

УДК 551.263.038/552.1:543:549

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-3

**ПОЗДНЕДЕВОНСКИЙ САХАРИНСКИЙ ДУНИТ-КЛИНОПИРОКСЕНИТ-ГАББРОВЫЙ  
КОМПЛЕКС (ВОСТОЧНО-МАГНИТОГОРСКАЯ ЗОНА, ЮЖНЫЙ УРАЛ):  
ПЕТРОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ  
ОБСТАНОВКА ФОРМИРОВАНИЯ**

**Т.Н. Сурин**

*Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ),  
Средний проспект В.О. 74, г. Санкт-Петербург, 199106 Россия; Timofey\_Surin@vsegei.ru, SurinTimofey@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 11.01.2021 г., принята к печати 27.02.2021 г.

**LATE-DEVONIAN SAKHARA DUNITE-CLINOPIROXENITE-GABBRO COMPLEX  
(EAST MAGNITOGORSK ZONE, SOUTH URALS): PETROLOGICAL-MINERALOGICAL  
FEATURES AND GEODYNAMIC SETTING**

**T.N. Surin**

*Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Sredniy pr. 74, St. Petersburg 199106 Russia;  
Timofey\_Surin@vsegei.ru, SurinTimofey@gmail.com*

Received 11.01.2021, accepted 11.01.2021

**Аннотация.** Актуальность работы определяется необходимостью регионального анализа магматической эволюции Восточно-Магнитогорского пояса региона и уточнения представлений о геодинамике развития Южного Урала. В статье охарактеризованы геология, петрохимические и минералогические особенности сахаринского дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса на Южном Урале. Обоснован его позднефранский возраст. Определен состав оливинов, клинопироксенов и хромшпинелидов в породах комплекса. Обоснована реститовая природа дунитов. Показано, что породы комплекса являются аналогами таковых Платиноносного пояса Урала и относятся к Урало-Аляскинскому типу. Сделан вывод о формировании комплекса в островодужной геодинамической обстановке, причем его становление знаменует собой начало стадии зрелой островной дуги. Расположение массивов комплекса является дополнительным аргументом в пользу западного падения (в современных координатах) палеозоны субдукции в момент его формирования. Ведущим механизмом петрогенезиса для него являлась кристаллизационная дифференциация.

**Ключевые слова:** сахаринский комплекс, петрология, минералогия, зрелая островная дуга, кристаллизационная дифференциация.

**Abstract.** The relevance of the work is caused by necessary regional analysis of magmatic evolution of the East Magnitogorsk belt and refinement of ideas on geodynamics of the South Urals. The geology and petrochemical-mineralogical features of the Sakhara dunite-clinopyroxenite-gabbro complex in the South Urals are characterized in the paper. Its late Frasnian age is substantiated. The composition of olivine, clinopyroxene and chromite in rocks of the complex are determined. The restite nature of dunites is proved. It is shown that rocks of the complex are similar to those of the Urals platinum belt and belong to Ural-Alaskan type. It is concluded that the complex formed in island-arc geodynamic setting and in the beginning of the formation of a mature island arc. The location of massifs of the complex is an additional argument in favor of a western dip (in the present-day coordinates) of a subduction paleozone at the moment of its formation. Crystallization differentiation was a leading mechanism of petrogenesis of rocks of the complex.

**Keywords:** Sakhara complex, petrology, mineralogy, mature island arc, crystallization differentiation.

**Для цитирования:** Сурин Т.Н. Позднедевонский сахаринский дунит-клинопироксенит-габбровый комплекс (Восточно-Магнитогорская зона, Южный Урал): петролого-минералогические особенности и геодинамическая обстановка формирования. Минералогия, 7(1), 40–53. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-3.

**For citation:** Surin T.N. Late-devonian sakhara dunite-clinopiroxenate-gabbro complex (East Magnitogorsk zone, South Urals): petrological-mineralogical features and geodynamic setting *Mineralogy*, 7(1), 40–53. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-3.

## Введение

Восточно-Магнитогорская зона представляет собой восточную ветвь Магнитогорской мегазоны (рис. 1), отождествляемой многими исследователями с палеовулканическим поясом, являющимся одним из крупнейших субмеридиональных поясов Южного Урала и локализованным в северной части Магнитогорско-Мугоджарской палеоостроводужной системы. Последняя прошла через долгую сложную историю развития, в котором выделяется три отчетливо выраженных этапа (Сурин, Мосейчук, 1995): первый – субокеанический (или окраинного моря, ордовик–силур до раннего девона включительно), второй – собственно островодужный (средний девон–ранний карбон) и третий – коллизионно-аккреционный, завершивший тектоническое развитие региона (средний карбон–пермь). Дальнейшее развитие проходило в субплатформенном режиме. Позднее эти представления были конкретизированы В.Н. Пучковым (2000).

В восточной части указанной зоны известны отдельные интрузии дунит-клинопироксенит-габбрового состава, объединяемые в позднедевонский сахаринский комплекс, с которыми связаны небольшие месторождения титаномагнетитовых руд (Мосейчук и др., 2013). Эти массивы до настоящего времени остаются слабо изученными; об их строении и составе имеются отдельные, весьма фрагментарные сведения в опубликованной литературе (Замига, 1969; Иванов, 1997; Сурин, 2000), в последней сводке по габбро-гипербазитовому магматизму Южного Урала они только упоминаются (Савельев и др., 2008). Между тем изучение их состава и выявление механизма петрогенезиса, а также реконструкция геодинамической обстановки формирования весьма важны для регионального анализа магматической эволюции региона и уточнения представлений о геодинамике развития всего Урала (не только Южного). Автор в течение ряда лет изучал их при проведении геолого-съемочных работ на территории Восточно-Магнитогорской зоны, и полученные результаты излагаются ниже.

## Геолого-петрографическая и петрохимическая характеристика пород сахаринского комплекса

Сахаринский комплекс объединяет породы дунит-клинопироксенит-габбровой формации, образующие ряд массивов в крайней восточной Гумбейской подзоне Восточно-Магнитогорской зоны (рис. 1). Часто они залегают в серпентинитовом меланже среди раннедевонских альпинотипных гипербазитов бриентского комплекса, прорывая их (например, Амамбайский массив и восточная часть Сахаринского массива), но нередко окружены со всех сторон блоками среднедевонских вулканитов. В этом плане показателен Сахаринский массив (рис. 2). Это гигантская пластина, имеющая форму «чемодана» и размеры 16 × 6 км на поверхности. Он локализован, в основном, среди среднедевонских вулканитов гумбейской толщи, прорывая их, но признаки экзоконтактового термального воздействия развиты неравномерно, что может свидетельствовать о внедрении массива в твердом, но горячем состоянии. Четкие ограничения массива особенно наглядно проявлены на детальных геофизических картах. В составе комплекса выделяются две фазы. Первая представлена изолированными телами интенсивно серпентинизированных дунитов с реликтовой сидеронитовой структурой и, в резко подчиненном количестве, перидотитов. Среди последних отмечаются оливиниты и верлиты. Породы второй фазы, слагающие большую часть объема массива, представлены оливин- и амфиболсодержащими габбро, клинопироксенитами, гораздо реже лейкокрастовыми габбро. Клинопироксениты иногда амфиболизированы вплоть до образования мономинеральных горнблендитов. Вторая фаза сопровождается комагматичной дайковой серией. Важно отметить, что наличие дунитов и перидотитов в массивах комплекса не является их обязательной характеристикой, нередко они и вовсе отсутствуют (массив Стоячий Камень и ряд других). В крупных массивах гипербазиты составляют не более 10 % их объема. В двух случаях установлено (Сахаринский и Амамбайский массивы), что породы сахаринского комплекса прорываются фаменскими монцодиоритами и кварцевыми сиенитами верхнеуральского комплекса (Мосейчук и др., 2013), на основании

