

PALEOZOIC GRANITOID MAGMATISM OF THE URALS: THE REFLECTION OF THE STAGES OF THE GEODYNAMIC AND GEOCHEMICAL EVOLUTION OF A COLLISIONAL OROGEN

V.V. Kholodnov ¹, G.Yu. Shardakova ^{1,2✉}, V.N. Puchkov ¹, G.A. Petrov ^{1,2}, E.S. Shagalov ^{1,2}, D.N. Salikhov ³,
A.V. Korovko ¹, S.V. Pribavkin ¹, I.R. Rakhimov ³, N.S. Borodina ¹

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovsky St, Ekaterinburg 620016, Russia

²Ural State Mining University, 30 Kuibyshev St, Ekaterinburg 620144, Russia

³Institute of Geology, Ufa Science Center of the Russian Academy of Sciences, 16/2 Karl Marx St, Ufa 450077, Republic of Bashkortostan, Russia

ABSTRACT. The Ural mobile belt is an intracontinental epiocceanic orogen that has already gone through all stages of the geodynamic development. Igneous rocks formed during each stage are important indicators for understanding the evolution of this belt and determining potential ore contents of its segments. We consolidated large datasets on petrogeochemistry and isotope geochronology of the Paleozoic (490–250 Ma) granitoids associated with the opening and evolution of the Ural paleocean and the subsequent formation of the collisional orogen. Using these data, we have revised the ages of several tectono-magmatic events, clarified the paleogeodynamic settings for the generation of granitoids of different compositions, and described the roles of mantle-crust interactions and the plume factor in the formation of the mature continental crust in the study area. The results can be useful for geological mapping and improving the assessment of the potential ore contents in granitoid complexes that differ in origin and composition.

KEYWORDS: Ural orogen; granitoids; rifting; subduction; collision; plumes; anatexis; source; isotopic age; geochemistry

FUNDING: The study was funded from the federal budget as part of fundamental research of Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (State Contracts A18-118052590029-6, AAAA-A18-118053090044-1, and AAAA-A18-118052590032-6) and Ufa Federal Research Centre of RAS (State Contracts 0252-2014-0002, 0252-2017-001, and 0246-2019-0080).

RESEARCH ARTICLE

Received: June 26, 2020

Revised: January 20, 2021

Accepted: January 21, 2021

Correspondence: Galina Yu. Shardakova, shardakovagalina@mail.ru

FOR CITATION: Kholodnov V.V., Shardakova G.Yu., Puchkov V.N., Petrov G.A., Shagalov E.S., Salikhov D.N., Korovko A.V., Pribavkin S.V., Rakhimov I.R., Borodina N.S., 2021. Paleozoic granitoid magmatism of the Urals: the reflection of the stages of geodynamic and geochemical evolution of a collisional orogen. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), 225–245. doi:10.5800/GT-2021-12-2-0522

ПАЛЕОЗОЙСКИЙ ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ УРАЛА КАК ОТРАЖЕНИЕ ЭТАПОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ И ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОЛЛИЗИОННОГО ОРОГЕНА

В.В. Холоднов¹, Г.Ю. Шардакова^{1,2}, В.Н. Пучков¹, Г.А. Петров^{1,2}, Е.С. Шагалов^{1,2}, Д.Н. Салихов³,
А.В. Коровко¹, С.В. Прибавкин¹, И.Р. Рахимов³, Н.С. Бородина¹

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

² Уральский государственный горный университет, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия

³ Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, Республика Башкортостан, Россия

АННОТАЦИЯ. Уральский подвижный пояс является внутриконтинентальным эпикоеаническим орогеном, прошедшим все этапы геодинамического развития. Магматические породы, сформированные в ходе каждого из них, – важное звено для понимания эволюции структуры и определения потенциальной рудоносности ее составных частей. Проведено обобщение большого набора петрогеохимических и изотопно-геохронологических данных по палеозойским (490–250 млн лет) гранитоидам, сопровождающим открытие и эволюцию Уральского палеоокеана и последующее формирование коллизионного орогена. В результате скорректированы представления о времени ряда тектономагматических событий, уточнены палеогеодинамические обстановки формирования гранитоидов разного состава и генезиса, показана роль процессов мантийно-корового взаимодействия и плюмового фактора при формировании зрелой континентальной коры. Результаты могут быть использованы для целей геокартирования и уточнения перспектив потенциальной рудоносности гранитоидных комплексов разного состава и природы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Уральский ороген; гранитоиды; рифтогенез; субдукция; коллизия; плюмы; анатексис; субстрат; изотопный возраст; геохимия

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках госбюджетных тем ИГГ УрО РАН № АААА-А18-118052590029-6, № АААА-А18-118053090044-1, № АААА-А18-118052590032-6, бюджетных тем ИГ УФИЦ РАН № 0252-2014-0002, № 0252-2017-001, № 0246-2019-0080.

1. ВВЕДЕНИЕ

Уральский подвижный пояс (УПП) в процессе эволюции прошел все стадии геодинамического развития в рамках двух циклов – тиманского и уральского [Puchkov, 2010, 2018a]. Формированию тиманид предшествовало образование в среднем рифее крупной изверженной провинции (LIP), связанной с «машакским» суперплюмом [Ernst, 2014; Ronkin et al., 2016; Kholodnov et al., 2017; Puchkov, 2018a, 2018b]. Его продукты широко распространены на западном палеоконтинентальном склоне Южного Урала в Башкирском мегантиклинории (БМА) – краевой рифтогенной структуре Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Магматизм этого времени связан с процессами плюм-зависимого эпиконтинентального рифтогенеза, предшествующими раскрытию Проторуальского рифейского океана и сопровождающими его, и с последующими эпизодами конвергентного взаимодействия литосферных плит, ведущими к формированию в венде – кембрии в краевой восточной части ВЕП (современный западный склон Среднего и Южного Урала) активной континентальной окраины (АКО) андского типа и складчатой области тиманид. Далее гранитоиды сопровождают все этапы конвергентного и дивергентного взаимодействия плит: эпизоды повторной рифтогенной активности в краю ВЕП, предшествующей раскрытию Уральского палеозойского океана, становление силурийской Тагильской и девонской

Магнитогорской островных дуг, их приращение к окраине ВЕП с формированием АКО (поздний девон – карбон) Уральского океана, жесткую коллизию [Vladimirov et al., 2003] ВЕП с Казахстанским континентом (Пермь).

На основе анализа литературных и авторских данных проведена дополнительная геохимическая типизация палеозойского гранитоидного магматизма УПП. Материал по данной теме весьма обширен, поэтому ниже охарактеризован ряд ключевых объектов, позволяющих получить общее представление об эволюции магматизма основных структурных зон Северного, Среднего и Южного Урала (рис. 1). (Авторы не касаются гранитов Приполярного и Полярного Урала, эволюции которых в настоящем выпуске журнала посвящена отдельная статья.) В результате скорректированы представления о возрасте ряда тектономагматических событий, уточнены палеогеодинамические обстановки формирования гранитоидов, оценена степень мантийно-корового взаимодействия при формировании зрелой континентальной коры УПП. Это способствует уточнению перспектив потенциальной рудоносности гранитоидных комплексов разного состава и природы.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Настоящая работа базируется на широком наборе данных, существенная часть которых опубликована при описании отдельных объектов, поэтому сведения

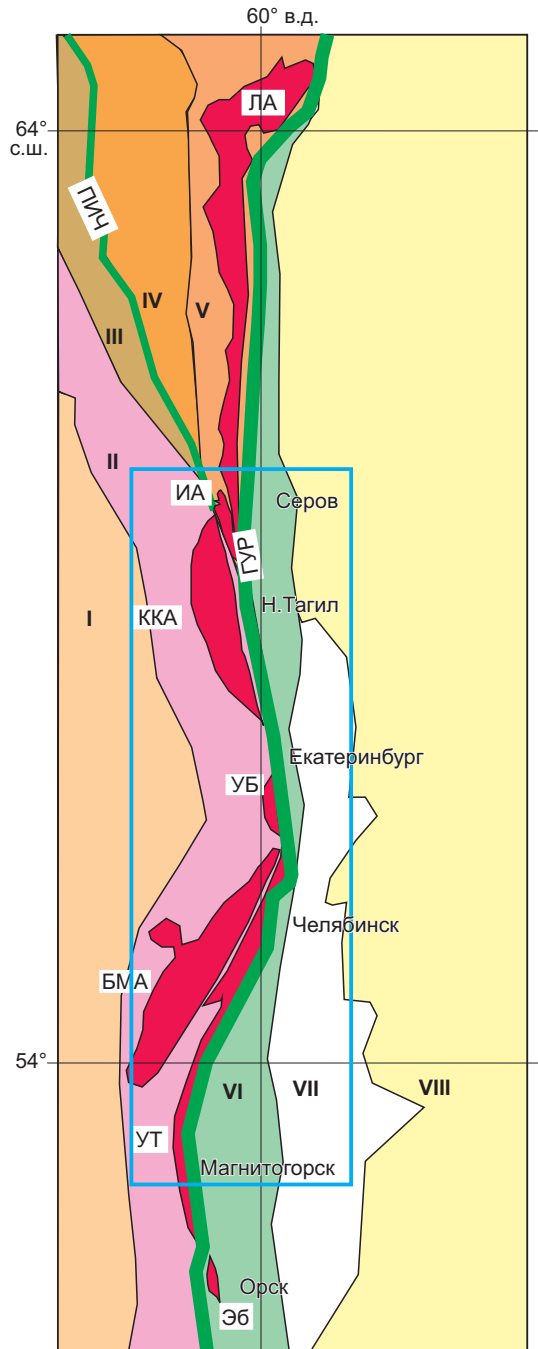


Рис. 1. Тектоническая схема Урала с расположением объектов (рамка) исследования (по [Puchkov, 2000; Kuznetsov et al., 2005], с дополнениями).

Зоны разломов: ПИЧ – Припечоро-Илыч-Чикшинская зона, ГУР – Главный Уральский разлом. Структуры и мегазоны: I – Восточно-Европейская платформа; II-III – Тиманский мегаблок: II – Тиманская и III – Ижемская зоны; IV-V – Печорский мегаблок: IV – Печорская и V – Большеземельская зоны; VI – Тагило-Магнитогорская мегазона; VII – Восточно-Уральская мегазона; VIII – Западно-Сибирская платформа. Блоки с древним фундаментом, в пределах которых развиты магматические породы рифей-венд-кембрийского возраста (с севера на юг): ЛА – Ляпинский антиклинорий (включая Кожимский блок), ИА – Ишеримский антиклинорий, ККА – Кваркушко-Каменногорский антиклинорий, УБ – Уфалейский блок, БМА – Башкирский мегантиклинорий, УТ – Уралтау, Эб – Эбетинская антиформа.

Fig. 1. Schematic tectonic map of the Urals showing the studied locations (box) (after [Puchkov, 2000; Kuznetsov et al., 2005], with additional data).

Fault zones: ПИЧ – Pri-Pechora-Ilych-Chiksha zone, ГУР – Main Uralian fault. Structures and megazones: I – East European platform; II-III – Timan megablock, including Timan (II) and Izhem (III) zones; IV-V – Pechora megablock, including Pechora (IV) and Bolshezemelsk (V) zones; VI – Tagil-Magnitogorsk megazone; VII – East Ural megazone; VIII – West Siberian platform. Blocks with the ancient basement, which are composed of the Riphean-Vendian-Cambrian igneous rocks (from north to south): ЛА – Lyapun anticlinorium (including the Kozhim block), ИА – Icherim anticlinorium, ККА – Kvarquush-Kamennogorsk anticlinorium, УБ – Ufalei block, БМА – Bashkirian meganticlinorium, УТ – Uraltau; Эб – Ebeta antiform.

об аналитических лабораториях здесь не приводятся. Сделаем лишь необходимую ремарку, касающуюся использования геохимических данных. Традиционно для определения геодинамической позиции гранитоидов используются диаграммы Дж. Пирса, основанные на уровнях содержаний и отношений ряда LILE и HFSE (Rb, Y, Yb, Nb, Ta и др.) [Pearce, 2008; Pearce, Cann, 1973; Pearce et al., 1984]. Другие варианты применяются для уточнения состава источника при выплавлении базитов; наиболее распространены диаграммы Nb/Y-Zr/Y, Th/Yb-Nb/Yb, которые в данной работе также присутствуют. Есть и более «современные» модификации ряда авторов, в том числе основанные на нормированных содержаниях микроэлементов [Greenough et al., 2005; Saccani, 2015; и др.]. Отметим, что различные диаграммы используются селективно: одни из них применимы только для базитов, другие – для гранитоидов. Однако габбро и гранитоиды редко встречаются в полном отрыве друг от друга; в большинстве уральских магматических серий присутствуют в том или ином объеме кислые, основные и даже ультраосновные породы. Исходя из опыта и определенной статистики, авторы предлагают упрощенный вариант диаграммы Пирса: соотношения содержаний Y и Nb, а также величины индекса Y/Nb, наносимые на график в виде диагональных линий. Для интерпретаций использованы их различия в породах, имеющих конкретные геохимические особенности и генерированных в разных геодинамических обстановках. В частности, для базальтов характерны дифференцированные уровни концентраций указанных элементов; величины отношения Y/Nb составляют в них: N-MORB=12, E-MORB=2.6, OIB=0.6 (по [Sun, McDonough, 1989]). Отметим, что Y является индикаторным для наиболее деплетированной (истощенной) мантии, а Nb – для наиболее обогащенной. Нами показано, что различаются они и в более кислых разностях, и соотношения этих компонентов в базитах и гранитоидах в существенной мере позволяют оценить механизм генерации магм (дифференциация, гибридность, роль плюмового фактора) и относительный вклад в состав субстрата мантийного и корового компонентов, что способствует уточнению ряда генетических выводов.

