-российских и международных научных конференциях: III конференция «В

КИЛЬВАТЕРЕ БОЛЬШОГО КОРАБЛЯ..» (Черноголовка, 2018); X, XI, XII Косыгинские чтения (Хабаровск, 2019, 2021, 2024); XX международная конференция «Физико-химические и петрофизические..» (Москва, ИГЕМ РАН, 2019); Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения Д.С. Коржинского (Москва, ИГЕМ РАН, 2019); LI, LIII Тектонические совещания (Москва, ГЕОС, 2020, 2022); XI Всероссийская научно-практическая конференция (Якутск, 2021); VIII, IX, X Всероссийская научная конференция (Биробиджан, 2021, 2022, 2024); XIII Всероссийское петрографическое совещание (Иркутск, 2021); XX научная конференция (Иркутск, 2022); V, VI Всероссийские конференции (Владивосток, 2021, 2023); 16-е двухгодичное собрание международного Геологического Общества (SGA) (Новая Зеландия, 2022).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, Таблицы № 1 и Таблицы № 2.

Диссертация содержит 147 страниц, 43 рисунка, список литературы из 192 наименований, в том числе Приложение: Таблица 1, Свойства образцов магматических пород САОП и Таблица 2, Возрасты магматических пород САОП, Рис. Т2.1 и Т2.2.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории тектоники осадочных бассейнов Института тектоники и геофизики ДВО РАН. Автор выражает глубокую благодарность своему старшему товарищу, коллеге и первому научному руководителю д.г.-м.н. Л.Ф. Мишину за всестороннюю помощь и поддержку при написании данной работы. Искренняя благодарность коллективам лабораторий тектоники осадочных бассейнов и тектоники за активное участие в обсуждении проблем редокс-зональности магматизма в САОП, а также помощь во время подготовки материалов. Особая благодарность моей коллеге и соавтору Е.А. Коноваловой за совместную плодотворную работу и вед.н.с. В.Г. Невструеву за ценные советы и консультации в ходе написания диссертации. Большая признательность моему руководителю д.г.-м.н. чл.-корр. РАН А.Н. Диденко за неоценимую помощь в подготовке диссертации. Также автор искренне благодарен доктору геол.-мин. наук академику РАН Александру Ивановичу Ханчуку за обсуждения, ценные советы и замечания, позволившие значительно повысить качество работы

Работа выполнена за счет субсидий на выполнение государственного задания ИТиГ ДВО РАН (тема № 121021000095-1).

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Ильменитовые и магнетитовые гранитоиды, происхождение и распространение в Сихотэ-Алиньском орогенном поясе

В главе кратко изложены взгляды на происхождение ильменитовых и магнетитовых гранитоидов как в Циркум-Пацифике в целом, так и в САОП в частности. Подчеркнута связь ильменитовых гранитоидов с месторождениями олова и вольфрама, а магнетитовых с золото-медно-порфирированными месторождениями. Показана роль российских ученых в изучении рудно-магматических систем Дальнего Востока РФ.

ГЛАВА 2. Окисленные и восстановленные магматические породы Сихотэ-Алиньского орогенного пояса в качестве объекта изучения. Методика исследований магматитов

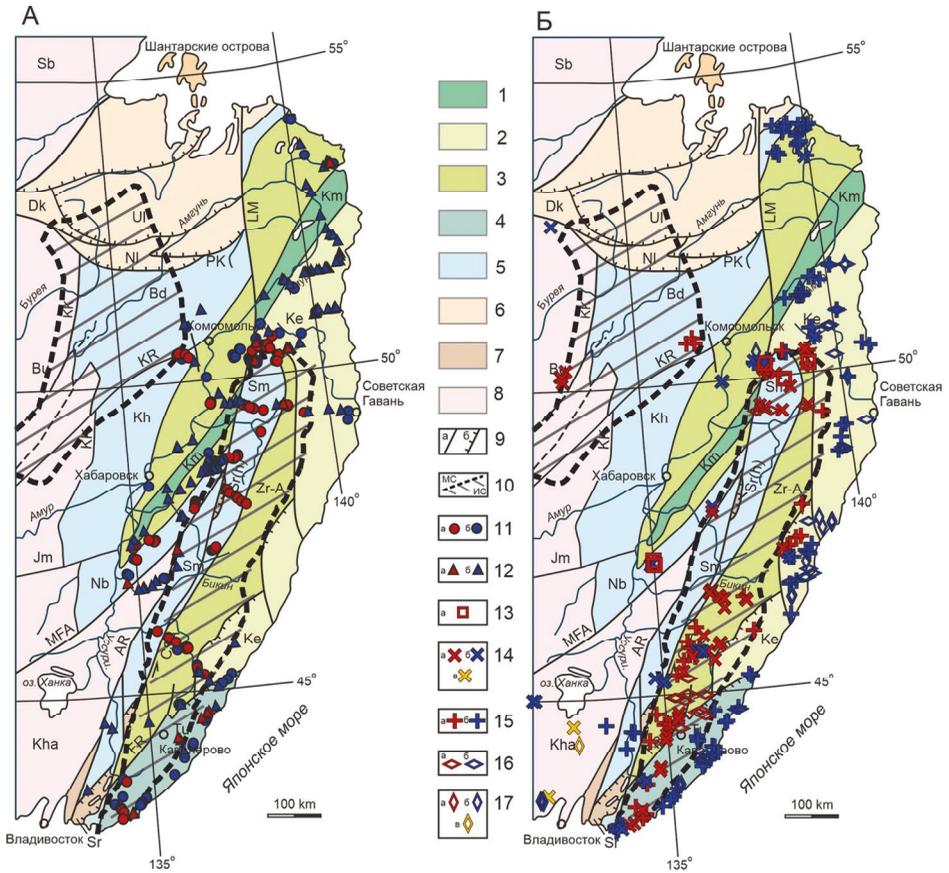
В главе дана краткая информация, касающаяся геохимии поливалентных элементов, показано соотношение коэффициента окисленности железа интрузивных пород САОП с магнитной восприимчивостью. Это позволяет сравнивать между собой распределение окислительно-восстановительных условий в регионах, где проводилось раздельное определение окисного и закисного железа (это материалы государственных геологических съемок М 1:100 000 и 1:200 000), с территориями, где проведено картирование по магнитной восприимчивости магматических пород.

За последние годы выполнено свыше 500 точек наблюдения (рис.1), где отобраны образцы, а также измерены значения MS в окрестности точки отбора образцов [Коновалова и др., 2021].

Для большинства образцов (385) выполнены рентгено-флуоресцентный анализ (РФА) и анализы (441) масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), изучены шлифы (около 200), измерен вес (в процентах массы) магнитной фракции (259) и определена железистость (в долях от веса магнитной фракции) темноцветных минералов (155). На основании этих работ была выработана методика определения пород ИС и МС по ком-

Рис. 1. Схема редокс-зональности в САОП [Талтыкин и др., 2024].

