

УДК 553.9+553.21

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О Sm–Nd-ВОЗРАСТЕ ИНТРУЗИЙ ОСНОВНОГО/УЛЬТРАОСНОВНОГО СОСТАВА ЗАПАДНОГО СКЛОНА ЮЖНОГО УРАЛА

© 2024 г. С. Г. Ковалев<sup>1,\*</sup>, С. С. Ковалев<sup>1</sup>, А. А. Шарипова<sup>1</sup>,  
В. М. Горожанин<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН А. В. Маслов<sup>2</sup>

Поступило 06.05.2024 г.

После доработки 17.05.2014 г.

Принято к публикации 20.05.2024 г.

Приведены новые данные о Sm–Nd-возрасте ишлинского ( $1470 \pm 62$  млн лет) и мисаелгинского ( $1481 \pm 58$  млн лет) комплексов основного/ультраосновного состава, распространённых в пределах западного склона Южного Урала. Полученные значения возраста близки к границе калиммия и эктазия ( $\sim 1400$  млн лет) Международной хроностратиграфической шкалы. На основе расчётных данных показано, что область магмогенерации для расплавов, сформировавших названные комплексы, располагалась в “голове” плюма — первопричины машакского “магматического события” на Южном Урале.

*Ключевые слова:* Южный Урал, ишлинский габбро-норитовый комплекс, мисаелгинский дифференцированный комплекс, Sm–Nd-возраст, плюм

DOI: 10.31857/S2686739724090023

Западный склон Южного Урала является регионом, в пределах которого широко распространены интрузии основного/ультраосновного состава представленные, как правило, дифференцированными телами различной мощности (от 15–20 до  $\sim 250$  м). Эти объекты на протяжении многих лет вызывают пристальный интерес исследователей в связи с их индикаторной ролью в расшифровке проблемных вопросов петрогенезиса и реконструкции процессов геодинамического развития региона [1–8]. Вместе с тем, одним из важнейших вопросов, которые решены всё ещё лишь частично, является возраст формирования указанных интрузивных комплексов. В данной работе приводятся новые данные о возрасте мисаелгинского и ишлинского комплексов, полученные в 2022–2023 гг.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы минералов изучены на сканирующем электронном микроскопе “Tescan Vega” Compact с энерго-дисперсионным анализатором “Xplorer Oxford Instruments” (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Съёмка проведена при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке 60 сек в режиме “Point&ID”, диаметр пучка  $\sim 3$  мкм. При анализе использован встроенный комплект эталонов “Oxford Instruments Standards”, представленный природными и синтетическими соединениями.

Анализ Sm–Nd-системы произведён с применением метода изотопного разбавления на мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON (производство “ThermoScience”, Германия) во ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург в статическом режиме. Коррекция на эффект приборной масс-дискриминации выполнена путём нормирования измеренных значений по отношению  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ . Нормализованные отношения приведены к значению  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512115$  в международном изотопном стандарте JNdi-1. Погрешность определения содержания

<sup>1</sup>Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: kovalev@ufaras.ru

Sm и Nd составляла 0.5%. Построение изохронных зависимостей и вычисление возраста исследованных пород и минералов, а также первичного отношения  $(\epsilon_{Nd})_0$  осуществлено в программе ISOPLOT с использованием значения константы распада  $\lambda_{147Sm} = 6.44 \times 10^{-12} \text{ год}^{-1}$ . При расчётах были использованы следующие значения относительных погрешностей определения Sm–Nd-данных: 0.5% — для отношения  $^{147}Sm/^{144}Nd$ , 0.003% — для отношения  $^{143}Nd/^{144}Nd$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Мисаелгинский комплекс* представлен двумя дифференцированными телами мощностью 45 и более 200 м, расположенными в юго-западной части тараташского метаморфического комплекса среди архей-нижнепротерозойских образований (рис. 1). В их сложении участвуют: порфиroidные оливиновые долериты (в эндоконтактных зонах), среднезернистые оливиновые пироксениты, оливиновые габбро-нориты, габбро и феррогаббро-долериты. В наиболее мощном теле выделены следующие горизонты (снизу вверх): нижняя эндоконтактная зона мощностью около 2 м, “ультраосновной” горизонт — 110–112 м и габбровый горизонт — 100–110 м.