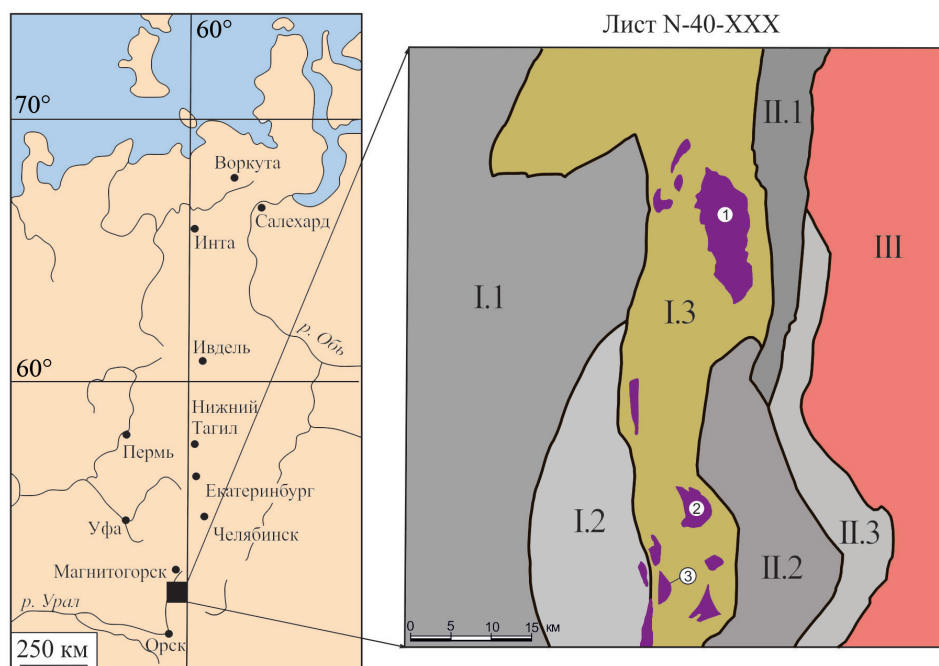


Рис. 1. Положение массивов сахаринского комплекса в региональных структурах Южного Урала (в пределах листа N-40-XXX), по (Мосейчук и др., 2013), с упрощениями.

Фиолетовое – массивы сахаринского комплекса. Цифрами в кругах обозначены наиболее типичные массивы: 1 – Сахаринский, 2 – Амамбайский, 3 – Стоячий Камень. Структурно-формационные зоны подзоны: I – Восточно-Магнитогорская (I.1 – Магнитогорская, I.2 – Кипчакская, I.3 – Гумбейская), II – Уйско-Новооренбургская (II.1 – Уйская, II.2 – Полоцко-Аркаимская, II.3 – Амурская), III – Кочкарско-Адамовская.

Fig. 1. Position of massifs of the Sakhara complex in regional structures of the South Urals (sheet N-40-XXX), simplified after (Moseychuk et al., 2013).

Violet – massifs of the Sakhara complex. Numbers in circles indicate the most typical massifs: 1 – Sakhara, 2 – Amambayka, 3 – Stoyachy Kamen. Lithostructural zones and subzones: I – East Magnitogorsk (I.1 – Magnitogorsk, I.2 – Kipchak, I.3 – Gumbeyka), II – Uy-Novooorenburg (II.1 – Uy, II.2 – Polotsk-Arkaim, II.3 – Amur), III – Kochkar-Adamovskaya.

чего некоторые геологи всю совокупность наблюдаемых в крупных массивах пород (от дунитов до кварцевых сиенитов и лейкогранитов) объединяют в единый субщелочной комплекс сложного состава. По нашему мнению, это не оправдано, поскольку во множестве массивов (более мелких по сравнению с названными) монцодиориты и сиениты не установлены.

Возраст пород дунит-клинопироксенит-габбровой формации на Южном Урале ранее считался среднедевонским. Однако в нашем случае возраст сахаринского комплекса устанавливается по геологическим данным. Так, габброиды сахаринского комплекса прорывают вулканиты и вулканогенно-осадочные породы гумбейской эйфельско-живетско-раннефранской вулcano-плутонической ассоциации, а сами, в свою очередь, прорываются фаменским габбро-сиенитовым верхнеуральским комплексом, следовательно, наиболее правильным представляется определить возраст характеризу-

емого комплекса как позднефранский (Сурин, 2000). Это недавно подтверждено находками в дунитах Сахаринского массива цирконов магматического облика с изотопным U-Pb возрастом 378–374 млн лет (Ферштатер и др., 2012).

Преобладающим развитием в комплексе пользуются габбро, значительную часть составляют клинопироксениты и верлиты, которые иногда переходят в оливиниты. Эти породы образуют практически непрерывную петрографическую серию через промежуточные разновидности (оливиновые клинопироксениты, меланогаббро). Оливиниты выделяются предположительно. К ним отнесены почти нацело серпентинизированные породы с небольшим (до 5 %) содержанием клинопироксена. Верлиты по соотношению оливина (замещенного в основном lizardитом, хризотилом, иддингситом) и клинопироксена образуют непрерывный ряд от оливинитов до оливиновых клинопироксенитов. Нередко в них много титаномагнетита. Оливиновые клинопирок-

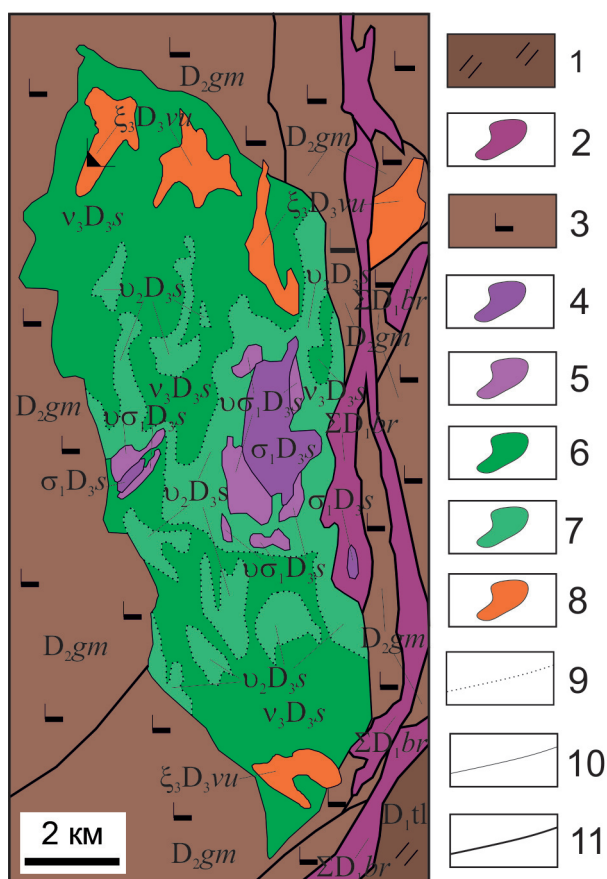


Рис. 2. Геологическая карта Сахаринского массива, с изменениями и упрощениями по (Мосейчук и др., 2013).

1 – раннедевонские аповулканогенные сланцы и метасилициты тьюлькубайской толщи ( $D_1tl$ ); 2 – раннедевонские аподунитовые и апогарцбургитовые серпентиниты бриентского комплекса ( $\Sigma D_1br$ ); 3 – среднедевонские базальты и андезибазальты гумбейской толщи ( $D_2gm$ ); 4–7 – породы сахаринского комплекса: 4, 5 – первая фаза: 4 – серпентинизированные дуниты ( $\sigma_1 D_3s$ ), 5 – оливиниты, верлиты ( $\sigma_1 D_3s$ ); 6, 7 – вторая фаза: 6 – клинопироксениты, титаномagnetитовые клинопироксениты, меланократовые титаномagnetитовые габбро ( $v_2 D_3s$ ), 7 – меланократовое габбро, реже лейкогаббро ( $v_2 D_3s$ ); 8 – позднедевонские монцодиориты и кварцевые сиениты верхнеуральского комплекса ( $\xi_3 D_3vu$ ); 9 – фациальные границы; 10 – геологические границы; 11 – тектонические нарушения.

Fig. 2. Geological map of the Sakhara massif, modified and simplified after (Moseychuk et al., 2013).