А – Схема расположения точек измерения MS (507 точек); Б – схема расположения точек определения абсолютных возрастов (U-Pb) (283 точки). Условные обозначения: 1 – террейн готерив-раннеальбской аккреционной призм (Км – Киселевско-Маноминский); 2 – террейн готерив-раннеальбской островной дуги (Ке-Кемский); 3 – террейн раннемелового турбидитового бассейна (Зг-А – Журавлевско-Амурский); 4 –



терреин раннемеловой (неоком) аккреционной призмы (Tu – Таухинский); 5 – террейны юрской аккреционной призмы (Sm - Самаркинский, Nb - Наданьхада-Бикинский, Vd – Баджалский, Kh – Хабаровский); 6 – террейны Монголо-Охотского орогенного пояса (Dk – Джагды-Кербинский, Nl – Ниланский, Ul – Ульбанский); 7 – террейны палеозойской континентальной окраины, надвинутые на юрскую аккреционную призму (Sr – Сергеевский, Sr(h) – Хорский); 8 – предмезозойские континенты: Буреинско (Bu) – Цзямусы (Jm) – Ханкайский (Kha) супертерреин и Сибирский кратон (Sb); 9 – сдвиги (a), надвиги (б); 10 – граница распространения пород ильменитовой серии, выделенная по соотношению $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ [Мишин и др., 2003; Меркулова, Мишин, 2015], 11–12 – пункты отбора образцов: 11 – интрузивных (а-ИС, б-МС), 12 – эффузивных (а-ИС, б-МС). 13–16 – возраст магматических пород: 13 – 133–120 млн лет, 14 – 120–94 млн лет, 15 – 94–60 млн лет, 16 – 60–53 млн лет, 17 – 53 ~ 36 млн лет, (а – ИС, б – МС, в – нерасчлененные ИС).

плексу признаков [Мишин и др., 2020]. Так, границей разделения интрузивов кислого-основного состава на ИС и МС для САОП предложено считать величину $MS = 0,5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Выяснилось, что эффузивные породы САОП также можно разделить на ИС и МС (рис. 2). Непосредственно с MS связана масса магнитной фракции и железистость темноцветных минералов - $F = FeO^*/(FeO^*+MgO)$. Значению $MS = 0,5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ соответствует масса магнитной фракции порядка 0,4–0,5 мас.%, железистость темноцветных минералов при этом превышает 0,6.

На рис. 3 приведена схема распределения пород ИС и МС в САОП. Установлено, что породы различных типов и возрастов могут попадать в зоны ИС, и МС. Согласно этой схеме границы редокс-зон также нередко секут границы аккреционных блоков и турбидитовых бассейнов, т.е. явной корреляции ильменитовых зон с аккреционными террейнами, содержащими органику, как предполагал Ш. Ишихара [Ishihara, 1977], не прослеживается.

На основании вышеизложенного, основными особенностями региональных зон распространения пород ИС и МС в САОП можно считать следующие:

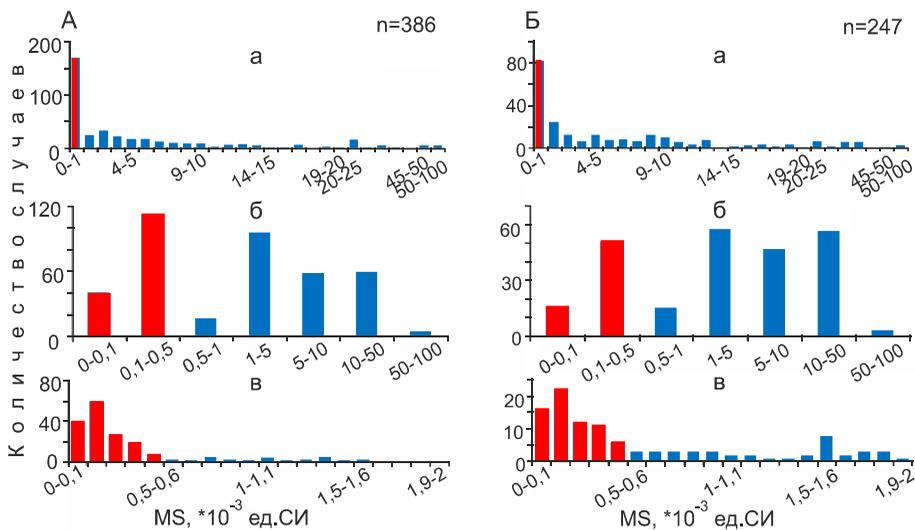


Рис. 2. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости в интрузивных (А) и эффузивных (Б) магматических породах САОП [Талтыкин и др., 2024]: полная выборка MS в арифметическом масштабе (а), полулогарифмическом (б) и интервальная (в): интервал 0–2. ИС – красная и МС – синяя.

- все зоны представляют собой вытянутые линейные структуры, ориентированные вдоль побережья океана. При этом ближняя к океану зона окисляется чаще всего магнетитовой;
- размеры зон – порядка тысячи км в длину и сотни в ширину;
- тип магматизма зон от интрузивов до эффузивов и от кислых до основных разностей;
- наличие в зонах магматитов широкого возрастного диапазона – до десятков миллионов лет.

На наш взгляд, объяснить наличие подобных региональных зон можно существованием восстановительных или окислительных условий, на фоне которых происходила соответствующая магматическая деятельность в регионе на протяжении длительного времени. По аналогии с температурным полем (существующим в любой точке пространства), имеющим положительный и отрицательный фон (относительно точки замерзания воды) мы вводим понятие редокс-фона. Редокс-фон может быть окислительным или восстановительным (относительно буфера FQM).

На рис.3 показаны пограничные массивы, породы которых представлены как магнетитовой, так и ильменитовой сериями и Приисковский массив (не является пограничным). Определен возраст ИС и МС этих массивов U-Pb методом. Установлено, что он может как совпадать, так и различаться в пределах единого массива.

ГЛАВА 3. Окислительно-восстановительные процессы при субдукции

В главе рассмотрен вопрос о влиянии окислительно-восстановительных условий при субдукции на региональную редокс-зональность кристаллизации магматических пород в литосфере аккреционных орогенов [Талтыкин и др., 2020].

На основе анализа имеющихся публикаций по результатам полевых исследований и физическому и математическому моделированию редокс-условий в литосфере при субдукции, показано (рис.4) [Талтыкин и др., 2020], что за счет процессов дегидратации, в том числе в транзитной мантийной зоне (MTZ), могут возникать участки с окисленным (I_o и II_o) фоном. При отсутствии дегидратации восстановленный поток флюидов из мантии приводит к появлению участков литосферы с восстановленным (I_n и II_n) фоном. Причем эта зональность существует длительное время и не зависит от типа магматизма.

