

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



# Петрология магматических и метаморфических комплексов

## Выпуск 10

Материалы X Всероссийской конференции  
с международным участием

27 ноября – 30 ноября 2018 года



*Лучшие решения  
для вашей лаборатории*

Томск 2018

# МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ П-ОВА СВЯТОЙ НОС И ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОЗ. БАЙКАЛ (ЗАБАЙКАЛЬЕ): ГЕОХИМИЯ, ВОЗРАСТ, SM-ND ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ

Е.И. Михеев<sup>1,2</sup>, А.Г. Владимиров<sup>1,2,3</sup>, А.В. Травин<sup>1,2,3</sup>, Н.И. Волкова<sup>1,3</sup>, В.В. Хлестов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, mikheev@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск

## METAMORPHIC COMPLEXES OF SVIATOY NOSS PENINSULA REGION IN TRANSBAIKALIA: GEOCHEMISTRY, AGE, SM-ND ISOTOPE DATA

E.I. Mikheev<sup>1,2</sup>, A.G. Vladimirov<sup>1,2,3</sup>, A.V. Travin<sup>1,2,3</sup>, N.I. Volkova<sup>1,3</sup>, V.V. Khlestov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of geology and mineralogy SB RAS, Novosibirsk, mikheev@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

<sup>3</sup>Tomsk State University, Tomsk

*Metamorphic complexes of Sviatoy Noss peninsula region (450 Ma) are fragments of Early Paleozoic accretion-collision system in Transbaikalia. Metamorphism degree is upper amphibolite facies ( $P = 6,2-7,2$  kbar,  $T = 705-745$  °C). The compositions of protoliths correspond to island arc metavolcanic or metavolcanogenic-sedimentary complexes (495-460 Ma), in which calc-alkaline and alkaline series volcanics predominate, tholeiitic volcanics are less common. Sm-Nd model ages for gneisses (1626-1544 Ma) and amphibolites (867 Ma) indicate Meso- Neoproterozoic the lower age limit for the protoliths of the metamorphic complexes. Amphibole (256-245 Ma,  $P_3-T_2$ ) and biotite (183-169 Ma,  $J_{1-2}$ ) Ar-Ar isotope ages reflect the Mesozoic history of the metamorphic complexes and correlate with the stages of the continental lithosphere extension in Transbaikalia.*

Метаморфические комплексы п-ова Святой Нос и прилегающих территорий восточного берега оз. Байкал рассматриваются в составе метаморфических террейнов, образующих раннепалеозойский Байкальский складчатый пояс в зоне сочленения Сибирского кратона и Баргузинского микроконтинента (Гладкочуб и др., 2010). На северо-востоке исследуемые комплексы отделены акваторией оз. Байкал от структурно-вещественных комплексов прибайкальской части Ольхонского метаморфического террейна и фундамента Сибирской платформы, на северо-востоке граничат с рифейским Байкало-Муйским островодужным террейном, на юго-востоке – с Баргузинским и Икатским террейнами, входящими в состав Баргузинского микроконтинента и на юго-западе – с Хамар-Дабанским метаморфическим террейном (Беличенко и др., 2006). Геодинамически рассматриваемые комплексы относятся к Ангинско-Таланчанской островной дуге (Макрыгина и др., 2007; Зорин и др., 2009; Мазукабзов и др., 2010).

Метаморфические породы представлены отложениями святоносского и котерского комплексов (рис.). Залегают они в виде отдельных провесов кровли или ксеноблоков гранитоидного батолита и характеризуются полной кристалличностью и отсутствием реликтовых структур. Уровень метаморфизма во всех случаях – не ниже амфиболитовой фации. Отложения святоносского комплекса распространены на п-ове Святой Нос, островах Лохматый и Голый Чивыркуйского залива и на восточном берегу оз. Байкал от устья руч. Большой Сухой до устья р. Большая Черемшана. Разрез святоносского комплекса представлен отложениями крестовой и катковской свит. Крестовая свита сложена графитовыми мраморами с редкими прослоями гнейсов, сланцев и кварцитов. Катковская свита сложена биотит-амфиболовыми, биотитовыми амфиболовыми, амфибол-гранат-биотитовыми, биотит-пироксеновыми, гранат-амфибол-пироксеновыми гнейсами, плагиогнейсами и сланцами, в подчиненном количестве – мраморами, амфиболитами. Прослои мраморов в катковской свите достигают мощности 100-150 м и содер-

жат многочисленные обломки силикатных пород. Породы катковской свиты интенсивно мигматизированы и прорваны различными гранитоидами, реже – дайками основных пород. Основными морфологическими типами мигматитов в северной части полуострова являются грубопослойные, а в районе мыса Нижнее Изголовье – брекчиевидные и псевдобрекчиевидные, ветвисто-жилковатые и отчасти послойные. Для отложений святоносского комплекса (включая обе свиты) устанавливается общее северо-восточное простирание – азимут 40-70° (Цыренов, 1965; Давыдов, 1983).

