УДК 551.24+551.73+552.313

ПОПЕРЕЧНАЯ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ НИЖНЕКЕМБРИЙСКОЙ УДИНО-ВИТИМСКОЙ ОСТРОВОДУЖНОЙ СИСТЕМЫ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2025 г. В. С. Ланцева^{1, *}, И. В. Гордиенко¹, О. Р. Минина¹

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения РАН, д. 6а, ул. Сахьяновой, 670047 Улан-Удэ, Россия *e-mail: valery fox@list.ru

> Поступила в редакцию 11.10.2024 г. После доработки 21.03.2025 г. Принята в печать 27.03.2025 г.

В статье приведены новые петрогеохимические данные по нижнекембрийским вулканитам олдындинской свиты Удино-Витимской островодужной системы. Установлен высокий уровень накопления редкоземельных элементов (РЗЭ), высокая степень дифференциации легкой части спектра, обогащенность крупноионными литофильными элементами, наличие Nb-минимума в исследованных вулканитах, что подтверждает их островодужную природу. Впервые выявлена поперечная структурная зональность вулканитов вкрест простирания Удино-Витимской островодужной системы. Установленная зональность прослежена по степени дифференцированности вулканов, а также по минеральному и химическому составу пород. Рассчитаны глубины залегания ископаемой зоны субдукции. Предполагается, что эта зона находится в районе Еравнинских озер в пределах Еравнинской структуры, что подтверждается крупной гравитационной ступенью северо-восточного простирания.

Ключевые слова: Удино-Витимская островодужная система, Западное Забайкалье, поперечная структурная зональность, вулканизм, дифференцированная серия, петрогеохимия, нижний кембрий, субдукция, базальты, андезиты, дациты, риолиты

DOI: 10.31857/S0016853X25020044, EDN: EGUKSZ

введение

Удино-Витимская островодужная система Западного Забайкалья расположена в южной части Байкальской горной области и протягивается от устья реки Селенги на северо-восток до среднего течения реки Витим на расстоянии ~800 км при ширине от 80–100 до 200 км [8] (рис. 1).

Бо́льшую часть этой островодужной системы занимают позднепалеозойские гранитоиды, среди которых находятся участки с сохранившимися вулканогенными и осадочными образованиями, обособленными в виде Еравнинской, Олдындинской, Кыджимитской и др. вулканотектонических структур, объединенных в составе Удино-Витимской островодужной системы, впервые выделенной в начале 2000-х годов [7]. Удино-Витимская островодужная система входит в состав обширной Забайкальской зоны палеозоид, сформировавшейся на позднебайкальском фундаменте и включающей как каледонские, так и тесно связанные с ними герцинские структуры [7]. В длительном процессе становления Удино-Витимской островодужной системы были выделены следующие этапы [8]:

- венд (?)-ранний кембрий;
- средний ордовик-силур;
- средний палеозой;

- поздний палеозой-ранний мезозой.

На протяжении этих этапов последовательно формировались [8, 20]:

 – раннекембрийские центры островодужного (субдукционного) вулканизма;

 среднеордовикско-силурийские зоны прибрежно-морского осадконакопления и вулканизма завершающих этапов формирования островной дуги;

 среднепалеозойская (девон—раннекаменноугольная) зона наложенных задуговых осадочных прогибов и рифтогенных вулканотектонических структур на активной континентальной окраине;

 область ареального позднекаменноугольнопермско-триасового вулканизма и внутриплитного интрузивного магматизма.



Рис. 1. Современное тектоническое положение Удино-Витимской островодужной системы среди докембрийских и палеозойских структур Забайкалья (по данным [8], с изменениями).

Обозначены вулканотектонические структуры (арабские цифры в кружочках): 1 – Еравнинская; 2 – Олдындинская; 3 – Кыджимитская; 4 – Бейсыханская; 5 – Абагинская; 6 – Мылдылгенская; 7 – Курбино-Онинская; 8 – Джидотойская; 9 – Верхнекондинская.

Показано положение фрагментов геологических вулканотектонических структур (рамка): Еравнинская (красным); Олдындинская (синим); Кыджимитская (белым).

I – Сибирский кратон; 2–3 – террейны: 2 – докембрийские, 3 – палеозойские; 4 – Удино-Витимская островодужная система; 5 – вулканотектонические структуры; 6 – Джидинская островодужная система; 7 – тектонические разломы с элементами сдвигов

В истории развития Удино-Витимской островодужной системы в венде (?)-раннем кембрии нами реконструированы:

- Забайкальский океанический бассейн;

 надсубдукционная Олдындинская островная дуга;

- преддуговой и задуговой прогибы.

Эти структуры входят в состав Еравнинской зоны Байкало-Витимской складчатой системы, выделенной в центральной части Западного Забайкалья, в строении Еравнинской зоны были выделены комплексы, соответствующие структурным этажам [23, 24]: – каледонскому (ранний кембрий–средний ордовик);

- варисскому (поздний силур-ранний карбон);

- герцинскому (средний карбон-ранняя пермь).

Эти комплексы отвечали каледонскому, варисскому и герцинскому этапам в развитии Еравнинской зоны. Каледонский комплекс связан с развитием палеоазиатского комплекса, а варисский и герцинский комплексы были связаны с этапами, соответствующими по времени этапам развития Монголо-Охотского океанического бассейна [23, 24].

69

В нашем исследовании для каледонского этапа развития рассматриваемого региона принята геодинамическая модель [8, 10, 24]. В соответствии с этой моделью в раннем палеозое в пределах южной периферии Сибирского байкальского континента возникла энсиалическая островная дуга, формирование которой происходило в геодинамической связи с Забайкальским океаническим бассейном, существовавшем в венде-раннем палеозое к северу (современные координаты) от энсиалической островной дуги. Эта структура рассматривается как активная континентальная окраина западно-тихоокеанского типа [8, 24]. Каледонский этап развития Удино-Витимской островодужной системы завершился формированием покровно-складчатой структуры в конце ордовика-начале силура (?) [8, 14, 24].

Геодинамику каледонского этапа развития Удино-Витимской островодужной системы во многом определяло становление олдындинской свиты и озерного (олдындинского) субвулканического комплекса. В настоящее время в составе олдындинской свиты рассматриваются дифференцированные вулканиты, вулканомиктовые и карбонатные породы, ассоциирующие с субвулканическими телами озерного (олдындинского) комплекса [8, 24].

Олдынинская свита мощностью от 250 до 1600 м делится на две подсвиты. Нижняя подсвита представлена биогермными известняками и туфово-тефроидной толщей дацитов и андезитов с прослоями грубых вулканомиктов. Видовой состав археоциат, трилобитов и водорослей в известняках соответствует атдабанскому, ботомскому и отчасти тойонскому ярусам нижнего кембрия [22, 26, 29]. Верхняя подсвита сложена вулканитами андезит-дацитриолитового ряда, смешанными с вулканомиктами. Известняки здесь практически полностью отсутствуют.

Основной объем олдындинской свиты составляют вулканогенные породы, с которыми связаны колчеданно-полиметаллические руды крупнейшего в России Озерного месторождения [5, 9, 11, 13, 27].

Целью нашей статьи является исследование вулканогенных пород олдынинской свиты Удино-Витимской островодужной системы, определение состава этих пород на основе петрографического исследования с использованием петрологогеохимического анализа и выявление геодинамических обстановок их образования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье приведены полученные данные о петрографическом, петролого-геохимическом составе и условиях образования нижнекембрийских вулканитов олдындинской свиты Удино-Витимской островодужной системы. Описание прозрачных шлифов проводилось с помощью микроскопа Olympus BX51 (Olympus Corporation, Tokyo, Japan).