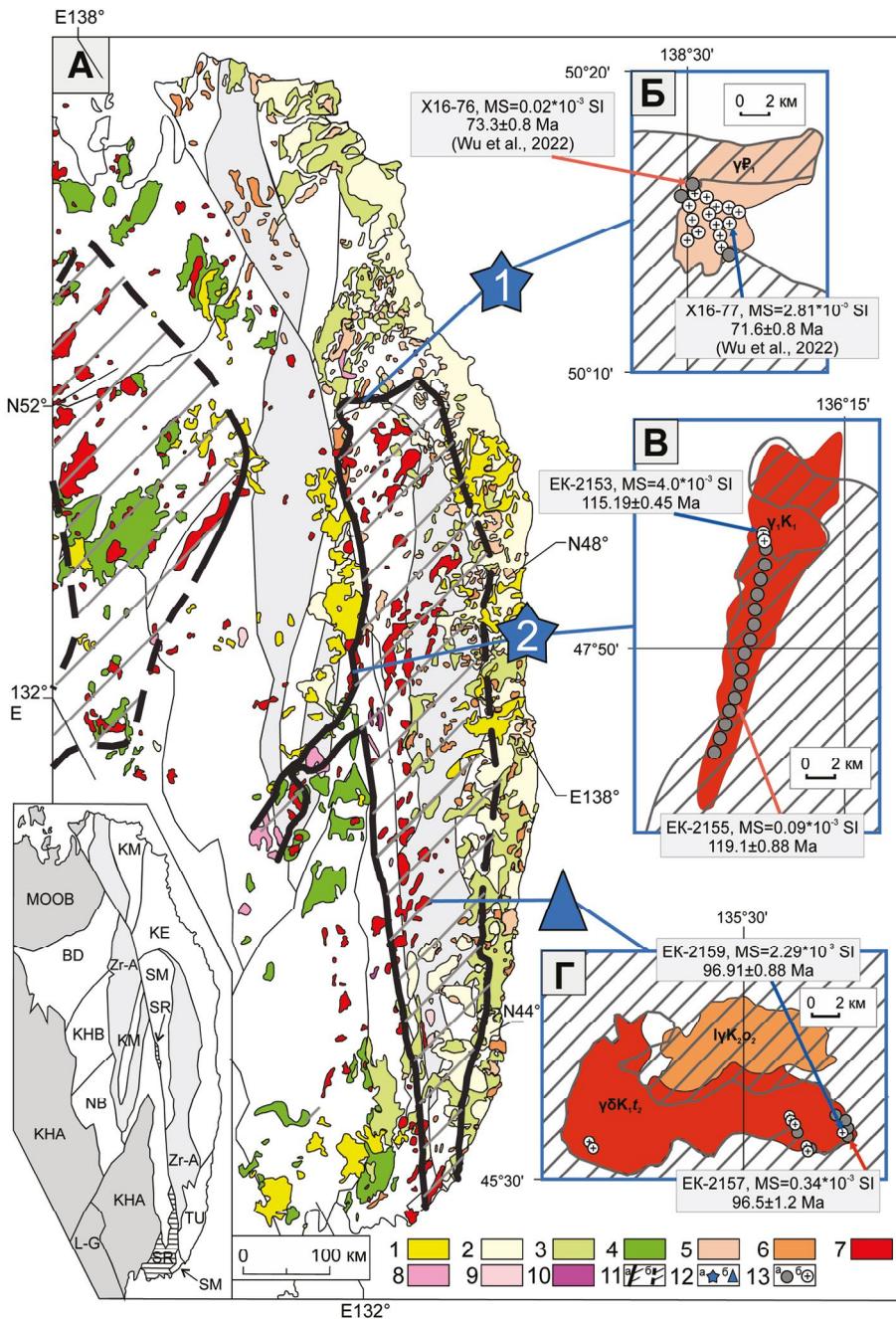


Рис. 3. А – Схема распределения пород ИС и МС в САОП. **Б, В, Г** – Схема распределения магматических пород ИС и МС в границах Аксакинского (**Б**), Южного Сидимийского (**В**) и Приискового массивов (**Г**) [Галтыкин и др., 2024].

Условные обозначения: 1–4 – вулканические образования: 1 – плиоцен: внутриплитные платобазальты; 2 – палеоцен-миоцен: риолиты, бимодальные вулканиты, базальты и габбро-граниты трансформной окраины; 3 – верхний мел: андезиты-риолиты надсубдукционной окраины; 4 – альб-нижний сеноман: базальты, андезиты, риолиты трансформной окраины; 5–8 – гранитоды: 5 – палеогеновые, 6 – поздне-меловые, 7 – альб-сеноманские, 8 – готерив-барремские; 9–10 – альб-сеноманские интрузивы монцогаббро (9), щелочных базитов и ультрабазитов (10). 11 – граница распространения пород ильменитовой серии, выделенная по комплексу признаков [Мишин и др., 2020] (а) и по соотношению $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ (б) [Мишин и др., 2003; Меркулова, Мишин, 2015], 12 – массивы: пограничные (а) 1 – Аксакинский (Б), 2 – Южный Сидимийский (В); с локальной MS (б) – Приисковый (Г); 13 – пункты измерения MS; а – $MS < 0,5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, б – $MS > 0,5 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Кроме измерений MS использовались карты аномального магнитного поля М 1 : 200 000. На врезке. Террейны средне-позднеюрской аккреционной призмы: BD – Баджалский NB – Наданьхада-Бикинский; SM – Самаркинский и КНВ – Хабаровский; поздне-тон-валанжинской: ТХ – Таухинский; баррем-раннеальбской: KM – Киселевско-Маноминский; баррем-раннеальбской островной дуги: KE – Кемский; раннемелового турбидитового бассейна: Zr-A – Журавлевско-Амурский. SR – Сергеевский террейн палеозойских континентальных аллохтонов на террейне юрской аккреционной призмы. КНА – Баджало-Цзямуси-Ханкайский супертеррейн раннепалеозойского, ЛГ – Лаоелин-Гродековский.

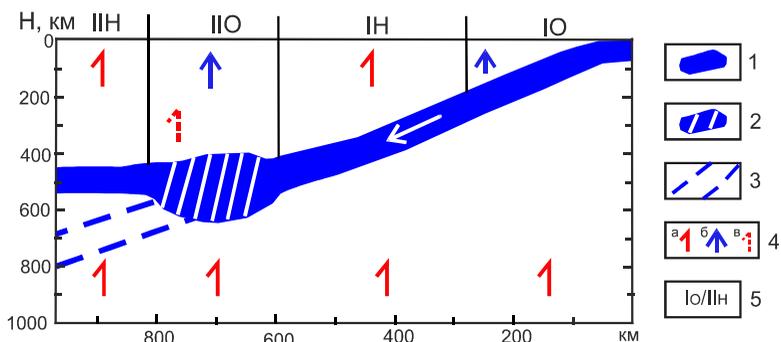


Рис. 4. Редокс-условия в литосфере при субдукции слэба.

Условные обозначения: 1 – погружающийся слэб; 2 – участок застойного слэба в мантийной транзитной зоне; 3 – участок слэба, проходящий зону МТЗ; 4 – флюидный поток: а – восстановленный, б – окисленный, в – восстановленный при отсутствии застойной части слэба; 5 – окисленные (Io) и восстановленные (Iih) области в литосфере.

ГЛАВА 4. Свойства магматических пород ильменитовой и магнетитовой серий Сихотэ-Алиньского орогенного пояса

В главе рассмотрена связь магматических пород САОП с условиями кристаллизации в пространстве и времени.

Согласно взглядам Д.М. Печерского [Печерский, 1964] редокс-условия кристаллизации магматических пород определяются, в первую очередь, фугитивностью кислорода в очаге магматизма. Ш. Ишихара [Ishihara, 1977] предполагал, что ильменитовые породы образуются из магнетитовых магм за счет переработки органического углерода аккреционных комплексов. При этом разделение магматических пород на ИС и МС не подразумевает существенных различий в петрологическом составе, в крайнем случае, только на уровне аксессуарных минералов. Ряд геологов, особенно при составлении описаний к листам геологических карт, связывают породы ильменитовой или магнетитовой серии со стратиграфическими магматическими комплексами или возрастными интервалами. Рассмотрим эти взаимоотношения для САОП.

Первое защищаемое положение:

Магматические породы Сихотэ-Алиньского орогенного пояса разделяются на региональные зоны преимущественного развития ильменитовой или магнетитовой серий. В этих зонах присутствуют идентичные по петрохимическому составу, степени фракционирования, типу, глубине кристаллизации и возрасту магматические образования.

На рис. 5 показано распределение интрузивных (А) и эффузивных (Б) магматических пород (различие в глубине кристаллизации) ИС и МС по отношению к петрохимическому составу. Установлено, что принадлежность магматических пород к ИС или МС практически не связана со степенью фракционирования (рис. 6А) и их типом (рис. 6Б) (А, I или S). Аналогичную картину дает и диаграмма разделения пород на S и I- типы Б. Чаппелла и А. Вайта [Chappell, White, 1974], мы используем вариант, предложенный Д. Маеда [Maeda, 1990].