Нижняя эндоконтактная зона сложена порфиroidными оливиновыми долеритами с переменным количеством основных породообразующих минералов: оливина, клино- и ортопироксена и плагиоклаза. По внешнему облику это тёмно-зелёные (до чёрных) породы со среднезернистой порфиroidной структурой и массивной текстурой. Минеральный состав включает: оливин (69–75% Fo), ортопироксен (клиноэнстатит, #Mg — 0.77–0.80), клинопироксен (авгит, #Mg — 0.80), плагиоклаз (14–42 An), амфибол (эдинит, магнезиогастингсит), биотит, магнетит, титаномагнетит, ильменит, сульфиды, апатит, титанит. В минеральном составе “ультраосновного” горизонта установлены: оливин (форстерит 86% Fo в центральных частях кристаллов и хризолит 67–76% Fo в основной массе пород), клинопироксен (Mg-авгит, #Mg — 0.75–0.93), ортопироксен (клиноэнстатит, #Mg — 0.75–0.82), плагиоклаз (12–52 An), амфибол (магнезиальная роговая обманка, эдинит, магнезиогастингсит), биотит, магнетит (хроммагнетит), титаномагнетит, ильменит (пикроильменит) и сульфиды. В верхнем — габбровом горизонте присутствуют клинопироксен (Mg-авгит и авгит, #Mg — 0.62–0.76), плагиоклаз (2–5–60 An), железистая и магнезиальная роговая обманка, биотит,

хлорит, кварц, магнетит, титаномагнетит, ильменит, титанит и сульфиды.

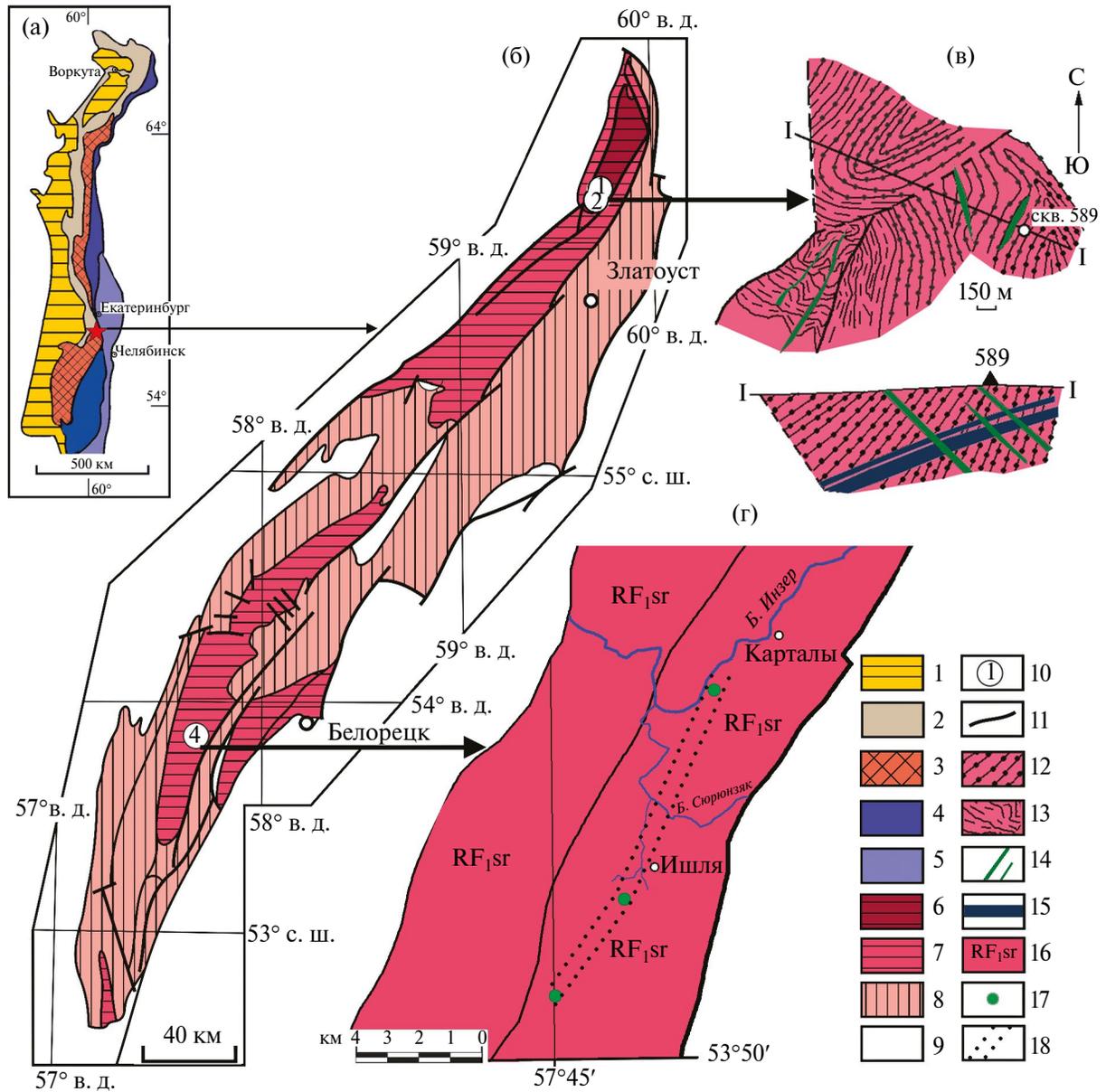
Первое определение возраста габбро-долеритов из описываемого комплекса было выполнено В.И. Ленныхом и В.И. Петровым [9] К–Аг-методом, который дал датировку около 780 млн лет. Нами в 1996 г. опубликован близкий возраст  $726 \pm 13$  млн лет, полученный Rb–Sr-методом по образцу габброида из верхней части интрузивного тела [3].

