Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1983, т. 98

УДК 543.53 + 551.71

РАСЧЛЕНЕНИЕ НЕМЫХ ТОЛЩ ДОКЕМБРИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ

П.А.ВАГАНОВ, П.И.ПИВЕНЬ,
С.Д.ВЕЛИКОСЛАВИНСКИЙ

Вопрос о типизации „немых" докембрийских комплексов, включающих глубоко и неоднократно метаморфизованные породы, до настоящего времени не получил однозначного решения. Использование чисто геологических данных не дает возможности провести расчленение и корреляцию таких пород, выявить их металлогеническую специализацию. В этой связи перспективными являются геохимические исследования, в особенности те из них, которые базируются на определении широкого круга химических элементов, включая редкие и рассеянные.

В настоящей работе с помощью метода нейтронно-активационного анализа исследовались древние породы центральной части Алданского щита – кристаллические сланцы основного состава. В последнее время появились указания на то, что в своем большинстве эти породы являются перекристаллизованными в процессе метаморфизма базальтами (метабазальтами) [2, 3].

Согласно схеме стратиграфического расчленения Алдана по В.А.Руднику [8] докембрий подразделен на иенгрский и тимптоно-джелтулинский комплексы, между которыми предполагаются крупные структурные и стратиграфические несогласия. Иенгрский комплекс в свою очередь подразделяется на две серии – верхнеалданскую и федоровскую, между которыми также предполагается наличие крупных несогласий.

На основании свинцово-изотопного датирования пород Алдана установлено, что возраст верхнеалданской серии превышает 3500 млн.лет, возраст федоровской серии составляет 3300±200 млн.лет, а тимптоно-джелтулинского комплекса – 2300±200 млн.лет [5, 9]. Детальный петрохимический анализ алданских вулканитов показал, что метабазальты верхнеалданской серии тождественны толеитовым базальтам, федоровской серии – щелочным базальтам, а в тимптоно-джелтулинском комплексе метабазальты представлены двумя разновидностями – толеитовой и щелочнобазальтовой [3].

Для определения содержаний редких элементов использовался инструментальный метод нейтронно-активационного анализа. На 20 химических элементов анализировались 30 образцов метабазальтов: 9 образцов верхнеалданской серии, 8 федоровской и 13 тимптоно-джелтулинского комплекса (из них 6 толеитовой серии и 7 щелочно-базальтовой). Отдельные редкие элементы, в частности кобальт и никель, определялись в значительно большем количестве

образцов. Пробы измельчались до порошкообразного состояния и тщательно перемешивались. Отобранные навески, масса которых составляла в среднем 50 мг, помещались в ампулы из особо чистого кварца. Эталонами служили стандартные образцы горных пород. С целью снижения выхода радионуклидов ^{46}Sc и ^{59}Fe для облучения использовались надтепловые нейтроны. Для этого ампулы с образцами и эталонами окружались кадмиевым фильтром толщиной I мм. Активация надтепловыми нейтронами позволила вести определение никеля по реакции $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$.

Облучение осуществлялось в тепловой колонне реактора; средняя плотность потока нейтронов составляла $7,5 \cdot 10^{13}$ нейтр.$см^{-2} \cdot с^{-1}$ (кадмиевое отношение по золоту - около 20); время облучения - 96 ч. Использование для облучения интенсивного потока нейтронов и спектрометрической системы с высокой разрешающей способностью позволило выбрать чисто инструментальный вариант анализа. Спектры регистрировались с помощью Ge(Li) -детектора типа ДГДК-35 с объемом 35 $см^3$ и 4096-канального анализатора типа NS-720 („Northern Scientific", США). Энергетическое разрешение детектора составляло 2,5 кэВ для γ-линии с энергией 1332,5 кэВ радионуклида ^{60}Co.