Анализ данных по ильменитовой и магнетитовой сериям магматических пород САОП показал отсутствие прямой связи между этими данными и изменениями возраста магматических пород, определенного для САОП U-Pb методом (рис. 1).

В САОП выделяют следующие этапы магматизма: I) готерив-раннеаптский (133-120 млн лет); II) поздний апт-альб-сеноманский (120-94 млн лет); III) турон-раннепалеоценовый (94~60 млн лет); IV) позднепалеоцен-раннеэоценовый (~60-53 млн лет) и V) позднеэоцен-раннечетвертичный (от 53 млн лет) [Геодинамика..., 2006].

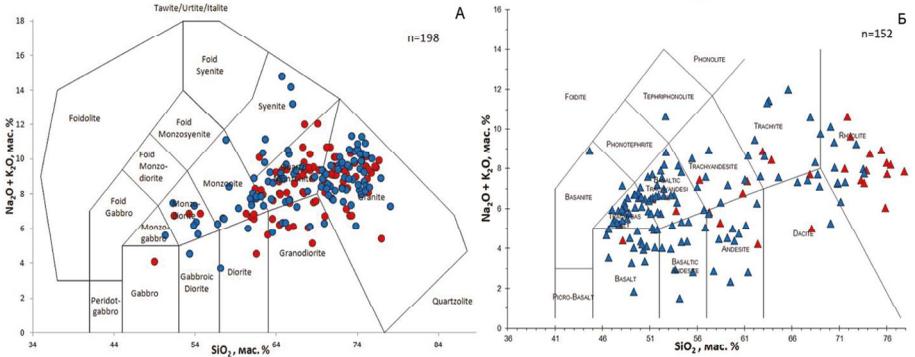


Рис. 5. Распределение пород МС (синие) и ИС (красные) в САОП по отношению к петрохимическим типам [Талтыкин и др., 2024].

А – интрузивы (границы и названия по [Middlemost, 1994]), Б – эффузивы (на основе [Le Maitre et al, 2002]).

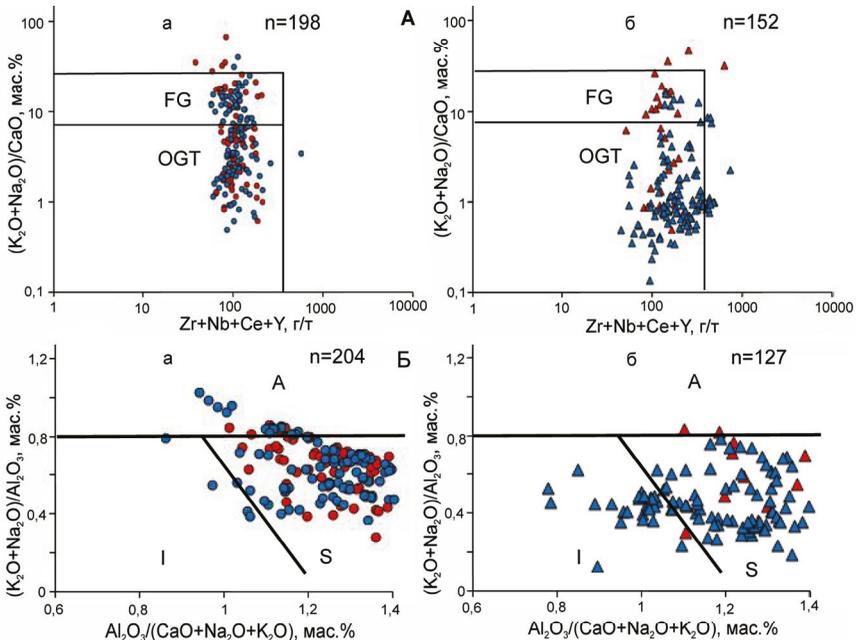


Рис. 6. Дискриминационные диаграммы связи пород ИС (красные) и МС (синие) с типом: а – интрузивы, б – эффузивы [Талтыкин и др., 2024].

А – Основа [Walén et al., 1987], FG – фракционированные магматические породы, OGT – нефракционированные I- и S-типа. Б – основа [Maeda, 1990], А, I, S – типы магматических пород.

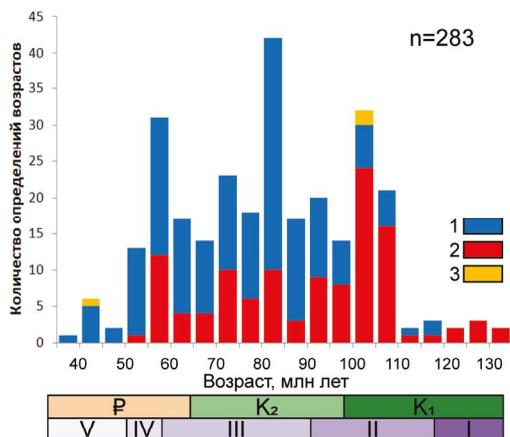


Рис. 7. Возраст магматических пород Сихотэ-Алиньского орогенного пояса, серии (1 – магнетитовая МС 2 — ильменитовая ИС; 3 – ИС), геохронологическая шкала и этапы магматизма [Талтыкин и др., 2024].

Была проанализирована связь ильменитовой и магнетитовой серий магматических пород САОП с возрастом (U-Pb методом). Прямой зависимости здесь сразу не просматривается (рис. 7). К.Дж.Р. Харт с коллегами [Hart et al., 2004] не нашел связи возраста с ильменитовой и магнетитовой сериями раннемеловых интрузивов на Аляске, а Т. Такаги не выявил её для меловых и палеоген-неогеновых интрузивов Японии [Takagi, 2004].

Второе защищаемое положение:

Ильменитовые породы I этапа магматизма (133–120 млн лет) относятся к коллизионным, а магнетитовые породы V этапа (моложе 52 млн лет) к надсубдукционным. Остальные магматические породы II – IV этапов относятся к «смешанным сериям».

На рис 8 показаны диаграммы [Pearce et al., 1984; Великославинского С.Д., 2003; Maeda, 1990] для идентификации геодинамических обстановок формирования интрузий среднего-кислого составов ИС и МС в САОП (221 образец гранитоидов).

На рис. 9–10 показано распределение магматических пород ИС и МС на I и II этапах.

К концу сеномана был сформирован орогенный пояс с континентальной корой [Grebennikov et al., 2016; Khanchuk et al., 2016]. Региональные ильменитовые и магнетитовые зоны проявились уже в первые два этапа магматизма. Первый этап, связанный с подвижками по системе разломов Тан-Лу, содержит только Хунгарийские граниты ИС при отсутствии эффузивных аналогов [Рязанцева и др., 1998]. Второй этап - орогенный, магматизм представлен породами ИС и МС.

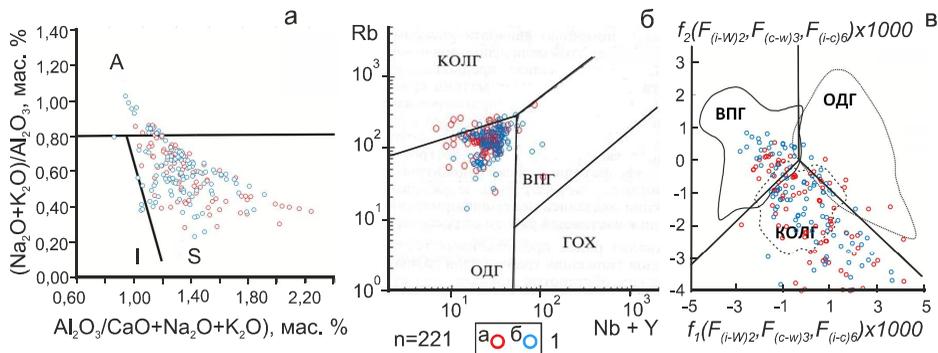


Рис. 8. Дискриминационные диаграммы Maeda, 1990(a); Pearce et al., 1984(б); Великославинского С.Д., 2003(в).