*Ишлинский комплекс оливиновых габбро-норитов*, описывавшийся ранее в геологосъёмочных отчётах как комплекс плагиоклазовых перидотитов или пикритов, представлен тремя разобщёнными выходами (“Курманайская дайка”, Ишлинские пикриты и пикриты руч. Интурат), которые протягиваются в субмеридиональном направлении на 8–10 км и залегают среди осадочных отложений суранской свиты нижнего рифея (см. рис. 1).

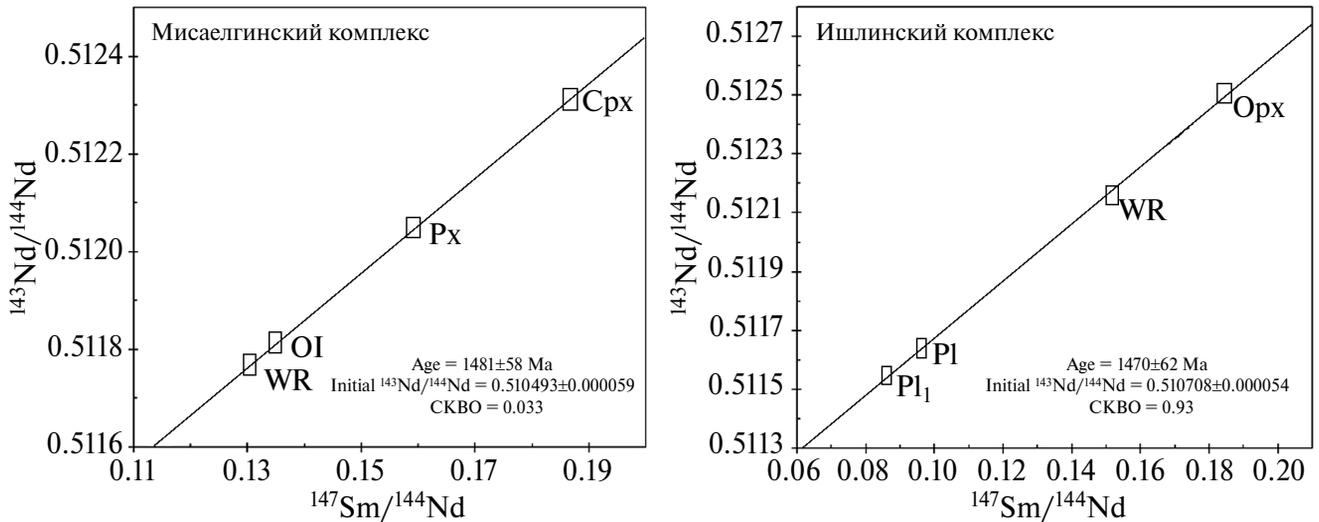
Для пород характерны порфиroidные, неравномернозернистые, часто пойкилитовые, близкие к кумулятивным структуры, с идиоморфными и субидиоморфными кристаллами оливина (73–80% Fo), клинопироксена (авгит, #Mg — 0.64–0.78) и ортопироксена (клиноэнстатит, #Mg — 0.61–0.78), “цементированных” ксеноморфными и субидиоморфными кристаллами плагиоклаза, состав которого варьирует от альбит-олигоклаза (2–24% An) до битовнит-анортита (78–83% An). Размер зёрен темнокрасных минералов меняется от 2.0–2.5 мм до сотых долей мм. В качестве второстепенных минералов присутствуют высокомагнезиальный биотит, Mg–Fe-роговая обманка, магнетит (хроммагнетит), хромшпинелид, ильменит, сульфиды, апатит. Вторичные минералы представлены эпидотом, хлоритом, тремолитом, тальком и серпентином.