3. РАННЕОРДОВИКСКО-РАННЕСИЛУРИЙСКИЙ (490–445 МЛН ЛЕТ) ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ ДИВЕРГЕНТНЫХ ОБСТАНОВОК (ОКРАИНА ВЕП), СИНХРОННЫЙ С ЗАЛОЖЕНИЕМ УРАЛЬСКОГО ПАЛЕООКЕАНА

В ордовике на восточной окраине ВЕП проявился магматизм, связанный с подновлением рифей-вендских рифтогенных разломов [Kholodnov et al., 2017], по времени синхронный с заложением Уральского палеоокеана и пассивной окраины континента. В интервале 480–450 млн лет (U-Pb) в Уфалейском блоке (фрагмент края ВЕП) внедрялись тела субщелочных пород козлиногорского комплекса (габбро, сиениты и граниты), сходных с А-гранитами и продуктивных на Nb-Zr

оруденение [Tevelev et al., 2015; Shardakova, 2016a]. Высокие содержания в породах Nb (до 100–200 г/т) при низком Y/Nb=1.0–0.5 служат важным индикатором наличия в источнике обогащенного мантийного (плюмового) компонента (OIB-тип). Породы козлиногорского комплекса отнесены к «ушатскому» эпизоду плюм-зависимого магматизма [Puchkov, 2018a]. В этот период внедрялись также субщелочные базальтоиды (455–435 млн лет) [Krasnobaev et al., 2017], секущие породы раннерифейской айской и среднерифейской машакской свит БМА, сиенит-порфиры верхнесеребрянского комплекса (447±8 млн лет) [Petrov, 2017], трахириодацит-граносиенитовая и щелочно-гранитная ассоциации (хомутовский, гладкинский, николаевский, кордонокаменский комплексы) внутриплитного типа в Николаевско-Билимбаевской зоне Центрально-Уральской мегазоны [Malyutin et al., 2007]. Трахириолиты кордонокаменского комплекса (U-Pb, по цирконам) имеют возраст 475±10 млн лет [Malyutin et al., 2007]. Содержание Nb в гранитоидах такого типа (хомутовский комплекс и др.) достигает 150 г/т и более, также при Y/Nb=1.0–0.5. Дайки трахириолитов, комендитов и пантеллеритов с «внутриплитными» геохимическими параметрами присутствуют и в зоне ГУР в составе малиновского комплекса (Северный Урал), его возраст (U-Pb, по цирконам) 476.2±2.7 млн лет [Petrov, 2017]. В целом на раннепалеозойской пассивной окраине ВЕП на этом этапе эволюции имели место два импульса рифтогенного плюм-зависимого (тип OIB) магматизма – раннеордовикский (476–475 млн лет) и позднеордовикско-раннесилурийский (450–435 млн лет).

4. ПОЗДНЕОРДОВИКСКО-РАННЕДЕВОНСКИЙ ОСТРОВОДУЖНЫЙ ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ ТАГИЛЬСКОЙ И ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОЙ МЕГАЗОН (СЕВЕРНЫЙ И СРЕДНИЙ УРАЛ)

Гранитоиды островодужного типа распространены на восточном склоне Среднего и Северного Урала в Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах. Как правило, они входят в состав габбро-гранитных и габбро-плагиогранитных серий, комагматичных вулканогенным породам [Fershtater et al., 1984; Smirnov et al., 2008; Petrov et al., 2017; и др.]. Одним из наиболее ранних является арбатский комплекс: диориты, кварцевые диориты (I фаза), гранодиориты и плагиограниты (II фаза; 454±2 млн лет, U-Pb, по цирконам). Эти породы – натровые, умеренно-глиноземистые, низкожелезистые, с низким содержанием литофильных элементов. Гранитоиды петропавловского комплекса обрамляют с востока дунит-клинопироксенит-габбровые массивы Платиноносного пояса Урала (ППУ). Это высоко- и умеренно-глиноземистые, высококальциевые (CaO 4–9%) породы известково-щелочной калиево-натриевой серии. U-Pb возраст циркона из кварцевых диоритов Маньинского массива (Северный Урал) – 436±3 млн лет, из тоналитов – 439.4±1.3 млн лет [Petrov et al., 2017]. На геотектонических диаграммах Пирса точки состава пород этих комплексов лежат в полях островодужных серий.

Для этого этапа гранитоидного магматизма Тагильской зоны (за исключением северорудничного комплекса) характерны $Y/Nb=5-20$, близкие к таковым для островодужных образований (рис. 2, поле I). Главную роль в генерации гранитоидов этого этапа играла субдукция.

В Восточно-Уральской мегазоне на Среднем Урале к островодужным образованиям позднего силура (435–425 млн лет) можно отнести Рефтинский массив, сложенный тремя комплексами: габбровым (восточная часть), габбро-плагиогранитоидным (западная) и разделяющим их комплексом параллельных диабазовых даек [Frolova, Burikova, 1977; Krasnobaev et al., 2005b; Smirnov et al., 2014b, 2018]. Данные о химическом составе пород данного объекта приведены в [Fershtater, 2013]. Кварцевые диориты и тоналиты здесь имеют $\epsilon Nd(t)=+3.7...+6.0$ и $\epsilon Hf(t)=+11.4...+12.7$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.70401-0.70567$. Модельные Sm–Nd и Lu–Hf возрасты составляют 690–889 и 578–644 млн лет, соответственно. В породах имеются докембрийские цирконы (787±4 и 581±4 млн лет), поэтому считается [Smirnov et al., 2018], что гранитоиды выплавлялись в силуре из неопротерозойской коры. Породы Рефтинского массива

имеют низкие содержания Nb (0.15–1.50 г/т) при повышенных – Y (3.7–29.3 г/т). Отношение $Y/Nb=5-35$, высокое, что характерно для пород островодужного ряда. Рефтинский массив мог быть частью офиолитового комплекса, обдуцированного на восточную часть УПП [Fershtater, 2013]. Его породы прорываются Хомутиным габбро-гранитным массивом с возрастом 405±8 млн лет [Fershtater, 2013].

5. ГАББРО-ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ S_2-D_1 ТАГИЛЬСКОЙ МЕГАЗОНЫ КАК ОТРАЖЕНИЕ СМЕНЫ МАНТИЙНОГО ИСТОЧНИКА (МАГМАТИЗМ «МАНТИЙНЫХ ОКОН»?)

Интрузивный островодужный магматизм позднесилурийско-девонского этапа в Тагильской мегазоне фиксируется внедрением монцогаббро-сиенитового тагило-кушвинского комплекса (одноименные массивы). Породы высокоглиноземистые, субщелочные, с высоким содержанием Sr; принадлежат к известково-щелочному типу. Возраст сиенитов (по цирконам, метод Кобера) – 426±4 млн лет; нефелиновых сиенитов из даек, секущих сиениты Кушвинского массива, – 428±3 млн лет [Fershtater, 2013]. Эти массивы прорывают

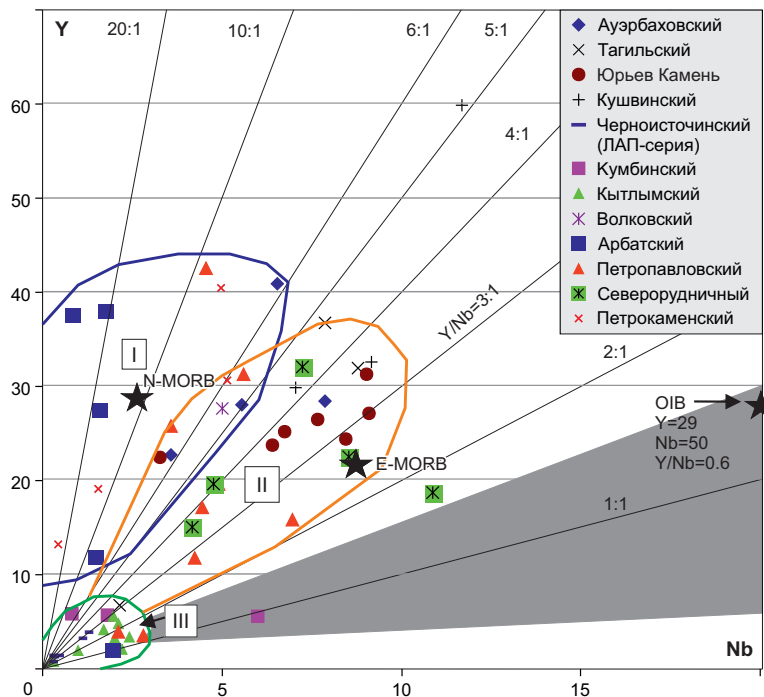


Рис. 2. Диапазоны концентраций Y и Nb и значений Y/Nb отношения в гранитоидах и базитах Тагильской вулканогенной зоны (ТВЗ) и Платиноносного пояса Урала (ППУ).

Островодужные комплексы ТВЗ (поле II): арбатский, петропавловский, северорудничный, петрокаменский. Поле II – рифтогенный габбро-(сиенит)-гранитоидный магматизм «мантийных окон», массивы: Тагильский, Кушвинский и Ауэрбахский. Поле III: Волковский габбровый массив ППУ; Тагильский (444–430 млн лет) габбро-диоритовый массив (Юрьевский Камень); массивы ЛАП-серии в составе ППУ: Кумбинский, Кытлымский, Черноисточинский.

Fig. 2. The Y and Nb concentration ranges and Y/Nb ratios of granitoids and basic rocks of the Tagil volcanic zone (TVZ) and the Ural platinum-bearing belt (PBB).

TVZ island-arc complexes (field II) – Arbat, Petropavlovsk, Severorudnichny, and Petrokamensk. Field II – riftogenic gabbro-(syenite)-granitoid magmatism of "slab-windows"; massifs – Tagil, Kushva, and Auerbakh. Field III – Volkov gabbro massif of PBB; Tagil (444–430 Ma) gabbro-diorite massif (Yuriev Kamen); massifs of leucogabbro-anorthosite-plagiogranite (LAP) series (i.e. PBB parts) – Kumba, Kytlym, Chernostochinsk.

отложения лудловско-раннепржидольской гороблагодатской толщи с формированием крупных месторождений скарново-магнетитовых руд, а также тесно связаны в пространстве с пржидольско-раннелохковскими образованиями бимодальной туринской свиты. Вероятно, магматическая система здесь начала формироваться в лудловское и закончила – в раннелохковское время. Подробно характеристика тагило-кушвинского комплекса и связанных с ним месторождений дана в работе [Kholodnov et al., 2013].

Исследование петрогеохимии трахибазальтов и трахитов туринской свиты [Nosova et al., 2002] – комагматов кушвинских и тагильских монцогаббро и сиенитов – показало их сходство с образованиями «мантийных окон», возникающих при подтоке фертильной астеносферной мантии, «застопоривании» субдукции и частичном разрушении погружающегося слэба. Массивы тагило-кушвинского комплекса и их комагматы имеют обогащенный Nb мантийный источник с Y/Nb=3–6 (рис. 2, 3), близкий к E-MORB-типу. На диаграмме Пирса (рис. 3) они тяготеют к внутриплитным образованиям.

Надсубдукционная позиция рифтогенного магматизма определяет неоднозначную геохимическую специфику тагило-кушвинского комплекса: с одной стороны – надсубдукционные (известково-щелочные) характеристики, а с другой – внутриплитные, свойственные толеитовым магмам (повышенные содержания HFSE, продуктивность на крупное скарново-магнетитовое оруденение, свидетельствующее о высокой «железистости» исходных магм). Известково-щелочной характер этих серий мог быть приобретенным признаком,

отражающим интенсивное взаимодействие первичных толеитовых магм с водным надсубдукционным флюидом, с участием коровой контаминации. В результате формируются гибридные расплавы, насыщаемые водномобильными литофилами (Na, Al, Ca, Rb, Sr, Ba, Th). Интенсивному флюидно-магматическому взаимодействию способствует высокая активность хлора при генерации пород и на этапах формирования железо- и медно-скарновых месторождений [Kholodnov, Bushlyakov, 2002].

Субщелочные габбро-гранитоидные серии рудоносного тагило-кушвинского комплекса (запад Тагильской мегазоны) образуют субмеридиональную цепочку интрузий, приуроченных к долгоживущей шовной рифтовой структуре, палеодепрессии, грабены в которой заполнены вулканогенно-осадочными породами именовской, гороблагодатской и рифтогенной трахибазальт-трахитовой туринской свит. Вероятно, структура растяжения связана с формированием «мантийного окна» под Тагильской зоной.

В этой структуре растяжения магнообразование шло не только в мантии в связи с обогащенным источником, но и в коре островодужного типа, при чередовании во времени рифтогенеза и аккреционно-коллизийных процессов. На западе Тагильской мегазоны возникла корово-анатектическая лейкодиорит-анортозит-плагиогранитная (ЛАП) серия (425–413 млн лет), субстратом которой были роговообманковые габброиды ППУ [Fershtater, 2013].

Производными источника типа E-MORB являются также породы ауэрбаховского габбро-диорит-гранитового

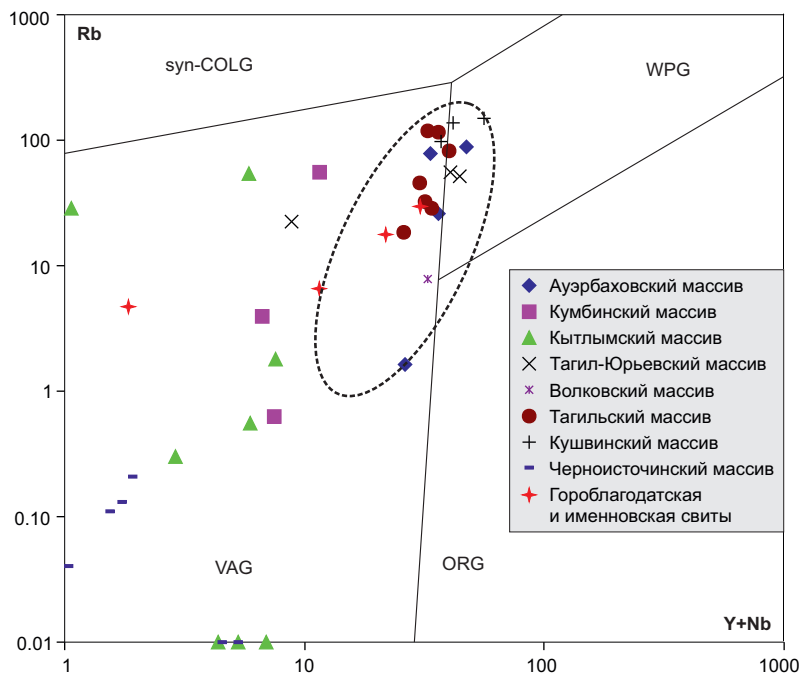


Рис. 3. Диаграмма Пирса [Pearce et al., 1984; Pearce, Cann, 1973] для силуро-девонских комплексов Тагильской мегазоны. Оконтурены рифтогенные массивы, характеризующие магматизм типа «мантийных окон».

Fig. 3. The Pearce diagram [Pearce et al., 1984; Pearce, Cann, 1973] for the Silurian–Devonian complexes of the Tagil megazone. Contours – riftogenic massifs related to the "slab-window" magmatism.

комплекса. Их датировки [Krasnobaev et al., 2007]: кварцевые диориты – 404 ± 4 и 407.7 ± 1.6 млн лет (U-Pb); Rb-Sr возраст 404.5 ± 9.1 млн лет ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.70425$); Sm-Nd – 411 ± 25 млн лет [Grabezhev et al., 2014] соответствуют пражскому – эмсскому векам раннего девона. По соотношениям Y-Nb и Rb-(Y+Nb) породы данного комплекса образуют практически единый ареал точек с породами тагило-кушвинского комплекса (см. рис. 2; рис. 3). Размещение вулканитов и интрузий ауэрбаховского комплекса и связанных с ними крупных медно-скарновых железо- и золоторудных месторождений Масловско-Ауэрбаховского рудного района на востоке Тагильской мегазоны, по-видимому, также контролируется рифтогенно-сдвиговой структурой, связанной с раскрытием «мантийного окна».