Условные обозначения: 1 – гранитоиды САОП ильменитовые (а), магнетитовые (б). Обстановки формирования гранитоидов: ВПГ(А) – внутриплитные, КОЛГ(С) – коллизионные, ОДГ(И) – островодужные (субдукционные и обстановки активных континентальных окраин).

$$f_1(F_{(i-w)2}, F_{(c-w)3}, F_{(i-c)6}) = 196.203\text{SiO}_2 + 753.953\text{TiO}_2 + 481.96\text{Al}_2\text{O}_3 + 92.664\text{FeO}^* + 521.5\text{MgO} + 374.766\text{CaO} + 7.571\text{Na}_2\text{O} - 584.778\text{K}_2\text{O} - 0.379\text{Ba} - 0.339\text{Sr} - 0.733\text{Rb} - 0.429\text{La} - 3.33\text{Ce} - 5.242\text{Nd} + 0.565\text{Sm} - 19823.8;$$

$$f_2(F_{(i-w)2}, F_{(c-w)3}, F_{(i-c)6}) = 1292.962\text{SiO}_2 + 4002.667\text{TiO}_2 + 1002.231\text{Al}_2\text{O}_3 + 1297.136\text{FeO}^* + 262.067\text{MgO} + 1250.48\text{CaO} + 1923.417\text{Na}_2\text{O} + 1009.287\text{K}_2\text{O} + 0.3634\text{Ba} - 0.325\text{Sr} - 0.701\text{Rb} + 0.8015\text{La} + 3.347\text{Ce} + 2.68\text{Nd} + 10.11\text{Sm} - 126860.$$

I этап коллизионный. 3 точки из массива Горбунский (131 млн лет) на диаграммах Maeda и Великославинского попадают в зону коллизионных пород, а на диаграмме Pearce в верхнюю часть островодужных пород, что тоже относится к коллизионным обстановкам или обстановкам активных континентальных окраин.

II этап орогенный. 27 точек из 10 массивов. Ведут себя аналогично этапу I. Особой разницы между породами ИС и МС во втором этапе не наблюдается (рис. 10).

На рис. 11–12 показано распределение магматических пород ИС и МС в III, IV и V этапах. В III этапе произошли основные тектонические события. Магматизм в III и IV этапах (посторогенный) был представлен породами как ИС, так и МС. V этап связан, видимо, с началом субдукции Тихоокеанской плиты. Магматизм (моложе 52 млн лет) надсубдукционный (?) магнетитовый.

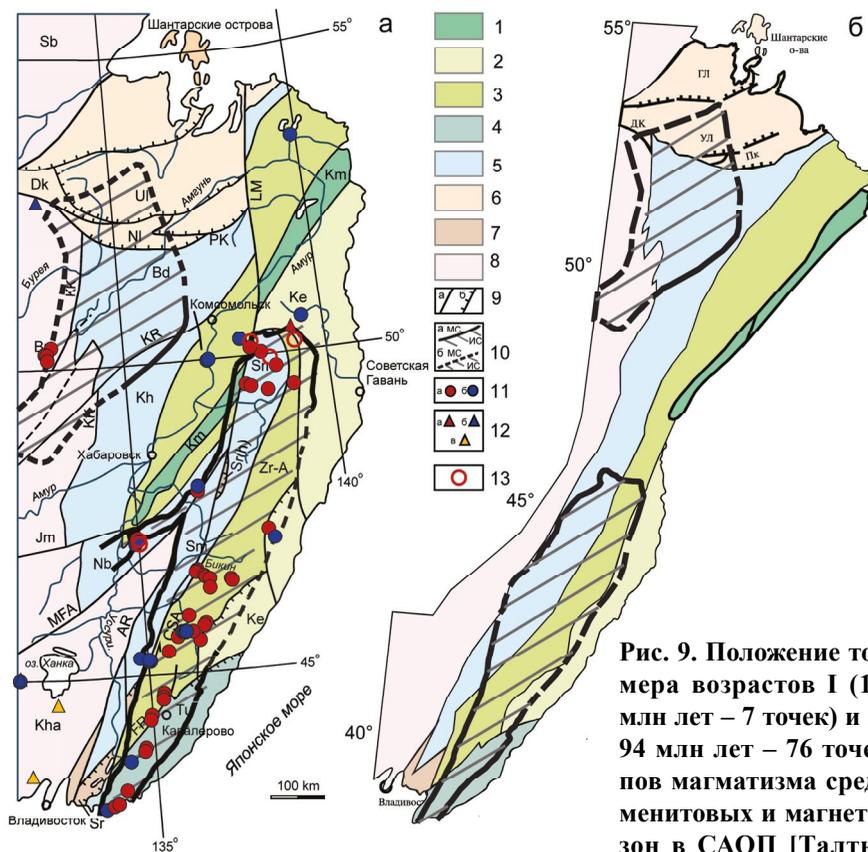


Рис. 9. Положение точек замера возрастов I (133–120 млн лет – 7 точек) и II (120–94 млн лет – 76 точек) этапов магматизма среди ильменитовых и магнетитовых зон в САОП [Талтыкин и др., 2024] (а), предположительное расположение ильменитовых и магнетитовых зон на сеноман (б). Условные обозначения 1–9 на рис. 1; 10 – граница распространения пород ИС, выделенная по комплексу признаков [Мишин и др., 2020] (а) и по соотношению $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ [Мишин и др., 2003; Меркулова, Мишин, 2015] (б); 11 – плутонические породы II этапа (а-ИС, б-МС); 12 – вулканические породы II этапа (а-ИС, б-МС); 13 – плутонические породы I этапа ильменитовые.

др., 2024] (а), предположительное расположение ильменитовых и магнетитовых зон на сеноман (б). Условные обозначения 1–9 на рис. 1; 10 – граница распространения пород ИС, выделенная по комплексу признаков [Мишин и др., 2020] (а) и по соотношению $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ [Мишин и др., 2003; Меркулова, Мишин, 2015] (б); 11 – плутонические породы II этапа (а-ИС, б-МС); 12 – вулканические породы II этапа (а-ИС, б-МС); 13 – плутонические породы I этапа ильменитовые.

Третий этап посторогенный. 28 точек из 10 массивов попадают в основном в коллизийную зону, частично и в область внутриплитных гранитоидов.

Четвертый этап посторогенный. 8 точек из 4 массивов есть практически во всех 3 основных зонах.

Пятый этап субдукционный. 4 точки из 2 массивов расположены в зоне островодужных пород (или обстановок активных континентальных окраин), хотя по диаграмме Maeda их можно отнести к коллизийным.

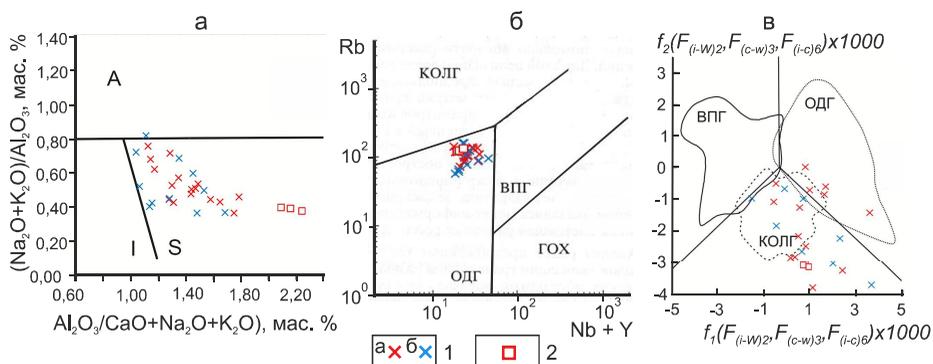


Рис. 10. Дискриминационные диаграммы Maeda, 1990(a); Pearce et al., 1984(б); Великославинского С.Д., 2003(в) для II (1) и I (2) этапов, ИС-красные, МС-синие. Условные обозначения на рис. 8. Для работы были использованы наши образцы магматических пород из массивов, имеющих U/Pb определения возраста.