Отнесение пород комплекса к среднему рифею было основано ранее на определении возраста Sm–Nd-методом по трём валовым пробам и трём монофракциям пироксенов из них, по которым рассчитан возраст  $1270 \pm 56$  млн лет (СКВО = 1.11), а аппроксимация точек (валовая проба, клинопироксен, ортопироксен) одного образца дала изохрону с наклоном, отвечающим  $T = 1291 \pm 67$  млн лет (СКВО = 0.66) [7, 8].

В 2019 г. нами была предпринята попытка определения возраста оливинового габбро-норита ишлинского тела по монофракциям оливина, пироксена, плагиоклаза и валового состава пород, в результате чего получена



**Рис. 1.** Структурная схема Урала (а), геологическая схема западного склона Южного Урала (б), геологическая схема и разрез участка “Магнитный” с телами пород мисаелгинского комплекса (в) и геологическая схема расположения тел ишлинского комплекса (г). а: Мегазоны Урала: 1 — Предуральская, 2 — Западно-Уральская, 3 — Центрально-Уральская, 4 — Тагильско-Магнитогорская, 5 — Восточно-Уральская. б: 6 — архейско-протерозойские отложения, 7 — нижнерифейские отложения, 8 — среднерифейские отложения, 9 — палеозойские отложения, 10 — тела дифференцированных комплексов (1 — мисаелгинский комплекс, 2 — лысогорский комплекс, 3 — ишлинский комплекс), 11 — тектонические границы. в: 12 — мигматиты, 13 — гранат-биотитовые гнейсы, 14 — разновозрастные дайки базитов, 15 — расслоенные тела мисаелгинского комплекса. г: 16 — нерасчленённые отложения суранской свиты, 17 — тела ишлинского комплекса, 18 — предполагаемые границы ишлинского комплекса.



**Рис. 2.** Sm–Nd-изохронные диаграммы для пород мисаелгинского и ишлинского комплексов. WR – валовый состав; OI – оливин; Px – пироксен (Cpx + Opx); Opx – ортопироксен; Cpx – клинопироксен; Pl<sub>1</sub> – плагиоклаз (Pl – плагиоклаз из пробы 2019 г.).

линейная зависимость с параметрами: возраст –  $1493 \pm 120$  млн лет и  $CKBO = 0.0051$ . Анализ зависимости  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  от  $1/\text{Nd}$  показал, что она не является линией смещения и может отвечать реальному геологическому событию. При этом наблюдалось отклонение фигуративной точки плагиоклаза от общей прямолинейной зависимости, что, вероятнее всего, связано с нарушением замкнутости Sm–Nd-системы в результате посткристаллизационных процессов, приведших к частичной потере самария и неодима.

В 2023 г. из проб 2019 г. были повторно отобраны монофракции минералов и выполнены определения возраста, результаты которых приведены на рис. 2. Полученные цифры коррелируются с возрастом пикродолеритов лысогорского комплекса  $1409 \pm 89$  млн лет, тела которых расположены в непосредственной близости от тел мисаелгинского комплекса [4].