На основе петрографического исследования были отобраны 30 образцов для анализа петрогенных оксидов и микроэлементов. Анализ образцов проводился в ЦКП "Геоспектр" ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия) (табл. 1).

Исследование минерального состава пород выполнялось электронно-зондовым методом на растровом сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Germany) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Great Britain) ЦКП «Спектр» ГИН СО РАН (г.Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия) (аналитики Е.А. Хромова, Е.В. Ходырева).

Определение основных петрогенных оксидов проводилось химико-спектральными методами анализа в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия) (аналитики А.А. Цыренова, Л.В. Митрофанова, Б.Б. Лыгденова, Г.И. Булдаева, И.В. Боржонова).

Определение редких элементов (Rb, Ba, Sr, Nb, Zr и Y) выполнено рентгенофлуоресцентным методом анализа на кристалл-дифракционном волновом спектрометре ARL Perform'X (Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия) (аналитики Б.Ж. Жалсараев, Р.Ж. Ринчинова).

Содержание редкоземельных элементов в пробах определено методом ICP AES на Optima 2000 DV (PerkinElmer, Wellesley, USA) в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия) (аналитики Т.И. Казанцева, Л.А. Левантуева).

Определение содержаний редких и редкоземельных элементов в 24 пробах было выполнено методом ICP-MS в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия) (аналитик О.В. Зарубина). Классификация вулканитов олдындинской свиты проводилась с использованием диаграммы Nb/Y – Zr/TiO₂ [37] и TAS-диаграммы SiO₂ – Na₂O+K₂O.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УДИНО-ВИТИМСКОЙ ОСТРОВОДУЖНОЙ СИСТЕМЫ

Еравнинская вулканотектоническая структура

Еравнинская вулканотектоническая структура (далее по тексту — Еравнинская структура) расположена в пределах хребта Байсыхан и восточной части хребта Улан-Бургасы (Кыджимит— Заза-Холойское междуречье). В ее строение входят [8, 18, 19, 24] (рис. 2):

– олдындинская свита (ε_1);

– озерный (олдындинский) субвулканический комплекс (€₁);

- исташинская (D₃f₁) свита;

- химгильдинская (D₃fm₂) свита;

 магматические комплексы верхнего палеозоя. Также в Еравнинскую структуру входят толщи, выделенные из состава олдындинской свиты [8, 18, 19, 24] (см. рис. 2):

- озернинская (D₁-D₃f₁);

- ульзутуйская (D₃fm-C₁t);

- кыджимитская (C₁v);

- сурхэбтинская (C₂₋₃).

В разрезе Еравнинской структуры нами определено соотношение пород в нижнепалеозойских отложениях:

- 60% - вулканические породы;

– 18% – туффиты;

~0% – карбонатные отложения (в основном рифогенные известняки);

 - <5% – терригенные (в основном вулканомиктовые) породы.

В Еравнинской структуре развиты преимущественно [15] породы риолитового, дацитового, андезит-дацитового составов, лавово-пирокластические образования андезитового состава.

В бассейне р. Ульзутуй в составе олдындинской свиты преобладают лавовые, пирокластические и субвулканические фации в ассоциации с нижнекембрийскими биогермными археоциатововодорослевыми известняками. На водоразделе р. Ульзутуй—руч. Известковый олдындинская свита сложена дацитами, андезитами и археоциатовыми известняками, в подчиненном количестве присутствуют туфы.

Для вулканитов получены следующие возрастные датировки U–Pb методом по цирконам (здесь и далее) [8, 15, 24]:

 -532 ± 11 млн лет (андезидацит);

 -529 ± 3 млн лет (риолит).

На водоразделе рек р. Ульзутуй — р. Сурхебт разрез сложен преимущественно вулканитами андезит-дацит-риолитового ряда и вулканомиктами. Риолиты имеют возраст 516.7 \pm 4.4 млн лет [8, 15, 24]. Возраст карбонатных пород по многочисленным находкам фауны археоциат, трилобитов и водорослей соответствует атдабанскому, ботомскому и отчасти тойонскому векам раннего кембрия [6, 22, 29].

Новые данные, полученные по археоциатам и крибрициатам из биогермных известняков свиты, ограничивают время их накопления позднеатдабанским—ботомским веками раннего кембрия [25, 26]. Нижнепалеозойская олдындинская свита с несогласием перекрывается озернинской толщей нижнего (эмский ярус)—верхнего (нижнефранский подъярус) девона или, возможно, тектонически совмещена с отложениями позднего палеозоя [18, 24].

Олдындинская вулканотектоническая структура

Олдындинская вулканотектоническая структура (далее по тексту – Олдындинская структура) расположена на правобережье среднего течения р. Кыджимит, правого притока р. Витим, и занимает площадь около 100 км² (рис. 3).

Вулканогенные образования с линзами рифогенных известняков, содержащих фауну археоциат, являются стратотипом олдындинской свиты нижнего кембрия [3].

В состав вулканитов входят:

- 50% - лавы и туфы андезитов (доминируют);

 40% — риолиты и дациты с горизонтами игнимбритов, агломератовых туфов и туфобрекчий;

— 10% — базальты.

Известняки образуют линзовидные тела среди вулканогенных пород. Общая мощность вулканогенных пород составляет >2000 м. В трех пробах из кислых вулканитов, расположенных по правои левобережью р. Левая Олдында, получены конкордантные значения возраста [8, 16]:

- -534 ± 6 млн лет;
- 532 ± 10 млн лет;
- 529.8 ± 3.6 млн лет.

В состав раннегерцинского комплекса здесь входят ульзутуйская (D_3 fm $-C_1$ t) и кыджимитская (C_1 v) толщи, химгильдинская (D_3 fm₂) свита [19, 20]. Крылья Олдындинской структуры сложены вулканогенными породами среднего и основного составов (андезитами, андезибазальтами, базальтами и их туфами) с редкими линзами рифогенных известняков. Центральная часть



Рис. 2. Схема геологического строения фрагмента Еравнинской вулканотектонической структуры (по данным [11]). *1* – четвертичные отложения; *2* – меловые отложения впадин; *3* – юрская удинская свита; *4*–*5* – позднепермский бичурский комплекс: *4* – гранит-граносиениты, *5* – габброиды; *6* – позднепермская тамирская свита; *7* – девонско-каменноугольные химгильдинская и исташинская свиты, нерасчлененные; *8* – нижнекембрийская олдындинская свита; *9* – разрывные нарушения; *10* – место отбора проб из магматических пород (изотопный возраст пород, млн лет)

структуры образована преимущественно вулканитами кислого состава (дациты, риодациты и риолиты). На риолитах с конгломератами в основании залегает ульзутуйская толща [16].

Кыджимитская вулканотектоническая структура

Кыджимитская вулканотектоническая структура (далее по тексту – Кыджимитская структура)

расположена в бассейне ручьев Сосновский и Хортяк (левобережье р. Кыджимит) (рис. 4).

В кыджимитском разрезе тектонически совмещены вещественные комплексы:

 вулканогенный нижнекембрийский (олдындинская свита);

 вулканогенно-терригенный девонско-нижнекаменноугольный (озернинская и кыджимитская толщи).



Рис. 3. Геологическая карта-схема Олдындинской вулканотектонической структуры в междуречье рек р. Левая Олдында – р. Химгильда (по данным [15, 17, 18]).