Одним из основных результатов альб-сеноманского магматизма явилось формирование континентальной коры. Гранитно-метаморфический слой возникает, по мнению ряда авторов [Луцицкая, Соколов, 2021], как за счет гранитизации аккреционных комплексов в процессе орогенеза, так и за счет внедрения интрузивов. Исследования, проведенные в САОП, свидетельствуют о том, что здесь имели место условия для образования гранитно-метаморфического слоя за счет мощных толщ сильно смятых юрских и раннемеловых пород [Grebennikov et al., 2016; Khanchuk et al., 2016]. При этом все происходило в той же редокс-обстановке, что и проявления магматизма, которые мы можем сегодня исследовать в регионе. То есть, под зонами ильменитовой серии гранитно-метаморфический слой будет восстановленный, а под магнетитовой зоной – окисленный. По нашим представлениям, возникшая в результате орогенеза новая континентальная кора (в первую очередь осадочно-вулканогенный и гранитно-метаморфический слои) сохранила редокс-зональность, существовавшую в литосфере региона во время её формирования. Эти её свойства будут оказывать влияние на редокс-условия кристаллизации интрузивов в дальнейшем.

Третье защищаемое положение:

Образовавшаяся в результате орогенеза новая континентальная кора в пределах САОП сохранила магнитные свойства, существовавшие в литосфере при формировании гранитно-метаморфического слоя в альб-сеноманское время.

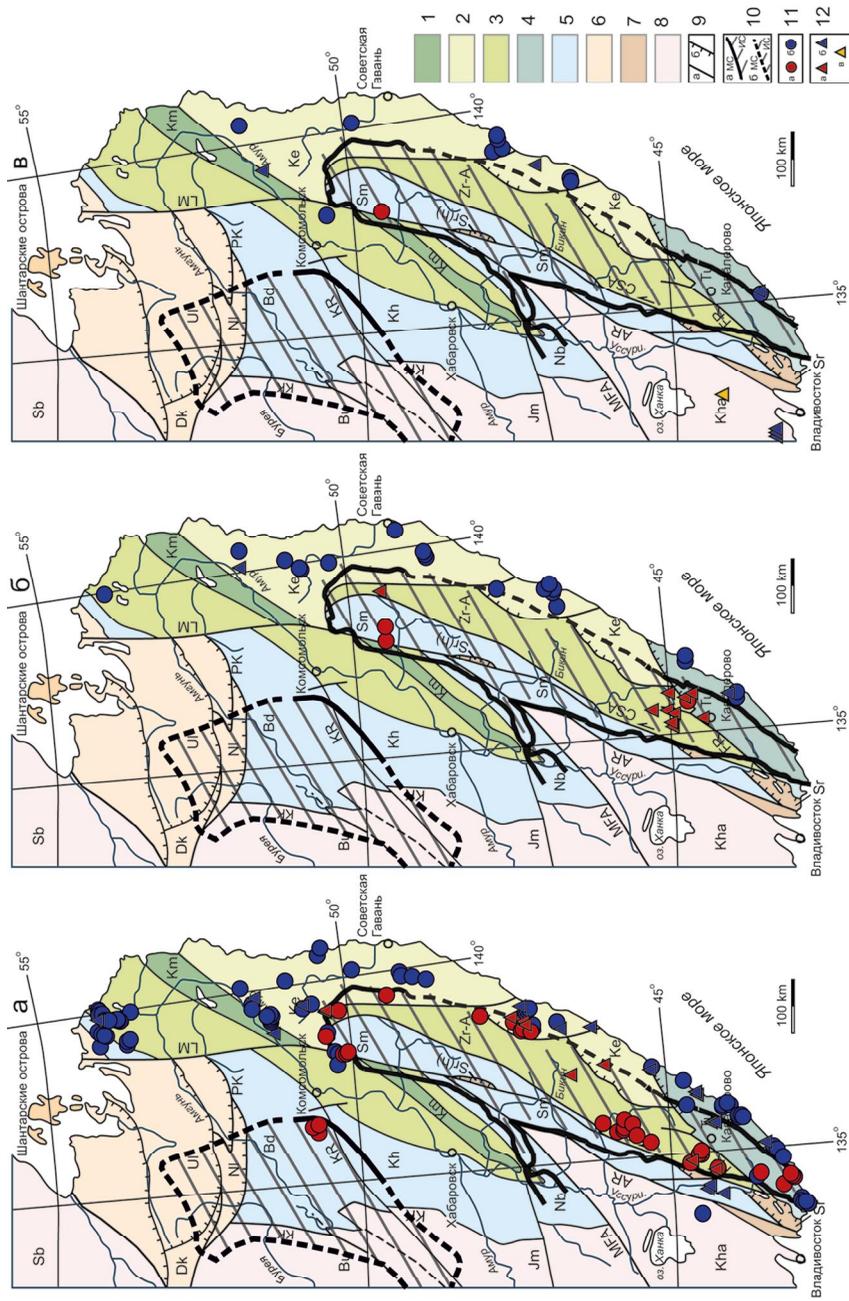


Рис. 11. Положение точек замера возрастов III (94-60 млн лет – 144 точки) (а), IV (60-53 млн лет – 35 точек) (б) и V (53~37 млн лет – 17 точек) (в) этапов магматизма среди ильменитовых и магнетитовых зон в САОП (основа - [Khanchuk et al., 2016] с дополнениями). Условные обозначения 1-12 на рис. 9, 12-в-НС.