1 – Early Devonian shale and metasilicite after volcanic rocks of the Tyulkubay Sequence; 2 – Early Devonian serpentinite after dunite and harzburgite of the Brient complex; 3 – Middle Devonian basalt and basalticandesite of the Gumbeyskaya Sequence; 4–7 – rocks of the Sakhara complex: 4, 5 – first phase: 4 – serpentinized dunite, 5 – olivinite, wehrlite; 6, 7 – second phase: 6 – clinopyroxenite, titanomagnetite clinopyroxenites, melanocratic titanomagnetite gabbro, 7 – melanocratic gabbro, rare leucogabbro; 8 – Late Devonian monzodiorite and quartz syenite of the Verkhneursalsk complex; 9 – facial boundaries; 10 – geological boundaries; 11 – faults.

Таблица 1

### Средние химические составы пород сахаринского комплекса

Table 1

### Average chemical compositions of rocks of the Sakhara complex

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	18	4	3	10	2	4	7	9	1
SiO <sub>2</sub>	40.51	43.65	43.37	51.00	43.13	43.26	48.23	48.01	43.05
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.22	0.12	0.31	1.30	1.18	0.58	0.89	1.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.08	1.52	1.82	2.59	7.07	5.39	11.0	16.06	20.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.16	7.45	8.71	4.40	13.03	11.01	4.95	5.30	5.09
FeO	3.67	5.91	3.70	3.47	5.98	7.38	6.26	6.46	7.58
MnO	0.14	0.17	0.17	0.11	0.12	0.17	0.15	0.14	0.07
MgO	48.02	32.92	40.23	18.98	13.37	14.6	13.66	7.19	6.65
CaO	0.17	7.76	1.56	18.4	14.68	16.15	13.37	12.18	12.51
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.27	0.15	0.56	0.89	0.50	1.32	3.08	1.93
K <sub>2</sub> O	0.06	0.12	0.16	0.18	0.43	0.36	0.47	0.68	0.98

Примечание. 1 – аподунитовый серпентинит; 2 – верлит; 3 – клинопироксеносодержащий оливинит; 4 – клинопироксенит, 5 – титаномagnetитовый клинопироксенит; 6 – меланократовое титаномagnetитовое габбро; 7 – меланократовое габбро; 8 – габбро; 9 – лейкогаббро. N – количество анализов. Химические анализы выполнены в лаборатории ОАО «Челябинскгеосъёмка»; пересчитано на сухой остаток.

*Note.* 1 – serpentinite after dunite; 2 – wehrlite; 3 – clinopyroxene-bearing olivinite; 4 – clinopyroxenite; 5 – titanomagnetite clinopyroxenite; 6 – melanocratic titanomagnetite gabbro; 7 – melanocratic gabbro; 8 – gabbro; 9 – leucogabbro. N – number of analyses. The chemical composition is analyzed in the Laboratory of OAO «Chelyabinskgeos'emka». The analyses are recalculated to dry residue.



сениты имеют промежуточный состав между клинопироксенитами и верлитами, залегая совместно как с теми, так и другими. Количество оливина в них колеблется от 5 до 30 %. Часто в них также много титаномагнетита. Клинопироксениты состоят в основном из диопсида переменной железистости с низкими содержаниями  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  (см. ниже). Часто в них много титаномагнетита, хотя нередко его почти нет. Наибольшим распространением в комплексе пользуются меланократовые габбро, которые изредка переходят в плагиоклазовые клинопироксениты. Соотношение плагиоклаза и клинопироксена в меланократовых габбро сильно варьирует при преобладании второго, содержание которого достигает 70–80 %. Иногда в этих габброидах также резко повышено содержание титаномагнетита. Достаточно редкие лейкократовые габбро обогащены основным плагиоклазом. В тех случаях, когда породы сахаринского комплекса прорываются более поздними по времени субщелочными образованиями (см. выше), в габброидах и клинопироксенитах отмечается интенсивная биотитизация, сопровождаемая заметным ростом концентрации в них  $K_2O$ , что свидетельствует о контактово-метасоматическом воздействии на них фаменской габбро-кварцево-сиенитовой серии верхнеуральского комплекса (Мосейчук и др., 2013).

Средние химические составы выделенных групп пород приведены в табл. 1. Следует отметить, что как геологическое строение массивов сахаринского комплекса, так и сам набор слагающих их пород, а также их общий химизм обнаруживают поразительное сходство с образованиями знаменитого Платиноносного пояса Урала (ППУ), развитого на Среднем и Северном Урале (Ферштатер, 1989; Иванов и др., 1999; Иванов, Шмелёв, 1996; Иванов, 1997; Krause et al., 2007; Симонов и др., 2016), на это уже ранее указывалось (Сурин, 2000). В последнее время этот вывод был подтвержден и в отношении Амамбайского массива (Кораблёв, Савельев, 2014). Ранее полная аналогия установлена и по распределению и содержанию РЗЭ (Мосейчук и др., 2013). Химический состав охарактеризованных пород также близок к таковому для платиноносных интрузий Корякско-Камчатской провинции (Корякско-Камчатский..., 2002).

Основные особенности химического состава пород сахаринского комплекса сводятся к следующему. Аподунитовые серпентиниты отличаются невысокой железистостью, при этом от альпино-типных гипербазитов раннедевонского бриентско-

го комплекса, с которыми они нередко ассоциируют в пространстве, они отличаются статистически значимыми повышенными концентрациями  $TiO_2$  и  $Cr_2O_3$ , что свидетельствует в пользу их меньшей «истощенности» (Сурин, 2000). Оливиниты от дунитов отличаются несколько повышенным содержанием  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$  и, соответственно, пониженным  $MgO$  (табл. 1). В габбро и оливиновых габбро отмечаются низкие содержания  $TiO_2$  и щелочей, а так же высокие  $CaO$ , что соответствует высокой основности их плагиоклаза. В габброидах содержания  $MgO$  и  $Al_2O_3$  заметно варьируют и обнаруживают прямую зависимость от соотношения в породе клинопироксена и плагиоклаза, т. е. при высоком содержании первого содержание  $Al_2O_3$  резко понижено. Наиболее высокая железистость характерна для клинопироксенитов и меланократовых габбро, обогащенных титаномагнетитом, чему соответствуют повышенные концентрации в них  $TiO_2$ . В лейкократовых габбро отмечаются высокие содержания  $CaO$  и  $Al_2O_3$  (табл. 1), что коррелируется с их обогащенностью основным плагиоклазом.

### Минералогические особенности пород и вопросы петрогенезиса

В последнее время получены важнейшие данные о составе некоторых минералов из гипербазитов и габброидов сахаринского комплекса (Сурин, 2000; Мосейчук и др., 2013; Кораблёв, Савельев, 2014) (табл. 2). Так, оливин в дунитах представлен форстеритом (90 % Fo), тогда как в клинопироксенитах он значительно менее магнезиальный и имеет переменный состав (73–85 % Fo) (табл. 2), причем наиболее железистыми являются оливины из пород с модальным плагиоклазом. Высокая магнезиальность оливина из дунитов исключает, по нашему мнению, их образование в результате кумуляции оливина из габбрового расплава и указывает на их реститовую природу. Клинопироксены из габброидов и пироксенитов сахаринского комплекса представлены диопсидами переменной железистости, которые характеризуются низкими содержаниями  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  (табл. 2), что сближает эти породы, с одной стороны, с наиболее «истощенными» мантийными ксенолитами в островодужных базальтах, а с другой – с наименее дифференцированными габброидами из ППУ (рис. 3). В породах Сахаринского массива отмечается характерный рост глиноземистости клинопироксенов при малом увеличении их титанистости. Такой тренд в целом

Таблица 2  
Химический состав и кристаллохимические формулы клинопироксенов, оливинов и хромшпинелидов из пород сахаринского комплекса  
Table 2  
Chemical composition and formulas of clinopyroxenes, olivines and chromite from rocks of the Sakhara complex

