

Оригинальная статья / Original article
УДК: 550.422

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА МЕЛОВЫХ БАЗАЛЬТОВ ЗАПАДНО-ЗАБАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ОБЛАСТИ И ЭВОЛЮЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ВНУТРИПЛИТНОГО МАГМАТИЗМА НА ПРИМЕРЕ УДИНСКОГО СЕКТОРА

© Т.Ю. Комарицына¹

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

РЕЗЮМЕ. Цель данной статьи – исследование геохимической и изотопной характеристик вулканических ассоциаций Западно-Забайкальской рифтовой области и их источников и определение механизмов формирования магматических расплавов на примере Удинского сектора. **Методы.** Определение составов вулканических пород Удинского сектора выполнялось рентгено-флуоресцентным методом, методом ISP-MS. **Результаты.** На протяжении всего мезозоя территория Западного Забайкалья была ареной внутриплитного магматизма, здесь происходили излияния вулканитов различного состава: от ультраосновных до кислых. Установлено, что меловые вулканиты представлены основными и средними породами. Их формирование происходило в четыре этапа: начала раннего мела (143–135 млн лет), конца раннего мела (131–111 млн лет), начала позднего мела (83–78 млн лет), конца позднего мела (72–71 млн лет). Каждый этап имеет свои индивидуальные характеристики. В процессе эволюции происходят изменения в составах и объемах продуктов магматизма. Ассоциации пород этапов раннего мела характеризуются наличием щелочных базальтов, трахибазальтов и базальтовых трахиандезитов, спектры распределения редких элементов близки к OIB за исключением Nb-Ta минимума, точки изотопных составов локализируются в области смешения расплавов обогащенной мантии EM II и PREMA. Вулканиты позднего мела представлены небольшими полями трахибазальтов и щелочных пикробазальтов. Их редкоэлементный состав близок к OIB. Точки изотопных составов вулканитов стремятся к области PREMA. **Выводы.** Формирование вулканитов Удинского сектора можно объяснить двумя процессами: смешением мантии PREMA с характеристиками OIB и литосферной метасоматизированной мантии и контаминацией веществом коры магматических расплавов, отвечающих PREMA + OIB.

Ключевые слова: непрерывное базальтовое волокно, рифтогенез, внутриплитный магматизм, базальты, мезозой, Западное Забайкалье.

Формат цитирования: Комарицына Т.Ю. Особенности вещественного состава меловых базальтов Западно-Забайкальской рифтовой области и эволюция источников внутриплитного магматизма на примере Удинского сектора // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 61–74.

MATERIAL COMPOSITION FEATURES OF CRETACEOUS BASALTS IN THE WESTERN-TRANSBAIKAL RIFT REGION AND EVOLUTION OF INTRA-PLATE MAGMATISM SOURCES ON EXAMPLE OF THE UDA SECTOR

T.Yu. Komaritsyna

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1a, Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russian Federation.

ABSTRACT. The **Purpose** of this article is to study the geochemical and isotopic characteristics of volcanic associations of the West Transbaikalian rift region and their sources and to determine the formation mechanisms of magmatic melts on example of the Uda sector. **Methods.** The X-ray fluorescent and ISP-MS methods have been used to determine the composition of volcanic rocks of the Uda sector. **Results.** In the Mesozoic the territory of the

¹Комарицына Татьяна Юрьевна, инженер-исследователь, e-mail: altapovatanua@mail.ru
Tatiana Yu. Komaritsyna, Research Engineer, e-mail: altapovatanua@mail.ru

Western Transbaikal was the arena of intraplate magmatism involving the outflows of volcanites of various composition: from ultrabasic to acidic. It is determined that Cretaceous volcanic rocks are represented by basic and medium rocks. They were formed in four stages: the beginning of the Early Cretaceous (143-135 Ma), the end of the Early Cretaceous (131-111 Ma), the beginning of the Late Cretaceous (83-78 Ma), the end of the Late Cretaceous (72-71 Ma). Each stage has its individual characteristics. The composition and volume of magmatism products were changed in the course of evolution. The rock associations of the Early Cretaceous stages feature the presence of alkaline basalts, trachybasalts and basaltic trachyandesites. The distribution spectra of rare elements are close to OIB excluding the Nb-Ta minimum. The isotopic composition points are localized in the region of EM II enriched mantle and PREMA mantle mixing. The volcanites of the Late Cretaceous are represented by the small fields of trachybasalts and alkaline picobasalts. Their rare element composition is close to OIB. The points of the isotopic compositions of volcanites tend to the PREMA region. **Conclusions.** Formation of Uda sector volcanites can be explained by two processes: mixing of the PREMA mantle having OIB characteristics and the lithospheric metasomatized mantle, and contamination of magmatic melts corresponding to PREMA + OIB by the crust matter.
Keywords: continuous basalt fiber, rifting, intraplate magmatism, basalts, mesozoic, Western Transbaikalia

For citation: Komaritsyna T.Yu. Material composition features of Cretaceous basalts in the Western-Transbaikal rift region and evolution of intra-plate magmatism sources on example of the Uda sector. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017, vol. 40, no. 2, pp. 61–74. (In Russian).

Введение

и постановка задачи

В последние годы большой интерес прикован к поискам базальтового сырья для производства минерального волокна. Благодаря своим уникальным свойствам базальтовое волокно и продукция на его основе находят все более широкое применение во всех отраслях промышленности. Материалы на основе базальтового волокна выдерживают высокие температуры, устойчивы к кислотам и щелочам, обладают значительной механической прочностью, поэтому они успешно потеснили изделия из стекловолокна. К видам базальтовой продукции предъявляют различные требования, но для плавки непрерывного базальтового волокна необходимы породы определенного состава. С точки зрения качества наиболее подходящим является базальтовое сырье с характеристиками $\text{SiO}_2 \sim 47\text{--}54$ мас. %, $\text{TiO}_2 \sim 1,2$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 11\text{--}18$ мас. %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \sim 8\text{--}15$ мас. %, $\text{MnO} \sim 0,12\text{--}0,27$ мас. %, $\text{MgO} \sim 3,1\text{--}8,9$ мас. %, $\text{CaO} \sim 8\text{--}9$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} \sim 2,6\text{--}2,8$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} \sim 0,2\text{--}1,6$ мас. %, $\text{P}_2\text{O}_5 \sim 0,11\text{--}0,39$ мас. % [1], а также модулем кислотности $M_k \sim 4,7\text{--}6,5$ [2]. Модуль кислотности рассчитывается по формуле $M_k = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$, где SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO – содержание соответствующих