Измерения велись в два этапа: через 8-10 и 30-40 дней после облучения. На первом этапе определялись содержания Rb, Ba, La, Ce, Sm и Th, на втором Co, Ni, Cr, Fe, Sc, Cs, Sr, Eu, Tb, Yb, Hf, Ta, Zr. Всего, таким образом, определялись содержания 19 редких элементов и железа. Предел обнаружения U, Th, Sm, Eu, Tb, Yb, Hf, Ta, Cs, Sc и Co составлял 0,05-0,1 г/т; по Cr, Rb, La, Ce, Ni - 5-10 г/т; по Zr, Ba, Sr - 20-50 г/т. Точность полученных результатов составляет в среднем ±10 %. Средние значения содержаний 19 редких элементов и железа в разновидностях алданских метабазальтов приведены в таблице. Рассмотрим результаты анализа по некоторым парам индикаторных элементов.

Элементы, обладающие сильными щелочными свойствами, K, Rb и Cs наиболее часто используются в качестве геохимических индикаторов различных геологических процессов. В дополнение к данным по Rb и Cs, полученным нейтронно-активационным методом, мы использовали данные по содержаниям K, определенным с помощью химического анализа. Средние значения K/Rb, полученные для метабазальтов Алданского щита, составляют 270 для верхнеалданской серии, 250 для федоровской, 380 и 450 для тимптоно-джелтулинского комплекса для толеитовых и щелочных разновидностей соответственно. Как по значениям этих отношений, так и по абсолютным содержаниям K и Rb исследуемые метабазальты близки к континентальным толеитам (кроме метабазальтов федоровской серии, в которых содержания K и Rb мало отличаются от содержаний этих элементов в щелочных базальтах) [II, I2]. В этом отношении алданские кристаллические сланцы проявляют определенное сходство с вулканитами зеленосланцевого пояса Канады и с основными кристаллическими сланцами Анабарского щита. Вулканиты зеленосланцевого пояса Канады содержат в среднем 0,2I % K и 5,9 г/т Rb (K/Rb = 360) [II, I2]. Основные кристаллические сланцы Анабарского щита содержат 0,42 % K и 6,2 г/т Rb (K/Rb = 680). По мнению Б.Г.Лутца, данные по содержаниям K и Rb под-

Средние содержания изучаемых элементов в метабазальтах Центрального Алдана по результатам нейтронно-активационного анализа, г/т

Элемент	Верхнеалданская серия (толеитовые)	Федоровская серия (щелочные)	Тимптоно-джелтулинский комплекс	
			толеитовые	щелочные
Рубидий	21,0	43,0	18,3	20,7
Цезий	0,45	2,00	0,27	0,25
Стронций	146	194	147	188
Торий	0,70	2,91	1,85	1,77
Уран	0,39	1,37	0,49	0,55
Лантан	15,0	47,0	Не измерялся	Не измерялся
Церий	32,0	75,0	16,0	30,0
Самарий	3,13	6,17	2,44	3,86
Европий	0,90	1,34	0,92	1,12
Тербий	0,48	0,66	0,46	0,76
Иттербий	1,30	1,60	1,58	2,20
Цирконий	95	78	108	122
Гафний	1,64	1,15	1,34	2,76
Тантал	0,39	0,76	0,33	0,52
Скандий	46,7	27,0	37,2	44,8
Хром	99	230	243	108
Кобальт	44,2	38,0	44,7	50,7
Никель	134	188	216	138
Железо[x]	8,46	5,76	6,89	8,42

[x] Содержания Fe указаны в процентах.

тверждают гипотезу о базальтовой природе анабарских кристаллических сланцев [7]. Аналогичный вывод может быть сделан в отношении кристаллических сланцев, исследовавшихся в настоящей работе.