1 – четвертичные отложения; 2-6 – химгильдинская свита (D₃–C₁hm): 2 – полимиктовые песчаники, 3 – полимиктовые гравийные песчаники, прослои кварцевых гравелитов, 4 – кварцевые песчаники, 5 – линзы полимиктовых конгломератов, 6 – тонкое ритмичное переслаивание мелкозернистых песчаников, алевролитов, глинистокремнистых сланцев с прослоями известковистых алевролитов; 7-переслаивание туфоалевролитов, туфопесчаников, туффитов, глинисто-карбонатных сланцев в ульзутуйской толще (D_3-C_1 ul); 8-11 – кыджимитская толща (D_3-C_1 kd): 8 – туфопесчаники, туфоалевролиты с прослоями и линзами карбонатных песчаников, туфогравелитов, конглобрекчий, 9 — розоватые детритовые алевритистые известняки, 10-11 — вулканиты (D-C₁): 10 — псефитовые кластолавы кислого состава, 11 – конгло-брекчии; 12–19 – олдындинская свита (€101): 12 – фельзиты, 13 – линзы мраморизованных известняков с археоциатами, 14 - риолиты, 15 - андезиты, 16 - туфы кислого состава, 17 - туфы смешанного состава, 18 - туфы среднего состава, 19 - агломератовые туфы кислого состава; 20 - порфировидные крупнозеристые граниты витимканского комплекса (PZ_{3V}); 21 – мелкозернистые граниты, граносиениты бичурского комплекса (P_{2b}); 22 - габбро (PZ₁ at); 23 - зона рассланцевания пород; 24 - тектонические нарушения: a - надвиг, $\delta -$ достоверные разломы, в – предполагаемые разломы; 25 – место отбора проб для изотопного исследования; 26 – элементы залегания; 27 – высотные отметки (м); 28 – место находок органических остатков; 29 – раннекембрийские (€1) археоциаты; 30-35 - позднепалеозойские (РZ₂) органические остатки: 30 - миоспоры, 31 - мшанки, 32 - водоросли, 33 - тентакулиты, 34 – строматопороидеи, 35 – конодонты Polygnatus sp.

Олдындинская свита здесь сложена базальтами, андезибазальтами и андезитовыми порфиритами с прослоями дацитов, кислыми туфами и туффитами. Возраст пород составляет [16, 18, 24]:

- дациты - 530.8 \pm 2.6 млн лет, СКВО = 0.0036 (левобережье руч. Сосновский, в.о.1485.8 м);

иритами (правобережье руч. Хортяк). и туффи-24]: = 0 0036 чительное распространение известняков, слага-

ГЕОТЕКТОНИКА № 2 2025

ющих единичные маломощные линзы.

-андезидациты -513.0 ± 3.8 млн лет, СКВО = 0



ГЕОТЕКТОНИКА №2 2025

Рис. 4. Карта-схема геологического строения водораздела между ручьями руч. Эпидотовый—руч. Александровский левого берега р. Кыджимит (по данным [15, 17]).

1 – четвертичные отложения (Q); 2 – кыджимитская толща (C₁vkd); 3 – озернинская толща (D₁₋₂oz); 4 – олдындинская свита (\mathbb{E}_1ol); 5 – базальты; 6 – тефротурбидиты (переслаивание туфоалевролитов, туфопесчаников, туфоаргиллитов, туффитов, детритовых известняков), дациты, риолиты, базальты и андезибазальты и их туфы; 7 – дациты, риолиты; 8 – андезибазальты; 9 – песчаники с прослоями конгломератов и гравелитов; 10 – переслаивание известковистых песчаников, алевролитов с прослоями алевритистых и биогермных известняков; 11 – переслаивание кремнистоуглистых аргиллитов, алевролитов, известняков; 12 – тела габброидов, дайки долеритов, сиенито-долеритов; 13 – граниты, лейкограниты, граносиениты бичурского комплекса($\gamma \xi P_2 b_3$); 14 – граносиениты и гранодиориты кыджимитского комплекса ($\gamma O_2 kd$); 15 – тектонические нарушения: a – надвиги, δ – достоверные, e – предполагаемые; 16 – тектоническое налегание; 17 – элементы залегания; 18 – место отбора проб и абсолютный возраст (млн лет); 19 – высотные отметки (м); 20 – места находок органических остатков; 21 – мшанки; 22 – споры; 23 – водоросли; 24 – тентакулиты; 25 – кораллы; 26 – археоциаты; 27 – конодонты Polygnatus sp.

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД ОЛДЫНДИНСКОЙ СВИТЫ

В изученных нами Еравнинской, Олдындинской и Кыджимитской вулканотектонических структурах нижнекембрийские вулканогенные породы олдындинской свиты представлены дифференцированной серией базальт-андезитдацит-риолитового состава с разным объемом отдельных разновидностей пород и состава вулканитов [15] (рис. 5, а, б; см. табл. 1).

Точки состава пород Еравнинской и Олдындинской структур на диаграмме $SiO_2-Na_2O+K_2O$ находятся в полях базальтов, андезибазальтов, андезитов, дацитов и риолитов (см. рис. 5, а).

Фигуративные точки Кыджимитской структуры находятся в полях трахибазальтов, трахиандезибазальтов, трахиандезитов. На диаграмме Nb/Y–Zr/TiO₂ (см. рис. 5, б) точки состава пород Еравнинской и Олдындинской структур также попадают в поля пород нормальной щелочности, при этом фигуративные точки Кыджимитской структуры находятся в полях субщелочных базальтов, щелочных базальтов, а также трахиандезитов.

Нами установлено, что все вулканогенные породы олдындинской свиты низкотитанистые, и поперек простирания структуры намечается вещественная зональность, выражающаяся в изменении петрографических свойств и увеличении суммы щелочей и калиевости.

По характеру распределения микроэлементов вулканогенные породы нижнекембрийской олдындинской свиты относятся к островодужным образованиям с характерными минимумами в концентрации таких высокозарядных элементов,



Рис. 5. Классификационные диаграммы (а) SiO₂-Na₂O+K₂O и (б) Nb/Y-Zr/TiO₂ для вулканитов олдындинской свиты (по данным [37]).

1-3 – вулканиты вулканотектонической системы: 1 – Еравнинская, 2 – Олдындинская, 3 – Кыджимитская

ГЕОТЕКТОНИКА № 2 2025

Таблица 1. Содержание окислов (мас.%) и элементов (г/т) в вулканогенных породах Удино-Витимской островодужной системы Западного Забайкалья