оксидов в сырье, мас. % [2]. В статье уделено внимание вещественным характеристикам магматических пород Удинского сектора Западно-Забайкальской рифтовой области. Вулканиты сектора характеризуются следующими содержаниями главных петрогенных компонентов: $\text{SiO}_2 \sim 47\text{--}54$ мас. %, $\text{TiO}_2 \sim 2\text{--}3$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 14\text{--}17$ мас. %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \sim 10\text{--}12$ мас. %, $\text{MnO} \sim 0,08\text{--}0,23$ мас. %, $\text{MgO} \sim 1,3\text{--}4,7$ мас. %, $\text{CaO} \sim 5,8\text{--}8,4$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} \sim 3,6\text{--}5,4$ мас. %, $\text{K}_2\text{O} \sim 1,8\text{--}3,2$ мас. %, $\text{P}_2\text{O}_5 \sim 0,7\text{--}2,0$ мас. %, модуль кислотности $M_k \sim 5,1\text{--}7,7$. Эти параметры близки к технологическим требованиям, предъявляемым к базальтовому сырью, что определяет перспективность базальтов для производства минерального волокна. Также большое значение имеют достаточно большие объемы вулканитов, которые только на территории Удинского сектора составляют около 400 км^3 [3]. Кроме того, в этом секторе наибольшая часть вулканитов залегает вблизи межрегиональной автодороги Р436 Улан-Удэ – Романовка – Чита. В связи с этим одной из главных задач является геохимическая и изотопная характеристика вулканических ассоциаций с участием пород основного состава, их источников и определение механизмов формирования магматических расплавов.

Методы исследования

Содержания петрогенных элементов были определены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН рентгено-флуоресцентным методом на многоканальном спектрометре СРМ-25 по методике, изложенной в работе [4].

Содержания элементов в минералах определены в Институте геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализатора JXA8200 (JEOL Ltd, Япония), укомплектованного пятью волновыми спектрометрами с кристаллами-анализаторами LDE1, LDE2, TAP, LDEBH, TAPH, PETJ, PETH, LiF и LiFH, а электродвижущая сила – энергетическим спектрометром EX-84055MU (JEOL Ltd, Япония).

Содержания редких элементов определены методом ISP-MS в ЦКП «Байкальский центр нанотехнологий» в технопарке при Иркутском национальном исследовательском техническом университете, пробоподготовка – сплавление с метаборатом лития.

Изотопные измерения стронция и неодима выполнены в ЦКП ИНЦ СО РАН Байкальского аналитического центра на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 с использованием активатора $Ta_2O_5 \cdot nH_2O$ в смеси кислот $NF:HNO_3:H_3PO_4$ (1:1:1).

Краткая геологическая характеристика

Западно-Забайкальская рифтовая область (ЗЗРО) протягивается от западного фланга хр. Малый Хамар-Дабан на северо-восток до Витимского плоскогорья, достигая в длину около 1000 км при ширине 200–300 км. Она выражена в рельефе системой впадин и грабен, формирование которых относится к поздней юре – раннему мелу [5]. Особенностью развития области является последовательная смена составов продуктов магматизма во времени, что позволяет выделить несколько этапов. Впадины ЗЗРО

объединяются в четыре сектора: Джидинский, Тугнуйско-Хилокский, Илькино-Кижингинский, Удинский и Витимский, отличающиеся друг от друга длительностью формирования вулканитов. Удинский сектор относится к северо-восточной части области и остается слабо изученным в отношении вещественных характеристик магматизма в его пределах.

Удинский сектор занимает северо-восточную часть области, охватывает бассейны р. Уда, Заза, Витим и включает три впадины северо-восточного простирания: Удинскую, Еравнинскую и Зазинскую [3]. Они были заложены в раннем мелу на среднепалеозойском фундаменте, представленном интрузивными породами витимканского сиенит-гранодорит-гранитового, бичурского габбро-монзонит-гранитового и куналейского сиенит-гранитового комплексов [6, 7] и выполнены продуктами вулканических излияний поздней юры – мела (рис. 1).

Удинская впадина протягивается вдоль долины р. Уды от г. Улан-Удэ до оз. Большое Еравное на расстояние более 250 км при ширине 20–30 км. Ее осевая часть заполнена современными четвертичными осадками, перекрывающими вулканиты, которые, согласно работам [8, 9], относятся к хилокской свите.

Еравнинская впадина является продолжением Удинской впадины, она простирается в северо-восточном направлении от оз. Большое Еравное до р. Витим на расстояние около 120 км при ширине от 10 до 30 км. Во впадине залегают вулканогенные образования раннетриасовой цаган-хунтейской свиты, вулканогенно-осадочные породы удинской свиты средней-поздней юры (бортовые части структуры), а котловины озер выполнены палеогеновыми и четвертичными осадками, перекрывающими меловые вулканиты.