№ пробы	205-1	205-2	205-3	206	206A	207	2646/88	3099/28	2646/122	3101/38
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Минерал	Клинопироксен									
MgO	17.26	13.93	15.18	14.82	14.64	13.22	15.94	16.03	15.63	15.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	1.87	1.35	1.82	1.67	1.09	0.00	0.00	0.87	0.78
SiO <sub>2</sub>	55.12	52.62	52.97	52.49	53.38	53.70	54.56	55.40	54.98	53.17
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	0.24	—	—	—	—	—
CaO	24.11	20.97	23.42	23.16	22.60	25.53	25.34	24.14	24.47	23.23
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.42	0.00	0.38	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.92	—	0.39	0.45	0.56	—	—	0.42	—	—
MnO	—	0.49	—	—	—	—	—	—	—	0.39
FeO	2.75	10.01	6.19	6.93	6.60	6.57	4.16	4.50	4.34	5.68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0.46	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100.15	100.02	99.97	99.98	100.17	100.11	100.00	100.18	100.21	100.02
Ca	0.94	0.84	0.93	0.92	0.89	1.01	1.00	0.94	0.96	0.94
K	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—	—
Mg	0.93	0.78	0.84	0.82	0.80	0.73	0.87	0.87	0.85	0.84
Fe <sup>+2</sup>	0.08	0.31	0.19	0.21	0.20	0.20	0.13	0.14	0.13	0.18
Fe <sup>+3</sup>	—	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—
Mn	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	0.01
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Cr	0.03	—	0.01	0.01	0.02	—	—	0.01	—	—
Al <sub>IV</sub>	0.00	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.01
Si	2.00	1.95	1.96	1.94	1.97	1.99	2.00	2.01	2.00	1.98
Al <sub>IV</sub>	0.00	0.05	0.04	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

№ пробы	2647/74	2646/124	3106/14	2646/58	2646/122	223A	106/28	106/145	105/140	227A
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Минерал	Клинопироксен									
MgO	16.89	15.47	15.19	17.32	15.50	12.43	12.15	13.88	13.01	17.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.62	0.74	0.60	0.00	0.00	1.03	1.64	2.37	2.82	1.26
SiO <sub>2</sub>	54.09	54.20	53.63	54.61	54.11	52.23	52.48	52.50	52.03	53.77
CaO	24.26	24.67	24.52	24.27	26.26	24.14	24.42	24.67	24.01	22.74
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.37	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	—	0.72	0.96	—	—	—	—	—	1.10

Продолжение таблицы 2  
Continuation of Table 2

[illegible]

Продолжение таблицы 2  
Continuation of Table 2

[illegible]

Окончание таблицы 2  
End of Table 2

№ пробы	3650/38	2646/64	2646/64	608/11	222a	220a	61-8	223б	228	319-8
№ п/п	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Минерал	Хромишнелид									
MgO	4.66	4.08	3.59	4.79	3.32	4.52	3.85	6.30	1.61	1.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.48	7.48	7.38	6.03	—	8.18	5.11	8.91	0.55	0.84
SiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	3.39	—	—	—	2.41	—
CaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TiO <sub>2</sub>	0.54	0.32	0.48	0.20	—	—	—	—	—	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.47	29.99	25.99	38.56	14.50	35.85	40.53	35.61	16.43	21.41
MnO	—	—	0.67	—	6.16	0.75	1.15	1.05	—	5.54
FeO	8.85	7.39	11.02	1.48	29.63	1.25	0.76	1.45	29.10	25.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.32	18.69	19.22	16.90	16.42	17.12	17.42	13.58	21.16	17.74
Сумма	99.86	99.86	99.84	99.91	99.73	99.91	99.91	99.93	99.71	99.75
Ca	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	0.39	0.34	0.30	0.40	0.30	0.37	0.32	0.50	0.15	0.12
Mg	0.63	0.67	0.70	0.61	0.64	0.61	0.64	0.47	0.84	0.71
Fe <sup>+2</sup>	0.32	0.27	0.40	0.05	1.15	0.04	0.03	0.05	1.15	1.02
Fe <sup>+3</sup>	—	—	0.02	—	0.19	0.02	0.03	0.03	—	0.17
Mn	0.02	0.01	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—
Ti	1.23	1.16	1.01	1.49	0.60	1.36	1.59	1.32	0.70	0.92
Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al <sub>VI</sub>	0.01	—	—	—	—	—	—	0.12	—	—
Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al <sub>IV</sub>	0.41	0.56	0.55	0.45	—	0.60	0.39	0.64	0.04	0.07

*Примечание.* Анализы 1–15, 22–27, 28–33 – Сахаринский массив, 16–21, 34–40 – Амамбайский массив. Анализы 1–4, 28 – габбро: амфиболитизированное, хлоритизированное и эпидотизированное (1–3, 28), меланократовое (4); 5, 7–10, 12, 13, 15, 17, 19, 21–24, 26, 30 – клинопироксенит: плагиоклазовый с оливином (5), с титаномagnetитом (7, 24), оливиновый (8, 23, 26), клинопироксенит (9, 12, 15, 30), амфиболитизированный (10), уралитизированный оливиновый (13), биотитовый (17), амфиболитизированный с титаномagnetитом и апатитом (19), рудный с актинолитом (21), плагиоклазовый с редким оливином (22); 11, 27, 32 – верлит: серпентинизированный (32); 6, 14, 25, 29, 31, 33 – дунит: пироксеновый (верлит?) (14, 33), серпентинизированный (6, 29), пироксеновый (31); 16, 34–38, 40 – аподунитовый серпентинит: антигорит-хризотилитовый с гранатом (34), β-лизардитовый (40); 18 – актинолитовый эпидотит с биотитом и клинопироксеном; 20 – лерцолит; 39 – карбонат-гальсовая порода с реликтами антигорита и бастита. Анализы выполнены во ВСЕГЕИ на микрозонде «Camebax», аналитик О.А. Яковлева. Проверка – не обнаружено, пустая клетка – не определялось.

*Note.* The analyses 1–15, 22–27, 28–33 – Sakhara massif, 16–21, 34–40 – Amambayka massif. The analyses 1–4, 28 – gabbro: amphibolized, chloritized and epidotized (1–3, 28), melanocratic (4); 5, 7–10, 12, 13, 15, 17, 19, 21–24, 26, 30 – clinopyroxenite: plagioclase with olivine (5), with titanomagnetite (7, 24), olivine (8, 23, 26), clinopyroxenite (9, 12, 15, 30), amphibolized (10), uraltized olivine (13), biotite (17), amphibolized with titanomagnetite and apatite (19), ore with actinolite (21), plagioclase with rare olivine (22); 11, 27, 32 – wehlrite: serpentized (32); 6, 14, 25, 29, 31, 33 – dunite: pyroxene (wehlrite?) (14, 33), serpentized (6, 29), pyroxene (31); 16, 34–38, 40 – serpentinite after dunite: antigorite-chrysotile with garnet (34), β-lizardite (40); 18 – actinolite epidote with biotite and clinopyroxene; 20 – lherzolite; 39 – carbonate-talc rock with relict antigorite and bastite. The analyses are carried out on a «Camebax» microprobe (VSEGEI, analyst O.A. Yakovleva).



также характерен как для пород ППУ, а так и для габброидов из габбро-гипербазитовых комплексов Аляски и Корякии (рис. 3). Высокотитанистые клинопироксены, характерные для дифференциатов платформенных расслоенных интрузий, в образованиях сахаринского комплекса отсутствуют. Все изученные клинопироксены имеют отчетливую положительную корреляцию между глиноземистостью и железистостью (рис. 4), что характерно именно для клинопироксенов, образовавшихся в результате последовательной эволюции расплава основного состава в условиях повышенного водного давления и объясняется «задержкой» кристаллизации плагиоклаза (Kushiro, 1979). Важно отметить, что наименее железистые клинопироксены являются и наименее глиноземистыми, что косвенно свидетельствует о выплавлении первичного расплава из истощенного мантийного источника (рис. 4). Низкая глиноземистость изученных диопсидов при их переменной (но невысокой) хромистости говорит о существенных отличиях между породами сахаринского комплекса и гипербазиитами океанических областей, но позволяет сопоставлять их с гипербазиитами островных дуг (рис. 5). В пользу последнего свидетельствует также высокая хромистость акцессорных хромшпинелидов из дунитов сахаринского комплекса при их повышенной железистости, причем величина отношения  $Cr / (Cr + Al)$  колеблется в них от 0.75 до 0.95 (рис. 6), что соответствует высокохромистым шпинелидам из гипербазитов фундамента развитых островных дуг (Паланджян, Дмитриенко, 1990) и согласуется с геологической позицией и возрастом сахаринского комплекса.