Компоненты	Образец										
	4562-б	4662/5	4571/1	B-14	P-270	4656/2	4567/3	P-306-3	4567/4	4656	
SiO ₂	49.20	49.20	57.00	60.5	61.00	61.8	62.20	62.60	63.50	63.50	
TiO ₂	0.83	0.85	1.22	0.73	0.90	0.98	0.99	0.76	0.91	0.87	
Al ₂ O ₃	20.00	16.50	20.40	15.1	14.80	15.49	15.16	15.35	15.20	15.50	
Fe ₂ O ₃	4.79	1.69	1.87	5.65	3.62	4.09	2.93	2.76	2.33	4.43	
FeO	4.09	7.36	5.24	6.73	4.66	3.61	4.67	2.65	5.34	3.22	
MnO	0.28	0.16	0.15	0.04	0.14	0.12	0.15	0.10	0.16	0.11	
MgO	5.32	7.94	2.80	1.72	1.94	2.29	1.81	2.40	1.85	1.41	
CaO	4.00	8.00	0.87	0.24	4.40	3.82	2.65	5.10	1.82	3.81	
Na ₂ O	4.58	3.45	7.52	3.67	2.70	4.05	5.36	2.50	5.81	4.21	
K ₂ O	1.58	0.17	1.04	1.73	3.10	0.98	1.09	2.90	0.83	1.26	
P ₂ O ₅	0.07	0.09	0.18	0.13	0.14	0.17	0.16	0.20	0.16	0.14	
LOI	5.57	3.97	2.21	3.14	1.66	1.73	1.35	2.10	1.99	1.68	
Total	100.31	<i>99.38</i>	100.50	<i>99.38</i>	99.10	99.11	98.53	99.41	99.90	100.14	
Na ₂ O/K ₂ O	2.89	20.29	7.23	2.1	0.87	4.13	4.91	0.86	7	3.34	
Ti	5597	3958	8319	4376	5396	5742	5578	4556	6395	6896	
Rb	34	2.224	31.153	22	46.77	33	12.472	121.25	11.4	35.146	
Ва	561	257.2	376.539	1550	1022.83	267	334.596	631.06	343	401.716	
Sr	523	676.3	271.097	553.49	257.3	315	231.092	184,24	243	311.679	
Nb	2.65	1.933	9.239	10	6.5	7.1	5.745	11.46	7.6	8.102	
Zr	65	35.99	218.807	180	167.68	192	124.645	243.65	205	186,.399	
Y	16	12.63	41.711	13	32.3	33	23.499	42.08	32	39.876	
La	10.0	4.47	15.906	10.59	18.63	21.0	9.607	23.75	15	19.585	
Ce	21.0	10.52	39.775	28.65	42.85	43.0	23.159	56.28	38	45.432	
Pr	2.63	1.42	5.488	4.51	5.48	5.7	3.039	7.27	4.77	5.896	
Nd	11.5	6.23	24.311	20.91	23.44	25	13.504	30.96	21	25.996	
Sm	2.73	1.62	6.249	5.84	5.4	5.9	3.347	7.23	5.1	6.11	
Eu	0.91	0.59	1.668	1.93	1.31	1.33	0.760	1.71	0.87	1.636	
Gd	3.01	1.92	6.643	8.74	5.63	4.32	3.661	7.36	5.1	6.366	
Tb	0.52	0.27	1.082	1.55	0.96	0.82	0.587	1.22	0.96	0.967	
Dy	3.20	1.74	7.778	6.76	6.16	6.6	4.265	7.88	6.2	7.068	
Но	0.70	0.36	1.557	1.39	1.33	1.41	0.868	1.72	1.41	1.392	
Er	2.00	1.04	4.722	3.69	3.8	4.01	2.813	4.96	4.10	4.224	
Tm	0.29	0.145	0.634	0.54	0.6	0.61	0.382	0.78	0.61	0.535	
Yb	1.90	0.978	4.472	3.4	3.88	4.14	2.765	4.94	4.13	4.09	
Lu	0.30	0.139	0.625	0.44	0.59	0.62	0.392	0.76	0.65	0.544	
Hf	2.03	0.717	6.081	0.6	4.83	5.4	3.745	6.51	5.7	5.081	
Та	0.17	0.098	0.345	0.96	0.42	0.44	0.233	0.73	0.47	0.212	
Th	1.44	0.364	3.698	0.86	3.94	4.15	2.184	6.45	4.13	3.674	
U	0.41	0.132	0.901	0.21	1.02	0.92	0.686	1.84	0.88	0.868	
$\Sigma REE+Y$	76.69	44.07	162.62	111.94	152.36	157.46	92.64	198.9	139.9	169.71	
La/Yb _(N)	3.56	3.09	2.4	2.1	3.24	3.43	2.34	3.25	2.45	3.23	
Eu/Eu*	0.24	0.26	0.2	0.21	0.18	0.19	0.16	0.18	0.13	0.2	

ГЕОТЕКТОНИКА №2 2025

Табл. 1. Продолжение

Компоненты	Образец										
	4595/1	P-269-2	4597	P-275-7	KO-48	266-1	260-1	0714	307/1	261-1	
SiO ₂	66.40	67.42	78.80	79.16	54.10	55.70	57.10	60.30	70.20	71.50	
TiO ₂	0.88	0.56	0.07	0.09	0.93	0.70	0.86	1.46	0.55	0.47	
Al ₂ O ₃	13.40	13.74	11.10	10.85	15.90	12.50	16.50	14.40	13.00	12.07	
Fe ₂ O ₃	2.73	3.34	0.61	0.94	1.18	3.27	3.82	2.26	1.74	3.03	
FeO	5.11	3.45	0.51	0.17	6.37	6.51	3.22	6.76	1.92	0.33	
MnO	0.03	0.03	0.01	0.03	0.11	0.17	0.01	0.24	0.04	0.05	
MgO	2.69	1.31	0.03	0.48	5.29	2.70	0.45	3.10	0.52	0.45	
CaO	0.40	0.55	0.08	0.25	9.45	7.10	1.37	2.36	3.28	1.37	
Na ₂ O	3.00	0.73	0.48	0.76	2.88	2.40	3.20	3.50	2.12	3.20	
K ₂ O	2.30	6.33	7.80	6.07	2.11	0.92	3.50	1.00	2.90	3.50	
P ₂ O ₅	0.20	0.09	0.03	0.02	0.14	0.17	0.10	0.16	0.12	0.10	
LOI	3.28	1.70	0.86	0.70	1.41	6.98	2.24	4.63	3.97	2.24	
Total	100.42	99.30	100.35	99.52	<i>99.8</i> 7	99.10	<i>99.13</i>	100.17	100.36	<i>99.13</i>	
Na ₂ O/K ₂ O	1.3	0.11	0.06	0.13	1.4	2.6	0,91	3.5	0.7	0.91	
Ti	6015	3357	676	540	6969	4197	5156	10074	3643	2818	
Rb	43	101.55	133	100.59	113	37.79	72.63	23	85	106.99	
Ва	222	2716.51	1065	553.11	482	176.12	366.61	290	481	356.56	
Sr	31	39.44	19	25.93	225	148.49	173.2	183	118	67.17	
Nb	12.6	6.85	9.4	8.36	16	16.12	23.45	12	22	12.51	
Zr	322	201.55	48	64.83	159	151.36	230.14	162	197	235.20	
Y	22	19.65	31	25.96	28	22.65	33.24	23	41	32.51	
La	21	9.24	22	23.53	36	19.86	32.7	40	39	29.20	
Ce	44	19.74	47	50.85	71	41.13	70.27	64	82	63.87	
Pr	5.4	2.29	5.5	5.91	8.2	4.75	8.39	6.6	9.4	7.65	
Nd	22	8.94	22	22.42	32	18.77	33.69	34	36	30.28	
Sm	4.44	2.02	5.2	5.08	6.2	3.98	7.09	7	7.4	6.49	
Eu	0.68	0.54	1.11	1.04	1.21	0.93	1.68	1.03	1.09	1.18	
Gd	4.00	2.32	5.1	4.54	5.4	4.14	6.69	6.3	7.1	6.12	
Tb	0.73	0.46	0.95	0.74	0.79	0.69	1.06	1.1	1.10	0.99	
Dy	4.34	3.36	5.7	4.79	5.7	4.42	6.55	6.3	7.8	6.32	
Но	0.97	0.76	1.24	1.01	1.13	0.93	1.38	1.3	1.61	1.36	
Er	3.01	2.28	3.68	2.86	3.37	2.69	3.81	4.1	4.69	3.82	
Tm	0.45	0.36	0.52	0.44	0.47	0.43	0.58	0.67	0.70	0.60	
Yb	3.03	2.48	3.45	2.79	3.26	2.81	3.67	6	4.65	3.87	
Lu	0.48	0.39	0.52	0.41	0.49	0.43	0.55	0.7	0.71	0.58	
Hf	8.3	5.06	2.60	2.62	4.32	3.90	6.04	6.8	6.1	6.54	
Та	0.72	0.59	0.68	0.64	1.18	1.23	1.66	1.48	1.83	1.01	
Th	9.8	7.10	5.9	5.25	12.4	7.67	7.80	10.2	15	8.55	
U	2.06	1.43	1.88	1.40	3.55	2.33	2.34	2.94	3.93	1.94	
∑REE+Y	136.53	74.83	154.97	152.37	203.22	128.71	211.35	202.1	239.25	194.84	
La/Yb _(N)	4.68	2.52	4.31	5.69	7.46	4.78	6.02	4.51	5.67	5.09	
Eu/Eu*	0.12	0.19	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.12	0.11	0.14	