Зазинская впадина протягивается в северо-восточном направлении от оз. Нохони до р. Витим на 100 км при ширине

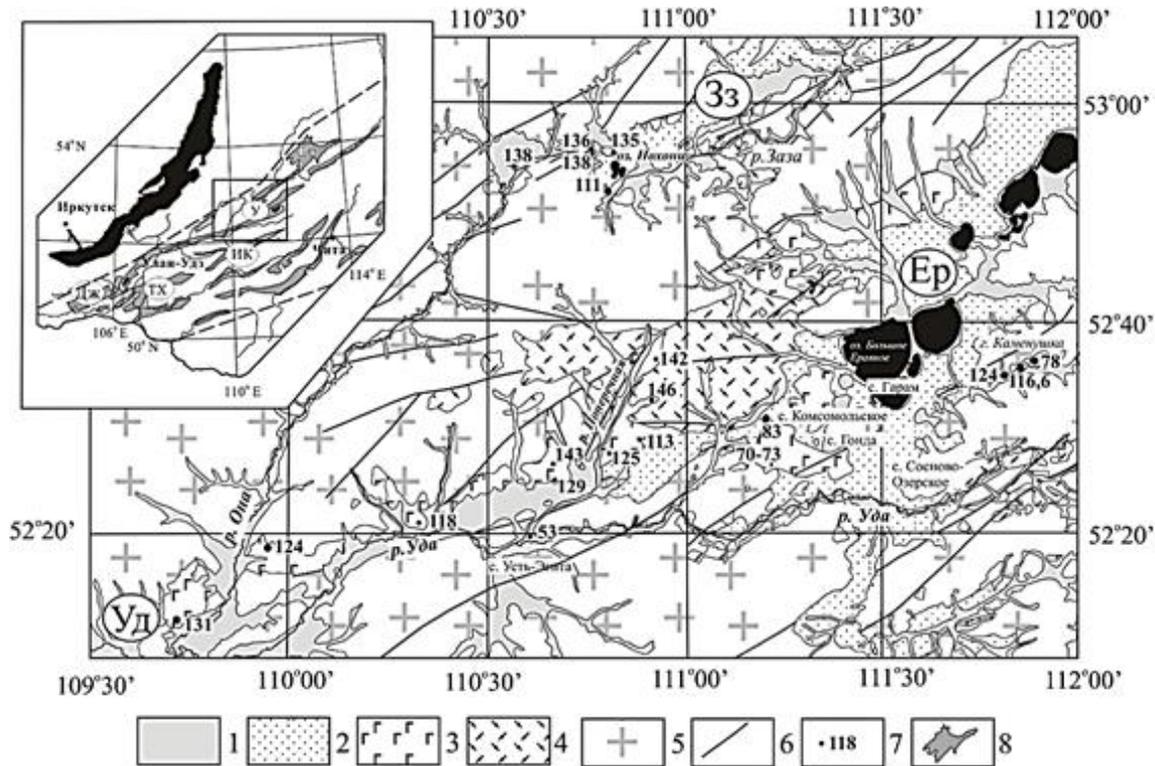


Рис. 1. Схема геологического строения Удино-Еравнинского сектора:
 1 – четвертичные отложения; 2 – палеогеновые отложения; 3 – мел-эоценовые вулканические образования; 4 – вулканические образования удинской свиты;
 5 – палеозойский гранитоидный фундамент; 6 – разломы; 7 – места отробования и возраст, млн лет; 8 – мезозойские впадины и грабены (на врезке).
 Впадины (буквы в кружках): Уд – Удинская; Ер – Еравнинская; Зз – Зазинская.
 При систематизации геохронологических сведений использованы данные А.А. Воронцова А.А., В.Г. Иванова, В.В. Ярмолюка [3, 5]

Fig. 1. Diagram of the Uda-Eravna sector geological structure:
 1 – Quaternary deposits; 2 – Paleogene deposits; 3 – Cretaceous-Eocene volcanic formations;
 4 – volcanic formations of the Uda suite; 5 – Paleozoic granitoid basement; 6 – faults;
 7 – sampling sites and age, millions of years; 8 – Mesozoic depressions and grabens (inset map). Depressions (letters in circles): Уд – Uda; Ер – Eravna; Зз – Zaza.
 The systematization of the geochronology data was performed on the basis of A.A. Vorontsov's, V.G. Ivanov's and V.V. Yarmolyuk's data [3; 5].

8–12 км. Здесь вулканы проявлены в пределах оз. Нохони и перекрываются четвертичными осадками, а также палеогеновыми отложениями.

Этапы формирования вулканических образований

Первый этап (начала раннего мела, 143–135 млн лет) стал самым значительным по объему излившихся лав (около 400 км³). Вулканы представлены трахибазальт-трахиандезитбазальтовой ассоциацией. Они выделяются в виде лавового плато, фрагменты которого просле-

живаются во всех изученных впадинах [3].

Ко второму этапу (конец раннего мела, 131–111 млн лет) магматическая активность снижается, объемы магматических продуктов достигают первых кубических километров. В это время формируются незначительные по размерам лавовые поля, представленные трахибазальтами, трахиандезитбазальтами и ассоциирующими с ними щелочными базальтами. Составы вулканических пород всех этапов отображены на диаграмме (рис. 2).