Происхождение пород дунит-клинопироксенит-габбровой формации Урала, в том числе и развитых в ППУ, является одной из сложнейших проблем, и, по нашему мнению, одной из самых запутанных на Урале. Ряд исследователей (К.К. Золоев, Д.С. Штейнберг, А.С. Варлаков) признавали магматическую природу габброидов, но все остальные породы, включая клинопироксениты, вебстериты, лерцолиты, верлиты и даже дуниты считали метасоматическими образованиями, формирующимися в результате воздействия габброидов на альпийно-типные гипербазиты. Другая точка зрения предполагает магматический (кумулятивный) генезис дунитов, верлитов и клинопироксенитов в результате кристаллизационной дифференциации базитовой магмы (Ферштатер, Пушкарёв, 1987; Ферштатер и др., 2012). Указывалось также на гетерогенность

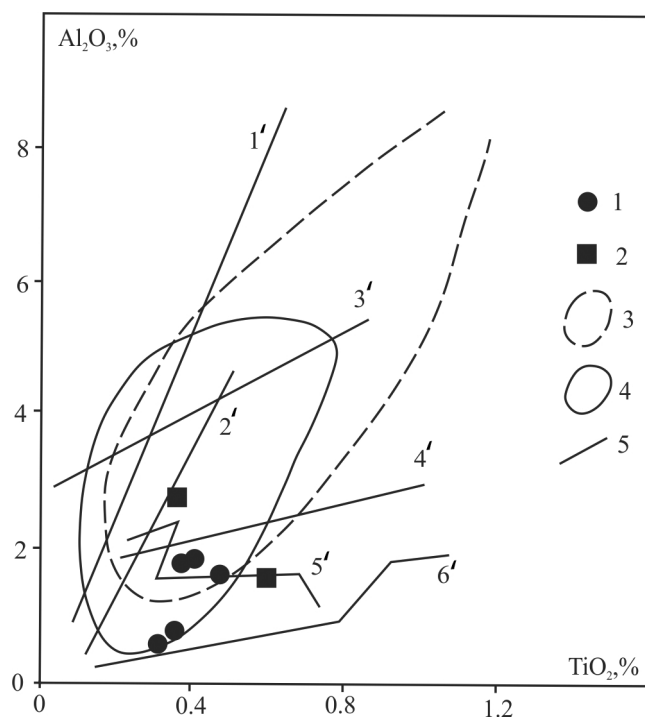


Рис. 3. Диаграмма  $TiO_2-Al_2O_3$  для клинопироксенов из гипербазитов и габброидов сахаринского комплекса.

1 – Сахаринский массив; 2 – Амамбайский массив; 3 – область составов клинопироксенов габброидных и ультраосновных ксенолитов из базальтов Алеутской и Малой Антильской островных дуг; 4 – область составов клинопироксенов из пород Платиноносного пояса Урала; 5 – тренды составов клинопироксенов из пород габбро-гипербазитовых комплексов (Иванов, Шмелёв, 1996): 1' – пояса Бодэ-Рэйндж (Аляска), 2' – массивов Олюторской зоны (Корякия), 3' – офиолитовых массивов Бей-оф-Айленд (Ньюфаундленд), 4' – офиолитового массива Семайл (Оман), 5' – Бушвельдского массива (Южная Африка), 6' – Скаергаардского массива (Гренландия).

Fig. 3.  $TiO_2-Al_2O_3$  diagram for clinopyroxenes from ultramafic rocks and gabbroids of the Sahara complex.

1 – Sahara massif; 2 – Amambayka massif; 3 – area of clinopyroxenes of gabbroids and ultramafic xenoliths from basalts of the Aleutian and Lesser Antilles island arcs; 4 – area of clinopyroxenes from rocks of the Urals platinum belt; 5 – trends of clinopyroxenes from rocks of gabbro-ultramafic complexes (Ivanov, Shmelev, 1996): 1' – Bode-Range belt (Alaska), 2' – massifs of the Olyutor zone (Koryakiya), 3' – ophiolite massifs of the Bay of Islands (Newfoundland), 4' – Semail ophiolite massif (Oman), 5' – Bushveld massif (South Africa), 6' – Scaergaard massif (Greenland).

габброидов, а часть из них считалась метаморфическими образованиями (Ефимов, 1984). Существуют также представления о дунитовой магме, которая своим происхождением обязана докристаллизационной дифференциации габброидного расплава,

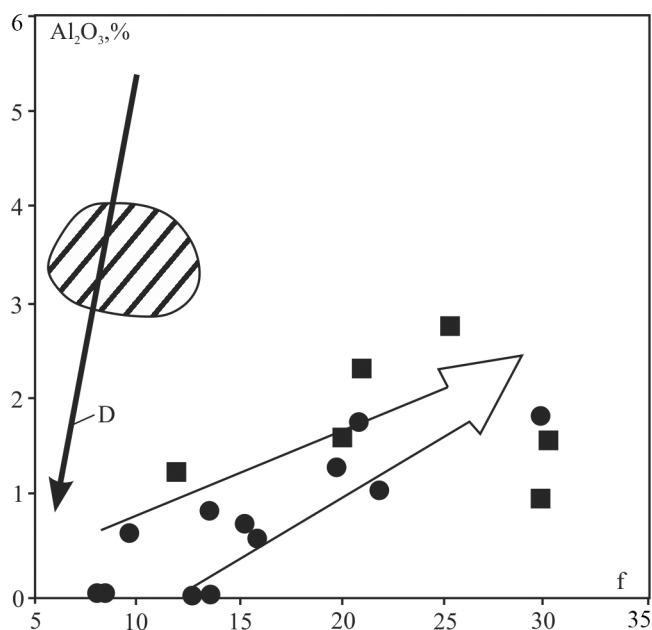


Рис. 4. Диаграмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $f$  для клинопироксенов из гипербазитов и габброидов сахаринского комплекса.

$f = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ . Тонкой стрелкой (D) показан тренд истощения мантийного источника, заштрихована область перекрытия составов пироксенов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов (Лазько, 1988). Широкой стрелкой показан тренд эволюции клинопироксенов из пород сахаринского комплекса. Остальные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Diagram  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $f$  for clinopyroxenes from ultramafic rocks and gabbroids of the Sakhara complex.

$f = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ . Thin arrow (D) shows the depletion of mantle source. Hatched area indicates overlapping compositions of pyroxenes of lherzolite and harzburgite (Laz'ko, 1988). Wide arrow shows the evolution trend of clinopyroxenes from rocks of the Sakhara complex. For other symbols, see Fig. 3.

а клинопироксениты при этом рассматриваются как «...результат термодиффузного инфильтрационно-биметасоматического перераспределения компонентов в термоградиентном тепловом поле, возникающем в результате интрузии дунитов, аналогично по генезису магнезиальным скарнам магматической стадии» (Иванов, 1997).