Табл. 1. Окончание

Компоненты	Образец										
	265-1a	265-16	9078	9097	P-318-1	K-21	K-16	K-22	K-28	K-28a	
SiO ₂	73.05	75.79	48.00	50.20	51.00	55.50	54.80	47.10	57.20	55.70	
TiO ₂	0.16	0.12	1.21	0.72	1.05	1.15	1.00	1.34	1.09	1.00	
Al ₂ O ₃	13.92	11.80	17.40	13.90	16.20	19.05	14.70	22.30	17.00	14.70	
Fe ₂ O ₃	0.98	1.95	3.72	2.03	4.73	3.37	2.62	1.61	5.02	2.31	
FeO	1.02	< 0.1	5.37	8.98	6.27	4.17	5.84	5.04	2.64	6.00	
MnO	0.05	0.52	0.14	0.24	0.15	0.11	0.18	0.17	0.12	0.15	
MgO	0.80	0.20	5.79	7.50	4.50	2.29	5.18	4.49	2.79	4.43	
CaO	1.24	1.28	7.31	9.44	7.00	5.37	8.23	10.17	3.73	8.76	
Na ₂ O	2.79	4.42	3.40	2.66	3.00	5.01	3.03	3.21	4.81	2.54	
K ₂ O	2.85	1.61	2.47	1.56	2.80	1.16	2.33	0.73	3.39	1.70	
P_2O_5	0.03	0.02	0.27	0.14	0.25	0.30	0.21	0.20	0.32	0.21	
LOI	2.56	1.53	5.14	2.08	2.42	2.44	1.79	3.60	1.65	2.33	
Total	99.45	99.24	100.22	99.45	99.27	<i>99.92</i>	99.91	<i>99.96</i>	99.76	<i>99.83</i>	
Na ₂ O/K ₂ O	0.97	2.74	1.4	1.7	1.1	4.3	1.3	4.4	1.41	1.49	
Ti	956	719	7154	4316	6295	6894	5995	8033	6535	5995	
Rb	101.68	59.69	64	53	169.48	42	44.10	33.84	89.79	59.76	
Ba	514.92	476.81	840	81	234.63	239	883.52	115.29	1355.45	485.98	
Sr	102.52	147.30	717	134	223.16	395	544.80	782.13	764.10	556.65	
Nb	11.52	9.58	3	7	11.10	9	9.56	4.64	13.96	9.98	
Zr	200.36	142.18	136	81	158.09	119	140.51	129.12	195.77	144.14	
Y	35.19	28.91	20	10	24.12	20	23.98	21.15	28.25	26.23	
La	35.77	32.77	19	4.2	15.00	20	17.79	10.48	30.93	19.59	
Ce	75.65	66.42	39	7.9	31.35	37.5	35.04	24.95	57.78	41.06	
Pr	8.71	7.50	4.9	—	3.84	3.85	4.20	3.39	6.63	4.89	
Nd	33.43	28.74	21.5	3.25	15.87	17.5	16.44	15.11	24.24	19.11	
Sm	6.83	5.68	5.0	0.96	3.86	3.9	3.83	3.98	5.14	4.32	
Eu	1.25	1.28	1.6	0.30	1.11	1	1.09	1.31	1.02	1.30	
Gd	6.22	5.23	5.1	0.84	4.18	5	3.91	3.90	4.86	4.35	
Tb	0.99	0.82	0.82	0.31	0.71	0.67	0.62	0.59	0.72	0.69	
Dy	6.34	5.13	4.35	1.8	4.54	3.8	3.77	3.62	4.44	4.24	
Но	1.35	1.10	0.84	0.47	0.98	0.86	0.80	0.74	0.93	0.88	
Er	3.92	3.18	2.4	1.38	2.72	2.1	2.29	2.07	2.69	2.54	
Tm	0.61	0.51	_	—	0.42	0	0.35	0.30	0.40	0.39	
Yb	4.06	3.33	2.05	1.56	2.73	1.94	2.22	1.82	2.48	2.36	
Lu	0.62	0.50	0.31	0.30	0.41	0.3	0.34	0.27	0.40	0.37	
Hf	5.66	4.21	_	—	4.08	4.40	3.55	2.87	4.74	3.49	
Та	0.99	0.84	_	_	0.80	0.81	0.67	0.31	0.78	0.68	
Th	10.84	9.05	_	—	5.91	6.0	5.27	0.65	8.30	5.23	
U	3.03	2.68	_	_	1.95	1.70	1.33	0.26	2.27	1.67	
$\Sigma \overline{REE+Y}$	220.94	191.1	126.87	33.27	111.84	118.42	116.67	93.68	170.91	132.32	
La/Yb _(N)	5.95	6.65	6.3	1.8	3.7	6.96	5.42	3.89	8.43	5.61	
Eu/Eu*	0.14	0.18	0.24	0.25	0.21	0.17	0.21	0.25	0.15	0.23	

Примечание. "-" - Содержание окислов и элементов не определялось.



Рис. 6. График распределения содержаний микроэлементов в базальтах, нормированных к примитивной мантии (по данным [36]).

Распределение E-MORB и OIB (по данным [35]).

1–2 – вулканотектоническая структура: 1 – Еравнинская, 2 – Кыджимитская; 3–4 – зона Курило-Камчатской островной дуги: 3 – фронтальная (по [12]), 4 – тыловая (по [28])

как Та и Nb и максимумами содержания флюидмобильных элементов, таких как Ba, Sr, Pb (рис. 6).

Содержание микроэлементов в породах Кыджимитской структуры значительно выше, чем в породах Еравнинской структуры. Распределение микроэлементов в базальтах Еравнинской структуры почти совпадает с полем распределения микроэлементов в базальтах фронтальной зоны Курило-Камчатской островной дуги, тогда как диапазон распределения микроэлементов Кыджимитской структуры совпадает с полем тыловой зоны Курило-Камчатской островной дуги [12, 28].

При анализе распределения редкоземельных элементов, нормированных к хондриту, мы обратили внимание на то, что в базальтах Еравнинской структуры отмечается истощение тяжелых РЗЭ, в то время как для лав Кыджимитской структуры отмечен рост концентраций всех РЗЭ (рис. 7).

Распределение РЗЭ в базальтах Еравнинской структуры совпадает с полем распределения РЗЭ в базальтах фронтальной зоны Курило-Камчатской островной дуги, а также с распределением РЗЭ характерных для E-MORB.

Распределение РЗЭ в базальтах Кыджимитской структуры совпадает с полем тыловой зоны Курило-Камчатской островной дуги и тяготеет к спектру распределения РЗЭ, типичных для OIB.

На классификационной диаграмме Nb/Y–Zr/Y точки составов базальтов и андезибазальтов раннекембрийской олдындинской свиты сосредоточены в поле островодужных базальтов [31] (рис. 8, а).

На дискриминационной диаграмме Th/Yb–Nb/ Yb фигуративные точки базальтов олдындинской свиты лежат в поле континентальных дуг [33] (см. рис. 8, б).