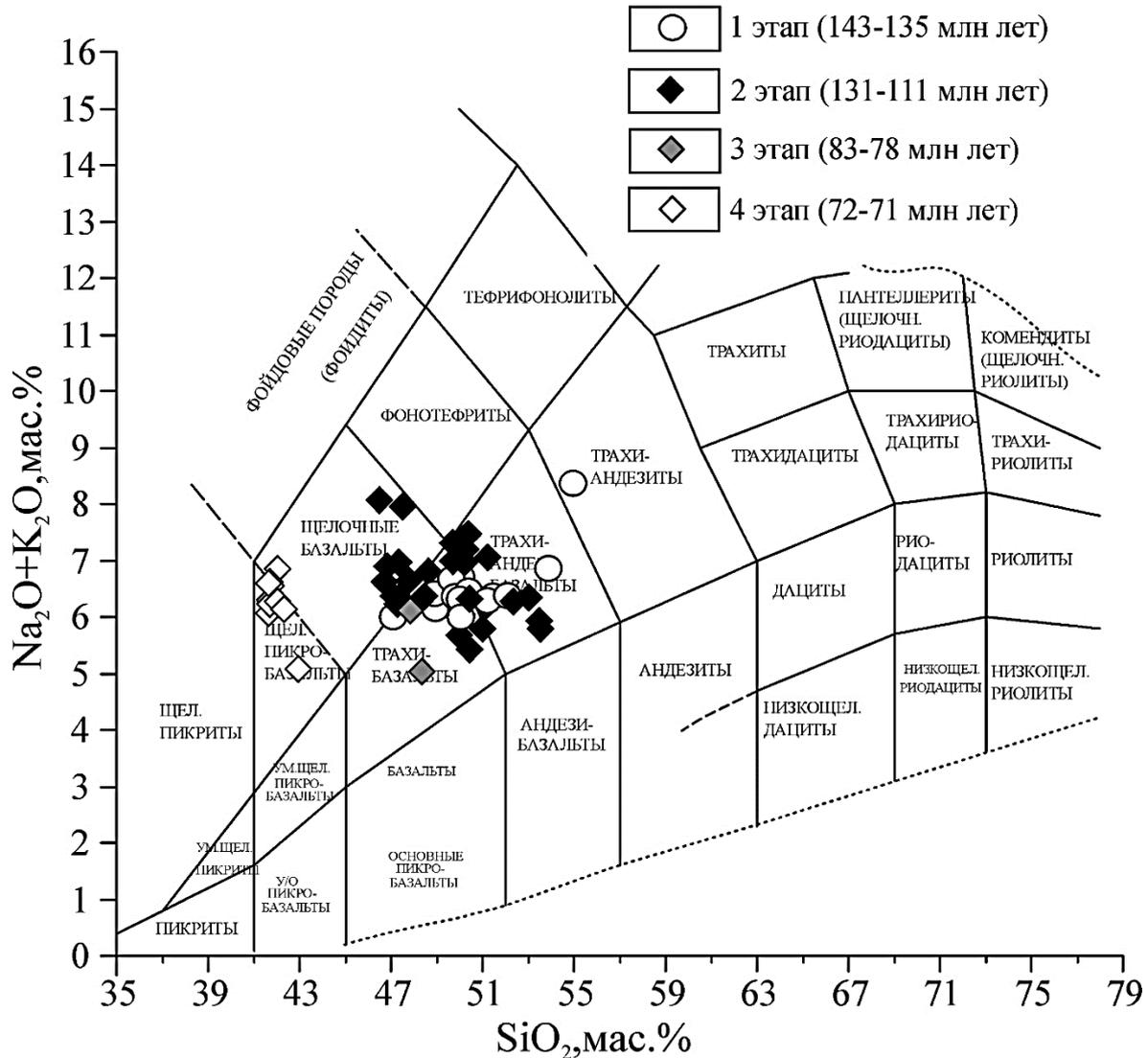


Рис. 2. Составы меловых вулканитов Удинского сектора на классификационной диаграмме $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$, мас. % (по источнику [10])
 Fig. 2. Compositions of Cretaceous volcanites of the Uda sector on the classification diagram $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$, wt % (according to [10])

Несмотря на разницу в возрастных интервалах, вулканиты первого и второго этапов имеют схожие вещественные характеристики: SiO_2 варьирует в пределах от 47 до 55 мас. % при $Na_2O + K_2O$ от 6 до 8,5 мас. % (для этапа начала раннего мела) и SiO_2 – от 47 до 53 мас. % при $Na_2O + K_2O$ от 5,5 до 8 мас. % (для пород конца раннего мела). Они представлены натриево-калиевыми сериями, величина отношения Na_2O / K_2O изменяется от 1,3 до 2,2, содержания оксида титана – от 2,1 до 3,1 мас. %.

Магматизм третьего этапа (начало раннего мела, 83–78 млн лет) возобновился после перерыва в 28 млн лет. Происходило образование небольших по площади (до 1 км²) вулканических полей, сложенных трахибазальтами ($SiO_2 \sim 48$ мас. %; $Na_2O + K_2O \sim 5-6,1$ мас. %). Аналогично породам предыдущих этапов вулканиты относятся к натриево-калиевой серии ($Na_2O / K_2O \sim 2,0-2,5$), содержания TiO_2 в породах варьируют в пределах от 2,1–2,5 мас. %.

Завершающим стал этап конца позднего мела (72–71 млн лет). Породы представлены щелочными пикробазальтами ($\text{SiO}_2 \sim 42$ мас. %; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \sim 5,1\text{--}6,9$ мас. %), они формируют вулканическое поле в окрестностях с. Комсомольского. Вулканиты отличаются от предыдущих этапов. Наряду с натриево-калиевой появляется натриевая серия ($\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$ варьирует от 1,8 до 5,1).

Минералого-петрографическая характеристика пород

Среди меловых вулканитов сектора различаются щелочные пикробазальты, щелочные базальты, трахибазальты и трахиандезибазальты [10].

Породы среднего состава представлены трахиандезибазальтами, они содержат крупные зерна зонального андезина. Структура основной массы интерсерральная, часто стекловатая, в ней

отмечаются зерна плагиоклаза, бурой роговой обманки, биотита и клинопироксена, а также мелкие зерна титаномагнетита. Составы минералов приведены в таблице. Плагиоклазы представлены андезином и отвечают $\text{Ab}_{47-53}\text{An}_{43-49}\text{Or}_{3-5}$. Пироксены представлены диоксид-авгитом ($\text{En}_{37-41}\text{Wo}_{38-42}\text{Fs}_{17-26}$) (рис. 3).

Вулканиты основного состава представлены трахибазальтами и щелочными базальтами. Основная масса трахибазальтов может быть как стекловатая, так и микрозернистая, состоящая из агрегатов плагиоклаза и пироксена. Содержит вкрапленники зонального андезина, оливина с типичной для него петельчатой структурой. Плагиоклазы представлены андезином ($\text{Ab}_{48-56}\text{An}_{38-49}\text{Or}_{3-5}$). По составу оливины отвечают $\text{Fa}_{37-46}\text{Fo}_{36-52}$. Также в породах присутствуют титаномагнетит, ильменит и фторопатит.