В рассматриваемых разновидностях метабазальтов среднее содержание Cs для верхнеалданской серии составляет 0,45 г/т; для федоровской – 2,0 г/т; для толеитов тимптоно-джелтулинского комплекса – 0,27 г/т; для щелочных метабазальтов этого комплекса – 0,24 г/т. По данным С.Харта, средняя концентрация Cs составляет 0,016 г/т в океанических толеитах; 0,2 г/т в континентальных толеитах; 2,0 г/т в щелочных базальтах [II, I2]. Вулканиты зеленосланцевого пояса Канады содержат 0,36 г/т Cs (Rb/Cs = I6) [II, I2].

Наши данные по содержаниям Cs указывают на близость метабазальтов верхнеалданской серии и тимптоно-джелтулинского комплекса к континентальным толеитам; среднее содержание Cs в метабазальтах федоровской серии в точности соответствует значению, установленному для щелочных ба-

зальтов. Федоровская серия обладает наименьшим рубидий-цезиевым отношением, равным 21, что отражает смещение этого отношения в сторону более щелочного Cs . В щелочных метабазальтах тимптоно-джелтулинского комплекса преимущественного обогащения Cs относительно Rb не наблюдается.

Известно, что среди всех щелочных элементов Cs в наибольшей степени обогащает континентальную кору относительно мантии. По А.П.Виноградову, среднее содержание Cs в гранитах равно 5 г/т, в осадочных породах (глины, сланцы) - 12 г/т, в то время как в основных породах - I г/т, а в ультраосновных - 0,I г/т [4]. Низкие концентрации Cs , устанавливаемые в большей части алданских кристаллических сланцев, могут рассматриваться в качестве дополнительного подтверждения их базальтовой природы. В то же время эти данные свидетельствуют о правильности критерия, предложенного С.Д.Великославинским для отбраковки гранитизированных разностей кристаллических сланцев [2, 3].

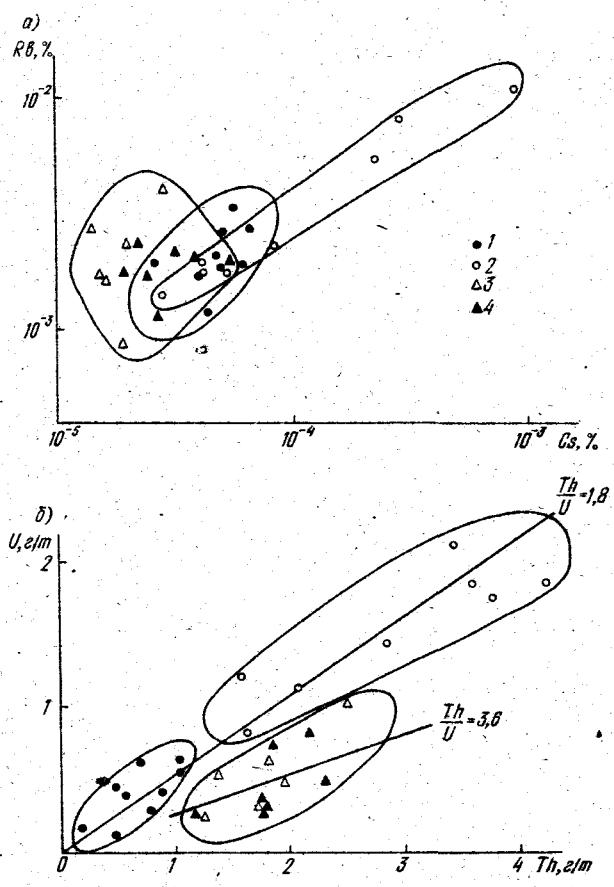


Рис.1. Содержания рубидия и цезия (а), урана и тория (б) в образцах метабазальтов Центрального Алдана: 1 - верхнеалданская серия; 2 - федоровская серия; 3 - тимптоно-джелтулинский комплекс, толеитовая разновидность; 4 - тимптоно-джелтулинский комплекс, щелочная разновидность

Однако по содержаниям редких щелочей Rb и Cs нельзя разграничить метабазальты Центрального Алдана с выделением их основных разновидностей. Как показывает рис.I, а, поля концентраций этих элементов в верхнеалданских, федоровских и тимптоно-джелтулинских метабазальтах перекрываются друг с другом. Корреляция между содержаниями Rb и Cs наблюдается только для метабазальтов федоровской серии.