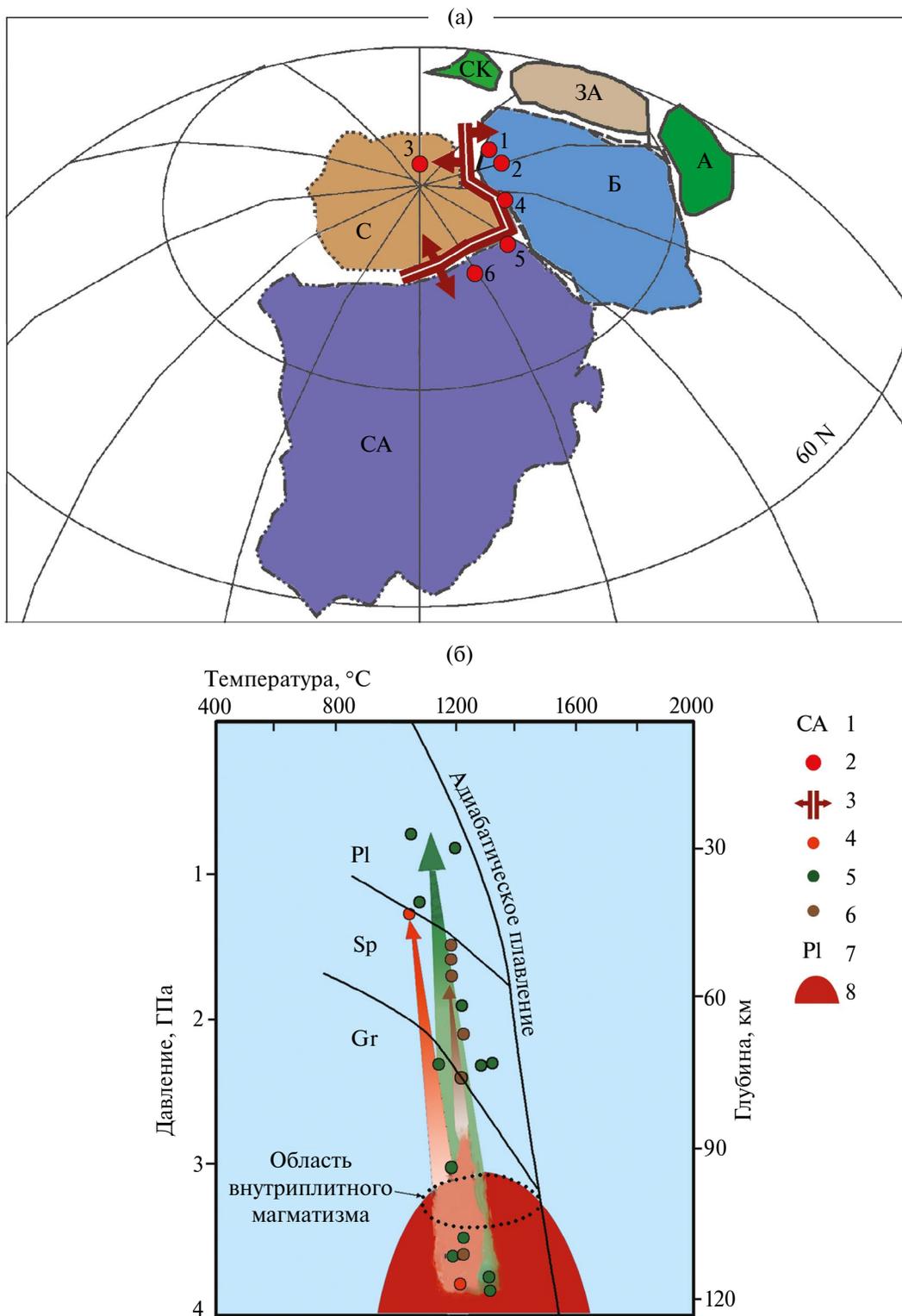
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты имеют принципиальное значение не только для региональной геологии Южного Урала, но и для глобальных геодинамических построений, в частности касающихся истории мезопротерозойского суперконтинента Колумбии и континента Балтики, входившего в его состав [10]. Приведённые выше значения возраста близки к границе калиммия и эктазия (~1400 млн лет) Международной хроностратиграфической шкалы. Одна из геодинамических реконструкций для этого временного

периода изображена на рис. 3, на которую нанесены индикаторные магматические комплексы.