Отложения котерского комплекса распространены на архипелаге Ушканьих островов и на восточном берегу оз. Байкал в междуречье р. Большая Черемшана – р. Шумилиха (Зайцев, 1979; Давыдов, 1983). Разрез котерского комплекса представлен биотит-амфиболовыми, биотитовыми, биотит-пироксеновыми гнейсами и сланцами, гранитогнейсами, графитовыми мраморами и редкими прослоями кварцитов и подразделяется на две свиты: няндонинская, в которой преобладают силикатные породы, и баргузинская – с преобладанием карбонатных пород и подчиненным количеством гнейсов и сланцев. В целом состав пород и геологическое строение котерского комплекса аналогично с геологическим строением святоносского комплекса.

Ранее возраст святоносского и котерского метаморфических комплексов считался докембрийскими (Салоп, 1964): архейским и верхнепротерозойским соответственно. Сейчас для отложений святоносского комплекса на примере п-ова Святой Нос установлен их раннепалеозойский возраст (Михеев и др., 2014). Для отложений котерского комплекса опубликованных данных по датированию нет, однако, учитывая тенденцию «омоложения» метаморфических блоков в южном обрамлении Сибирской платформы и сходство геологического строения со святоносским комплексом, можно также предположить, что они будут иметь венд-раннепалеозойский возраст – для решения этого вопроса требуется проведение геохронологических исследований.

Полученные геологические, петрогеохимические, геохронологические и изотопные данные по метаморфическим породам п-ова Святой Нос и восточного берега оз Байкал позволяют сделать выводы об их протолите и времени метаморфизма, а также провести их сравнительную характеристику с породами метаморфических комплексов восточного берега оз. Байкал.

#### Протолит метаморфических пород

Изучены три главные группы пород, слагающие святоносский комплекс п-ова Святой Нос: 1)  $\pm$ Bt-Cpx-Amp-Grt гнейсы и плагиогнейсы, 2) амфиболиты и 3) Bt- и Bt-Amp гнейсы.  $\pm$ Bt-Cpx-Amp-Grt гнейсы и плагиогнейсы слагают северный блок метаморфических пород полуострова, амфиболиты и Bt- и Bt-Amp гнейсы – южный. Оценка P-T-параметров метаморфизма святоносского комплекса (P = 6,2-7,2 кбар, T = 705-745 °C) отвечает высокотемпературной части амфиболитовой фации (Михеев и др., 2014). Поскольку породы полностью перекристаллизованы и имеют метаморфические структуры, то реконструкция протолита возможна только по результатам петрогеохимических исследований.

Петрохимические диаграммы Предовского (Предовский, 1980) и Вернера (Werner, 1987) показывают магматический протолит для гнейсов и плагиогнейсов северной части п-ова Святой Нос. По химическому составу они отвечают преимущественно андезибазальтам и андезитам известково-щелочной серии, реже – базальтам и дацитам, и согласуются с составами вулканитов окраинноконтинентальных обстановок (Фролова, Бурикова, 1997). Повышенные содержания CaO в средних и кислых разновидностях говорит о том, что протолитом также могли быть туффиты с повышенной карбонатной составляющей. Кроме того, для данных пород характерны пониженные содержания  $Al_2O_3$  и  $Na_2O$  относительно вулканитов близкого петрохимического состава. По содержаниям индикаторных редких элементов гнейсы также преимущественно соответствуют вулканитам нормальной щелочности (андезитам и риодацитам) (Winchester, Floyd, 1977). В пользу вулканического протолита также свидетельствуют содержащиеся в породе кристаллы циркона с магматической ростовой зональностью.