Некогерентность поведения Rb и Cs, отражающуюся в отсутствии корреляции между содержаниями этих элементов, следует, по всей вероятности, объяснять влиянием процессов глубокого и неоднократ-

ного метаморфизма. При перекристаллизации первичных пород, очевидно, сказывалось различие в ионных радиусах Rb^+ и Cs^+: значительно больший радиус последнего затрудняет вхождение цезия во многие минералы.

Перейдем к рассмотрению особенностей распределения в алданских метабазальтах редкоземельных элементов. В настоящей работе получены сведения о легких (La, Ce), средних (Sm, Eu, Tb) и тяжелых (Yb) лантаноидах. Литературные данные показывают, что по характеру распределения редкоземельных элементов имеются существенные различия между океаническими, континентальными и щелочными базальтами. Эти различия наглядно проявляются после нормирования редкоземельного состава базальтов к редкоземельному составу хондритов. Океанические толеитовые базальты характеризуются хондритовым типом распределения редких земель, в континентальных толеитах относительно повышены содержания легких (цериевых) лантаноидов, а в щелочных базальтах редкоземельные элементы фракционированы весьма сильно - эти базальты резко обогащены легкими и обеднены тяжелыми лантаноидами [I, 7, I3].

Из приведенной таблицы следует, что по содержаниям и характеру распределения редких земель метабазальты верхнеалданской серии и тимптоно-джелтулинского комплекса близки к континентальным толеитам - в них наблюдается умеренное обогащение легкими лантаноидами. Метабазальты федоровской серии сильно обогащены легкими редкоземельными элементами, что соответствует составу редких земель, характерному для щелочных базальтов. Хондритовый тип распределения океанических толеитов не наблюдался нами ни в одном из исследованных случаев. Можно отметить, что в части исследованных нами метабазальтов проявляется отрицательная европиевая аномалия, которая обусловлена, как известно, возможностью перехода европия из состояния Eu^{3+} в состояние Eu^{2+}.

Уникальные закономерности выявляются при сопоставлении содержаний тория и урана в алданских метабазальтах (рис.I, б). Прежде всего следует отметить, что на бинарной диаграмме каждая из разновидностей исследованных метабазальтов занимает свое поле концентраций U и Th. Минимальные количества обоих элементов содержатся в толеитовых метабазальтах верхнеалданской серии. Средние содержания U и Th в этих метабазальтах (соответственно 0,39 и 0,70 г/т) близки к средним содержаниям этих элементов в континентальных базальтах. Среднее значение Th/U в метабазальтах верхнеалданской серии равно I,79, что чуть ниже значения, характерного для континентальных базальтов.

Щелочные метабазальты федоровской серии характеризуются сравнительно повышенными содержаниями U и Th (в среднем соответственно I,37 и 2,9I г/т), в этом отношении они близки к щелочным базальтам. Однако обогащение пород федоровской серии ураном и торием сопровождается очень небольшим увеличением Th/U, которое лишь немного превышает Th/U в верхнеалданской серии и составляет 2,I2. Таким образом, здесь не проявляется обычное для щелочных базальтов смещение Th/U в сторону более основного элемента - тория - с увеличением щелочности магм. Б.Г.Лутц от-

мечает, что такое смещение Th/U должно происходить с увеличением глубины выплавления базальтовых магм [7].

Метабазальты тимптоно-джелтулинского комплекса содержат в среднем 0,50 г/т U и 1,80 г/т Th. Торий-урановое отношение здесь равно 3,7, что в два раза выше, чем для других алданских метабазальтов. Поскольку рост Th/U в равной степени характерен для щелочной и для толеитовой разновидности пород тимптоно-джелтулинского комплекса, можно полагать, что преимущественное обогащение тория связано с глубинностью образования этих пород.