На дискриминационных диаграммах Hf—Th— Nb и Hf—Th—Ta точки составов основных пород Еравнинской, Олдындинской и Кыджимитской вулканотектонических структур располагаются в поле островодужных базальтов (рис. 9, а, б).

Проведенный геохимический анализ полученных данных указывает на формирование



Рис. 7. Спектры распределения нормированных к хондриту содержаний редкоземельных элементов в базальтах (по данным [36]).

1–2 – вулканотектоническая структура: *1* – Еравнинская, *2* – Кыджимитская; *3–4* – зона Курило-Камчатской островной дуги: *3* – фронтальная (по [12]), *4* – тыловая (по [28])



Рис. 8. Классификационная диаграмма (a) Nb/Y–Zr/Y (по [31]) и (б) дискриминационная диаграмма Th/Yb–Nb/Yb (по [33]) для базальтов нижнекембрийской олдындинской свиты.

Обозначено: ARC – островодужные базальты; N–MORB – нормальные базальты океанического хребта; OIB – базальты океанических островов; PM – примитивная мантия; DM – неглубокая обедненная мантия; DEP – глубоко истощенная мантия; EN – обогащенный компонент; REC – переработанный компонент; EMORB – обогащенные базальты океанического хребта.

I-3 – вулканиты вулканотектонической системы: *I* – Еравнинская, 2 – Олдындинская, 3 – Кыджимитская



Рис. 9. Дискриминационные Hf–Th–Nb и Hf–Th–Ta диаграммы для базальтов. Распределение N-MORB, E-MORB, OIB и островодужных базальтов (по [38]). I – N–MORB; II – E-MORB; III – OIB; IV – островодужные базальты. *I–3* – вулканиты вулканотектонических структур: *I* – Еравнинская, *2* – Олдындинская, *3* – Кыджимитская

вулканитов олдындинской свиты в надсубдукционных (островодужных) условиях.

Для генетического обоснования выявленной вещественной зональности нижнекембрийского вулканизма Удино-Витимской структуры мы сравнили ее строение с Курило-Камчатской островной дугой и другими структурами территорий, прилегающих к территории Забайкалья.

В пределах Курило-Камчатской островной дуги поперечная зональность вулканизма (вкрест дуги) обоснована и детально охарактеризована по степени дифференцированности вулканов, химическому и минеральному составу слагающих их лав и составу включений, привнесеных лавами [1, 2, 4].

С использованием этих характеристик профиль поперечной зональности нижнекембрийского вулканизма олдындинской свиты был проведен поперек ее простирания с юго-востока на северозапад, т.е. от фронтальной зоны Еравнинской структуры через промежуточную зону Олдындинской структуры к тыловой зоне Кыджимитской структуры (рис. 10).

Зональность по степени дифференцированности вулканов. Состав нижнекембрийских вулканитов Удино-Витимской островодужной системы значительно варьирует от базальтов (47–51% SiO₂) до риолитов (70–75% SiO₂). Нами был определен состав пород: - 30–35% – андезиты (наиболее распространенные породы);

- 20% дациты;
- 25% риолиты;
- 10% базальты;
- 15% андезибазальты.

Наиболее распространены сильнодифференцированные базальт (андезибазальт)-андезит-дацитриолитовые ассоциации пород.

В Еравнинской структуре лавы фронтальной зоны юго-восточной части Удино-Витимской островной дуги дифференцированы значительнее, чем в ее тыловой части, что, по кремнеземистости, выражается в бо́льшей частоте встречаемости каждого типа пород.

В Кыджимитской структуре в тыловой зоне северо-западной части Удино-Витимской островной дуги преобладают слабо- (базальт-андезибазальтовой) и умеренно-дифференцированные (базальт-андезибазальт-андезитовой) ассоциации пород. Сильно-дифференцированная (базальт (андезибазальт)-андезит-дацит) ассоциация пород в тыловой зоне дуги встречается крайне редко.

Таким образом, в распределении ассоциаций вулканитов по кремнекислотности устанавливается поперечная зональность, выраженная в более широком проявлении глубоко



Рис. 10. Схема поперечной зональности Удино-Витимской островодужной системы.

Обозначено: ВТС – вулканотектоническая структура.

Показано (линии) зоны Удино-Витимской островной дуги:

А-А' – фронтальная (низко-калиевые породы);

Б-Б' – промежуточная (умеренно-калиевые породы);

В-В' – тыловая (высоко-калиевые породы).

1 — олдындинская свита, 2 — вулканотектонические структуры, 3 — предполагаемая зона субдукции, 4 — профиль поперечной зональности

дифференцированных ассоциаций пород во фронтальной зоне Удино-Витимской островной дуги.

Минералогическая зональность. Содержание вкрапленников в вулканитах колеблется от 5–10% до 20–30%, однако преобладают умереннопорфировые разности с 15–20% вкрапленников. Основные различия в минеральных ассоциациях и в составе минералов лав проявляются в следующем:

 в базальтах фронтальной зоны отмечается пироксен-плагиоклазовый парагенезис минералов вкрапленников; в базальтах тыловой зоны наблюдается пироксен-амфибол-плагиоклазовый парагенезис;

 для андезитов и андезидацитов фронтальной зоны характерен пироксен-плагиоклазовый парагенезис, а для аналогичных лав тыловой зоны
плагиоклаз-амфибол-биотитовый.

Плагиоклазы лав фронтальной зоны с более высокими концентрациями Fe, чем плагиоклазы лав тыловой зоны, в одних и тех же разновидностях пород.

Геохимическая зональность. В близких по кремнеземистости лавах Удино-Витимской островодужной системы наблюдаются существенные вариации щелочности и железистости. По общему содержанию щелочей среди изученных вулканических пород выделяются лавы нормального и субщелочного рядов [34].

Вулканические породы нормального щелочного ряда распространены во фронтальной и промежуточной зонах дуги. Вулканические породы субщелочного ряда определены только в тыловой зоне.

По содержанию К₂О нами установлено:

 во фронтальной зоне Удино-Витимской островной дуги распространены лавы низкокалиевой (преобладают) и умереннокалиевой серий;

 в промежуточной зоне находятся лавы умеренно- и высококалиевой серий;

 в тыловой зоне находятся лавы высокои весьма высококалиевой серий.

Мы рассматриваем полученный химический состав пород в качестве доказательства наличия в регионе поперечной зональности. В сравнении с более мафическими разностями в кислых дацит-риолитовых сериях поперечная зональность по сумме щелочей проявлена слабо.

От фронта к тылу Удино-Витимской островной дуги во всех типах вулканитов по кремнекислотности четко возрастают средние концентрации не только калия, но и таких некогерентных и редких элементов, как Rb, Sr, U, Th, La, Ce (вместе со всей суммой легких лантоноидов), Nb, Zr, Hf, а также величины отношений Rb/Sr, La/Yb, Sr/Ce, Th/U, Zr/Y, La/Nb, Fe₂O₃/(FeO+Fe₂O₃).

Таким образом, поперечная вещественная зональность раннекембрийского вулканизма олдындинской свиты в немалой степени сопоставляется с подобной геохимической зональностью современной Курило-Камчатской островной дуги (рис. 11, а).

Используя метод расчета по [32], мы определили глубину и угол погружения Удино-Витимской островной дуги (см. рис. 11, б). Проведенное нами определение глубины залегания зон субдукции показало, что области плавления субдуцирующей Западно-Забайкальской океанической плиты во фронтальной части Удино-Витимской островодужной системы, в которой находится Еравнинская вулканотектоническая структура, погружены на глубину 100 км. В тыловой части Удино-Витимской островодужной системы очаги плавления океанической плиты резко погружены под окраину Сибирского континента в районе Олдындинской вулканотектонической структуры до глубины 180 км и до глубины 250 км в районе Кыджимитской вулканотектонический структуры.