Синхронное проявление внутриплитного мантийного и корового магматизма – одна из важных черт магматизма на границах скольжения литосферных плит [Khanchuk, Martynov, 2011]. При косой коллизии и особенно при субдукции СОХ скольжение плит и дивергентная динамика СОХ в субдуцируемой плите способствуют разрыву погруженной океанической коры, с внедрением в зону «мантийных окон» астеносферных диапиров. Такая обстановка могла иметь место в Тагильской мегазоне на рубеже силура и девона. Здесь диапир «мантийных окон» вызвали не только железосодержащий магматизм внутриплитного типа, но и прогрев, метаморфизм и анатексис ее новообразованной коры.

6. ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКИЙ ПОСТСТРОВОДУЖНЫЙ ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ МАГНИТОГОРСКОЙ МЕГАЗОНЫ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

На постостроводужном этапе (D_3 -C) при формировании АКО Южного и Среднего Урала, с причленением Магнитогорской энсиматической палеодуги к окраине ВЕП, имели место разнонаправленные тектономагматические процессы. Они отражены в составе и природе гранитоидов трех структурно-формационных подзон Магнитогорской мегазоны (ММЗ): Центрально-Магнитогорской, Западно-Магнитогорской и Восточно-Магнитогорской.

В Центрально-Магнитогорской подзоне (ЦМП) в раннем карбоне образовался крупный Магнитогорско-Богдановский грабен (МБГ), где раздвиги контролировали трещинные излияния высокотитанистых базальтов и сопряженных с ними трахидацит-риолитовых серий. Сформировалась магнитогорская габбро-гранитная серия, имеющая типичный для магматитов «мантийных окон» набор геохимических металлогенических признаков, связанных с источником E-MORB-типа [Salikhov et al., 2019]: породы обогащены Ti, Fe, HFSE (Nb, Ta, Y, Zr, Hf) и HREE. Кроме того, на состав данной серии заметное влияние оказала обстановка АКО, где сформировалась грабеновая структура над зоной «мантийного окна», поэтому породы несут заметную долю контаминированного вещества коры, что отражается в повышенных отношениях Zr/Y и Th/Yb (рис. 4). Интенсивное

взаимодействие с надсубдукционным водным флюидом, обогащенным хлором [Kholodnov, Bushlyakov, 2002], в условиях окислительного режима магнетитовой феррофации [Fershtater, 1987] вызвало массовую экстракцию Fe хлороносным флюидом и способствовало формированию крупных скарново-магнетитовых месторождений (Магнитогорская группа).

Изотопно-геохимические данные по породам серии подтверждают влияние плюм-литосферного взаимодействия: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.70313$, $\epsilon\text{Nd}(t) +5.90 \dots +5.80$ [Ronkin, 1989; Gorozhanin, 1995], указывая на то, что рифтогенез и грабенообразование в ЦМП вызвали деструкцию коры с насыщением ее деплетированным материалом мантии. Наличие элементов расслоенности, а также петрогеохимические параметры позволяют рассматривать кристаллизационную дифференциацию как ведущий механизм формирования магнитогорской серии [Fershtater, 2013]: от габбро к габбро-диоритам, диоритам и далее – к адамеллитам и гранитам растут содержания Nb и Y при Y/Nb=5 (рис. 4). На такой механизм указывает и состав более субщелочных пород Грязнушинского и Чекинского массивов.

Завершают интрузивный магматизм МБГ малые интрузии долеритов, диорит-порфиритов, сиенит- и гранит-порфиритов (330–310 млн лет [Salikhov et al., 2019]). Одни из них обладают чертами надсубдукционных серий (долерит-лампрофировый, спасский и родниковый комплексы, Y/Nb=3) (рис. 5, а, поле I), другие – внутриплитных (E-MORB, железнодороженский и желтинский комплексы, Y/Nb=5) (рис. 5, а, поле II), а третьи отвечают более обогащенным плюм-зависимым образованиям OIB-типа [Salikhov et al., 2019]). К ним относятся (рис. 5, а, поле III) «золотоносный» балбукский сиенит-(диорит)-гранит-порфиритовый и калымбаевский лампроит-лампрофировый (303–308 млн лет) комплексы. Содержания Y в них низкие, Y/Nb около 1.

В Западно-Магнитогорской подзоне (ЗМП) в позднем девоне и карбоне процессы сдвига – раздвиги и рифтогенного растяжения проявлены менее интенсивно, чем в ЦМП. Здесь комплексы ультрабазитов, габбро-долеритов и гранитоидов повышенной основности [Salikhov et al., 2012, 2019; Rakhimov, 2017] образуют единый тренд с Y/Nb=4–5 (рис. 5, б, поле I), отвечающий источнику E-MORB-типа. Отметим, что, по мнению авторов, худолазовский габбро-долеритовый комплекс (328–324 млн лет), несущий Cu-Ni оруденение, по составу сопоставим с трапповым магматизмом [Salikhov et al., 2019], близок к рудоносным интрузиям Норильского района и породам Микчангдинского массива – аналогам рудоносных интрузий Талнах и Норильск-1 [Krivolutskaya et al., 2009]. В ЗМП имеются также тоналиты и плагиограниты (в составе басаевского, худолазовского и кизильского комплексов) с иным соотношением Nb и Y, Y/Nb=1–2 (рис. 6, б, поле II); они более близки к коровым анатектическим выплавкам.

Завершает магматизм среднего карбона в ЗМП улугуртауский комплекс малых интрузий долеритов, лампрофиров и габбро-диоритов (Sm-Nd возраст 321 ± 15 млн

лет) [Rakhimov et al., 2014]. С ним связаны месторождения золотокварцевого типа (Тукан и др.). Характерен иной тренд эволюции (см. рис. 5, 6, поле III) с понижением Y/Nb-отношения от 5 до 3 при росте содержаний Nb (до 10 г/т). Наиболее магнезиальные габброиды здесь по содержаниям Y (15–35 г/т) и Nb (4–6 г/т) (Y/Nb около 5) близки к габбро предшествующих интрузивных серий ЗМП. Такое поведение возможно при смешении магм из разных источников, часто сопряженном с окончанием субдукции, и объясняется вхождением недеплетированного астеносферного вещества в область метасоматизированной мантии N-MORB-типа [Perepelov et al., 2006].

Интрузивный магматизм Восточно-Магнитогорской подзоны (ВМП) также обладает заметной спецификой [Salikhov et al., 2019; Kholodnov et al., 2020], связанной с тем, что эта часть ММЗ на постостроводужном этапе испытала наибольший подъем и существенную эрозию. Здесь вскрыты гранитоидные массивы самого раннего этапа инверсии ММЗ (с островодужной обстановки на режим АКО). К надсубдукционным массивам «переходного» режима относятся Краснинский диорит-гранодиоритовый (368–366 млн лет), Верхнеуральский монцогаббро-диорит-граносиенитовый (362 млн лет) и Петропавловский пироксенит-габбро-диорит-граносиенитовый (347±8.6 млн лет) [Popov et al., 2002]. Считалось, что первые два завершали островодужный магматизм ВМП. В то же время по возрасту они синхронны с ранними аккреционно-коллизийными

диорит-гранодиорит-гранитными сериями окраинно-континентальных батолитов Урала (Челябинского, Верхисетского и др.). По соотношению Y-Nb (рис. 6) эта группа массивов отличается от магматизма «мантийных окон» и от островодужных предшественников средне- и верхнедевонского возраста.

В ходе эволюции Верхнеуральский и Кассельский массивы обогащаются Nb при снижении Y/Nb-индекса от 4.0 до 1.0. По-видимому, это указывает на участие в магмогенерации, наряду с надсубдукционным источником, и мантийного обогащенного (ОИВ) вещества. В вулканитах позднеостроводужной сара-тюбинской толщи Уйско-Новооренбургской шовной зоны, отделяющей ММЗ от Восточно-Уральской мегазоны, содержания Nb растут от 6–8 г/т в пикритоидах и меймечитах (MgO>30 %) до 15 г/т в пикробазальтах и базальтах с MgO 10–20 %, при устойчивых содержаниях Y (25–28 г/т). Y/Nb отношение в этом ряду понижается от 4 до 2.

Такой тренд, по-видимому, возникает из-за смешения островодужных мантийных расплавов с обогащенной субщелочной плюм-зависимой магмой (ОИВ-типа). Время влияния плюма на позднеостроводужный магматизм Магнитогорской дуги – 375–360 млн лет [Salikhov et al., 2019]. Для Краснинского диорит-гранодиоритового массива обогащение Nb не характерно, Y/Nb=3–4.

Таким образом, в ВМП на постостроводужном переходном этапе эволюции (D₃-C₁) может быть выделена ассоциация надсубдукционных мантийно-корových

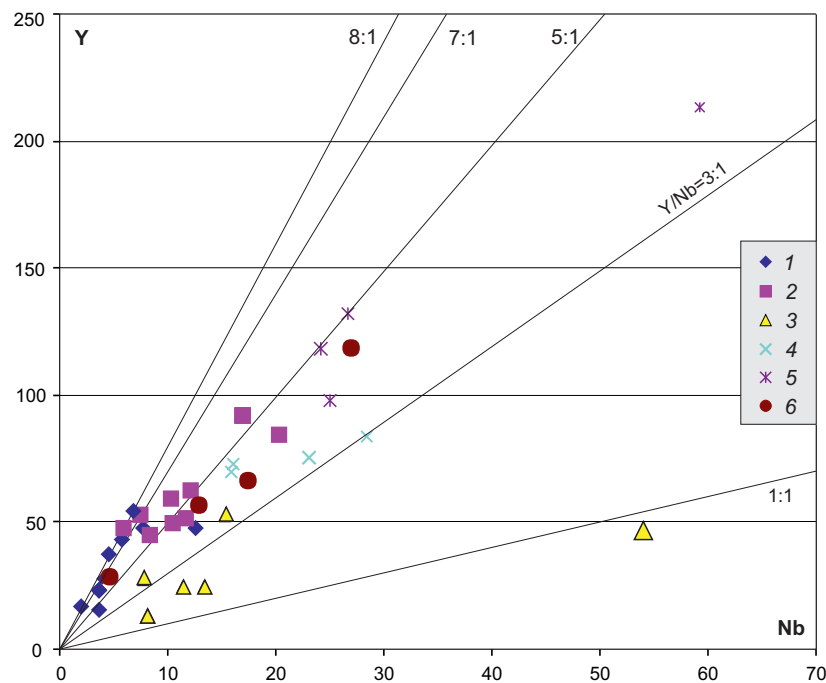


Рис. 4. Соотношения Y и Nb в интрузивных породах Магнитогорской серии.

1–2 – Магнитогорский массив: 1 – габбро, 2 – гранодиориты и граниты; 3–6 – гранитоиды: 3 – Кассельский, 4 – Богдановский, 5 – Чекинский, 6 – Грязнушинский массивы.

Fig. 4. The Y/Nb ratios of intrusive rocks, Magnitogorsk series.

1–2 – Magnitogorsk massif: 1 – gabbro, 2 – granodiorites and granites; 3–6 – granitoids of the Kassel (3), Bogdanov (4), Chekin (5), and Gryznushin (6) massifs.

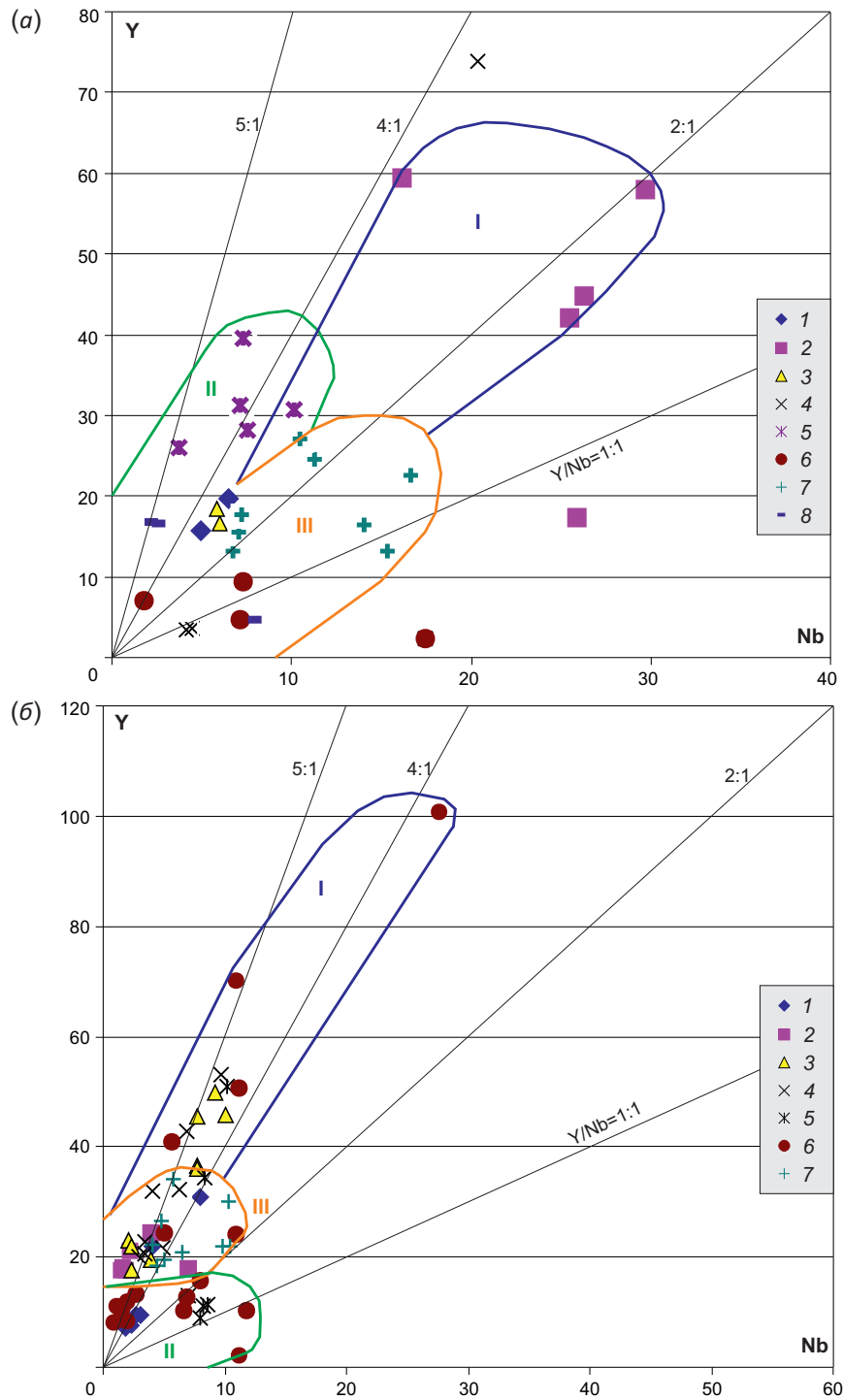


Рис. 5. Соотношения Y и Nb в дайковых комплексах ЦМП (а) и в интрузивных сериях ЗМП (б). (а) – комплексы: 1 – долерит-лампрофировый, 2 – родниковый, 3 – спасский, 4 – петропавловский, 5 – железнодороженский, 6 – балбукский, 7 – калымбаевский, 8 – желтинский. Поле I: долерит-лампрофировый, спасский и родниковый комплексы; поле II: железнодороженский и желтинский комплексы; поле III: балбукский и калымбаевский комплексы. (б) – комплексы: 1 – файзуллинский, 2 – наурузовский, 3 – басаевский, 4 – утлыкташский, 5 – кизильский, 6 – худолазовский, 7 – улугуртауский. Поле I: основные интрузивные серии ЗМП, поле II: анатектические гранитоиды (?), поле III: улугуртаусский комплекс. Пояснения см. в тексте.