Составы амфиболитов южной части п-ова Святой Нос согласуются с составами субщелочных базальтов и на диаграмме Предовского (Предовский, 1980) соответствуют полю магматических пород. По составу рассеянных элементов выделилось две группы пород. Наибольшая часть амфиболитов обладает геохимическими характеристиками близкими к OIB, но для мультиэлементных спектров этих амфиболитов характерны отрицательные аномалии по Nb и Ti, что говорит о надсубдукционной природе протолита. Реже встречаются амфиболиты с геохимическими характеристиками MORB, что проявляется в обеднении легкими лантаноидами относительно тяжелых.

Протолитом биотитовых и биотит-амфиболовых гнейсов, исходя из полученных геохимических данных, могли служить как вулканиты кислого состава, так и граувакки. На диаграмме Предовского (Предовский, 1980) для отделения субграувакк и аркозов от средних и кислых магматитов составы исследуемых гнейсов попадают в поле магматических пород.

Таким образом, протолиты метаморфических пород (гнейсов и амфиболитов) п-ова Святой Нос наиболее вероятно отвечают вулканогенной либо вулканогенно-осадочной толще, в которой преобладают вулканиты известково-щелочной и субщелочной серий, реже встречаются толеитовые вулканиты.

#### Интерпретация геохронологических данных

Изученные комплексы традиционно рассматривались как выступы докембрийского кристаллического фундамента (Салоп, 1964) и лишь в последнее время – в качестве раннепалеозойских образований, возникших в результате аккреционно-коллизийных процессов (Зорин и др., 2009). В работе (Михеев и др., 2014) получено подтверждение их палеозойского возраста на основе U-Pb изотопного метода, а также информация о дальнейшей термальной истории этих комплексов на основе Ar-Ar изотопного метода. U-Pb методом (TIMS и LA-ICP-MS) по цирконам из гнейсов получены даты  $495 \pm 5$ ,  $464 \pm 1,5$  и  $450 \pm 5$  млн лет. Первые две датировки ( $C_3-O_2$ ) получены по цирконам, характеризующимся осцилляционной зональностью, характерной для магматических цирконов, и, вероятно, отражают возраст вулканического протолита. Датировка  $450 \pm 5$  млн лет ( $O_3$ ) получена по перекристаллизованным зернам циркона, характеризующимся однородной структурой и наиболее вероятно отражающим возраст метаморфизма святоносского комплекса. Модельные Sm-Nd возрасты для гнейсов (1626-1544 млн лет) и амфиболитов (867 млн лет) свидетельствуют о том, что среди протолитов метаморфических толщ п-ова Святой Нос отсутствуют архейские геологические комплексы, а нижняя возрастная граница протолита отвечает началу рифея. Результаты Sm-Nd изотопии согласуются с данными, полученными для этих же объектов в (Лебедева и др., 2017; Рыцк и др., 2017).

Ar-Ag изотопным методом по амфиболам и биотитам из гнейсов получены возрастные интервалы 256-245 и 183-169 млн лет. Период 256-245 млн лет соотносится с одним из этапов формирования рифтовой системы Центральной Азии и максимально близок к возрасту Хангайской крупной изверженной провинции (270-230 млн лет) (Ярмолюк и др., 2013); идентичные выделенному периоду датировки –  $249 \pm 2$  и  $247 \pm 2$  млн лет – получены U-Pb методом по циркону из гранитоидов заганского комплекса, участвующих в строении Заганского комплекса метаморфического ядра (Забайкалье) (Донская и др., 2014). Этап 183-169 млн лет соотносится с гранитоидами юрского возраста (178-152 млн лет), пространственно ассоциирующими с комплексами метаморфических ядер в Забайкалье (Скляров и др., 1997; Donskaya et al., 2008; Mazukabzov et al., 2011; Donskaya, Mazukabzov, 2014; Донская и др., 2016).

#### Сравнительная характеристика метаморфических комплексов п-ова Святой Нос и восточного берега оз. Байкал.

Святоносский комплекс восточного берега оз. Байкал. По геологическим и петрографическим данным (геологическая структура, набор пород, минералогия гнейсов) метаморфическая толща святоносского комплекса обнаруживает заметное сходство с метаморфическими комплексами п-ова Святой Нос. Набор пород в южной части святоносского комплекса, представленный амфиболитами и биотитовыми гнейсами, совпадает с набором пород в метаморфическом комплексе южной части п-ова Святой Нос. Севернее состав святоносского комплекса представлен метабазами (амфиболитами и клинопироксен-амфиболовыми плагиогнейсами) и мраморами, что хорошо соотносится со строением северного блока святоносского комплекса п-ова Святой Нос; отличительной чертой служит отсутствие граната в составе плагиогнейсов святоносского комплекса восточного берега оз Байкал. Протолитом амфиболитов и плагиогнейсов святоносского комплекса восточного берега являются субщелочные вулканиты: трахибазальты – для амфиболитов, трахиандезиты и трахидациты – для плагиогнейсов.