Во всех исследованных метабазальтах содержания U и Th значительно ниже, чем в гранитоидах. Как и в случае редких щелочей - Rb и Cs - это указывает на правильность критерия, использованного для отбраковки гранитизированных разностей кристаллических сланцев [3].

Рис.I, б показывает, что в пределах каждой разновидности метабазальтов содержания U и Th довольно четко коррелируют друг с другом. По всей вероятности из-за близости кристаллохимических свойств ионов U^{4+} и Th^{4+} (валентность, ионный радиус) геохимические пути урана и тория почти не разделялись не только в первичном магматическом процессе, но и при дальнейшей перекристаллизации, происходящей в результате метаморфизма.

Для каждой из исследованных разновидностей метабазальтов Центрального Алдана характерна достаточно широкая вариация содержаний многих редких элементов. Данные по содержанию U и Th убедительно свидетельствуют об этом и подтверждают тем самым наличие процессов определенной магматической дифференциации при формировании метабазальтов. Эти процессы прослеживаются также по распределению в метабазальтах двух сидерофильных элементов - никеля и кобальта. Различие кристаллохимических свойств ионов Co^{2+} и Ni^{2+} обуславливает неодинаковое геохимическое поведение кобальта и никеля. Известно, что никель опережает кобальт при изоморфном замещении ми-

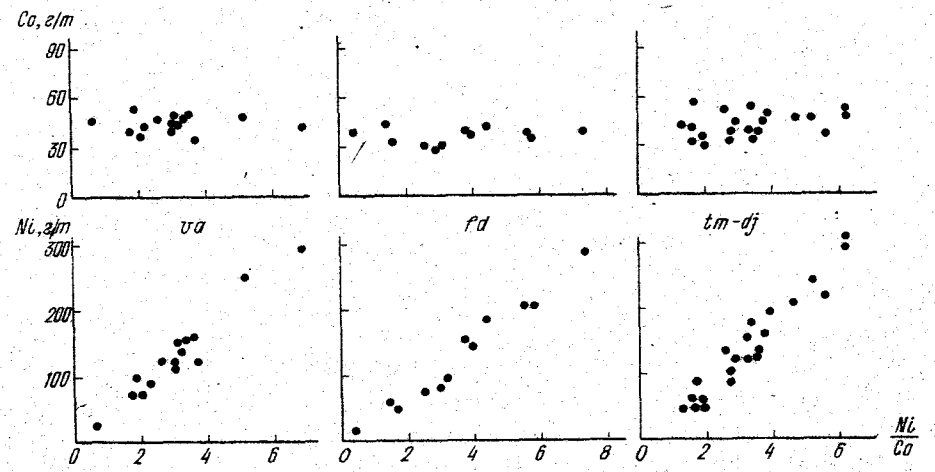


Рис.2. Содержания кобальта и никеля в образцах метабазальтов Центрального Алдана

нералообразующих элементов – обеднение никелем более поздних дифференциатов идет быстрее, чем обеднение кобальтом. Среди изверженных пород только ультраосновные и основные имеют отношение Ni / Co, близкое к 7–10; у многих гранитов это отношение меньше I.

Результаты измерений содержаний Ni и Co в рассматриваемых метабазальтах представлены на рис.2. Как отмечалось ранее, количество определений Ni и Co, выполненных нейтронно-активационным методом, значительно больше, чем количество определений других элементов. По горизонтальной оси отложены значения Ni / Co – последовательное уменьшение этого отношения указывает направление процесса магматической дифференциации. Видно, что содержание кобальта графически постоянно как в пределах каждой разновидности метабазальтов, так и при переходе от одной разновидности к другой. В координатах Ni, (Ni/Co) точки, соответствующие образцам метабазальтов каждой разновидности, ложатся на линии, очень близкие к прямым. Это подтверждает возможность использования отношения содержаний Ni и Co в качестве меры дифференциации базальтов [6].