Наличие крупной гравитационной ступени северо-восточного простирания косвенно подтверждает предполагаемое положение зоны субдукции Удино-Витимской островодужной системы в районе Еравнинских озер в Западном Забайкалье.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По проведенным нами исследованиям образцов пород получены новые результаты по характеристике вулканитов, слагающих основной объем олдындинской свиты. В изученных Еравнинской, Олдындинской и Кыджимитской вулканотектонических структурах Удино-Витимской островодужной системы олдындинская свита входит в состав нижнепалеозойского комплекса и во многом определяет геодинамику каледонского этапа ее развития.

В результате петролого-геохимического изучения вулканогенных пород установлено, что они представлены дифференцированной серией базальт-андезит-дацит-риолитового состава с разным объемом отдельных разновидностей пород и их составов в разных вулканотектонических структурах.

В Еравнинской и Олдындинской структурах преобладают базальты, андезибазальты, андезиты, дациты и риолиты нормальной щелочности, а в Кыджимитской структуре — субщелочные базальты, щелочные базальты, трахиандезибазальты, трахиандезиты. Все вулканогенные породы олдындинской свиты низкотитанистые и высокоглиноземистые. Их петрографический состав и суммы щелочей, а также калиевость изменяются поперек простирания структур.

Содержание микроэлементов в породах Кыджимитской структуры значительно выше, чем



Рис. 11. Вариационная диаграмма (а) средних содержаний K₂O относительно SiO₂ в раннекембрийских вулканитах (по данным [32]) и (б) график корреляции содержаний K₂O при SiO₂=55% в вулканитах вулканотектонических структур с глубиной залегания зоны субдукции (по данным [32]).

1–3 – вулканотектонические структуры: *1* – Еравнинская, *2* – Олдындинская, *3* – Кыджимитская; *4* – лавы вулканов Курило-Камчатской островной дуги (по [28])

в породах Еравнинской структуры, их распределение в базальтах Еравнинской и Кыджимитской структур отвечает разным зонам островной дуги — фронтальной зоне в Еравнинской и тыловой зоне в Кыджимитской структурах. На дискриминационных диаграммах Nb/Y–Zr/Y, Hf–Th–Nb и Hf–Th–Ta точки составов пород Еравнинской, Олдындинской и Кыджимитской вулканотектонических структур располагаются в поле островодужных базальтов. Полученные геохимические данные свидетельствуют о том, что формирование вулканитов олдындинской свиты происходило в надсубдукционных (островодужных) условиях.

По степени дифференцированности вулканитов, химическому и минеральному составу проведено обоснование поперечной структурной зональности нижнекембрийского вулканизма олдындинской свиты Удино-Витимской островодужной системы. Профиль поперечной зональности проведен вкрест простирания структур с юго-востока на северо-запад – от фронтальной зоны Еравнинской структуры через промежуточную зону Олдындинской структуры к тыловой зоне Кыджимитской структуры.

В распределении ассоциаций вулканитов по кремне-кислотности поперечная зональность выражается в более широком проявлении глубоко дифференцированных ассоциаций пород во фронтальной зоне Удино-Витимской островной дуги. Минералогическая зональность проявляется в различиях минеральных ассоциаций в составе минералов лав:

 пироксен-плагиоклазовый парагенезис минералов вкрапленников (в базальтах фронтальной зоны);

 пироксен-амфибол-плагиоклазовый парагенезис (в базальтах тыловой зоны);

 пироксен-плагиоклазовый парагенезис (в андезитах и андезидацитах фронтальной зоны);

 плагиоклаз-амфибол-биотитовый парагенезис (в тыловой зоне).

Геохимическая зональность наблюдается по существенным вариациям щелочности и железистости близких по кремнеземистости лав.

Вулканические породы нормального щелочного ряда распространены во фронтальной и промежуточной зонах Удино-Витимской островной дуги. Вулканические породы субщелочного ряда определены только в ее тыловой зоне. В зонах Удино-Витимской островной дуги распространены лавы следующих серий:

 низкокалиевая (преобладает) и умереннокалиевая (во фронтальной зоне);

 умеренно- и высоко-калиевая (в промежуточной зоне);

 высоко- и весьма высоко-калиевая (в тыловой зоне). От фронтальной к тыловой части островной дуги во всех типах вулканитов возрастают средние концентрации не только калия, но и таких некогерентных и редких элементов:

– Rb, Sr, U, Th, La, Ce (вместе со всей суммой легких лантоноидов);

- Nb, Zr, Hf;

– Rb/Sr, La/Yb, Sr/Ce, Th/U, Zr/Y, La/Nb, Fe₂O₃/(FeO+Fe₂O₃) – величины отношений.

Установлено, что поперечная структурная зональность нижнекембрийской Удино-Витимской островной дуги сопоставима с подобной геохимической зональностью современной Курило-Камчатской островной дуги.

Проведенные исследования позволили определить глубину залегания зоны субдукции Удино-Витимской островодужной системы, которая погружена на 100 км во фронтальной части дуги в районе Еравнинской вулканотектонической структуры. В тыловой части Удино-Витимской островодужной системы очаги плавления океанической плиты были резко погружены под окраину Сибирского палео-континента в районе Олдындинской вулканотектонической структуры до глубины 180 км. В районе Кыджимитской вулканотектонический структуры очаги плавления океанической плиты были погружены под окраину Сибирского палео-континента до глубины 250 км.

выводы

В результате проведенных геокартировочных и петрогеохимических исследований авторы пришли к следующим выводам.

1. Установлено, что для большинства изученных вулканитов нижнекембрийской олдындинской свиты характерны свойства, проявляющиеся в типичных вулканитах островных дуг:

- высокий уровень накопления РЗЭ,

высокая степень дифференциации легкой части спектра,

 обогащенность крупноионными литофильными элементами, наличие Nb-минимума.

2. Выявлена поперечная вещественная зональность кембрийских вулканитов с юго-востока на северо-запад (в современных координатах) вкрест простирания Удино-Витимской островодужной системы Западного Забайкалья, которая прослеживается по степени дифференцированности вулканов, а также по минеральному и химическому составу пород, соответствует зональности, проявленной в типичных островных дугах.

ГЕОТЕКТОНИКА № 2 2025

Таким образом, формирование кембрийского вулканизма Удино-Витимской структуры проявилось в островодужных условиях.

3. Рассчитана глубина залегания, составляющая от 100 до 250 км в зоне субдукции, которая находится в районе Еравнинских озер в Западном Забайкалье и косвенно подтверждается крупной гравитационной ступенью северо-восточного простирания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность рецензенту А. А. Третьякову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и анонимным рецензентам за полезные комментарии, которые позволили улучшить статью, и редактору М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 22-27-20141.

СЛЕДОВАНИЕ НОРМАМ НАУЧНОЙ ЭТИКИ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. – Под ред. Ю.М. Пущаровского – М.: Наука, 1992. 528 с.
- Антонов А.Ю. Геохимия и петрология мезо-кайнозойских магматических образований и мантийный диапиризм. – Новосибирск: Гео, 2008. 250 с.
- Беличенко В.Г., Комаров Ю.В., Мусин Ю.Б., Хренов П.М., Чернов Ю.А. Геолого-петрографический очерк южной окраины Витимского плоскогорья. М.: АН СССР, 1962. 168 с.
- 4. Богатиков О.А., Цветков А.А. Магматическая эволюция островных дуг. – М.: Наука, 1988. 248 с.
- Васильев И.Л. Геология Еравнинского рудного поля. – Под ред. С. А. Гурулева – Новосибирск: Наука, 1977. 126 с.
- Ветлужских Л.И. Трилобиты и биостратиграфия кембрийских отложений Саяно-Байкальской горной области. – Автореф. дис. ... к.г.-м.н. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. 17 с.
- 7. Гордиенко И.В., Миронов А.Г. Геодинамическая и металлогенческая эволюция Забайкалья в позднем рифее-палеозое // Отечественная геология. 2008. № 3. С. 46–57.