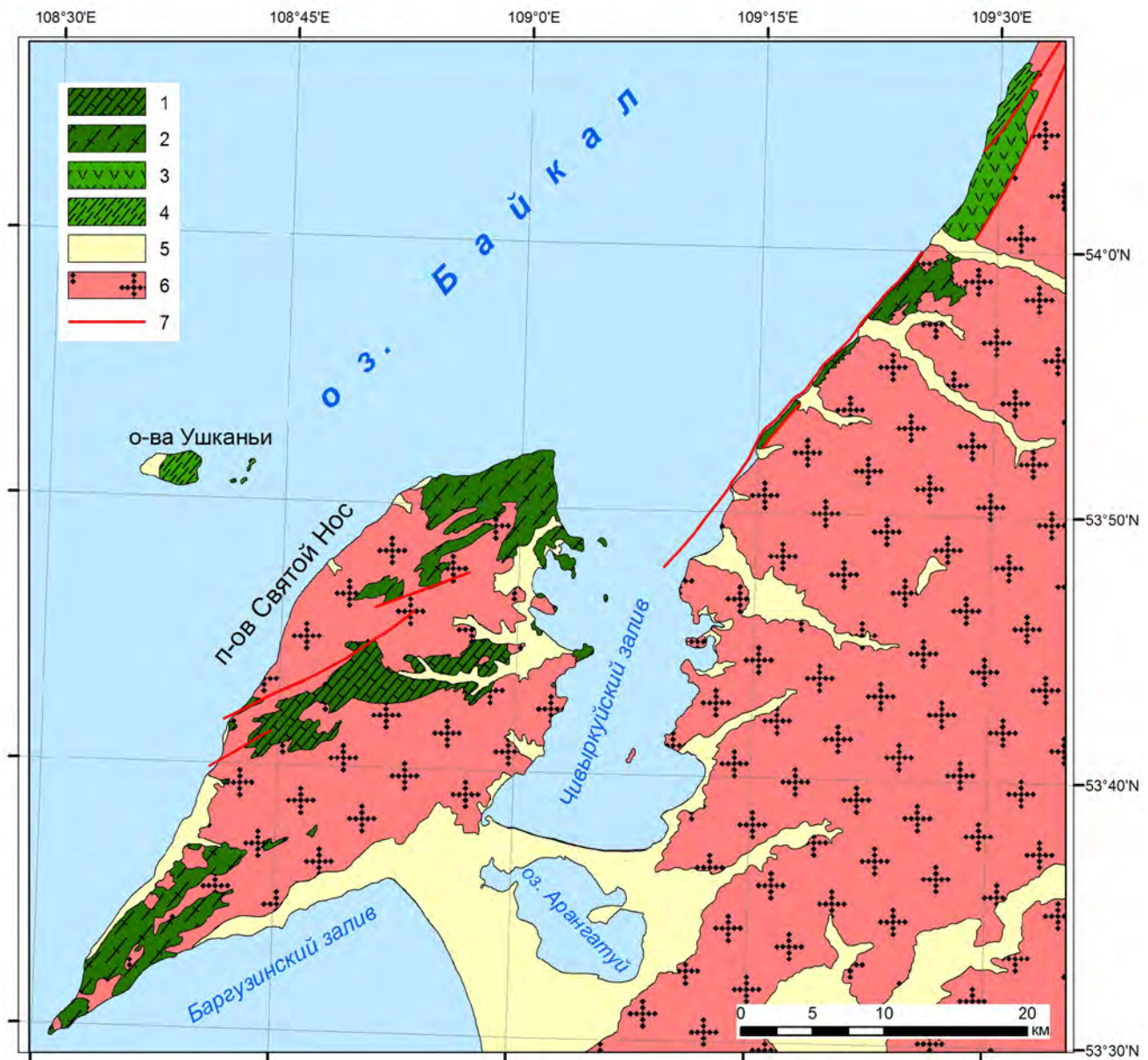


Рисунок. Схема геологического строения п-ова Святой Нос. Составлена на основе геологических карт масштаба 1:200 000 (листы N-49-XIV, XIX, XX) (Цыренов, 1965; Зайцев, 1979; Давыдов, 1983). 1-2 – святоносский комплекс: 1 – крестовая свита (графитовые мраморы с прослоями кварцитов, кристаллических сланцев и гнейсов), 2 – катковская свита (кристаллические сланцы и гнейсы, амфиболиты с прослоями мраморов); 3-4 – котерский комплекс: 3 – няндонинская свита (гнейсы, кристаллические сланцы с прослоями мраморов), 4 – баргузинская свита (мраморы с прослоями гнейсов, сланцев и кварцитов); 5 – неоген-четвертичные отложения; 6 – позднепалеозойские гранитоиды ( $C_3-P$ ), нерасчлененные; 7 – разломы.

Протолитом биотитовых гнейсов могли быть риолиты или граувакки. В целом для пород святоносского комплекса характерен субщелочной состав пород, что отличает их от отложений метаморфических толщ п-ова Святой Нос и котерского комплекса, для которых характерны составы нормальной щелочности. Петрохимически состав амфиболитов святоносского комплекса близок к составу субщелочных амфиболитов в южной части п-ова Святой Нос, геохимически они характеризуются более высоким содержанием РЗЭ (350 г/т и 144-217 г/т соответственно). Также существенная разница в значениях  $\epsilon Nd(t)$  для амфиболитов святоносского комплекса восточного берега (-5,08) и южной метаморфиче-

ской толщи п-ова Святой Нос (1,06) говорит о разных типах источников их протолитов. Кислые гнейсы обеих толщ характеризуются отрицательными значениями  $\epsilon Nd(t)$ .

Отложения котерского комплекса, представленные графитовыми мраморами, основными гнейсами, гранитогнейсами и кварцитами, схожи по структуре с отложениями святоносского комплекса п-ова Святой Нос. Отличительной чертой котерского комплекса служит значительная доля карбонатных отложений в разрезе. Главным темноцветным минералом в основных гнейсах котерского комплекса является клинопироксен, тогда как в гнейсах святоносского комплекса п-ова Святой Нос набор темноцветных минера-