Составы минералов для пород этапов конца позднего мела и конца раннего мела Удинского сектора, мас. %
Compositions of minerals for the rocks of the end of Late Cretaceous and the end of Early Cretaceous stages of the Uda sector, wt %

Состав / Composition	Минерал / Mineral								
	Оливин / Olivine		Плагиоклаз / Plagioclase			Пироксен / Pyroxene		Нефелин / Nepheline	
	Порода / Rock								
	ТБ	ЩБ	ТБ	ЩБ	ТАБ	ЩПБ	ЩБ	ТАБ	ЩПБ
SiO_2	36,87	39,30	55,58	56,17	55,92	47,77	45,98	50,82	47,95
TiO_2	0,16	н.о.	0,15	0,17	0,17	2,49	3,067	1,51	н.о.
Al_2O_3	н.о.	н.о.	26,55	26,18	26,23	6,39	5,978	2,38	32,49
FeO^*	35,80	16,23	0,99	1,08	0,81	7,04	8,671	11,96	0,884
MnO	0,63	0,35	н.о.	н.о.	н.о.	0,12	0,191	0,31	н.о.
MgO	27,09	44,29	0,13	н.о.	0,44	13,07	14,06	13,85	0,12
CaO	0,28	0,29	9,54	9,06	9,63	22,79	20,65	19,79	0,77
Na_2O	н.о.	н.о.	6,28	6,27	5,12	0,50	0,778	0,47	12,98
K_2O	н.о.	н.о.	0,69	0,82	0,70	н.о.	н.о.	н.о.	4,69
V_2O_3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,28	н.о.	0,198	н.о.
Сумма	100,82	100,46	100,04	99,75	99,07	100,56	99,39	101,22	100,06

Примечание. ЩПБ – щелочной пикробазальт; ТБ – трахибазальт; ЩБ – щелочной базальт; ТАБ – трахиандезибазальт. Н.о. – не обнаружено.

Note. ЩПБ – alkaline pyrobasalt; ТБ – trachybasalt; ЩБ – alkaline basalt; ТАБ – trachyandesite basalt; Н.о. – not found.

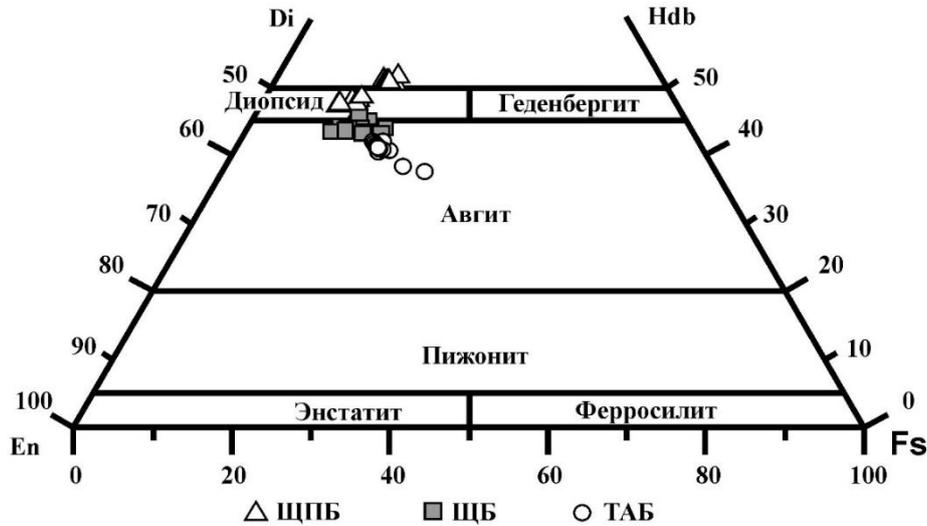


Рис. 3. Классификационная диаграмма для минералов пород Удинского сектора в системе энстатит – диопсид – геденбергит – ферросиллит:
 En – энстатит; Di – диопсид; Hdb – геденбергит; Fs – ферросиллит;
 ЩПБ – щелочной пикробазальт; ЩБ – щелочной базальт;
 ТАБ – трахиандезитобазальт

Fig. 3. Classification diagram for the minerals of the Uda sector rocks in the enstatite-diopside-hedenbergite-ferrosillite system:
 En – enstatite; Di – diopside; Hdb – hedenbergite; Fs – ferrosillite;
 ЩПБ – alkaline picrobasalt; ЩБ – alkaline basalt;
 ТАБ – trachyandesitebasalt

Для щелочных базальтов характерны афировые мелкозернистые и стекловатые структуры. Их минеральный состав определяют плагиоклаз, магнезиальный биотит, флогопит, щелочной полевой шпат, пироксен, оливин, титаномагнетит, кальцит и фторапатит. Плагиоклазы представлены андезитом $Ab_{52-59}An_{34-43}Or_{4-7}$, пироксены – диопсид-авгитом ($En_{38-46}Wo_{43-46}Fs_{11-17}$). Оливин в сравнении с трахибазальтами более магнезиальный и по составу отвечает формуле $Fe_{17}Fo_{83}$.

Для щелочных пикробазальтов характерна порфировая структура. Основная масса более чем на половину состоит из стекла, микролиты представлены пироксеном, оливином, также в составе пород присутствует кальцит, фторапатит и титаномагнетит. Главной особенностью щелочных пикробазальтов является наличие нефелина, состав которого отображен в таблице. Пироксен

представлен диопсидом и отвечает формуле ($En_{33-43}Wo_{48-52}Fs_{10-15}$).

Геохимическая характеристика вулканитов

Редкоэлементный состав пород сектора отображен на графике (рис. 4). Видно, что содержание редких элементов пород всех этапов близки OIB [11]. Так для этапов раннего мела характерно обогащение лёгкими редкоземельными элементами (LREE) относительно тяжелых (HREE), выражающееся величиной $(La/Yb)_N$, варьирующей в пределах от 14 до 51. Особенности базальтов этапа являются повышенные содержания крупноионных литофильных элементов (Ba, K, Pb, Sr) и пониженные содержания высокозарядных элементов (Nb, Ta, Ti) в сравнении с OIB. По конфигурации спектры имеют сходство с средним составом верхней континентальной коры и при этом характеризуются более высокими содержаниями HFSE.



Рис. 4. Спайдер-диаграмма составов базальтов, нормированных на примитивную мантию
 Примитивная мантия и OIB приведены по источнику [11].

Состав верхней континентальной коры приведен по источнику [12, 13]
 Fig. 4. Spidergram of basalt composition normalized for a primitive mantle
 Primitive mantle and OIB are given according to [11].