- Гордиенко И.В., Булгатов А.Н., Руженцев С.В., Минина О.Р., Климук В.С., Ветлужских Л.И., Некрасов Г.Е., Ласточкин Н.И., Ситникова В.С., Метелкин Д.В., Гонегер Т.А., Лепехина Е.Н. История развития Удино-Витимской островодужной системы Забайкальского сектора Палеоазиатского океана в позднем палеозое // Геология и геофизика. 2010. № 5. С. 589–614.
- Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. Курбино-Ераснинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2015. № 2. С. 114–124.
- Гордиенко И.В. Неопротерозой-палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. – Под ред. В.В. Ярмолюка – Новосибирск: СО РАН, 2023. 345 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. – 2-ое изд.– Серия Баргузино-Витимская. – Лист N-49-XXVIII (Гунда). – Объяснительная записка. – Отв. ред. И.Н. Тихомиров – СПб: ВСЕГЕИ, 2016. 208 с.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Перепелов А.Б. Поперечная геохимическая зональность на примере Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 25–40.
- Дистанов Э.Г., Ковалев Д.Р., Тарасова Р.С. Геологическое строение и генезис Озерного свинцовоцинкового колчеданного месторождения (Западное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 1972. Т. 14. № 2. С. 3–22.
- 14. Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. Механизм развития системы островная дуга-задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее– раннем палеозое // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 209–226.
- Ланцева В.С. Вулканизм Удино-Витимской зоны каледонид Западного Забайкалья (состав, возраст, геодинамические условия формирования). – Автореф. дис. ... к.г.-м.н. – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2014. 19 с.
- 16. Минина О.Р., Ветлужских Л.И., Ланцева В.С. Стратиграфия и вулканизм нижнего и среднего палеозоя Байкальской горной области // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 38–46.
- Минина О.Р. Ранние герциниды Байкало-Витимской складчатой системы (состав, строение, геодинамическая эволюция). – Автореф. дис. ... д.г.-м.н. – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2014. 36 с.
- 18. Минина О.Р., Доронина Н.А., Некрасов Г.Е., Ветлужских Л.И., Ланцева В.С., Аристов В.А., Наугольных С.В., Куриленко А.В., Ходырева Е.В. Ранние герциниды Байкало-Витимской складчатой системы (Западное Забайкалье) // Геотектоника. 2016. Т. 50. № 3. С. 63–84.
- 19. Минина О.Р., Гордиенко И.В., Дамдинов Б.Б., Ташлыков В.С., Гонегер Т.А., Скрипников М.С., Ланцева В.С., Хубанов В.Б., Кислов Е.В. Новые данные о возрасте рудовмещающих отложений Озерного полиметал-

лического месторождения // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 3. С. 1–16.

- 20. Минина О.Р., Ланцева В.С., Соболев И.Д., Викентьев И.В. Состав, возраст и обстановки седиментации рудовмещающей еравнинской серии Удино-Витимской зоны (Западное Забайкалье) // Литология и полезные ископаемые. 2024. № 1. С. 34–55.
- Нефедьев М.А. Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2009. 184 с.
- 22. Постников А.А., Журавлева И.Т., Терлеев А.А. Стратиграфия кембрийских отложений Озернинского рудного узла (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 1997. № 3. Т. 38. С. 608–619.
- 23. Руженцев С.В., Минина О.Р., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Ларионов А.Н., Лыхин Д.А., Некрасов Г.Е. Геодинамика Еравнинской зоны (Удино-Витимская складчатая система Забайкалья): геологические и геохронологические данные // ДАН. 2010. Т. 434. № 3. С. 361–364.
- 24. Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е., Аристов В.А., Голионко Б.Г., Доронина Н.А., Лыхин Д.А. Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3–28.
- Скрипников М.С., Ветлужских Л.И. Новые находки археоциат из олдындинской свиты (Западное Забайкалье) // Вестн. Пермского университета. Сер. Геол. 2021. Т. 20. № 1. С. 1–10.
- 26. Скрипников М.С. Археоциаты, крибрициаты, С-, Sгизотопные характеристики и биостратиграфия известняков нижнекембрийской олдындинской свиты (Западное Забайкалье). – Автореф. дис. ... к.г.-м.н. – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2023. 21 с.
- 27. Тарасова Р.С., Близнюк М.В., Бабкин И.Н. О формационном типе и генезисе Озерного свинцовоцинкового колчеданного месторождения. – В кн.: Геология и генезис эндогенных рудных формаций Сибири. – М.: Наука, 1972. вып. 143.
- Чащин А.А., Мартынов Ю.А. Петрология пород вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка). – Под ред. В.Г. Сахно – Владивосток: Дальнаука, 2011. 270 с.
- Язмир М.М., Далматов Б.А., Язмир И.К. Атлас фауны и флоры палеозоя и мезозоя Бурятской АССР. – Палеозой. – М.: Недра, 1975. 184 с.
- 30. Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое-кайнозое (на основе геохимических и изотопно-геохимических данных) // Петрология. 1998. Т. 6. № 2. С. 115–138.
- Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 491–504. Doi:10.1016/j.lithos.2004.09.014
- Dickinson W., Hatherton T. Andesitic volcanism and seismicity around the Pacific // Science. 1967. Vol. 157. No. 3790. P. 801–803.

- Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // Lithos. 2008. Vol. 100. P. 14–48. Doi:10.1016/j.lithos.2007.06.016
- Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alcaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contrib. Miner. Petrol. 1976. Vol. 58. No. 1. P. 63–81.
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. London, Spec. Publ. 1989. Vol. 42. P. 313–345.
- Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. – Ed. by A. Hallam, (Blackwell, Oxford, GB. 1985), 312 pp.
- Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // Chem. Geol. 1977. Vol. 20. P. 325–343.
- 38. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // Earth Planet. Sci. Lett. 1980. V. 50. P. 11–30.

The Transverse Structural Zoning of the Lower Cambrian Uda–Vitim Island-Arc System (Western Transbaikalia, Russia)

V. S. Lantseva^{*a*, *}, I. V. Gordienko^{*a*}, O. R. Minina^{*a*}

^aDobretsov Geological Institute of Siberian Branch RAS, bld. 6a, Sakhyanova str., 670047 Ulan-Ude, Russia

*e-mail: valery_fox@list.ru

The new petrochemical data on the Lower Cambrian volcanites of the Oldynda Formation of the Uda-Vitim island-arc system are presented. The high level of REE content, the high degree of spectrum light part differentiation, enrichment in large-ion lithophile elements, and Nb-minimum presence in the studied volcanites were analyzed, confirming their island-arc origin. Transverse structural zoning of volcanites in the cross-strike of the Uda-Vitim island-arc system was determined. For the first time the structural zoning has been traced by the degree of volcano differentiation, as well as by the mineral and chemical rock composition. The depths of the mineral subduction zone have been calculated. It as assumed that this zone is located in the area of the Eravna lakes within the Eravna structure, what is confirmed by a large gravity stage of northeastern strike.

Keywords: Uda-Vitim island-arc system, Western Transbaikalia region, transverse structural zoning, volcanism, differentiated series, petrogeochemistry, the Lower Cambrian, subduction, basalts, andesites, dacites, rhyolites