Fig. 5. The Y/Nb ratios of dike complexes in the Central Magnitogorsk zone (a) and intrusive series of the West Magnitogorsk zone (WMZ) (b). (a) – complexes: 1 – dolerite-lamprophyric, 2 – Rodnik, 3 – Spassk, 4 – Petropavlovsk, 5 – Zheleznodorozhnsensky, 6 – Balbuk, 7 – Kalymbaev, 8 – Zheltinsky. Field I: dolerite-lamprophyre, Spassk and Rodnik complexes; field II: Zheleznodorozhnsensky and Zheltinsky complexes; field III: Balbuk and Kalymbaev complexes. (b) – complexes: 1 – Faizullin, 2 – Nauruzov, 3 – Basaev, 4 – Utlyktash, 5 – Kizil, 6 – Khudolaz, 7 – Ulugurtaus. Field I – main intrusive series of WMZ; field II – anatectic granitoids (?); field III – Ulugurtaus complex. See text for explanations.

гранитоидных массивов с $Y/Nb=4-1$. Связь с субдукцией подтверждается высокой активностью Cl и S во флюиде, что типично для надсубдукционных диорит-гранодиорит-порфировых серий, сопровождающихся Au-Cu порфировым (Краснинский массив) и Cu-Mo порфировым (Верхнеуральский массив) оруденением [Kholodnov, Bushlyakov, 2002].

Наряду с мантийно-коровыми сериями, при усилении субширотного стресса формировались корово-анатектические гранитоиды, неизвестные в центральной и западной части ММЗ [Kholodnov et al., 2020]. В самом северном, Ахуново-Петропавловском, ареале ВМП, в интервале 310–306 млн лет внедрялся ахуново-карагайский гранодиорит-гранитный комплекс. Изотопные параметры двух массивов этого комплекса: Карагайский – $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.70411$, $\epsilon Nd(t)=+4.38$, Ахуновский – $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.70414$, $\epsilon Nd(t)=+3.44$ [Bogatov, Kostitsyn, 1999; и др.] – отражают важную роль деплетированного мантийного субстрата при анатексисе. Гранитоиды этого комплекса по составу, возрасту и условиям генерации близки к надсубдукционным ГТГГ-сериям Среднего и Южного Урала (325–290 млн лет, см. раздел 7). По соотношению Y и Nb ахуново-карагайские гранитоиды отличаются от других интрузивных серий ВМП и всей ММЗ обеднением Y (<10 г/т) и низким Y/Nb-индексом – около 1.0 (рис. 6).

В условиях усиления коллизионных сдвиго-раздвиговых деформаций магматизм Ахуново-Петропавловского ареала завершает богатый калием и HFSE граносиенит-гранитный Уйскоборский массив (304 ± 4.8 млн лет), имеющий $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.70404$, $\epsilon Nd(t)=+5.76$ [Bogatov, Kostitsyn, 1999; Popov et al., 2002; Kholodnov et al., 2020]. Его породы сохраняют некоторые признаки надсубдукционных серий, но появляются черты синколлизионных и внутривулканических плюм-зависимых образований. Содержания Nb растут до 12 г/т при $Y/Nb=2.0-0.5$.

Завершает гранитоидный магматизм всей ММЗ гумбейский монцодиорит-гранитный комплекс (294 ± 8 млн лет) [Fershtater, 2013], с которым связана золотоносная кварц-шеелитовая и молибденитовая минерализация. Его пикрит-шонкиновый источник отвечает внутривулканическому (OIB) типу [Salikhov et al., 2019] при $Y/Nb=1.0-2.0$. По соотношению Nb и Y породы ранней фазы этого комплекса близки к монцогаббро и монцодиоритам пермских шошонит-латитовых серий (степнинская, увильдинская).

В целом ясно, что в ММЗ этапу наиболее интенсивного рифтогенного магматизма (E-MORB-тип) «мантийных окон» предшествовал этап плюм-зависимого магматизма (обогащенный источник, OIB-тип). Влияние этого плюма на магматизм ВМП – 375–360 млн лет. После прекращения режима «мантийных окон»

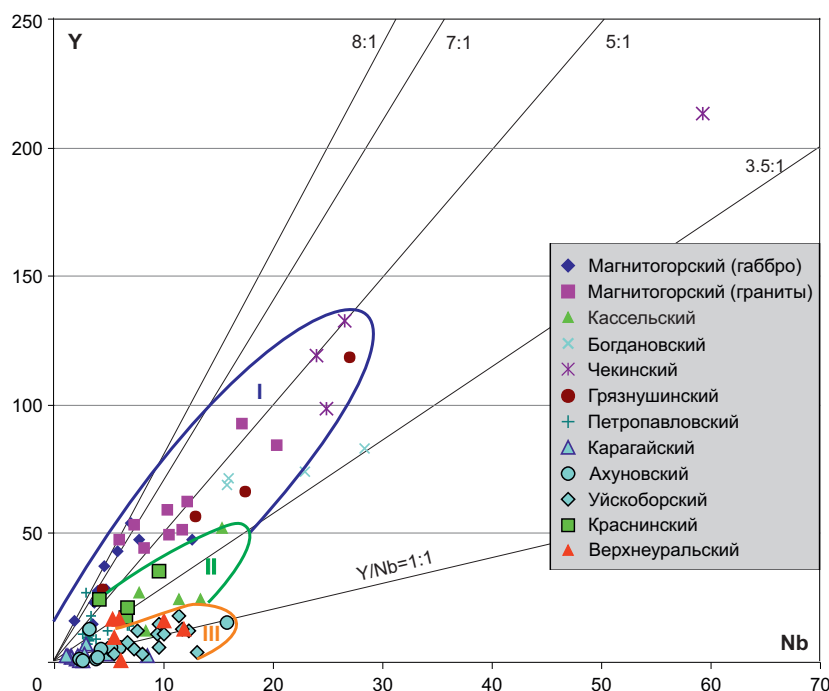


Рис. 6. Соотношения Y и Nb в интрузивных гранитоидах ВМП и ЦМП.

Массивы ВМП: Краснинский, Верхнеуральский, Кассельский, Петропавловский, Ахуновский, Карагайский, Уйскоборский. Поле I – Магнитогорская серия; поле II – окраинно-континентальные мантийно-коровые габбро-диорит-сиенитовые интрузии с порфировым оруденением; поле III – корово-анатектические граниты ГТГГ-типа (ахуново-карагайский комплекс) и Уйскоборский массив (A-тип).

Fig. 6. The Y/Nb ratios of intrusive granitoids in the East and Central Magnitogorsk zones.

East Magnitogorsk massifs – Krasnin, Verkhneuralsk, Kassel, Petropavlovsk, Akhunov, Karagay, Uyskobor. Field I – Magnitogorsk series; field II – marginal-continental mantle-crustal gabbro-diorite-syenite intrusions with porphyry mineralization; field III – crustal-anatexitic granites of the gabbro-tonalite-granodiorite-granite (GTGG) type (Akhunovo-Karagay complex), and the Uyskobor massif (A-type).

здесь возобновлялся плюм-зависимый базитовый и гранитоидный магматизм (304–294 млн лет – калымбаевский и гумбейский комплексы). В перми магматизм с источником ОИВ-типа сместился в Восточно-Уральскую мегазону, продуцируя шошонит-латитовые серии на Южном и Среднем Урале.

7. КОРОВО-АНАТЕКТИЧЕСКИЙ ГАББРО-ТОНАЛИТ-ГРАНОДИОРИТ-ГРАНИТНЫЙ МАГМАТИЗМ (ПОЗДНИЙ ДЕВОН – КАРБОН) АКО СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО УРАЛА

Габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные комплексы (ГТГГК) формируют крупные батолиты, протяженные ареалы и отдельные мелкие интрузии. Их появление отражает один из наиболее масштабных для позднего палеозоя этапов формирования континентальной коры УПП. Самые крупные из них являются долгоживущими центрами эндогенной активности. Их аналогами считаются батолиты андской АКО Северной Америки [Fershtater, 2013]. ГТГГК на Урале образуют два основных возрастных кластера: 365–355 и 320–290 млн лет. Многократный анатексис, сопровождающийся затем кристаллизационной дифференциацией, составляет характерную черту их формирования. На геодинамических диаграммах точки пород ГТГГК лежат в поле надсубдукционных серий. Подробно их строение, возраст и генезис описаны в статьях и монографиях Г.Б. Ферштатера с коллегами [Orogenic Granitoid Magmatism..., 1994; Fershtater et al., 2002, 2018; и др.].

Петротипом окраинно-континентальных ГТГГК в Восточно-Уральской мегазоне на Среднем Урале является долгоживущий (более 70 млн лет) Верхисетский батолит. В нем представлены породы последовательно внедряющихся габбро-диоритовой (368.9±6.1 млн лет), тоналит-трондьемитовой, тоналит-гранодиоритовой (345–315 млн лет) и адамеллит-гранитной (285–275 млн лет) серий [Orogenic Granitoid Magmatism..., 1994; Montero et al., 2000; Zin'kova, Fershtater, 2010; Fershtater, 2013; Smirnov et al., 2014a]. Согласно [Fershtater, 2013], биотит-роговообманковые породы двух ранних серий были частью протолита для более поздних – существенно гранодиоритовых, образованных в результате нескольких этапов анатексиса. В габброидах ранней серии батолита содержания Y достигают 20 г/т при Nb<5 г/т, Y/Nb=5 (рис. 7). Первичный состав ее источника в зоне нижнекорового анатексиса (и подстилающей зоне андерплейтинга) был обогащен деплетированным мантийным материалом, близким по составу к E-MORB. Эволюция серий шла гомодромно от ранних высокотемпературных анатектических габбро-диоритов, диоритов, тоналитов к более низкотемпературным гранодиоритам, адамеллитам, плагиогранитам (калифобный тип эволюции [Fershtater, 2013]) и K-Na гранитам (калифильный). Содержания Y и Nb в этом ряду дискретно понижаются, отвечая этапам анатексиса плавления, с Y/Nb=1.0 и менее на конечном этапе.

Гранитоиды «золотоносного» Шарташского (302±3 млн лет) и Каменского массивов (298–309 млн лет)

[Pribavkin, Pushkarev, 2011; Fershtater, 2013] фиксируют один из последних импульсов ГТГГК на Среднем Урале. По Y/Nb отношению они аналогичны поздним, обогащенным Nb сериям Верхисетского массива (рис. 7).

На Южном Урале, в Восточно-Уральской мегазоне, ГТГГК представлены крупными батолитами (Челябинский, Суундукский, Пластовский) и поясами отдельных массивов (Коелгско-Кабанский, Чернореченский, Нижнесанарский и др.) [Fershtater, 2013; Kallistov, Osipova, 2017] Для них характерны более высокие, по сравнению с аналогами Среднего Урала, концентрации многих микроэлементов (LREE, Rb, Li, Ba, Nb, Ta, Zr, Pb, Sr, Sc, Th и др.). Породы Челябинского батолита [Kallistov, 2011] имеют самые высокие содержания Nb (7–50 г/т) при близком количестве Y (6–40 г/т). Здесь Y/Nb-индекс в ряду от тоналитов и гранитов остается около 1.0, указывая, по-видимому, на связь с обогащенным протолитом ОИВ-типа в нижней части коры.

Отличия в соотношениях Y и Nb в ГТГГК Среднего и Южного Урала отражают особенности состава их магматических источников (протолитов): преобладание мантийного компонента E-MORB (Верхисетский массив) или ОИВ-типа (Челябинский массив).

Гранитоиды, подобные ГТГГК, присутствуют и в зоне ГУР, а также западнее, во фрагментах края ВЕП. На Южном Урале это массивы Сыростано-Тургоякского ареала (граница северной части ММЗ с краем ВЕП), Нижнеуфалейский массив (Уфалейский блок), Киалимский, Семибратский и Уржумский массивы (северо-восточный край БМА) [Shardakova, 2016a, 2016b]. Наличие последних свидетельствует о том, что влияние эндогенной активности, имеющей место при формировании УПП, отразилось и в зоне сочленения с ВЕП.

Породы Сыростанского массива (335–325 млн лет) [Shagalov, 2002; Fershtater, 2013] имеют высокие содержания Nb – до 25–33 г/т (рис. 8) на фоне снижения Y/Nb-индекса (от 2.0 до 0.5–0.7) от габбро и диоритов к плагиогранитам и K-Na гранитам. Этот массив близок к Челябинскому по составу источника (протолита). Тургоякский и Атлянский массивы фиксируют более поздние этапы анатектического гранитообразования. В Атлянском массиве содержания Nb и Y снижаются от гранодиоритов (Nb=12–15, Y=2–14 г/т) к гранитам (Nb=5.0–5.5, Y=3.3–5.0 г/т), Zr падает от 130–200 до 40 г/т. В Тургоякском массиве такая тенденция проявляется от гранодиоритов и адамеллитов (Y=10.0–12.5, Nb=4.5–6.0 г/т) к гранит-порфирам (4.6 и 5.4 г/т), при более низком Y/Nb-отношении ~0.5. Эти два массива по времени предшествуют внедрению Ахуново-Карагайского батолита (310–307 млн лет) в более южной части ММЗ, где адамеллиты и граниты содержат менее всего Nb и Y (2–5 г/т), характеризуя финальный этап формирования, возможно, единой с Сыростано-Тургоякской магматической системы (см. рис. 7).

Поведение Y и Nb служит дополнительным подтверждением того, что надсубдукционные серии ГТГГК, маркирующие один из наиболее поздних этапов (365–290 млн лет) формирования зрелой континентальной

коры УПП, различаются по составу протолита. Последний отвечает обогащенным мантийным источникам E-MORB или OIB-типа и заметно преобладает на Южном Урале. На диаграмме Пирса (см. рис. 7, б) гранитоидные ГТГК этого сектора (включая зону ГУР и край ВЕП) тяготеют к полю WPG.