Composition of the upper continental crust is given according to [12, 13]

Породы этапа начала позднего мела обладают не только близкими содержаниями редких элементов относительно OIB, но и соответствующим им распределением. Наблюдается обогащение легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых, выражающееся величиной $(La/Yb)_N \sim 10-15$. На этапе конца позднего мела картина существенно меняется, вулканы отличаются повышенными содержаниями крупноионных литофильных элементов (Ba, Pb, Sr) и высокозарядных элементов (Nb, Ta, Ti) в сравнении с породами OIB-типа. При этом породы характеризуются пониженными содержаниями Rb и K. Величина $(La/Yb)_N$ варьирует в пределах от 29 до 56.

Изотопный состав базальтов

Вулканы этапов раннего мела характеризуются высокими отношениями $^{87}Sr / ^{86}Sr = ^{87}Sr / ^{86}Sr = 0,705436-0,705688$ и низкими $\epsilon Nd(t) = -1,7...+0,3$. Как видно из графика (рис. 5), они локализируются в области смешения расплавов, формирующихся из обогащенной мантии типа EM II и PREMA. Базальтоиды этапов

позднего мела обладают более радиогенным составом стронция $^{87}Sr / ^{86}Sr \sim 0,70434$ при значениях $\epsilon Nd(t) \sim 2,5$ (этап 83–78 млн лет) и $^{87}Sr / ^{86}Sr \sim 0,70393$ при $\epsilon Nd(t) \sim 3,6$ (этап 72–71 млн лет). Точки составов смещаются в сторону источника типа PREMA.

Также важно отметить, что составы пород этапов раннего мела расположены на линии смешения между базальтом ЮБВО, имеющим наименее радиогенный изотопный состав Sr и обогащенный Nd и валовым составом верхней коры. Это предполагает процесс контаминации веществом верхней континентальной коры с долей корового контаминанта в пределах от 15 до 20% [18].

Обсуждение результатов

Результаты исследований позволяют дать оценку эволюции вулканизма сектора. В процессе эволюции происходят резкие изменения в составах и объемах продуктов магматизма. Наибольшие объемы излияний происходили на этапах раннего мела (143–111 млн лет), с этапа начала конца раннего мела произошло существенно уменьшение объемов

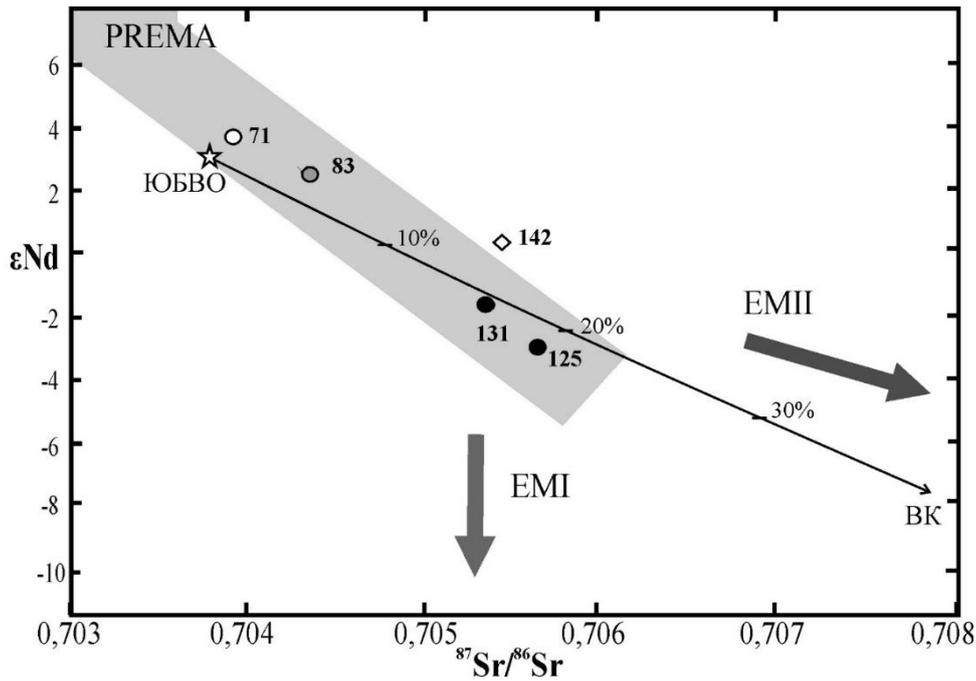


Рис. 5. Изотопный состав базальтоидов Удинского сектора на диаграмме $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \epsilon\text{Nd}$
PREMA – превалирующая мантия по источнику [14].

Темная область – поле мантийной корреляции по источнику [15].

Линия смешения между модельным составом базальта (ЮБВО) из выборки [16] и валовым составом верхней коры (BK) – по источнику [17]

Fig. 5. Isotopic composition of the Uda sector basaltoids on the diagram $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \epsilon\text{Nd}$

PREMA – prevailing mantle according to [14].

Dark area – the field of mantle correlation according to [15].

The line of mixing between the model composition of basalt (ЮБВО).

from the sampling [16] and bulk composition of the upper crust (BK) according to [17]

магматических продуктов. Наряду с этим произошли изменения и в составах вулканитов. Первые этапы (143–135 млн лет, 131–111 млн лет) характеризуются наличием базальтовых трахиандезитов, трахибазальтов и щелочных базальтов. Для этапа 83–78 млн лет характерны небольшие проявления трахибазальтов, а на завершающем этапе – 72–71 млн лет – щелочных пикробазальтов. Вулканиты всех этапов сектора отвечают натриево-калиевой серии за исключением щелочных пикробазальтов этапа конца позднего мела, для которых характерно преобладание натриевой серии. Это изменение коррелирует с появлением в породах вкрапленников нефелина. Также нельзя не отметить схожесть редкоземельного состава пород с OIB, что позволяет выдвинуть предположение о связи пород с