Петрогенезис сахаринского комплекса вкратце представляется следующим. Закономерная эволюция состава клинопироксенов из разных типов пород указывает на то, что кристаллизационная дифференциация была ведущим механизмом образования всей серии пород комплекса (за исключением дунитов). Главными фракционирующими минералами были оливин и клинопироксен, а на поздней стадии к ним добавился основной плагио-

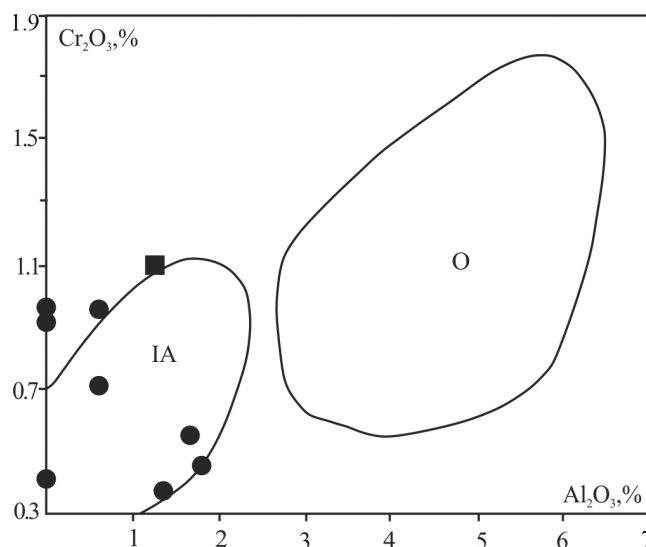


Рис. 5. Диаграмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Cr}_2\text{O}_3$  для хромсодержащих клинопироксенов из гипербазитов и габброидов сахаринского комплекса.

Поля составов клинопироксенов из: IA – гипербазитов островных дуг, O – гипербазитов океанических областей (Савельева, 1987). Остальные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 5.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Cr}_2\text{O}_3$  diagram for Cr-bearing clinopyroxenes from ultramafic rocks and gabbroids of the Sakhara complex.

Compositional fields of clinopyroxene from: IA – island arc ultramafic rocks, O – oceanic ultramafic rocks (Savel'eva, 1987). For other symbols, see Fig. 3.

клаз. Кумулятами являются оливиниты и верлиты, нередко обогащенные магнетитом. Первичный расплав, вероятно, соответствовал верлитовому или тылаит-анкармитовому (Корякско-Камчатский..., 2002; Попов, 2005; Krause et al., 2007; Пушкарёв, 2017). Практически полное отсутствие плагиоклаза или его весьма незначительное количество в наиболее основных породах комплекса является, по-видимому, следствием водных условий выплавления первичного расплава, т. к. в сухих условиях он должен соответствовать троктолиту (Borghini et al., 2018).

Природа дунитов – важнейший вопрос петрогенезиса сахаринского комплекса. По современным представлениям, в складчатых областях уверенно выделяются три типа дунитов: 1) остаточные («residual»), т. е. реститовые; 2) замещающие («replacive»), т. е. перекристаллизованные или, условно говоря, метасоматические; и 3) кумулятивные (Su et al., 2016). В нашем случае вся совокупность имеющихся данных свидетельству-

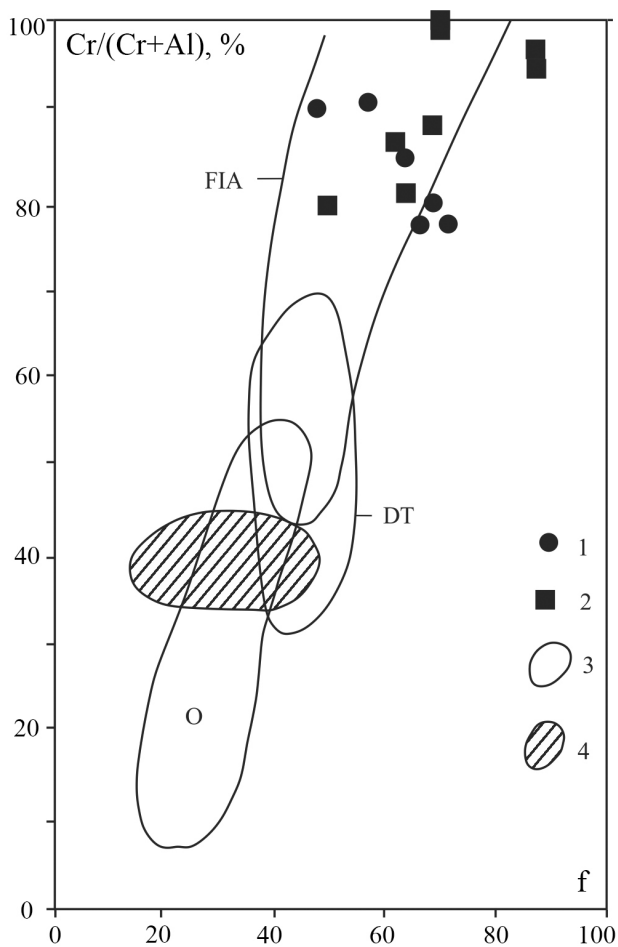


Рис. 6. Диаграмма составов хромшпинелидов из гипербазитов сахаринского комплекса.

1 – Сахаринский массив; 2 – Амамбайский массив; 3 – поля составов хромшпинелидов из гипербазитов океанов (О), глубоководных желобов (DT) и фундамента островных дуг (FIA); 4 – область перекрытия составов шпинелидов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов (Лазько, 1988; Паланджян, Дмитриенко, 1990).

Fig. 6. Composition of chromite from ultramafic rocks of the Sakharin complex.

1 – Sakharin massif; 2 – Amambayka massif; 3 – compositional fields of chromites from ultramafic rocks of oceans (O), deep-water trenches (DT) and island arc basement (FIA); 4 – area of overlapping compositions of chromites of lherzolite and harzburgite assemblages (Laz'ko, 1988; Palandzhyan, Dmitrienko, 1990).

ет в пользу реститовой природы дунитов, т. е. их принадлежности к первому типу, поскольку сидеронитовая структура пород противоречит их отнесению ко второму типу, а высокомагнезиальный состав оливина – к третьему. В пользу реститовой природы дунитов также косвенно свидетельствует то, что они присутствуют только в крупных массивах (Сахаринском и Амамбайском), тогда как во

множестве мелких (Стоячий Камень и др.) дуниты отсутствуют. Другой вопрос – каким образом мантийные рститы вместе с магмой были подняты на уровень коры? По мнению В.С. Попова, блоки горячего твердого остатка «увлекались» за собой выплавлявшейся магмой (Попов, 2005). Возможным объяснением этого явления может быть установленная экспериментально «сверхпластичность» дунита при его взаимодействии с базальтовым расплавом в водных условиях (Ohuchi et al., 2012), что в сочетании с его разуплотнением в результате серпентинизации должно приводить к его способности к перемещению вместе с магмой по проницаемым зонам.

### Геодинамическая обстановка формирования и выводы

Приведенные данные позволяют подтвердить сделанный ранее вывод о том, что образования сахаринского комплекса являются полными аналогами ППУ (Сурин, 2000). Геодинамическая обстановка формирования самой платиноносной ассоциации до последнего времени была неясной. Ранее наиболее распространенными были представления о субплатформенной природе этих образований (Ферштатер, 1989). Только в последние десятилетия получены убедительные геологические, геохимические и минералогические доказательства островодужных (т. е. надсубдукционных) условий их формирования (Иванов, Шмелёв, 1996; Иванов и др., 1999; Krause et al., 2007; Пушкарёв, 2017). Следовательно, сахаринский комплекс также формировался в островодужной обстановке. Оба этих вывода нашли неожиданное подтверждение в находке платиноидной минерализации в корях выветривания Сахаринского массива (Таловина, Лазаренков, 2001), причем профиль этой минерализации палладиево-платиновый, что характерно именно для островодужных платиноносных комплексов. Необходимо отметить, что надсубдукционная обстановка формирования мафит-ультрамафических комплексов Урало-Аляскинского типа (т. е. аналогичного ППУ) признается в настоящее время многими исследователями, в том числе и для ряда комплексов, развитых во многих других регионах мира (Cai et al., 2012; Su et al., 2014; Habtoor et al., 2016).

С учетом общей схемы магматической эволюции Восточно-Магнитогорского пояса, в соответствии с которой в позднефранское время началась

стадия формирования зрелой островной дуги (Сурин, Мосейчук, 1995), можно сделать вывод о том, что сахаринский комплекс является своего рода индикатором начала этой стадии. С современных позиций, в том числе и на основании экспериментальных данных, это объясняется реологическими свойствами коры, т. е. понижением ее геотермы и увеличением жесткости, т. к. на более ранней (развитой островодужной) стадии формирование интрузий Урало-Аляскинского типа в силу ее «размягченности» было невозможно и даже «запрещено» (Guillou-Frottier et al., 2014).