На Урале этапы окраинно-континентального корово-анатектического гранитообразования во времени и пространстве чередуются с рифтогенным магматизмом как в надсубдукционных структурах типа

«мантийных окон», так и в шовных зонах и разломах с рифтогенным магматизмом OIB-типа. Литературные данные свидетельствуют, что батолитообразование, синхронное с рифтогенно-плюмовым магматизмом, имеет место на конвергентных границах, формирующихся над плюмами на краю континентов [Yarmolyuk et al., 2013, 2018]. В пределах АКО Сибирского континента одновременно с рифтогенным плюмовым магматизмом формируются крупные Ангаро-Витимский, Хангайский и другие гранитные батолиты [Vladimirov

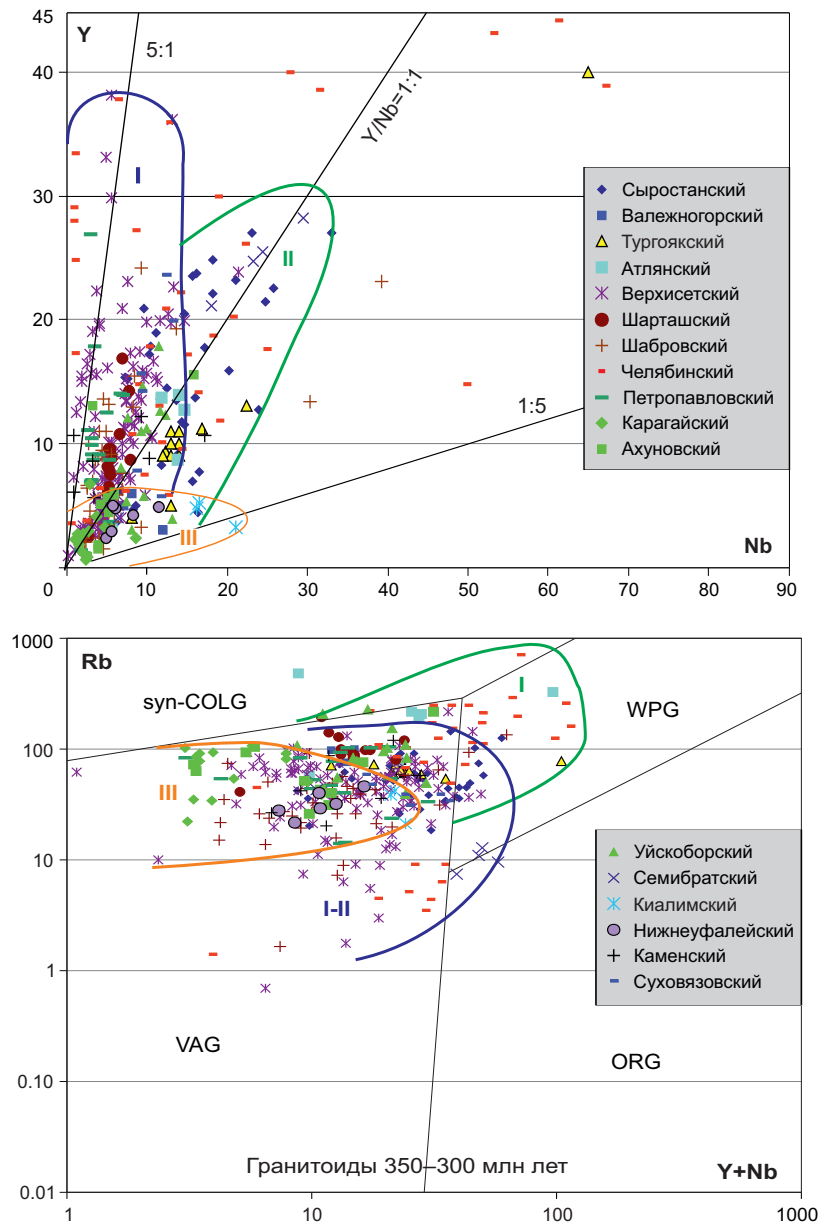


Рис. 7. Геохимические диаграммы для ГТГГ-комплексов Среднего и Южного Урала.

(а) – соотношения Y и Nb; (б) – диаграмма Пирса [Pearce et al., 1984; Pearce, Cann, 1973]. Поле I – ГТГГ-массивы Южного Урала (Челябинский, Сыростанский, Атлянский); поле II (смешанное) – ГТГГ-серии Среднего и Южного Урала; поле III – граниты с наиболее низкой степенью частичного плавления (Ахуновский, Карагайский, Киалимский и другие массивы).

Fig. 7. Geochemical diagrams for the GTGG complexes of the Middle and South Urals.

(a) – Y/Nb ratios; (b) – Pearce diagram [Pearce et al., 1984; Pearce, Cann, 1973]. Field I – GTGG massifs of the South Urals (Chelyabinsk, Syrostan, Atlyan); field II (mixed) – GTGG series of the Middle and South Urals; field III – granites with the lowest degree of partial melting (Akhunov, Karagay, Kialim and other massifs).

et al., 2003; Tsygankov et al., 2016]. Известны плюмы с преобладанием кремнекислой магмы, описываемые также как Silicate LIPS или SLIPS [Ernst, 2014]. На участках, подвергшихся наиболее сильным стрессовым воздействиям, типичным для АКО [Yarmolyuk et al., 2018], плюм-генерированные расплавы не поднимаются выше низов коры. Их тепловое и флюидное воздействие вызывает анатексис низов коры и подстилающей зоны нижнекорового андерплейтинга и определяет образование крупных мантийно-коровых гранитоидных батолитов.

На рис. 8 приведены обобщенные данные по изотопии Nd в позднепалеозойских (370–250 млн лет) гранитоидах Среднего и Южного Урала.

Специфичная, почти субвертикальная форма поля II характеризует разнонаправленные тектономагматические процессы при формировании и эволюции АКО Южного и Среднего Урала в позднем девоне и карбоне.

Габбро-гранитный магматизм «мантийных окон» имеет большую деплетированность (Магнитогорский массив – верхняя часть поля), а предшествующие надсубдукционные массивы (Верхнеуральский, Петропавловский) менее деплетированны (нижняя часть поля).

ГТГГ-серии также существенно отличаются по соотношениям $\epsilon Nd(t)$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ – возраст (T), что связано с разными субстратом и степенью мантийно-корового взаимодействия (Верхисетский, Челябинский массивы и др.).

8. ПЕРМСКИЙ КОЛЛИЗИОННЫЙ И ПОСТКОЛЛИЗИОННЫЙ ГРАНИТНЫЙ МАГМАТИЗМ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОЙ МЕГАЗОНЫ СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО УРАЛА

Образование пермских гранитоидов связано с гиперколлизией, столкновением ВЕП и Казахстанского

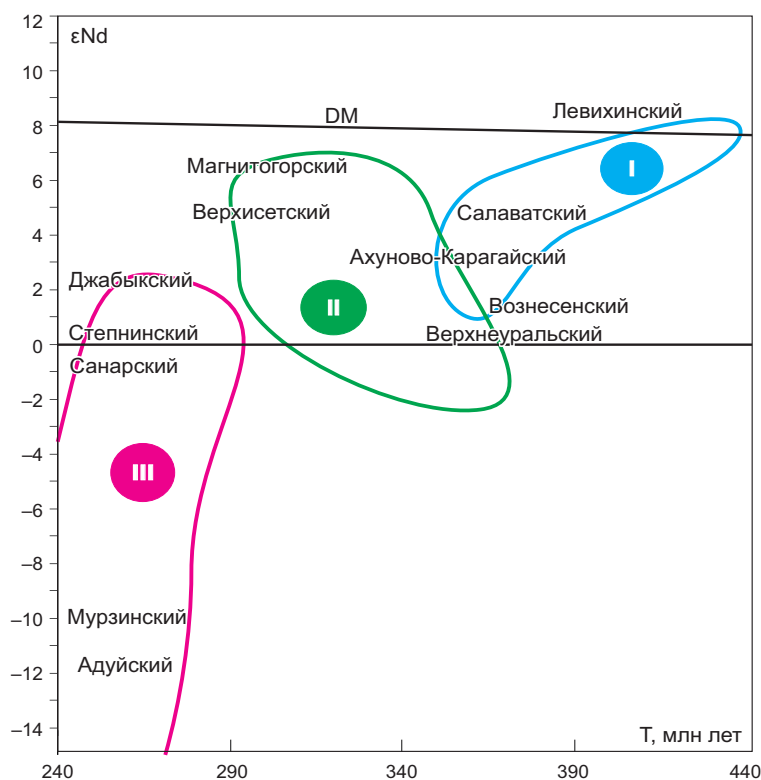


Рис. 8. Nd-изотопная систематика позднепалеозойских гранитоидов Урала (фрагмент рисунка из работы [Kholodnov et al., 2017], с дополнениями).

При построении полей использованы также данные следующих авторов [Ronkin, 1989; Orogenic Granitoid Magmatism..., 1994; Shatagin et al., 2000; Popov et al., 2002; Osipova et al., 2008; Tevelev et al., 2006, 2015; Fershtater, 2013; Rakhimov, Salikhov, 2014; Smirnov et al., 2014a, 2014b; Ronkin et al., 2016; Shardakova, 2016a, 2016b; Krasnobaev et al., 2017; Petrov, 2017, 2020; Kholodnov et al., 2020; и др.]. Поле I – массивы офиолитовых и островодужных ассоциаций Урала; поле II – окраинно-континентальные гранитоидные массивы (поздний девон – карбон); поле III – гранитоиды, образующиеся при гиперколлизии континентов (пермь) (степнинская, джабыкско-санарская и мурзинско-адуйская серии).

Fig. 8. The Nd-isotope systematics of the Late Paleozoic granitoids of the Urals (a fragment of the figure from [Kholodnov et al., 2017], with additional data).

For constructing the fields, we also used the data from [Ronkin, 1989; Orogenic Granitoid Magmatism..., 1994; Shatagin et al., 2000; Popov et al., 2002; Osipova et al., 2008; Tevelev et al., 2006, 2015; Fershtater, 2013; Rakhimov, Salikhov, 2014; Smirnov et al., 2014a, 2014b; Ronkin et al., 2016; Shardakova, 2016a, 2016b; Krasnobaev et al., 2017; Petrov, 2017, 2020; Kholodnov et al., 2020] and other publications. Field I – massifs of ophiolite and island-arc associations of the Urals; field II – Late Devonian – Carboniferous marginal-continental granitoid massifs; field III – granitoids resulting from the Permian continental collision (Stepninsky, Dzhabyk-Sanar, and Murzin-Adui series).

континента [Puchkov, 2000, 2010; и др.]. Земная кора в это время достигла значительной зрелости (рис. 8, поле III) и мощности, которая за счет андерплейтинга и скучивания составила в Восточно-Уральской мегазоне около 30 км [Fershtater, 2013]. По условиям генерации пермские коллизионные граниты – это также продукты водного корового анатексиса. В указанном секторе наблюдается субсинхронное формирование собственно гранитной (коровой) и монцодиорит-гранитной (первично-мантийной) серий.

В контурах Мурзинско-Адуйского блока, структуры с древним основанием, находятся Адуйский и Мурзинский гранитные массивы (250–256 млн лет). Подробно их состав, строение и эволюция охарактеризованы в работах [Gerdes et al., 2002; Popov et al., 2002, 2003; Krasnobaev et al., 2005a, 2006; Fershtater, 2013; Fershtater, Borodina, 2018; Fershtater et al., 2018, 2019; Shardakova et al., 2021].

На Южном Урале, в пределах Восточно-Уральской мегазоны (Кочкарский антиклинорий) коллизионные гранитоиды внедрялись в три этапа, которым отвечают гнейсо-гранитный, гранитный и гранит-лейкогранитный комплексы [Fershtater, 2013]. Варламовский массив (300 млн лет) относится к гнейсо-гранитному комплексу, синхронному с главной фазой регионального метаморфизма. Он несет низкие содержания Zr (50–105 г/т), Nb (2.5–5 г/т) и Y (3–7 г/т), Y/Nb около 1. Такие невысокие содержания HFSE характерны для пород с низкой степенью частичного плавления. Состав галогенов в минералах этого массива показал [Kholodnov, Bushlyakov, 2002], что гранитизирующие водные флюиды имели низкие концентрации F (в биотитах 0.3–1.0 %, в апатитах – 2.2–3.5 %), при минимуме Cl (0.02–0.05 %).

За ним следует джабыкско-санарский комплекс (Джабыкский, Санарский и Кацбахский батолиты). Джабыкский массив сложен мелкосреднезернистыми биотитовыми гранитами (I фаза, 289 ± 4.4 млн лет) и среднезернистыми биотитовыми и двуслюдяными гранитами (II фаза, 277 ± 2.6 млн лет). Для них характерны довольно высокие $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70458\text{--}0.70533$ [Fershtater, 2013], $\epsilon\text{Nd}(t)$ от -0.11 до $+1.6$, то есть источником для гранитов служила преимущественно новообразованная континентальная кора УПП. Модельный Nd-возраст (1050–800 млн лет) допускает участие в протолите и вещества древних блоков. Гранитообразование в джабыкско-санарском комплексе связано с более высокой степенью частичного плавления при снижении общего и водного давления (до 4–5 кбар). Росту степени плавления способствовало повышение активности F во флюиде. В биотитах концентрации F достигают 1.0–1.5 % [Kholodnov, Bushlyakov, 2002]. Рост температуры анатексиса подтверждается дискретным ростом в породах этого комплекса содержания «тугоплавких» HFSE – Nb (9–19 г/т) и Y (10–20 г/т), Y/Nb около 1.0. В Джабыкском батолите присутствуют тела субщелочных гранитоидов, относимых к степнинскому комплексу [Tevelev et al., 2005, 2006; Osipova et al., 2008; Fershtater, 2013]. Отметим, что пермские граниты коллизионного типа присутствуют и западнее зоны ГУР: в Уфалейском блоке кизильский комплекс имеет Rb-Sr возраст 267 млн лет и $\text{ISr} = 0.70553$ [Shardakova, 2016a].

В целом в коллизионных гранитах наблюдаются повышенные, относительно ГТГГК, концентрации многих микроэлементов (Rb, Cs, Ba, Zr, Nb, Th, U; PЗЭ; La/Yb > 30).