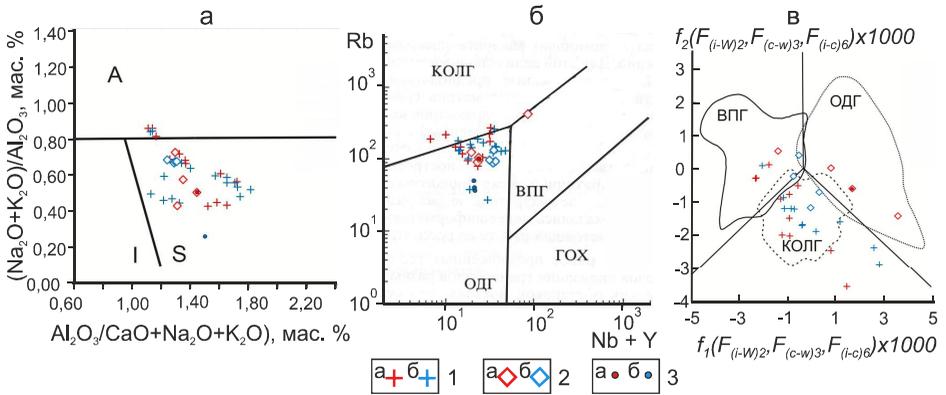


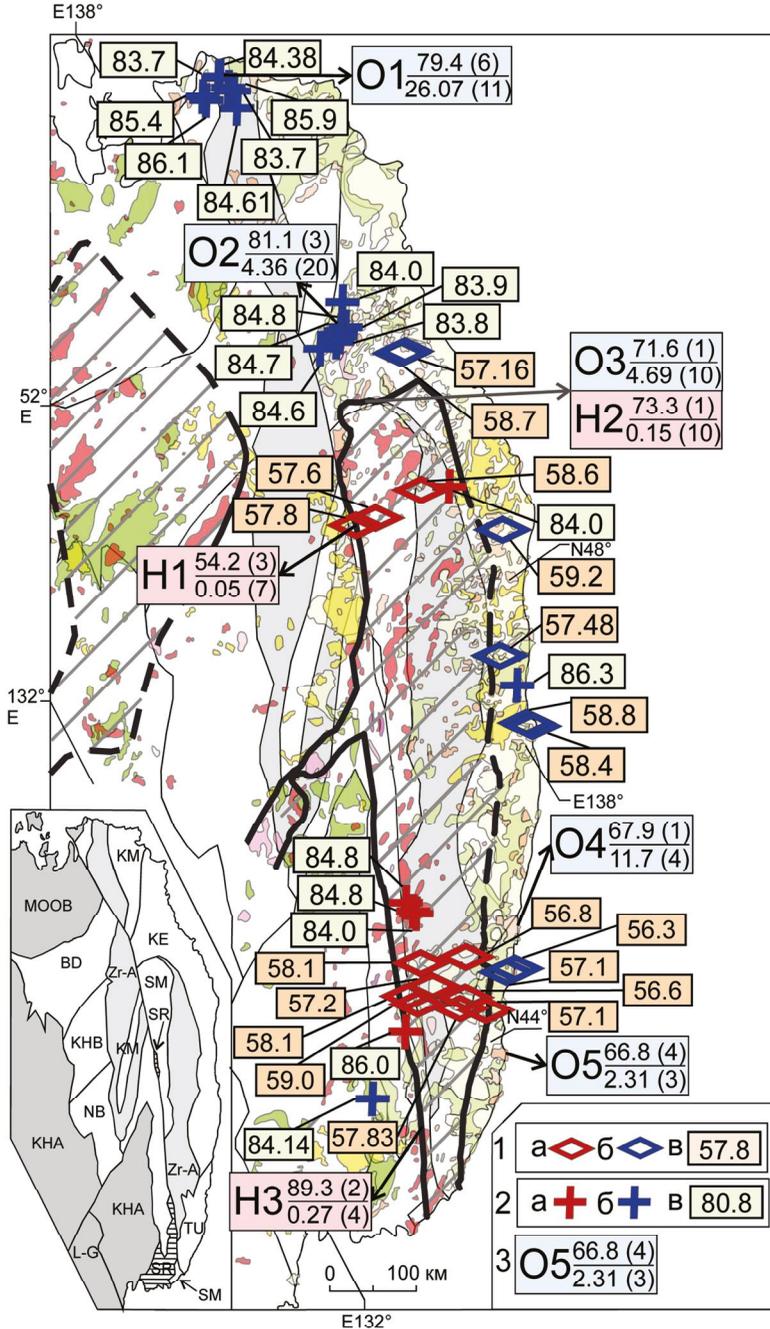
Рис. 12. Дискриминационные диаграммы Maeda, 1990(a); Pearce et al., 1984(б); Великославинского С.Д., 2003(в) для III (1), IV (2) и V (3) этапов, ИС-красные, МС-синие. Условные обозначения на рис. 8. Для работы были использованы наши образцы магматических пород из массивов, имеющих U-Pb определения возраста.

Представленные на рис. 13 материалы подтверждают данные, приведенные на тектонической карте Карсакова-Чжао, 2001: в ильменитовой зоне магматические породы (например, танетского (длительность 3,2 млн лет) и сантонского (длительность 2,7 млн лет) ярусов) ильменитовые, а в магнетитовой – магнетитовые.

Представляют значительный интерес так называемые «пограничные массивы», содержащие ильменитовые и магнетитовые серии (рис. 3). Если у Южного Сидимийского массива возраст этих серий различный (119 и 115 млн лет – это можно объяснить разными фазами магматизма), то у Аксакинского массива ИС и МС практически разновозрастные, т.е. различные части массива кристаллизовались в различных редокс-условиях. Пока ничем, кроме влияния верхней части земной коры САОП (осадочно-вулканогенного и гранитно-метаморфического слоев) на редокс-условия кристаллизации магматитов, мы объяснить эти факты не можем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в Сихотэ-Алиньском орогенном поясе изучение регионального распределения редокс-зональности магматических пород (в первую очередь интрузивов кислого – основного состава) позволило уточнить границы зон, а также выработать методику разделения магматических пород на окисленные (магнетитовые) и восстановленные (ильменитовые). На



основании изучения окислительно-восстановительных процессов при субдукции предложена модель возникновения в земной коре зон с восстановительными или окислительными условиями кристаллизации магматических пород. Модель удовлетворительно описывает закономерности распределения этих зон в Циркум-Пацифике. Взаимное расположение погружающейся (и ее форма: плоская, выгнутая, вогнутая) и континентальной плит при субдукции определяет конфигурацию редокс-зон. Исследования, проведенные в САОП, показали, что: а) редокс-условия кристаллизации магматических пород не связаны не только с петрохимическим составом (как и предполагал Ш. Ишихара), но и типом, и степенью фракционирования магматических пород; б) магматические породы САОП с возрастом 120-52 млн лет (по U-Pb датированию) присутствуют и в ильменитовой, и в магнетитовой зонах; в) региональные зоны преимущественного распространения магматических пород ильменитовой и магнетитовой серий, возникнув при орогенезе, продолжают существовать и далее, несмотря на существенные тектонические перемещения. Эти зоны оказывают влияние на редокс-условия кристаллизации более молодых магматических пород, а также являются факторами, контролирующими оловянное (олово-вольфрамовое) и золото-медно-порфировое оруденение регионе.

Показана связь магнитной восприимчивости MS с коэффициентом окисленности железа для САОП. Проведено определение тектонических обстановок по дискриминационным диаграммам Пирса, Великославинского и Маеда [Pearce et al., 1984; Великославинский С.Д., 2003; Maeda, 1990] для 5 этапов тектонических преобразований и магматизма в САОП. Использовались образцы из массивов с подтвержденным U-Pb возрастом.

Рис. 13. Распределение магматических пород танетского яруса палеоцена (19 точек) и сантонского яруса позднего мела (20 точек) по редокс-зонам в САОП [Талтыкин и др., 2024].

Условные обозначения к рис. 13: 1 – точки отбора магматических пород танетского яруса палеоцена: а – ИС, б – МС, в – абсолютный возраст; 2 – точки отбора магматических пород сантонского яруса позднего мела: а – ИС, б – МС, в – абсолютный возраст. 3 – массивы, для которых есть несколько измерений возрастов и магнитной восприимчивости: О1 – Бекчиулский, О2 – Тумнинский-1, О3/Н2 – Аксакинский пограничный, Н1 – Барку, О4 – Тернейский, О5 – Владимирский, Н3 – район г. Лазо (Вангоуский ?). На табличках: «О» – окисленный, «Н» – восстановленный; в числителе – средний возраст (количество определений); в знаменателе – средняя MS (количество измерений). Остальные условные обозначения (1 – 11) на рис. 3.

Результаты настоящих исследований в САОП расширяют наши знания о механизме формирования ильменитовых и магнетитовых магматических пород в зонах конвергентных окраин.