горячими точками мантии [5, 19]. При этом ярко выраженный Nb-Ta минимум на этапах раннего мела предполагает присутствие водного флюида в магматическом расплаве. Изотопные характеристики пород ранних этапов отличаются близостью к расплавам, формирующимся из обогащенной мантии EM-II, и в тоже время располагаются вдоль линии смешения между модельным составом базальта и валовым составом верхней коры. Породы поздних этапов смещаются к составам расплавов мантии типа PREMA. Это дает возможность рассмотреть два процесса формирования вулканитов:

1) смешение расплавов мантии типа PREMA с характеристиками, присутствующими OIB, и литосферной метасоматизированной мантии, сформированной под

воздействием субдукционных процессов предшествующих этапов развития территории [3];

2) подъем магматических расплавов, отвечающих мантии типа PREMA с характеристиками OIB, и формирование промежуточных очагов, в которых происходила контаминация магм коровым веществом.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать выводы о том, что в процессе эволюции магматизма Удинского сектора происходят изменения в составах и объемах вулканических пород. Наибольшие объемы излияний типичны для этапов раннего мела (143–111 млн лет), с этапа начала конца раннего мела объемы магматических продуктов сократились. Наряду с этим произошли изменения и в составах вулканитов. Первые этапы характеризуются наличием базальтовых трахиандезитов, трахибазальтов и щелочных базальтов. Для этапа 83–78 млн лет характерны небольшие проявления трахибазальтов, а на завершающем этапе – 72–71 млн лет – щелочных пикробазальтов. Содержание SiO₂ в породах этапов раннего мела достигает 55 мас. %, в то время как этапы конца позднего мела характеризуются появлением ультраосновных разновидностей и SiO₂ в них варьирует в пределах 41 – 42 мас. %. Вулканиты всех этапов сектора отвечают

калиево-натриевой серии за исключением щелочных пикробазальтов этапа конца позднего мела, для которых характерно преобладание натриевой серии. Все базальтоиды сектора характеризуются повышенными содержаниями некогерентных элементов в сравнении с OIB. На ранних этапах (143–111 млн лет) проявлен ярко выраженный Nb-Ta минимум и повышенные концентрации таких элементов, как Rb, Ba, Sr, K. На поздних этапах исчезает ниобий-танталовый минимум, сглаживаются спектры распределения элементов для пород этапа 83–78 млн лет и их составы соответствуют OIB. Этап 72–71 млн лет характеризуется повышенными в сравнении с базальтами океанических островов содержаниями высокочargedных и крупноионных литофильных элементов и отрицательными аномалиями по Ba, K. Изотопные характеристики пород ранних этапов близки к составам расплавов, которые формируются из обогащенной мантии EM-II, в то время как составы пород поздних этапов смещаются в сторону составов источника типа PREMA. Распределение точек изотопных характеристик вулканитов отвечает мантийной последовательности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-05-00181) и Научной школы «Химическая геодинамика» НШ 9638.2016.5.

Библиографический список

1. Казымов К.П., Манькова Т.В., Бражкина Т.В., Меньшикова Е.А., Исаева Г.А. Исследования сырья ООО «Вулкан» для производства непрерывного базальтового волокна // Базальтовые технологии. 2012. С. 18–20.
2. Кибол В.Ф., Кибол Р.В., Кибол И.В., Способ производства высокосили-

References

1. Kazymov K.P., Man'kova T.V., Brazhkina T.V., Men'shikova E.A., Isaeva G.A. *Issledovaniya syr'ya* ООО «Vulkan» dlya proizvodstva nepreryvnogo bazal'tovogo volokna [Studies of raw materials of LLC «Vulkan» for the production of continuous basalt fiber]. *Bazal'tovyye tekhnologii* [Basalt Technologies], 2012, pp. 18–20. (In Russian).
2. Kibol V.F., Kibol R.V., Kibol I.V., *Sposob proizvodstva vysokosilikatnykh*

катных волокон из горных пород, установка для его существования «Модуль кибол-S», высокосиликатное непрерывное волокно, высокосиликатное рубленое волокно, высокосиликатное грубое волокно и высокосиликатное шпательное волокно, полученные названным способом: пат. РФ № 2102342. МПК 6, C03B 37/00. Опубл. 20.01.1998.

3. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Комарицына Т.Ю. Позднемезозойский-кайнозойский рифтогенный магматизм Удинского сектора (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 5. С. 920–946.

4. Афонин В.П., Гуничева Т.Н., Пискунова Л.Ф. Рентгенофлуоресцентный анализ. Новосибирск: Наука, 1984. 328 с.

5. Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое – кайнозое (на основе геохимических и изотопно-геохимических данных) // Петрология. 1998. Т. 6. № 2. С. 115–138.

6. Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Масштаб 1:1000000. Лист N-49 – Чита. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011.

volokon iz gornykh porod, ustanovka dlya ego sushchestvovaniya «Modul' kibol-S», vysokosilikatnoe nepreryvnoe volokno, vysokosilikatnoe rublennoe volokno, vysokosilikatnoe gruboe volokno i vysokosilikatnoe shpatel'noe volokno, poluchennyye nazvannym sposobom [Method of production vysokovoltnykh of fibre from rocks, installation for its existence, "Module kibol-S", vysokovoltnoe continuous fiber, Vysokovo-canoe chopped fiber, vysokovoltnoe coarse fiber and vysokovoltnoe Spacial fiber produced called way]: patent RF no. 2102342, 1998. (In Russian).

3. Vorontsov A.A., Yarmolyuk V.V., Komaritsyna T.Yu. *Pozdnemezozoiiskii-kainozoiiskii riftogennyi magmatizm Udinkogo sektora (Zapadnoe Zabaikal'e)* [Late Mesozoic-Early Cenozoic rifting magmatism in the Uda sector of Western Transbaikalia]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2016, vol. 57, no. 5, pp. 920–946. (In Russian).

4. Afonin V.P., Gunicheva T.N., Piskunova L.F. *Rentgenofluorestsentnyi analiz* [X-ray fluorescence analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 328 p.

5. Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I. *Istochniki vnutriplitnogo magmatizma Zapadnogo Zabaikal'ya v pozdnem mezozoe – kainozoe (na osnove geokhimicheskikh i izotopno-geokhimicheskikh dannyykh)* [Sources of intraplate magmatism in the Western Transbaikal region in the Late Mesozoic – Cenozoic (based on geochemical and isotope-geochemical data)]. *Petrologiya* [Petrology], 1998, vol. 6, no. 2, pp. 115–138. (In Russian).

6. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii (tret'e pokolenie). Seriya Aldano-Zabaikal'skaya. Masshtab 1:1000000. List N-49 – Chita* [State geological map of the Russian Federation (third generation). Aldan-Transbaikalian Series. Scale 1: 1,000,000. Sheet N-49 - Chita]. Saint Petersburg, Karto-graficheskaya fabrika Vserossiis-

7. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41.

8. Геологическая карта СССР. Серия Западно-Забайкальская. Масштаб 1:200000. Лист N-49-XXVIII. М.: Мингео СССР, 1970.

9. Геологическая карта СССР. Серия Западно-Забайкальская. Масштаб 1:200000. Лист N-49-XXXII, N-49-XXXIII, N-49-XXX IV. М.: Мингео СССР, 1971.

10. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, матасоматические, импактные образования. Изд. 3, испр. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.

11. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle

kogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta im. A.P. Karpinskogo Publ., 2011.

7. Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril' S.I., Kirillova G.L., Kuz'min M.I., Nokleberg U., Prokop'ev A.V., Timofe-ev V.F., Tomurtoogo O., Yan' Kh. *Model' formirovaniya orogennykh poyasov Tsentral'noi i Severo-Vostochnoi Azii* [Formation model of orogenic belts of Central and North-East Asia]. *Tikhookeanskaya geologiya* [Pacific Geology], 2003, vol. 22, no. 6, pp. 7–41. (In Russian).

8. *Geologicheskaya karta Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik. Seriya Zapadno-Zabaikal'skaya. Masshtab 1:200000. List N-49-XXVIII* [Geological map of the Union of the Soviet Socialist Republics. Series West Transbaikalia. Scale 1: 200,000. Sheet N-49-XXXIII]. Moscow, Mingeo Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik Publ., 1970.

9. *Geologicheskaya karta Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik. Seriya Zapadno-Zabaikal'skaya. Masshtab 1:200000. List N-49-XXXII, N-49-XXXIII, N-49-XXX IV* [Geological map of the Union of the Soviet Socialist Republics. Series West Transbaikalia. Scale 1: 200,000. Sheet N-49-XXXII, N-49-XXXIII, N-49-XXX IV]. Moscow, Mingeo Soyuzo Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik Publ., 1971.

10. *Petrograficheskii kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, matasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, matasomatic, impact formations]. Saint Petersburg, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii geologicheskii institut imeni A.P. Karpinskogo Publ., 2009. 200 p.

11. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle

composition and processes // *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. London: Spec. Publ. 1989. Vol. 42. P. 313–346.

12. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.

13. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treasure on Geochemistry* / ed. D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2003. Vol. 3: The Crust. P. 1–64.

14. Zindler A., Hart S. Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet Sci.* 1986. Vol. 14. P. 493–571.

15. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.

16. Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Покровский Б.Г. Магматизм и геодинамика Южно-Байкальской вулканической области (горячей точки мантии) по результатам геохронологических, геохимических и изотопных (Sr, Nd, O) исследований // *Петрология*. 2003. Т. 11. № 1. С. 3–34.

17. Азбель И.Я., Толстихин И.Н. Радиогенные изотопы и эволюция мантии Земли, коры и атмосферы. Апатиты: Изд-во Кол. фил. АН СССР, 1998. 140 с.

18. Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брандт И.С. Радиоизотопная геология в задачах и примерах. Новосибирск: ГЕО, 2005. 268 с.

19. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская-кайнозойская вулканическая провинция Центральной – Восточной Азии – проекция горячего поля мантии // *Геотектоника*. 1995. № 5. С. 41–67.

composition and processes. *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 1989. Vol. 42, pp. 313–346.

12. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, Blackwell, 1985. 312 p.

13. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* / ed. D. Holland, K.K. Turekian. Amsterdam, Elsevier, 2003. Vol. 3: The Crust, pp. 1–64.

14. Zindler A., Hart S. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 1986, vol. 14, pp. 493–571.

15. For G. *Osnovy izotopnoi geologii* [Fundamentals of isotope geology]. Moscow, Mir Publ., 1989. 590 p.

16. Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I., Pokrovskii B.G. *Magmatizm i geodinamika Yuzhno-Baikal'skoi vulkanicheskoi oblasti (goryachei tochki mantii) po rezul'tatam geokhronologicheskikh, geokhimicheskikh i izotopnykh (Sr, Nd, O) issledovaniy* [Magmatism and geodynamics of the South Baikal volcanic region (mantle hot points) by the results of geochronological, geochemical and isotope (Sr, Nd, O) studies]. *Petrologiya* [Petrology], 2003, vol. 11, no. 1, pp. 3–34. (In Russian).

17. Azbel' I.Ya., Tolstikhin I.N. *Radiogennyye izotopy i evolyutsiya mantii Zemli, kory i atmosfery* [Radiogenic isotopes and evolution of the Earth's mantle, crust and atmosphere]. Apatity, Kol. fil. Akademii nauk Soyuza Sovetskikh Sotsialisticheskikh respublik Publ., 1998. 140 p.

18. Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. *Radioizotopnaya geologiya v zadachakh i primerakh* [Radioisotope geology in problems and examples]. Novosibirsk, GEO Publ., 2005. 268 p.

19. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Ivanov V.G. *Vnutriplitnaya pozdne-mezozoiskaya-kainozoiskaya vulkanicheskaya provintsiya Tsentral'noi – Vostochnoi Azii – proektsiya goryachego polya mantii* [Intraplate Late Mesozoic-Cenozoic volcanic

province of Central and East Asia as a projection of the mantle hot field]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1995, no. 5, pp. 41–67. (In Russian).

*Статья поступила 13.01.2017 г.
The article was received 13.01.2017.*