Породы степнинской монцогаббро-гранитной серии (шошонит-латитовый тип) образуют отдельные

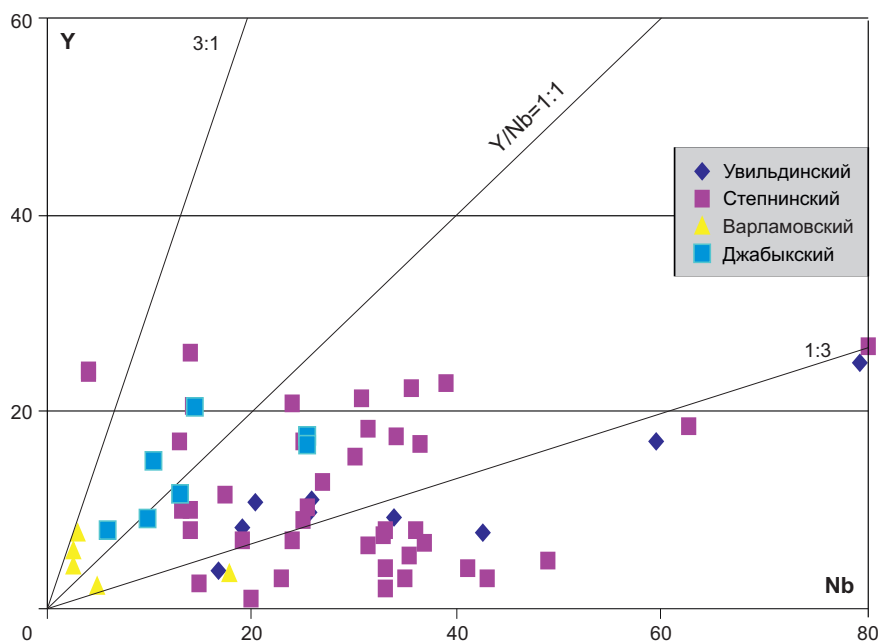


Рис. 9. Соотношения Y и Nb в ряде гранитоидных массивов Южного Урала.
Fig. 9. The Y/Nb ratios of granitoid massifs, South Urals.

массивы и целые пояса (Степнинско-Вандышевско-Уйский, Шилово-Аллакиозерский, Увильдино-Кисегачский и др.), представлены рядом от монцогаббро и монцодиоритов до граносиенитов, субщелочных гранитов, лейкогранитов с жилами пегматитов и аплитов. Они внедрялись дискретно начиная с 286 млн лет и далее в течение верхней перми [Ronkin, 1989; Bushlyakov, Bajenov, 1999; Smirnov, Kaleganov, 2001; Fershtater, 2013; Snachev et al., 2018; Puchkov, 2018a], чередуясь во времени с синколлизийными коровыми гранитами. Породы данной серии обогащены K, F, Ti, Fe, LILE (Rb, Sr, Ba, Th), HFSE (Nb, Ta, Y, Zr, Hf) и ЛРЗЭ. Для Степнинского и Увильдинского массивов (рис. 9) фиксируются тренды магматической дифференциации: в Степнинском – от монцогаббро и монцодиоритов (Nb 24–27 г/т и Y 17–21 г/т) к кварцевым монцодиоритам (Nb 36–46 г/т и Y 15–22 г/т) при Y/Nb=0.6–0.7, в Увильдинском – от монцодиоритов и сиенитов (Nb 19.0–20.5 г/т и Y 8–11 г/т) к адамеллитам (Nb 25–26 г/т и Y 10–11 г/т) и далее к субщелочным гранитам и лейкогранитам, наиболее богатым Nb (до 34–79 г/т) и Ta (до 15–36 г/т), при Y=8–25 г/т. В увильдинских гранитах Y/Nb составляет 0.3, в Степнинском выше – 1–2).

Особенности состава подтверждают плюм-зависимую природу пермских монцодиорит-гранитных серий [Puchkov, 2018a]. На начальном этапе внедрялись глубинные основные и средние мантийные магмы, их можно считать производными отдельного плюма: на диаграммах ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), $\epsilon\text{Nd}(t)$ и V-Ti/1000 (г/т) они лежат в поле OIB. Позднее при дифференциации возникли редкометалльные граниты и лейкограниты. В Степнинском и Увильдинском массивах также имеются граносиениты и граниты, обедненные Nb. Они могли быть образованы при плавлении континентальной коры под действием энергии и флюидов плюма и ранних высокотемпературных фаз самих интрузий (околоинтрузивный анатексис, мигматизация и минглинг).

На финальных стадиях эволюции УПП внедрялись мелкие тела постколлизийной гранит-лейкогранитной серии (Малышевский, Шамейский, Кременкульский, Зенковский, Сосновский, Юго-Коневский и другие массивы, кабанский комплекс), которые часто приурочены к субмеридиональным зонам разломов и оперяющим их нарушениям и характерны только для сегментов восточного склона Урала с развитой континентальной корой. Породы в этих массивах часто грейзенизированы

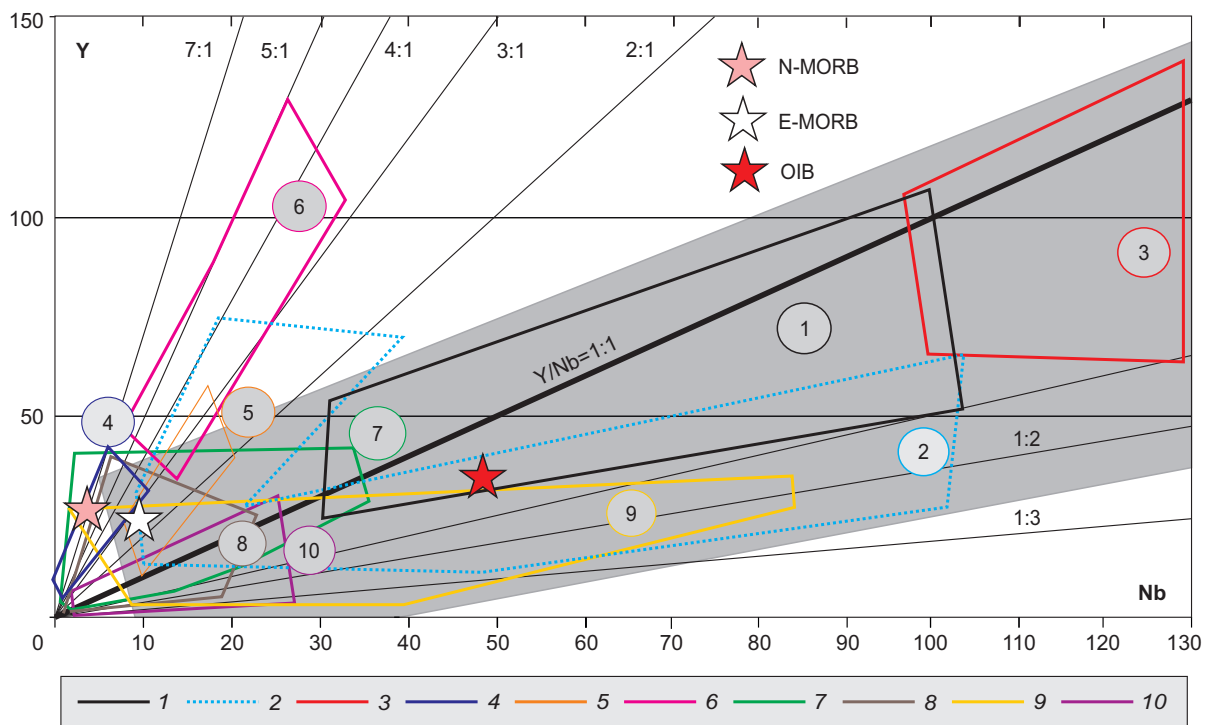


Рис. 10. Сводная диаграмма Y-Nb для гранитоидов Урала (от рифея до триаса).

Серии: 1 – внутриплитные рифтогенные плюм-зависимые (R_{2-3}), 2 – переходных обстановок «тиманского» этапа (V-€), 3 – субщелочные плюм-зависимые (O_1), 4 – островодужные (O_3-D_2); 5–6 – позднеостроводужные (D_3-C_1): 5 – переходной обстановки («надсубдукционные»), 6 – дивергентного режима «мантийных окон»; 7–8 – надсубдукционные (АКО) (D_3-C_3): 7 – Южный Урал, 8 – Средний Урал; 9 – монцодиорит-гранитные плюм-зависимые (P_1), 10 – коллизийные (P_1-T_1). Серое поле объединяет плюм-зависимые гранитоидные серии.

Fig. 10. Summary diagram of the Y-Nb ratios for the Uralian granitoids (from Riphean to Triassic).

Series: 1 – intraplate riftogenic plume-dependent (R_{2-3}); 2 – transitional settings of the "Timan" stage (V-€); 3 – sub-alkaline plume-dependent (O_1); 4 – island-arc (O_3-D_2); 5–6 – late island-arc (D_3-C_1): 5 – transitional setting ("suprasubduction"), 6 – divergent regime of "slab-windows"; 7–8 – suprasubduction (D_3-C_3): 7 – South Urals, 8 – Middle Urals; 9 – monzodiorite-granite plume-dependent (P_1); 10 – collisional (P_1-T_1). Gray field – plume-dependent and granitoid series.

и альбитизированы, вплоть до образования альбититов, калишпатитов и слюдитов, с флюоритом, пиритом, молибденитом (Мальшевский, Кременкульский массивы), иногда – золотоносными кварцевыми жилами.

Отметим, что в настоящем выпуске журнала в статье, посвященной девон-карбонному магматизму и оруденению Южного Урала [Kosarev et al., 2021], геодинамические аспекты развития аккреционно-коллизонной системы данного сектора рассмотрены несколько в другой интерпретации.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы проследили основные тенденции в эволюции палеозойского гранитоидного магматизма Северного, Среднего и Южного Урала в интервале 490–250 млн лет на разных этапах геодинамической эволюции Уральского орогена. Обзор соотношений Y и Nb (Y/Nb) в комплексах, имеющих широкий спектр составов, подтвердил применимость этих элементов для уточнения геодинамических условий, механизмов магмогенерации, степени мантийно-корового взаимодействия. На рис. 10 приведены обобщенные данные по соотношениям Y и Nb в гранитоидах Урала. Используя представительные анализы, авторы предварительно выделили поля пород, генерированных в разных геодинамических обстановках и, в зависимости от этого, имеющих разные источники вещества. Нанесены также поля доордовикских гранитоидов: рифейских внутриплитных рифтогенных – с высоким содержанием Nb, выдержанным отношением Y/Nb=1.5–0.5 (OIB-тип) и венд-кембрийских – с переменной геохимией, выражающей быструю смену обстановок, что также отражается на величине Y/Nb-индекса (две «ветви» на рис. 10). В генерации многих гранитоидов доуральского этапа развития важную роль играло вещество мантийных плюмов [Puchkov, 2018b].

Нами показано, что в палеозое также генерация гранитов часто связана с влиянием мантийных диапиров (плюмов), подъем которых вызывал анатексис коры, с формированием кислых выплавок. По составу источника к OIB-типу наиболее близки породы монцодиорит-гранитных серий (P_1) с Y/Nb=0.3–1.3 (рис. 10, поле 9); магматиты «мантийных окон» (D_3-C_1) в большей степени обогащены Y (поле 6). Накопление данных по соотношениям Y, Nb в большом спектре объектов, сопоставление их с изотопными параметрами серий – предмет наших дальнейших исследований.

Важную роль в магмогенерации играли плейт-тектонические процессы: образование гранитов в COX и над зонами субдукции, анатексис в орогенах с мощной корой, сжатой в результате аккреции и коллизии. Допускается возможность сосуществования магматических пород конвергентного и дивергентного режима в случае субдукции COX под АКО.

Отметим некоторые наиболее значимые моменты.

1. Начиная с раннего ордовика на восточной окраине ВЕП проявлялся основной и кислый магматизм, связанный с заложением Уральского палеоокеана и пассивной

окраины континента. Установлены два импульса рифтогенного плюм-зависимого (OIB-тип, Y/Nb=0.5–1.0) магматизма: ранне- (476–475 млн лет) и позднеордовикский (450–435 млн лет).

2. В генерации серий позднеордовикско-силурийского этапа Тагильской и Восточно-Уральской мегазон на Северном и Среднем Урале главную роль играла субдукция. Для пород характерны повышенные Y/Nb=4–7, до 20 (E-MORB, иногда – ближе к N-MORB-типам), типичные для пород островодужного ряда.

3. Монцобаббро-сиенитоидный магматизм позднего силура – нижнего девона в Тагильской мегазоне по составу сходен с обогащенными магматитами «мантийных окон» (E-MORB-тип). На западе зоны в структурах растяжения диапиры одновременно вызвали прогрев, метаморфизм и анатексис новообразованной коры (ЛАП-серии). Такая последовательность с разноуровневыми источниками (в мантии и коре) отражает связь генерации магм как с зоной субдукции, так и с астеносферными диапирами.

4. На постостроводужном этапе (поздний девон – карбон) в ММЗ существовала АКО, плюм-зависимые серии (OIB-тип, Y/Nb=1–3) во времени и в пространстве чередовались с рифтогенными магматитами «мантийных окон» (E-MORB-тип, Y/Nb=3–7). Выделен также ряд мантийно-коровых массивов с Y/Nb-индексом 4–1, для которых связь с зоной субдукции подтверждается особенностями флюидного режима и наличием Au-Cu-порфирирового и Cu-Mo-порфирирового оруденения.

5. Крайне-континентальные ГТГГ-серии, маркирующие основной этап (365–290 млн лет) формирования континентальной коры УПП, имели различный состав магматических источников – E-MORB и OIB-типы; последний доминировал на Южном Урале. Отметим, что поля серий (рис. 10), так или иначе связанных с субдукцией, сосредоточены близко друг к другу и в целом характеризуются низкими содержаниями Y и Nb и переменным Y/Nb-индексом. Они, в зависимости от степени мантийно-корового взаимодействия, по составу источника близки к указанным выше типам.

6. В ходе пермской гиперколлизии между ВЕП и Казахстанским континентом, в Восточно-Уральской мегазоне, на Среднем и Южном Урале субсинхронно формировались гранитная (коровая) и монцодиорит-гранитная серии. Появление последней связано с влиянием плюма (тип OIB, см. выше), вызвавшего анатексис коры.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bogatov V.I., Kostitsyn Yu.A., 1999. The Rb-Sr Isotope Age and Geochemistry of Granitoids in the Northern Magnitogorsk Trough, South Urals. Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration 2, 34–41 (in Russian) [Богатов В.И., Костицын Ю.А. Rb-Sr изотопный возраст и геохимия гранитоидов на севере Магнитогорского прогиба, Южный Урал // Известия вузов. Геология и разведка. 1999. № 2. С. 34–41].

Bushlyakov I.N., Bajenov A.G., 1999. Geochemistry of Halogens in Granitoids and Metamorphite of the Ilmenogorsk

Complex. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publishing House, 72 p. (in Russian) [Бушляков И.Н., Баженов А.Г. Геохимия галогенов в гранитоидах и метаморфитах Ильменогорского комплекса. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 1999. 72 с.].

Ernst R.E., 2014. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press, London, 653 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>.

Fershtater G.B., 1987. Petrology of Major Intrusive Associations. Nauka, Moscow, 231 p. (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 1987. 231 с.].

Fershtater G.B., 2013. Paleozoic Intrusive Magmatism of the Middle and South Urals. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 365 p. (in Russian) [Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2013. 365 с.].