лов более разнообразный (Amp, Bt, Cpx, Grt), а объемные соотношения темноцветов приблизительно равны. Котерский комплекс отличается значительно более широким развитием гранитогнейсов. Гранитогнейсы котерского комплекса отличаются от биотитовых гнейсов святоносского комплекса часто выраженной катакластической структурой (большей степенью деформации), отсутствием в их составе темноцветных минералов, более высоким содержанием кварца. Протолитом основных гнейсов котерского комплекса являются известково-щелочные базальты. Протолитом гранитогнейсов могли быть трахириолиты или аркозовые песчаники. Петрохимически и геохимически основные гнейсы котерского комплекса близки к гнейсам и плагиогнейсам северной части п-ова Святой Нос.

### Выводы

Метаморфические породы святоносского и котерского комплексов (450 млн лет) являются фрагментом раннепалеозойской аккреционно-коллизонной системы Байкальского региона. Уровень метаморфизма отвечает верхней части амфиболитовой фации ( $P = 6,2-7,2$  кбар,  $T = 705-745$  °C). Составы протолитов отвечают метавулканической либо метавулканогенно-осадочной серии островодужного генезиса (495-460 млн лет), в которой преобладают вулканы из известково-щелочной и субщелочной серий, реже встречаются толеитовые вулканы. Sm-Nd модельные возрасты для гнейсов (1626-1544 млн лет) и амфиболитов (867 млн лет) свидетельствуют о том, что среди протолитов метаморфических толщ святоносского комплекса отсутствуют архейские геологические комплексы, а нижняя возрастная граница протолита отвечает началу рифея. Ar-Ar изотопные даты по амфиболам (256-245 млн лет,  $P_3-T_2$ ) и биотитам (183-169 млн лет,  $J_{1,2}$ ) отражают мезозойскую историю развития святоносского метаморфического комплекса и коррелируют с этапами тектонического растяжения континентальной литосферы в Забайкалье.

Работа подготовлена в рамках государственного задания Института геологии и минералогии СО РАН, проекты №№ 0330-2016-0003; 0330-2016-0013 (экспедиционные работы, проведение аналитических исследований), а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 5.1688.2017/ПЧ (обработка материалов и подготовка публикаций).