Возраст пород ППУ достоверно установлен различными методами и составляет на Среднем и Северном Урале 420–430 млн лет, что доказывает синхронность его образования с локализованной восточнее именновской островодужной вулканогенной формацией, вскрытой Уральской сверхглубокой скважиной СГ-4 (Иванов и др., 1999). В нашем случае наблюдается прямо противоположная картина в пространственном размещении пород рассматриваемого комплекса и разновозрастных с последними вулканитов, т. е. массивы сахаринского комплекса, синхронные с образованиями аблязовской островодужной вулканоплутонической ассоциации, локализованы восточнее последних, что также может служить одним из аргументов в пользу противоположно направленной (на запад в современных координатах) vergence палеозоны субдукции при формировании Восточно-Магнитогорского пояса (Сурин, Мосейчук, 1995), в отличие от Тагильского пояса, где она по мнению практически всех исследователей имела устойчиво восточное падение.

Таким образом, геологические и петрологические данные свидетельствуют о том, что образования сахаринского комплекса являются аналогами Платиноносного пояса Урала. Формирование комплекса знаменует собой начало стадии зрелой островной дуги. Ведущим механизмом петрогенеза для него являлась кристаллизационная дифференциация.

## Литература

- Ефимов А.А.** (1984) Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М., Наука, 232 с.
- Замига Ю.И.** (1969) Сахаровский габбро-пироксенит-дунитовый массив на восточном склоне Южного Урала. *Труды II-го Уральского петрографического совещания*. Свердловск, Т. 2, 39–40.
- Иванов К.С., Аникина Е.В., Ефимов А.А., Пушкарёв Е.В., Ферштатер Г.Б., Шмелёв В.Р.** (1999) Платиноносный пояс Урала / Путеводитель экскурсий Международной научной конференции «Палеозоны субдукции: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез». Екатеринбург, УрО РАН, 95 с.
- Иванов К.С., Шмелёв В.Р.** (1996) Платиноносный пояс Урала – магматический след раннепалеозойской зоны субдукции. *Доклады Академии наук*, **347**(5), 649–652.
- Иванов О.К.** (1997) Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург, Уральский университет, 487 с.
- Кораблёв Г.Г., Савельев Д.Е.** (2014) Минералогическо-геохимические особенности ультрамафитов Амамбайского массива (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2014*. Миасс, ИМин УрО РАН, 99–103.
- Корякско-Камчатский регион – новая платиноносная провинция России (2002) СПб., Картфабрика ВСЕГЕИ, 283 с.
- Лазыко Е.Е.** (1988) Типоморфизм породообразующих минералов ультрабазитов / Магматические горные породы. Т. 5. Ультраосновные породы. М., Наука, 424–441.
- Мосейчук В.М., Яркова А.В., Михайлов И.Г., Кашина Л.В., Сурин Т.Н., Плохих Н.А., Юрецкий В.Н.** (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XXX. Объяснительная записка. М., МФ ВСЕГЕИ, 222 с.
- Паланджян С.А., Дмитриенко Г.Г.** (1990) Петрохимические типы и геотектоническая позиция перидотитов офиолитовых ассоциаций. *Труды ИГГ СО АН СССР*. Новосибирск, ИГГ СО АН СССР, (758), 62–70.
- Попов В.С.** (2005) Дунит-верлит-клинопироксенитовая магматическая ассоциация: возможные источники и механизм подъема и дифференциации расплава. *Записки РМО*, **134**(6), 1–18.
- Пучков В.Н.** (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, Даурия. 146 с.
- Пушкарёв Е.В.** (2017) Островодужные анкарами-ты Урала и их аналоги в дунит-клинопироксенит-габбровых комплексах Урала. *Металлогения древних и современных океанов-2017. Дифференциация и причины разнообразия рудных месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 23–28.
- Савельев Д.Е., Сначёв В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А.** (2008) Геология, петрогеохимия и хромитовосность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 320 с.
- Савельева Г.Н.** (1987) Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М., Наука, 246 с.
- Симонов В.А., Пучков В.Н., Приходько В.С., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С., Сте-**



панов А.С. (2016) Физико-химические условия кристаллизации дунитов Нижнетагильского платиноносного массива (Средний Урал). *Геология и геофизика*, **57** (6), 1106–1134.

Сурин Т.Н. (2000) Сахаринский дунит-клинопироксенит-габбровый комплекс (Восточно-Магнитогорская зона, Ю. Урал) – аналог образований Платиноносного пояса Урала. *Тезисы конференции «Металлогения и геодинамика Урала»*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 82–85.

Сурин Т.Н., Мосейчук В.М. (1995) Геодинамика развития Магнитогорского палеовулканического пояса. *Вестник СПбГУ, Сер. 7*, **4**(28), 11–18.

Таловина И.В., Лазаренков В.Г. (2001) Распределение и генезис платиноидов в никелевых рудах Сахаринского и Елизаветинского месторождений, Урал. *Литология и полезные ископаемые*, (2), 134–141.

Ферштатер Г.Б. (1989) Дунит-клинопироксенит-габбровая формация Платиноносного пояса Урала: позднеордовикская субплатформенная вулканоплутоническая ассоциация / Магматические формации в геологической истории и структуре Земли. Свердловск, ИГГ УрО АН СССР, 55–64.

Ферштатер Г.Б., Пушкарёв Е.В. (1987) Магматические клинопироксениты Урала и их эволюция. *Известия АН СССР. Серия геологическая*, (3), 13–23.

Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П. (2012) Геохимия циркона из магматических и метаморфических пород Урала. *Литосфера*, (4), 13–29.

Borghini G., Francomme J.E., Fumagalli P. (2018) Melt-dunite interactions at 0.5 and 0.7 GPa: experimental constraints on the origin of olivine-rich troctolites. *Lithos*, **323**, 44–57.

Cai K., Sun M., Yuan C., Zhao G., Xiao W., Long X. (2012) Keketuohai mafic-ultramafic complex in the Chinese Altai, NW China: petrogenesis and geodynamic significance. *Chemical Geology*, **294-295**, 26–41.

Guillou-Frottier L., Burov E., Auge T., Gloaguen E. (2014) Rheological conditions for emplacement of Ural-Alaskan-type ultramafic complexes. *Tectonophysics*, **631**, 120–145.

Habtoor A., Ahmed A.H., Harbi H. (2016) Petrogenesis of the Alaskan-type mafic-ultramafic complex in the Makkah quadrangle, western Arabian Shield, Saudi Arabia. *Lithos*, **263**, 33–51.

Krause J., Brüggemann G., Pushkarev E.V. (2007) Accessory and rock forming minerals monitoring the evolution of zoned mafic-ultramafic complexes in the Central Ural Mountains. *Lithos*, **95**, 19–42.

Kushiro I. (1979) Fractional crystallization of basaltic magma. In: *Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspectives*. (Ed.) Yoder H. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 171–204.

Ohuchi T., Nishihara Y., Kawazoe T., Spengler D., Shiraishi R., Suzuki A., Kikegawa T., Ohtani E. (2012) Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications

for shear localization in Earth's upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **335-336**, 59–71.

Su B., Chen Y., Guo S., Liu J. (2016) Origins of orogenic dunitites: Petrology, geochemistry, and implications. *Gondwana Research*, **29**, 41–59.

Su B.-X., Qin K.-Z., Zhou M.-F., Sakui P.A., Thakurta J., Tang D.-M., Liu P.-P., Xiao Q.-H., Sun H. (2014) Petrological, geochemical and geochronological constraints on the origin of the Xiadong Ural-Alaskan type complex in NW China and tectonic implication for the evolution of southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, **200–201**, 226–240.