Fershtater G.B., Borodina N.S., 2018. Murzinka Massive at the Middle Urals as an Example of the Interformational Granite Pluton: Magmatic Sources, Geochemical Zonality, Peculiarities of Formation. *Lithosphere* 5, 672–691 (in Russian) [Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С. Мурзинский массив на Среднем Урале как пример межформационного гранитного плутона: магматические источники, геохимическая зональность, особенности формирования // Литосфера. 2018. № 5. С. 672–691]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-672-691>.

Fershtater G.B., Borodina N.S., Bea F., Montero P., 2018. Model of Mantle-Crust Interaction and Magma Generation in the Suprasubduction Orogen (Paleozoic of the Urals). *Lithosphere* 2, 177–207 (in Russian) [Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Беа Ф., Монтеро П. Модель мантийно-корового взаимодействия и сопряженного магматизма в надсубдукционном орогене (палеозой Урала) // Литосфера. 2018. № 2. С. 177–207]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-2-177-207>.

Fershtater G.B., Borodina N.S., Bea F., Zin'kova E.A., Montero P., Shagalov E.S., 2002. Suprasubductional Anatectic Granitoids of the Urals: A Contribution to Understanding the Role of Subduction in Granite Formation. *Russian Geology and Geophysics* 43 (1), 42–56 (in Russian) [Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Беа Ф., Зинькова Е.А., Монтеро П., Шагалов Е.С. Надсубдукционные анатектические гранитоиды Урала: вклад в понимание роли субдукции в гранитообразовании // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 1. С. 42–56].

Fershtater G.B., Krasnobaev A.A., Montero P., Bea F., Borodina N.S., Vishnyakova M.D., Soloshenko N.G., Streletskaya M.V., 2019. Age and Isotope-Geochemical Features of the Murzinka – Adui Metamorphic Complex in Connection with the Problem of Formation of the Murzinka Interformational Granite Pluton. *Russian Geology and Geophysics* 60 (3), 287–308. <https://doi.org/10.15372/RGG2019039>.

Fershtater G.B., Malakhova L.V., Borodina N.S., Rapoport M.S., Smirnov V.N., 1984. Eugeosyncline Gabbro-Granite Series. Nauka, Moscow, 264 p. (in Russian) [Ферштатер Г.Б., Малахова Л.В., Бородина Н.С., Рапопорт М.С.,

Смирнов В.Н. Эвгеосинклинальные габбро-гранитные серии. М.: Наука, 1984. 264 с.].

Frolova T.I., Burikova I.A., 1977. Geosyncline Volcanism (Case of the Eastern Slope of the South Urals). MSU Publishing House, Moscow, 279 p. (in Russian) [Фролова Т.И., Бурикова И.А. Геосинклинальный вулканизм (на примере восточного склона Южного Урала). М.: Изд-во МГУ, 1977. 279 с.].

Gerdes A., Montero P., Bea F., Fershtater G., Borodina N., Osipova T., Shardakova G., 2002. Peraluminous Granites Frequently with Mantle-Like Isotope Compositions: The Continental-Type Murzinka and Dzhabyk Batholith of the Eastern Urals. *International Journal of Earth Sciences* 91, 3–19. <https://doi.org/10.1007/s005310100195>.

Gorozhanin V.M., 1995. Rubidium – Strontium Isotope Method for Solving the Problems of Geology of the South Urals. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ekaterinburg, 23 p. (in Russian) [Горожанин В.М. Рубидий – стронциевый изотопный метод в решении проблем геологии Южного Урала. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 1995. 23 с.].

Grabezhev A.I., Puchkov V.N., Gerdes A., Rovnushkin M.Yu., 2014. Krasnoturinskoe Copper-Skarn Ore Field (North Urals): U-Pb Age of Ore Controlling Diorites, and Their Place in the Regional Metallogeny Scheme. *Doklady Earth Sciences* 456 (4), 443–447 (in Russian) [Грабежев А.И., Пучков В.Н., Гердес А., Ровнушкин М.Ю. Краснотурьинское медно-скарновое рудное поле (Северный Урал): U-Pb-возраст рудоконтролирующих диоритов и их место в схеме металлогении региона // Доклады АН. 2014. Т. 456. № 4. С. 443–447]. <https://doi.org/10.7868/S0869565214160191>.

Greenough J.D., Dostal J., Mallory-Greenough M., 2005. Igneous Rock Associations 5. Oceanic Island Volcanism II: Mantle Processes. *Geoscience Canada* 32 (2), 77–90.

Kallistov G.A., 2011. Petrology of Granitoids of the Chelyabinsk Massif. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ekaterinburg, 23 p. (in Russian) [Каллистов Г.А. Петрология гранитоидов Челябинского массива. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2011. 23 с.].

Kallistov G.A., Osipova T.A., 2017. Geology and Geochemistry of Synplutonic Dykes in the Chelyabinsk Granitoid Massif, South Urals. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 331–345 (in Russian) [Каллистов Г.А., Осипова Т.А. Геология и геохимия синплутонических даек в Челябинском гранитоидном массиве (Южный Урал) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 2. С. 331–345]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0244>.

Khanchuk A.I., Martynov Yu.A., 2011. Tectonics and Magmatism of Margins of Sliding of Oceanic and Continental Lithospheric Plates. In: *Geology, and Processes in Settings of Subduction, Collision and Sliding of Lithospheric Plates. Proceedings of the All-Russia Scientific Conference with International Participation (September 2–23, 2011)*. Dal'nauka, Vladivostok, 45–49 (in Russian) [Ханчук А.И., Мартынов Ю.А. Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит //

Геология, процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (2–23 сентября 2011 г.). Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 45–49].

Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N., 2002. Halogens in Endogenous Ore Formation. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, 392 p. (in Russian) [Холоднов В.В., Бушляков И.Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2002. 392 с.].

Kholodnov V.V., Fershtater G.B., Shagalov E.S., Sharda-kova G.Yu., 2017. Riphean Magmatism and Ore Formation Preceding the Opening of the Uralian Paleoocean (Western Slope of the South Urals). *Lithosphere* 2, 5–26 (in Russian) [Холоднов В.В., Ферштатер Г.Б., Шагалов Е.С., Шардакова Г.Ю. Рифейский магматизм и рудообразование, предшествующие раскрытию Уральского палеоокеана (западный склон Южного Урала) // *Литосфера*. 2017. № 2. С. 5–26].

Kholodnov V.V., Petrov G.A., Konovalova E.V., 2013. Skarn-Magnetite Fields of the Urals: Age, Geodynamic Types, Fluid Regime, and Magma Sources. In: A.A. Kremenetsky (Ed.), *Ore Formation Processes and Applied Geochemistry. To the 100th Anniversary of L.N. Ovchinnikova*. Publishing House of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, 94–109 (in Russian) [Холоднов В.В., Петров Г.А., Коновалова Е.В. Скарново-магнетитовые месторождения Урала: возраст, геодинамическая типизация, флюидный режим, магматические источники // *Процессы рудообразования и прикладная геохимия: К 100-летию Л.Н. Овчинникова* / Ред. А.А. Кременецкий. М.: Изд-во ИМГРЭ, 2013. С. 94–109].

Kholodnov V.V., Shagalov E.S., Callistov G.A., Sharda-kova G.Yu., Salikhov D.N., Konovalova E.V., 2020 (in press). Akhunovo-Petropavlovsky Granitoid Area as a Marginal Continental Center of the Long-Term Mantle-Crust Interaction: The Significance of Subduction and Riftogenic-Plume Sources. *Russian Geology and Geophysics* 8 (in Russian) [Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Каллистов Г.А., Шардакова Г.Ю., Салихов Д.Н., Коновалова Е.В. Ахуново-Петропавловский гранитоидный ареал как окраинно-континентальный центр длительного мантийно-корового взаимодействия: роль субдукционных и рифтогенно-плюмовых магматических и флюидных источников // *Геология и геофизика*. 2020. № 8 (в печати)]. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG2020155>.

Kosarev A.M., Vladimirov A.G., Khanchuk A.I., Salikhov D.N., Kholodnov V.B., Osipova T.A., Kallistov G.A., Seravkin I.B., Rahimov I.R., Shafigullina G.T., 2021. Devonian-Carboniferous Magmatism and Metallogeny in the South Ural Accretionary-Collisional System. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), XX–XX. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0529>.

Krasnobaev A.A., Bea F., Fershtater G.B., Montero P., 2005a. Zircon Geochronology of Murzinka Metamorphic Complex, Central Ural. *Doklady Earth Sciences* 404 (3), 407–410 (in Russian) [Краснобаев А.А., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Монтеро П. Цирконовая геохронология мурзинского

метаморфического комплекса (Средний Урал) // *Доклады АН*. 2005. Т. 404. № 3. С. 407–410].

Krasnobaev A.A., Bea F., Fershtater G.B., Montero P., 2005b. About Geochemical Heterogeneity of Zircons from the Silurian Gabbro and Granitoids of the Middle Urals. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB RAS. Yearbook 2004*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 248–253 (in Russian) [Краснобаев А.А., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Монтеро П. О геохимической гетерогенности цирконов из силурийских габбро и гранитоидов Среднего Урала // *Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН. Ежегодник-2004*. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2005. С. 248–253].

Krasnobaev A.A., Fershtater G.B., Bea F., Montero P., 2006. Zircons from Magmatic Rocks of the Tagil and Magnitogorsk Zones as a Base for Their Age and Correlation Relations. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB RAS. Yearbook 2005*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 276–283 (in Russian) [Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. Цирконы из магматитов Тагильской и Магнитогорской зон как основа их возрастных и корреляционных соотношений // *Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН. Ежегодник-2005*. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2006. С. 276–283].

Krasnobaev A.A., Fershtater G.B., Bogomolov E.S., Lari-onov A.N., Berezhnaya N.G., 2007. The Auerbakh Granitoid Massif: Zircons, Age, Polychrony. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB RAS. Yearbook 2006*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 191–196 (in Russian) [Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Богомолов Е.С., Ларионов А.Н., Бережная Н.Г. Ауэрбаховский гранитоидный массив: цирконы, возраст, полихронность // *Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН. Ежегодник-2006*. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2007. С. 191–196].

Krasnobaev A.A., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Shokal-sky S.P., Busharina S.V., 2017. Polychronic Zirconology of Syenites from the Avashlin Intrusion in the Kurgas Anticline (South Urals). *Doklady Earth Sciences* 473 (2), 195–200 (in Russian) [Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Шокальский С.П., Бушарина С.В. Полихронная цирконология сиенитов Авашлинской интрузии в Кургаской антиклинали (Южный Урал) // *Доклады АН*. 2017. Т. 473. № 2. С. 195–200]. <https://doi.org/10.7868/S0869565217080187>.

Krivolutskaya N.A., Mikhailov V.N., Snisar S.G., Gongalsky B.I., 2009. Internal Structure and Composition of the Mikchangdinsky Basic and Ultrabasic Massif in the Norilsk Ore District (Siberian Trap Province). *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 14 (2), 29–48 (in Russian) [Криволюцкая Н.А., Михайлов В.Н., Снисар С.Г., Гонгальский Б.И. Внутреннее строение и состав Микчангдинского ультрабазит-базитового массива в Норильском рудном районе (Сибирская трапповая провинция) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. Вып. 14. № 2. С. 29–48].

Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gertseva M.V., 2005. Pre-Ordovician Granitoids of the Timan-Ural Region, and Evolution of Proto-Uralides-Timanides. Geoprint, Syktyvkar, 100 p. (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герцева М.В. Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция протоуралид-тиманид. Сыктывкар: Геопринт, 2005. 100 с.]

Malyutin S.A., Gradovsky I.F., Uspenskaya E.A., 2007. Trachyrhyodacite-Granosyenite and Comendite-Trachyrhyolite-Alkaline-Granitic Associations of Central Ural Uplift and Their Ore Content (Middle Ural). Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration 5, 22–31 (in Russian) [Малютин С.А., Градовский И.Ф., Успенская Е.А. Трахириодацит-граносиенитовая и комендит-трахириолит-щелочно-гранитная ассоциация Центрально-Уральского поднятия и их рудоносность (Средний Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 5. С. 22–31].

Montero P., Bea F., Gerdes A., Fershtater G., Zin'kova N., Borodina N., Osipova T., Smirnov V., 2000. Single-Zircon Evaporation Ages and Rb-Sr Dating of Four Major Variscan Batholiths of the Urals: A Perspective on the Timing of Deformation and Granite Generation. Tectonophysics 317 (1–2), 93–108. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00270-X).

Nosova A.A., Narkisova V.V., Sazonova L.V., Simakin S.G., 2002. Minor Elements in Clinopyroxene from Paleozoic Volcanics of the Tagil Island Arc in the Central Urals. Geochemistry International 40 (3), 219–232.

Orogenic Granitoid Magmatism of the Urals, 1994. UB RAS Publishing House, Miass, 250 p. (in Russian) [Орогенный гранитоидный магматизм Урала. Миасс: Изд-во УрО РАН, 1994. 250 с.]

Osipova T.A., Tevelev A.V., Popov V.S., Belyatsky B.V., 2008. Sm-Nd and Rb-Sr Age of Gabbroic Rocks in the Dzhabyk Batholith, the Southern Urals. Doklady Earth Sciences 419, 275–280. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08020190>.

Pearce J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. Lithos 100 (1–4), 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>.

Pearce J.A., Cann J.R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. Earth and Planetary Science Letters 19 (2), 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5).

Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. Journal of Petrology 25 (4), 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>.

Perepelov A.B., Puzankov M.Y., Ivanov A.V., Filosofova T.M., 2006. Basanites of Mt. Khukhch: First Mineralogical-Geochemical Data on the Neogene K-Na Alkaline Magmatism in Western Kamchatka. Doklady Earth Sciences 409, 765–768. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06050205>.

Petrov G.A., 2017. Conditions for the Formation of Complexes in the Main Uralian Fault Zone in the North Urals. Publishing House of the Ural State Mining University,

Ekaterinburg, 181 p. (in Russian) [Петров Г.А. Условия формирования комплексов зоны Главного Уральского разлома на Северном Урале. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 181 с.]

Petrov G.A., 2020. Precambrian Complexes of the Isherim Anticlinorium (North Urals): Stratigraphy, Magmatism, Metamorphism, and Metallogeny. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, 176 p. (in Russian) [Петров Г.А. Докембрийские комплексы Ишеримского антиклинория (Северный Урал): стратиграфия, магматизм, метаморфизм, металлогения. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2020. 176 с.]

Petrov G.A., Kholodnov V.V., Ostanin S.Yu., Shagalov E.S., Konovalova E.V., 2017. Fluid Regime of Formation and Metallogenic Features of Granitoids of the South Pomur Massif (North Urals). Lithosphere 5, 103–112 (in Russian) [Петров Г.А., Холоднов В.В., Останин С.Ю., Шагалов Е.С., Коновалова Е.В. Флюидный режим формирования и особенности металлогении гранитоидов Южно-Помурского массива (Северный Урал) // Литосфера. 2017. № 5. С. 103–112]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-17-5-103-112>.