### Литература

- Беличенко В.Г., Гелетий Н.К., Бараш И.Г. Баргузинский микроконтинент (Байкальская горная область): к проблеме выделения // Геология и геофизика. – 2006. – т. 47. – № 10. – с. 1049-1059.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев С.А. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. – 2010. – т. 51. – № 5. – с. 571—588.
- Давыдов В.И. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200 000, серия Прибайкальская, лист N-49-XIX. М., 1983.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Ванг Т., Гуо Л., Родионов Н.В., Демонтерова Е.И. Мезозойские гранитоиды в структуре Безымянного комплекса метаморфического ядра // Геология и геофизика. – 2016. – т. 57. – № 11. – с. 2015-2033.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Лепехина Е.Н., Ванг Т., Зенг Л., Гуо Л. О непрерывности магматизма позднего палеозоя – раннего мезозоя в Западном Забайкалье // Доклады Академии наук. – 2014. – т. 458. – № 3. – с. 306-312.
- Зайцев П.Ф. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200 000, серия Прибайкальская, лист N-49-XIV. М., 1979.
- Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. Механизм развития системы островная дуга – задуговой бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее – раннем палеозое // Геология и геофизика. – 2009. – т. 50. – № 3. – с. 209-226.
- Лебедева Ю.М., Рыцк Е.Ю., Великославинский С.Д., Богомолов Е.С., Толмачева Е.В., Андреев А.А. Святоносский метаморфический комплекс острова Кылтгыгей (озеро Байкал): P-T параметры метаморфизма и коровые источники // Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое. Материалы V Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург, ИГГД РАН. – СПб: Springer, 2017. — с. 98-99.
- Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Падерин И.П. Геодинамика Западно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса в позднем палеозое // Геология и геофизика. – 2010. – т. 51. – № 5. – с. 615-628.
- Макрыгина В.А., Беличенко В.Г., Резницкий Л.З. Типы палеоостровных дуг и задуговых бассейнов северо-восточной части Палеоазиатского океана (по геохимическим данным) // Геология и геофизика. – 2007. – т. 48. – № 1. – с. 141-155.
- Михеев Е.И., Владимирова А.Г., Волкова Н.И., Баянова Т.Б., Травин А.В., Юдин Д.С., Мехоношин А.С., Орсов Д.А. Термохронология гранулитов п-ова Святой Нос (Забайкалье) // Доклады РАН. – 2014. – т. 455. – № 3. – с. 317-322.
- Предовский А.А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л.: Наука. – 1980. – 152 с.
- Рыцк Е.Ю., Богомолов Е.С., Великославинский С.Д., Андреев А.А., Лебедева Ю.М., Толмачева Е.В. Изотопная структура области сочленения Сибирского кратона и Баргузино-Витимского супертеррейна (восточный берег Байкала) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 15. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. – с. 229-230.
- Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Том I. Стратиграфия. М.: Недра. – 1964. – 515 с.
- Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997 г., 182 с.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок: Уч. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 320 с.
- Цыренов Д.Ц. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200 000, серия Прибайкальская, лист N-49-XX. М., 1965.
- Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Козловский А.М. Позднепалеозойский-раннемезозойский внутриплитный магматизм Северной Евразии: траппы, рифты, батолиты-гиганты и геодинамика их формирования // Петро-

- логия. – 2013. – т. 21. – № 2. – с. 115-142.
19. Donskaya T.V., Mazukabzov A.M. The geochemistry and ages of rocks in the footwall of the ButuliynNurand Zagan metamorphic core complexes (North Mongolia – Western Transbaikalia). // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – 5 (3). – pp. 683–701.
  20. Donskaya T.V., Windley B.F., Mazukabzov A.M., Kröner A., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Ponomarchuk V.A., Badarch G., Reichow M.K., Hegner E. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia // *Journal of the Geological Society, London*. – 2008. – v. 165. – pp. 405-421.
  21. Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S. Metamorphic core complexes of the Transbaikalia: review // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2011. – V. 2. – № 2. – P. 95-125.
  22. Werner C.D. Saxonian granulites — a contribution to the geochemical diagnosis of original rocks in high metamorphic complexes // *Gerlands Beiträge zur Geophysik*. – 1987. – v. 96. № 3–4. – p. 271—290.
  23. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // *Chemical Geology*. – 1977. – v. 20. – p. 325-343.