Для выяснения условий и механизмов генерации расплавов, сформировавших характеризуемые комплексы, нами выполнены расчёты температур образования минеральных ассоциаций по оливин–клинопироксеновому OI–Cpx-геотермометру [11]. Путём подстановки в формулу, предложенную в работе [12] температур, рассчитанных по OI–Cpx-геотермометру, было определено давление, при котором сформировались минеральные ассоциации ишлинского и мисаелгинского комплексов. Для проверки корректности полученных результатов, произведены также расчёты температуры кристаллизации оливина по содержанию в нём кальция. Для анализа использовались только те данные, температуры которых, рассчитанные по OI–Cpx-геотермометру и по содержанию кальция в оливине, различались не более чем на  $5^\circ\text{C}$ .

Согласно полученным результатам, максимальные *PT*-условия формирования расплавов, сформировавших тела ишлинского комплекса установлены для ассоциаций “ядерные части порфиroidных кристаллов оливина – окружающий клинопироксен” ( $T = 1302\text{–}1313^\circ\text{C}$ ,  $P = 37\text{–}38$  кбар). В ассоциациях “краевые части кристаллов оливина – клинопироксен” температуры снижаются до  $1036\text{–}1059^\circ\text{C}$ , а давление до  $7\text{–}8$  кбар. Температура кристаллизации пироксенов, рассчитанная как среднее по двупироксеновым геотермометрам [13–16], составляет  $1156\text{–}1200^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3.** Среднерифейские (1380–1385 млн лет) магматические комплексы на реконструкции континента Нуна (Колумбия), по [17] с упрощениями (а) и PТ-диаграмма для расплавов, сформировавших магматические комплексы западного склона Южного Урала, по [18] с упрощениями (б). а: 1 – СА – Северная Америка, С – Сибиря, Б – Балтика, А – Амазония, ЗА – Западная Африка, СК – Северо-Китайская платформа; 2 – рифтовая зона с машакским возрастом; 3 – индикаторные магматические комплексы (1 – Машак, 2 – дайки в скв. Мензелино-Актаныш, 3 – Анабар, дайки Чирес, 4 – Тиман, скв. Полью-1, 5 – Гренландия, вулканы Мидсоммерсо и Зиг-Зал Вал, 6 – дайки Виктория Лэнд). б: 4 – мисаелгинский комплекс; 5 – ишлинский комплекс; 6 – лысогорский комплекс; 7 – поля устойчивости минеральных фаз (Pl – плагиоклаз, Sp – шпинель, Gr – гранат); 8 – предполагаемый плюм.

Аналогичные расчёты выполнены для минералов мисаелгинского комплекса. Максимальные  $PT$ -параметры ( $T = 1325\text{--}1350^\circ\text{C}$ ,  $P = 38\text{--}43$  кбар) и температура кристаллизации пироксенов  $1005\text{--}1173^\circ\text{C}$  близки к таковым, характеризующим условия формирования расплавов ишлинского комплекса.

На основании рассчитанных параметров построены тренды эволюции расплавов, сформировавших описываемые комплексы западного склона Южного Урала (см. рис. 3 б). Как видно из диаграммы, наиболее глубокие составы расплавов для всех комплексов располагаются практически в одной области магмогенерации, а точки рассчитанных параметров для ишлинского и лысогорского комплексов образуют практически непрерывный тренд, характеризующий весь процесс зарождения и эволюции расплава при формировании интрузивных тел. В связи с этим необходимо подчеркнуть, что согласно многочисленным исследованиям ([10, 17] и др.) магматизм среднерифейского этапа развития Южного Урала имел плюмовую природу и, вероятнее всего, область магмогенерации располагалась в "голове" поднимающегося плюма, что объясняет близкие  $PT$ -параметры расплавов для пространственно разобщённых комплексов.

Таким образом, описываемые комплексы являются индикаторами, характеризующими начало плюмового события на территории Южного Урала. Дальнейшее развитие процесса (во временном интервале 1395–1380 млн лет), обусловленное растяжением литосферы с активным рифтогенезом заключалось в формировании машакского/шатакского рифта с пикрит-базальт-риодацитовым магматизмом, широким развитием дайковых поясов и разнообразных пород различной формационной принадлежности [19].