Popov V.S., Bogatov V.I., Zhuravlev D.Z., 2002. Sources of Granite Magmas and Formation of the Crust in the Middle and South Urals: Sm-Nd and Rb-Sr Isotope Data. Petrology 10 (4), 389–410 (in Russian) [Попов В.С., Богатов В.И., Журавлев Д.З. Источники гранитных магм и формирование земной коры Среднего и Южного Урала: Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные // Петрология. 2002. Т. 10. № 4. С. 389–410].

Popov V.S., Tevelev A.V., Belyatsky B.V., Bogatov V.I., Petrova A.Yu., Zhuravlev D.Z., Osipova T.A., 2003. Isotopic Composition of Nd and Sr in the Urals Granites as an Evidence for the Mantle-Crust Interaction. Proceedings of the Russian Mineralogical Society 132 (3), 16–38 (in Russian) [Попов В.С., Тевелев А.В., Беляцкий Б.В., Богатов В.И., Петрова А.Ю., Журавлев Д.З., Осипова Т.А. Изотопный состав Nd и Sr в гранитах Урала как показатель взаимодействия кора – мантия // Записки РМО. 2003. Т. 132. № 3. С. 16–38].

Pribavkin S.V., Pushkarev E.V., 2011. The Age of Late Orogenic Granitoids of the Urals Based on U-Pb Isotope Dating of Zircons (Exemplified by the Shartash and Shabry Massifs). Doklady Earth Sciences 438, 627. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11050369>.

Puchkov V.N., 2000. Paleogeodynamics of the South Urals. Gilem, Ufa, 146 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Гилем, 2000. 146 с.]

Puchkov V.N., 2010. Geology of the Urals and Cis-Urals (Actual Problems of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny). DesignPoligraphService, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.]

Puchkov V.N., 2018a. The Plume-Dependent Granite-Rhyolite Magmatism. Lithosphere 5, 692–705 (in Russian)

[Пучков В.Н. Плюм-зависимый гранит-риолитовый магматизм // Литосфера. 2018. № 5. С. 692–705]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-692-705>.

Puchkov V.N., 2018b. Plumes – a New Word in the Geology of the Urals. *Lithosphere* 18 (4), 483–499. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-483-499>.

Rakhimov I.R., 2017. Geology, Petrology and Ore Potential of the Late Devonian – Carboniferous Intrusive Magmatism of the West Magnitogorsk Zone, South Urals. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ufa, 183 p. (in Russian) [Рахимов И.Р. Геология, петрология и рудоносность позднедевонско-карбонового интрузивного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Уфа, 2017. 183 с.].

Rakhimov I.R., Salikhov D.N., 2014. Collisional Magmatism of the West Magnitogorsk Zone, South Urals. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Bashkortostan Republic* 19 (1), 12–20 (in Russian) [Рахимов И.Р., Салихов Д.Н. Коллизионный магматизм Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2014. Т. 19. № 1. С. 12–20].

Rakhimov I.R., Salikhov D.N., Puchkov V.N., Ronkin Yu.L., Kholodnov V.V., 2014. Bashkirian Sr-Nd Age of the Terminal Stage of Collisional Magmatism in the Western Magnitogorsk Zone of the South Urals. *Doklady Earth Sciences* 457, 921–925. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080078>.

Ronkin Yu.L., 1989. Strontium Isotopes – Indicators of the Evolution of Magmatism in the Urals. In: *Informational Collection of Scientific Papers of IGG UB of the USSR Academy of Sciences. Yearbook 1988. IGG UB of the USSR Academy of Sciences Publishing House, Sverdlovsk*, p. 107–110 (in Russian) [Ронкин Ю.Л. Изотопы стронция – индикаторы эволюции магматизма Урала. Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО АН СССР. Ежегодник-1988. Свердловск: Изд-во ИГГ УрО АН СССР, 1989. С. 107–110].

Ronkin Yu.L., Tichomirowa M., Maslov A.V., 2016. The Southern Urals Large Igneous Province with an Age of Approximately 1380 Ma: Precision U–Pb ID-TIMS Constraints. *Doklady Earth Sciences* 468, 587–592. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16060210>.

Saccani E., 2015. A New Method of Discriminating Different Types of Post-Archean Ophiolitic Basalts and Their Tectonic Significance Using Th-Nb and Ce-Dy-Yb Systematics. *Geoscience Frontiers* 6 (4), 481–501. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.006>.

Salikhov D.N., Belikova G.I., Puchkov V.N., Ernst R., Sederlund U., Kamo S., Rakhimov I.R., Kholodnov V.V., 2012. Nickel-Bearing Intrusive Complex in the South Urals. *Lithosphere* 6, 66–77 (in Russian) [Салихов Д.Н., Беликова Г.И., Пучков В.Н., Эрнст Р., Седерлунд У., Камо С., Рахимов И.Р., Холоднов В.В. Никеленосный интрузивный комплекс на Южном Урале // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–77].

Salikhov D.N., Kholodnov V.V., Puchkov V.N., Rakhimov I.R., 2019. The Magnitogorsk Zone of the South Urals in the Late Paleozoic: Magmatism, Fluid Regime, Metallogeny, and Geodynamics. *Nauka, Moscow*, 392 p. (in Russian) [Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое:

магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М.: Наука, 2019. 392 с.].

Shagalov E.S., 2002. Petrology and Geochemistry of the Ores of the Syrostan-Turgoyak Group of Granitoid Massifs (South Urals). Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ekaterinburg, 31 p. (in Russian) [Шаргалов Е.С. Петрология и геохимия пород Сыростанско-Тургойской группы гранитоидных массивов (Южный Урал): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2002. 31 с.].

Shardakova G.Yu., 2016a. Granitoids of the Ufaley Block: Geodynamic Environments, Age, Sources, Problems. *Lithosphere* 4, 133–137 (in Russian) [Шардакова Г.Ю. Гранитоиды Уфалейского блока: геодинамические обстановки, возраст, источники, проблемы // Литосфера. 2016. № 4. С. 133–137].

Shardakova G.Yu., 2016b. Geochemistry and Isotopic Ages of Granitoids of the Bashkirian Mega-anticlinorium: Evidence for Several Pulses of Tectono-Magmatic Activity at the Junction Zone between the Uralian Orogen and East European Platform. *Geochemistry International* 54, 594–608. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070089>.

Shardakova G.Yu., Pribavkin S.V., Krasnobaev A.A., Borodina N.S., Chervyakovskaya M.V., 2021. Zircons from Rocks of the Murzinka-Adui Metamorphic Complex: Geochemistry, Thermometry, Polychronicity, Genetic Conclusions. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (2), XX–XX (in Russian) [Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В., Краснобаев А.А., Бородина Н.С., Червяковская М.В. Цирконы из пород музинско-адуйского метаморфического комплекса (Средний Урал): геохимия, термометрия, полихронность, генетические следствия // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. XX–XX]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0527>.

Shtagin K.N., Astrakhantsev O.V., Degtyarev K.E., Luchitskaya M.V., 2000. Inhomogeneity of the Continental Crust in the East Urals: Results of the Isotope Geochemical Study of the Paleozoic Granitoid Complexes. *Russian Geotectonics* 5, 44–60 (in Russian) [Шатагин К.Н., Астраханцев О.В., Дегтярев К.Е., Лучицкая М.В. Неоднородность континентальной коры Восточного Урала: результаты изотопно-геохимического изучения палеозойских гранитоидных комплексов // Геотектоника. 2000. № 5. С. 44–60].

Smirnov V.N., Fadeicheva I.F., Ivanov K.S., 2008. Geochemistry of Volcanic Rocks in the Tagil Zone of the Urals as an Indicator of Geodynamic Environments of Their Formation. *Doklady Earth Sciences* 423, 1278–1281. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08080217>.

Smirnov V.N., Ivanov K.S., Larionov A.N., 2014a. The U-Pb SIMS Zircon Age and Geodynamic Conditions of Formation of Granitoides of the Verkhisetsk Batholith, The Eastern Slope of the Middle Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation* 22, 576–593. <https://doi.org/10.1134/S0869593814060057>.

Smirnov V.N., Ivanov K.S., Ronkin Yu.L., Serov P.A., Gerdes A., 2018. Isotope Contents of Sr, Nd and Hf in Rocks of the Reftinsky Gabbro-Diorite-Tonalite Complex (Eastern Slope of the Middle Urals): Petrological and Geological

Implications. *Russian Geochemistry* 6, 499–513 (in Russian) [Смирнов В.Н., Иванов К.С., Ронкин Ю.Л., Серов П.А., Гердес А. Изотопный состав Sr, Nd и Hf в породах рефтинского габбро-диорит-тоналитового комплекса (восточный склон Среднего Урала): петрологические и геологические следствия // *Геохимия*. 2018. № 6. С. 499–513]. <https://doi.org/10.7868/S0016752518060018>.

Smirnov V.N., Kaleganov B.A., 2001. Results of K-Ar Dating of Monzodiorite-Granite Massifs of the Urals. *Doklady Earth Sciences* 376 (3), 379–381 (in Russian) [Смирнов В.Н., Калеганов Б.А. Результаты К-Аг-датирования монцодиорит-гранитных массивов Урала // *Доклады АН*. 2001. Т. 376. № 3. С. 379–381].

Smirnov V.N., Nastavko E.V., Ivanov K.S., Bayanova T.B., Rodionov N.V., Serov P.A., 2014b. Results of Isotopic Dating of Rocks of the Reftinsky Gabbro-Diorite-Tonalite Complex, Eastern Zone of the Middle Urals. *Lithosphere* 5, 3–18 (in Russian) [Смирнов В.Н., Наставко Е.В., Иванов К.С., Баянова Т.Б., Родионов Н.В., Серов П.А. Результаты изотопного датирования пород Рефтинского габбро-диорит-тоналитового комплекса, Восточная зона Среднего Урала // *Литосфера*. 2014. № 5. С. 3–18].

Snachev A.V., Puchkov V.N., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Geodynamic and Physicochemical Conditions of Formation of the Stepninsky Monzogabbro-Granosyenite-Granite Complex (Southern Urals). *Moscow University Geology Bulletin* 18 (6), 82–91 (in Russian) [Сначев А.В., Пучков В.Н., Сначев В.И., Романовская М.А. Геодинамические и физико-химические условия формирования Степнинского монцогаббро-граносиенитгранитного комплекса (Южный Урал) // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2018. № 6. С. 82–91]. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-6-82-92>.

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications* 42 (1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

Tevelev A.V., Degtyarev K.E., Tikhomirov P.L., Kosheleva I.A., Kosarev A.M., Moseichuk V.M., Pravikova N.V., Surin T.N., 2005. Geodynamic Settings for Formation of the Carboniferous Volcanic Complexes of the South Urals and Priuralie. In: *Treatise on Regional Tectonics. South Urals. Vol. 1*. Nauka, Moscow, p. 213–247 (in Russian) [Тевелев А.В., Дегтярев К.Е., Тихомиров П.Л., Кошелева И.А., Косарев А.М., Мосейчук В.М., Правикова Н.В., Сурин Т.Н. Геодинамические обстановки формирования каменноугольных вулканических комплексов Южного Урала и Приуралья // *Очерки по региональной тектонике: Южный Урал*. М.: Наука, 2005. Т. 1. С. 213–247].

Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Khotylev A.O., Prudnikov I.A., Tevelev Ark.V., 2015. The Data on the Composition and Age of the Kozlinogorsk Gabbro-Alkaline Granite Complex on the Western Slope of the Southern Urals. *Moscow University Geology Bulletin* 70, 338–349 <https://doi.org/10.3103/S0145875215040122>.

Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Popov V.S., Kuznetsov I.E., Osipova T.A., Pravikova N.V., Vostretsova E.S., Gustova A.S., 2006. Paleozooids of the Eastern Ural / Trans-Ural Junction. In: A.M. Nikishin (Ed.), *Proceedings of the Laboratory of Orogeny. Iss. 4*. MSU Publishing House, Moscow, 300 p. (in Russian) [Тевелев А.В., Кошелева И.А., Попов В.С., Кузнецов И.Е., Осипова Т.А., Правикова Н.В., Вострецова Е.С., Густова А.С. Палеозоиды зоны сочленения Восточного Урала и Зауралья: Труды лаборатории геологии складчатых поясов / Ред. А.М. Никишин. М.: Изд-во МГУ, 2006. Вып. 4. 300 с.].

Tsygankov A.A., Khubanov V.B., Travin A.V., Lepekhina E.N., Burmakina G.N., Antsiferova T.N., Udoratina O.V., 2016. Late Paleozoic Gabbroids of Western Transbaikalia: U–Pb and Ar–Ar Isotopic Ages, Composition, and Petrogenesis. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 790–808. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.019>.

Vladimirov A.G., Kruk N.N., Rudnev S.N., Khromykh S.V., 2003. Geodynamics and Granitoid Magmatism of Collisional Orogens. *Russian Geology and Geophysics* 44 (12), 1321–1338 (in Russian) [Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Руднев С.Н., Хромых С.В. Геодинамика и гранитоидный магматизм коллизионных орогенов // *Геология и геофизика*. 2003. Т. 44. № 12. С. 1321–1338].

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Savatenkova V.M., 2018. Isotope (Nd, Pb) Sources of the Khangai Batholith: To the Problem of Formation of Gigantic Batholiths in Central Asia. In: *Correlation of Altaides and Uralides, Deep Structure of the Lithosphere, Stratigraphy, Magmatism, Metamorphism, Geodynamics, and Metallogeny. Proceedings of the Fourth International Scientific Conference (April 02–06, 2018)*. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, p. 179–181 (in Russian) [Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Саватенкова В.М. Изотопные (Nd, Pb) источники Хангайского батолита: к проблеме формирования гигантских батолитов Центральной Азии // *Корреляция алтаид и уралид, глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения: Материалы Четвертой международной научной конференции (2–6 апреля 2018 г.)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 179–181].

Yarmolyuk V.V., Kuz'min M.I., Vorontsov A.A., 2013. West Pacific-Type Convergent Boundaries and Their Role in the Formation of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics* 54 (12), 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.012>.

Zin'kova E.A., Fershtater G.B., 2010. The Verkh-Isetkiy Granitoid Massif. In: *Magmatism and Metamorphism in the History of the Earth. A Guide to Geological Excursions of the XI All-Russia Petrographic Meeting (August 24–28, 2010)*. IGG UB RAS Publishing House, Ekaterinburg, p. 22–36 (in Russian) [Зинькова Е.А., Ферштатер Г.Б. Верхисетский гранитоидный массив // *Магматизм и метаморфизм в истории Земли: Путеводитель геологических экскурсий XI Всероссийского петрографического совещания (24–28 августа 2010 г.)*. Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 2010. С. 22–36].