Рекомендуется продолжить работы по построению схемы редокс-зональности САОП и сопредельных территорий (в первую очередь северо-востока РФ) в свете металлогенических задач. Также особый научный интерес представляют массивы, имеющие одновозрастные породы ИС и МС.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. Мишин Л.Ф., Коновалова Е.А., **Талтыкин Ю.В.**, Крутикова В.О., Добкин С.Н., Юрченко Ю.Ю., Штарева А.В. Окислительные условия и связанная с ними геохимическая и металлогеническая зональности магматических образований Сихотэ-Алиньского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 3. С. 51-67 (2,08 п.л., авторский вклад – 35%). DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-3-51-67. Импакт-фактор РИНЦ: 1,189.

Mishin L.F., Konovalova E.A., **Taltykin Yu.V.**, Krutikova V.O., Dobkin S.N., Yurchenko Yu.Yu., Shtareva A.V. Redox Conditions and Related Geochemical and Metallogenic Zonation of Magmatic Rocks of the Sikhote Alin Orogenic Belt // Russian Journal of Pacific Geology. 2020. Vol. 14. № 3. P. 241–256. DOI: 10.1134/S1819714020030057. (1,96 п.л., авторский вклад – 35%). SJR: 0,352.

2. Мишин Л.Ф., Коновалова Е.А., **Талтыкин Ю.В.** Влияние окислительных условий на геохимическую и металлогеническую зональность на примере мезозойских магматических поясов Восточной Якутии // Петрология. 2022. Т. 30. № 3. С. 260-280 (2,57 п.л., авторский вклад – 35%). DOI: 10.31857/S0869590322030050. Импакт-фактор РИНЦ: 1,933.

Mishin L.F., Konovalova E.A., **Taltykin Yu.V.** Effects of Redox Conditions on Geochemical and Metallogenic Zoning: An Example of Mesozoic Magmatic Belts in Eastern Yakutia // Petrology. 2022. Vol. 30. № 3. P. 258–277. DOI: 10.1134/S0869591122030055. (2,45 п.л., авторский вклад – 35%). SJR: 0,463.

3. Коновалова Е.А., **Талтыкин Ю.В.**, Юрченко Ю.Ю., Мишин Л.Ф. Окислительно-восстановительный режим формирования пород Приисковского массива и его металлогенические следствия (Южный Сихотэ-Алинь, Приморье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. №3. С. 254-269. (1,96 п.л., авторский вклад – 30%). DOI: 10.31857/S0016777023030012. Импакт-фактор РИНЦ: 1,145.

Konovalova E.A., **Taltykin Yu.V.**, Yurchenko Yu.Yu., Mishin L.F. Redox Conditions of Formation of Rocks of the Priiskovy Massif and Their Metallogenic Consequences

(South Sikhote–Alin, Primorye) // *Geology of Ore Deposits*. 2023. Vol. 65. № 3. P. 240–254. DOI: 10.1134/S1075701523030017. (1,84 п.л., авторский вклад - 30%). SJR: 0,276.

4. Диденко А.Н., Архипов М.Ю., **Талтыкин Ю.В.**, Крутикова В.О., Коновалова Е.А. Петро-палеомагнитная характеристика габбродиоритов нижнеамурского комплекса журавлевско-амурского террейна (Сихотэ-Алиньский орогенный пояс) // *Тихоокеанская геология*. 2023. Т. 42. № 5. С. 57-75. (2,33 п.л., авторский вклад – 15%). DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-5-57-75. Импакт-фактор РИНЦ: 1,189.

Didenko A.N., Arkhipov M.V., **Taltykin Yu.V.**, Krutikova V.O., Konovalova E.A. The Petro- and Paleomagnetic Characteristics of Gabbrodiorites from the Lower Amur Complex of the Zhuravlevka-Amur Terrane (the SikhoteAlin Orogenic Belt) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2023. Vol. 17. № 5. P. 457–474. DOI: 10.1134/S1819714023050020. (2,21 п.л., авторский вклад - 15%). SJR: 0,352.

5. **Талтыкин Ю.В.**, Коновалова Е.А., Мишин Л.Ф., Юрченко Ю.Ю. Зональность окислительно-восстановительных условий кристаллизации магматических пород мел-палеогенового возраста Сихотэ-Алиньского орогенного пояса (Дальний Восток России) // *Тихоокеанская геология*. 2024. Т. 43. № 1. С. 56-72. (2,08 п.л., авторский вклад – 80%). DOI: 10.30911/0207-4028-2024-43-1-56-72. Импакт-фактор РИНЦ: 1,189.

Taltykin Yu.V., Konovalova E.A., Mishin L.F., Yurchenko Yu.Yu. Zonation of Redox Conditions during Crystallization of Cretaceous–Paleogene Igneous Rocks of the Sikhote–Alin Orogenic Belt (Russian Far East) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2024. Vol. 18. № 1. P. 50–65. DOI: 10.1134/S181971402401007X. (1,96 п.л., авторский вклад – 80%). SJR: 0,352.

Научные статьи, опубликованные в других рецензируемых научных изданиях, включенных в дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

6. **Талтыкин Ю.В.**, Мишин Л.Ф., Коновалова Е.А. Окислительно-восстановительный фон в земной коре Сихотэ-Алиньского орогенного пояса при кристаллизации магматитов мел-палеогенового возраста: связь с геодинамикой // *Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук*. 2020. № 4. С. 24-38. (1,74 п.л., авторский вклад – 80%). DOI: 10.34078/1814-0998-2020-4-24-38. Импакт-фактор РИНЦ: 0,229.

Иные публикации:

7. Коновалова Е.А., Мишин Л.Ф., **Талтыкин Ю.В.** Гранитоидные массивы зоны перехода окислительно-восстановительных условий (Сихотэ-Алиньский орогенный пояс) // *Региональные проблемы*. 2021. Т. 24. № 2–3. С. 60-63. (0,49 п.л., авторский вклад – 40%). DOI: 10.31433/2618-9593-2021-24-2-3-60-63. Импакт-фактор РИНЦ: 0,266.

8. **Талтыкин Ю.В.**, Мишин Л.Ф., Коновалова Е.А. Редокс-зональность Сихотэ-Алиньского орогенного пояса, связь с геодинамикой // Региональные проблемы. 2021. Т. 24. № 2–3. С. 81–84. (0,49 п.л., авторский вклад – 80%) DOI: 10.31433/2618-9593-2021-24-2-3-81-84. Импакт-фактор РИНЦ: 0,266.

9. Коновалова Е.А., Мишин Л.Ф., **Талтыкин Ю.В.** Ильменитовые и магнетитовые магматические породы Дальнего Востока // Региональные проблемы. 2022. Т. 25. № 3. С. 66-68. (0,37 п.л., авторский вклад – 40%) <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2022-25-3-66-68>. Импакт-фактор РИНЦ: 0,266.

10. Коновалова Е.А., Швалов В.А., **Талтыкин Ю.В.** Петромагнитные характеристики пород Маглойского массива (Хабаровский край, Амурский район): связь с условиями формирования и металлогенией // Региональные проблемы. 2024. Т. 27. № 3. С. 48-50. (0,37 п.л., авторский вклад – 40%) <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2024-27-3-48-50>. Импакт-фактор РИНЦ: 0,266.

11. **Талтыкин Ю.В.**, Коновалова Е.А. Металлогения и редокс-условия кристаллизации магматических пород Буреинского массива (Еврейская автономная область): предварительные материалы // Региональные проблемы. 2024. Т. 27. № 3. С. 45-47. (0,37 п.л., авторский вклад – 80%). <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2024-27-3-45-47>. Импакт-фактор РИНЦ: 0,266.

Талтыкин Юрий Викторович

Распределение ильменитовой и магнетитовой серий магматических пород мел–палеогенового возраста в Сихотэ–Алиньском орогенном поясе

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Подписано в печать
Формат 60x90 1/16. Объем: усл. печ. л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