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, проект № 23-27-00023.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие у них конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А. А., Алексеева Г. В., Ковалев С. Г.* Расслоенные интрузии западного склона Урала. Уфа: Гилем, 2000. 188 с.
2. *Алексеев А. А., Алексеева Г. В., Ковалев С. Г.* Дифференцированные интрузии западного склона Урала. Уфа: Гилем, 2003. 171 с.
3. *Ковалев С. Г.* Дифференцированные диабаз-пикритовые комплексы западного склона Южного Урала. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1996. 90 с.
4. *Ковалев С. Г., Маслов А. В., Ковалев С. С., Высоцкий С. И.* Sm–Nd-возраст пикритов лысогорского комплекса (Южный Урал): свидетельства инициального среднерифейского магматизма // ДАН. 2019. Т. 488. № 1. С. 58–61.
5. *Ковалев С. Г., Ковалев С. С.* Условия и механизмы формирования сульфидно-оксидной минерализации при дифференциации расплава в промежуточной камере (на примере интрузии западного склона Южного Урала) // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 6. С. 551–557.
6. *Носова А. А., Сазонова Л. В., Горожанин В. М., Кузьменкова О. Ф.* Мезопротерозойские оливиновые габбронориты Башкирского антиклинория, Южный Урал: родоначальные расплавы и особенности эволюции магм // Петрология. 2010. Т. 18. № 1. С. 53–87.
7. *Носова А. А., Сазонова Л. В., Каргин А. В., Ларионова Ю. О., Горожанин В. М., Ковалев С. Г.* Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. 2012. Т. 20. № 4. С. 392–428.
8. *Сазонова Л. В., Носова А. А., Ларионова Ю. О., Каргин А. В., Ковалев С. Г.* Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.
9. *Ленных В. И., Петров В. И.* Пикриты тараташского комплекса // Труды Ильмен. гос. заповед. 1978. Вып. 17. С. 45–52.
10. *Ernst R. E.* Large igneous provinces. London: Elsevier, 2014. 653 p.
11. *Loucks Robert R.* A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // Contrib Mineral. Petrol. 1996. 125(2–3). P. 140–150.
12. *De Hoog Jan C. M., Gall Louise, David H. C.* Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // Chemical Geology. 2010. 270(1–4). P. 196–215.
13. *Wood B. J., Banno S.* Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1973. 42(2)/ P. 109–124.

14. Wells P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1977. 62(2). P. 129–139.
15. Perchuk L. L., Saxena S. K., Bhattacharji S. Thermodynamic control of metamorphic processes in Energetics of Geological Processes. New York: Springer, 1977. P. 285–352.
16. Kretz R. Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1982. 46(3). P. 411–422.
17. Пучков В. Н. Плюмы в геологической истории Урала // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. 2013. Т. 88. Вып. 4. С. 64–72.
18. Green D. H. MantleTemp. <http://www.mantleplumes.org/>
19. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

## NEW DATA ON Sm-Nd AGE OF MAFIC/ULTRAMAFIC INTRUSIONS ON THE WESTERN SLOPE OF THE SOUTH URAL

**S. G. Kovalev<sup>a,#</sup>, S. S. Kovalev<sup>a</sup>, A. A. Sharipova<sup>a</sup>, V. M. Gorozhanin<sup>a</sup>,  
Corresponding Member of the RAS A. V. Maslov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center  
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: kovalev@ufaras.ru*

The article presents new data on the Sm–Nd age of the Ishliy (1470±62 Ma) and Misaelga (1481±58 Ma) complexes of basic/ultrabasic composition, distributed within the western slope of the Southern Urals. The obtained age values are close to the Kalimian-Ektasian boundary (~1400 Ma) of the International Chronostratigraphic Scale. Based on calculated data, it is shown that the area of magma generation for the melts that formed the named complexes was located in the “head” of the plume – the primary cause of the Mashak “magmatic event” in the Southern Urals.

*Keywords:* Southern Urals, Ishliy gabbro-norite complex, Misaelga differentiated complex, Sm-Nd age, plume