## References

Borghini G., Francomme J.E., Fumagalli P. (2018) Melt-dunite interactions at 0.5 and 0.7 GPa: experimental constraints on the origin of olivine-rich troctolites. *Lithos*, **323**, 44–57.

Cai K., Sun M., Yuan C., Zhao G., Xiao W., Long X. (2012) Keketuohai mafic-ultramafic complex in the Chinese Altai, NW China: petrogenesis and geodynamic significance. *Chemical Geology*, **294-295**, 26–41.

Efimov A.A. (1984) [Gabbro-ultramafic complexes of the Urals and problem of ophiolites]. Moscow, Nauka, 232 p. (in Russian)

Fershtater G.B. (1989) [Dunite-clinopyroxenite-gabbro complex of the Urals platinum belt: Late Ordovician platform volcano-plutonic association] [*Igneous complexes in geological evolution and structure of the Earth*]. In: *Magmaticheskie formatsii v geologicheskoy istorii i strukture Zemly*. Sverdlovsk, IGG UrO AN SSSR, 55–64. (in Russian)

Fershtater G.B., Krasnobayev A.A., Bea F., Montero P. (2012) [Geochemistry of zircon from igneous and metamorphic rocks of the Urals]. *Litosfera [Litosphere]*, (4), 13–29. (in Russian)

Fershtater G.B., Pushkarev E.V. (1987) [Igneous clinopyroxenites of the Urals and their evolution]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological series]*, (3), 13–23. (in Russian)

Guillou-Frottier L., Burov E., Auge T., Gloaguen E. (2014) Rheological conditions for emplacement of Ural-Alaskan-type ultramafic complexes. *Tectonophysics*, **631**, 120–145.

Habtoor A., Ahmed A.H., Harbi H. (2016) Petrogenesis of the Alaskan-type mafic-ultramafic complex in the Makkah quadrangle, western Arabian Shield, Saudi Arabia. *Lithos*, **263**, 33–51.

Ivanov K.S., Anikina E.V., Efimov A.A., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Shmelev V.R. (1999) [Urals platinum belt]. In: *Putevoditel ekskursii mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Paleozony subduktzii: tektonika, magmatizm, metamorfizm, sedimentogenez» [A guidebook of field trips of International scientific conference «Subdaction*



paleozones: tectonics, magmatism, metamorphism, sedimentogenesis». Yekaterinburg, UrO RAN, 95 p. (in Russian)

**Ivanov K.S., Shmelev V.R.** (1996) [Urals platinum belt – a magmatic trace of the Early Paleozoic subduction zone]. *Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences]*, **347**(5), 649–652. (in Russian)

**Ivanov O.K.** (1997) [Concentric-zonal pyroxenite-dunite massifs of the Urals]. Yekaterinburg, Uralskiy Universitet, 487 p. (in Russian)

**Korablev G.G., Saveliev D.E.** (2014) [Mineralogical-geochemical features of ultramafic rocks of the Amambaika massif (Souther Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2014. Dvadsat let na peredovyykh rubezhakh geologii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Metallogeny of ancient and modern oceans-2014. Twenty years at the frontline of geology of mineral deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 99–103. (in Russian)

[Koryak-Kamchatka region – a new platinum province of Russia]. (2002) St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI, 283 p. (in Russian)

**Krause J., Brüggmann G., Pushkarev E.V.** (2007) Accessory and rock forming minerals monitoring the evolution of zoned mafic-ultramafic complexes in the Central Ural Mountains, *Lithos*, **95**, 19–42.

**Kushiro I.** (1979) Fractional crystallization of basaltic magma. *Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspectives. (Ed.) Yoder H.* Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 171–204.

**Laz'ko E.E.** (1988) [Typomorphism of rock-forming minerals of ultramafic rocks] In: *Magmaticheskie gornyye porody. T.5. Ultraosnovnyye porody [Igneous rocks. Vol. 5. Ultramafic rocks]*. Moscow, Nauka, 242–441. (in Russian)

**Moseychuk V.M., Yarkova A.V., Mikhaylov I.G., Kashina L.V., Surin T.N., Plokhikh N.A., Yuretsky V.N.** (2013) [State geological of the Russian Federation]. Scale of 1 : 200 000. Series South Urals. Sheet N-40-XXX. Explanatory report. Moscow, MF VSEGEI, 222 p. (in Russian)

**Ohuchi T., Nishihara Y., Kawazoe T., Spengler D., Shiraishi R., Suzuki A., Kikegawa T., Ohtani E.** (2012) Superplasticity in hydrous melt-bearing dunite: Implications for shear localization in Earth's upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **335–336**, 59–71.

**Palandzhyan S.A., Dmitrienko G.G.** (1990) [Petrochemical types and geotectonic setting of peridotites of ophiolite associations]. *Trudy IGG SO AN SSSR [Proceedings of Institute of Geology and Geophysics SB AS USSR]*. Novosibirsk, IGG SO AN SSSR, (758), 62–70. (in Russian)

**Popov V.S.** (2005) [Dunite-wehrlite-clinopyroxenite igneous association: possible sources, uplift mechanisms, and melt differentiation]. *Zapiski RMO [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **134** (6), 1–18. (in Russian)

**Puchkov V.N.** (2000) [Paleogeodynamics of the South and Central Urals]. Ufa, Dauriya, 146 p. (in Russian)

**Pushkarev E.V.** (2017) [Island arc ankaramites of the Urals and their analogs in dunite-clinopyroxenite-gabbro complexes of the Ural-Alaskan type]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2017. Differentsiatsiya i prichiny raznoobraziya rudnykh mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2017. Differentiation and reasons of diversity of ore deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 23–28. (in Russian)

**Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A.** (2008) [Geology, petrochemistry and chromite potential of gabbro-ultramafic massifs of the South Urals]. Ufa, DizainPoligrafServis, 320 p. (in Russian)

**Savelieva G.N.** (1987) [Gabbro-ultramafic complexes of the Urals ophiolites and their analogs in the present-day oceanic crust]. Moscow, Nauka, 246 p. (in Russian)

**Simonov V.A., Puchkov V.N., Prikhod'ko V.S., Stupakov S.I., Kotlyarov A.V., Karmanov N.S., Stepanov A.S.** (2016) Physicochemical conditions of crystallization of dunites of the Nizhnii Tagil Pt-bearing massif (Middle Urals). *Russian Geology and Geophysics*, **57**(6), 868–890.

**Su B., Chen Y., Guo S., Liu J.** (2016) Origins of orogenic dunites: Petrology, geochemistry, and implications. *Gondwana Research*, **29**, 41–59.

**Su B.-X., Qin K.-Z., Zhou M.-F., Sakui P.A., Thakurta J., Tang D.-M., Liu P.-P., Xiao Q.-H., Sun H.** (2014) Petrological, geochemical and geochronological constraints on the origin of the Xiadong Ural-Alaskan type complex in NW China and tectonic implication for the evolution of southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, **200–201**, 226–240.

**Surin T.N.** (2000) [Sakhara dunite-clinopyroxenite-gabbro complex (East Magnitogorsk zone, South Urals) – an analog of rocks of the Urals platinum belt]. *Tezisy konferentsii «Metallogeniya i geodinamika Urala» [Abstracts of conference «Metallogeny and geodynamics of the Urals»]*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 82–85. (in Russian)

**Surin T.N., Moseychuk V.M.** (1995) [Geodynamic evolution of the Magnitogorsk paleovolcanic belt]. *Vestnik SPbGU, Ser. 7 [Vestnik of St. Petersburg State University, series 7]*, **4**(28), 11–18. (in Russian)

**Talovina I.V., Lazarenkov V.G.** (2001) [Distribution and genesis of platinoids in Ni ores of the Sakhara and Elizavetinsky deposits, Urals]. *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources]*, (2), 134–141. (in Russian)

**Zamiga Yu.I.** (1969) [Sakhara gabbro-pyroxenite-dunite massif at the eastern slope of the South Urals]. *Trudy II-go Ural'skogo petrograficheskogo soveshchaniya [Proceedings of the 2nd Uralian petrographic meeting]*. Sverdlovsk, vol. 2, 39–40. (in Russian)