Л.Н.Когарко рассмотрена возможность использования Ni / Co в качестве непосредственного индикатора мантийного происхождения магм. Расчеты показали, что первичные магмы, являющиеся результатом плавления мантии, характеризуются Ni / Co, варьирующим от 7,6 до 2,2. В ходе процессов кристаллизационной дифференциации это отношение закономерно снижается и в щелочных магмах нефелин-сиенитового и ийолитового составов, представляющих продукты дифференциации первичных магм, приближается к единице [6].

По сравнительно высоким значениям Ni / Co в исследуемых метабазальтах можно сделать вывод об их мантийном генезисе. Действительно, начало процесса дифференциации метабазальтов Центрального Алдана характеризуется значениями Ni / Co, близкими к 6–7. Первичные магмы, выплавленные из мантии, обладают как раз таким значением этого отношения.

Данные нейтронно-активационного анализа образцов метабазальтов Центрального Алдана были подвергнуты многомерной статистической обработке. Использовался факторный анализ со стандартной методикой главных компонент. При совместном рассмотрении 30 образцов на долю первых трех главных компонент (факторов) приходится около 70 % всей дисперсии. На диаграмме, построенной в координатах первого t_1 и третьего t_3 факторов, метабазальты федоровской серии четко отделяются от всех других метабазальтов (рис.3). Это разделение обусловлено значениями t_1: положительные нагрузки фактора t_1 определяются главным образом содержаниями Ce, U, Sm, Th и Ta (редких литофильных элементов), а отрицательные – содержаниями Sc, Fe и Co (сидерофильных элементов). Диаграмма рис.3,а показывает также, что метабазальты тимптоно-джелтулинского комплекса по значениям фактора t_3 разделяются на толеитовую и щелочную разновидности (основной вклад в положительные нагрузки t_3 связан с содержаниями тяжелых лантаноидов – Tb, Yb).

Если факторный анализ повторить после исключения из рассмотрения образцов федоровской серии, то в координатах t_1 и t_3 метабазальты тимптоно-

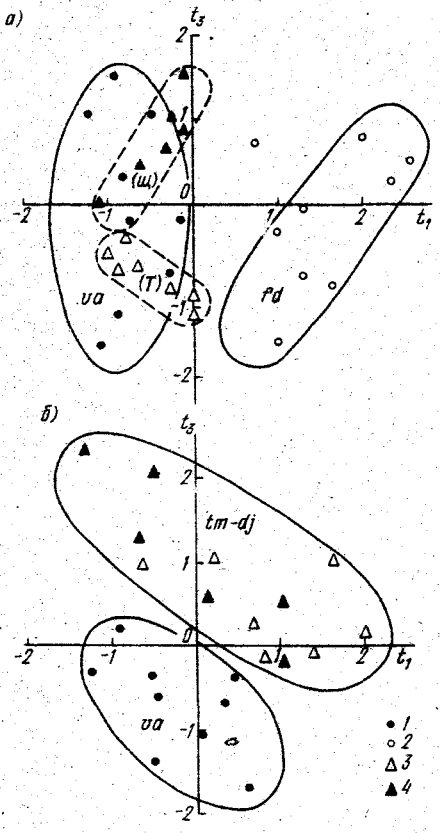


Рис.3. Результаты факторного анализа данных, полученных методом нейтронной активации: а – анализ всей совокупности; б – анализ совокупности без участия данных по метабазальтам федоровской серии
Условные обозначения см. на рис.1

джелтулинского комплекса полностью отделяются от метабазальтов верхнеалданской серии (рис.3, б). В этом случае положительные нагрузки t_1 обусловлены в основном содержанием Ni и Cr, а отрицательные – содержаниями Sm, Tb и Ta. Положительные нагрузки фактора t_3 определяются содержаниями ряда гидромагматофильных элементов – Th, Ta, U, Eu, Hf.

Выводы

1. Высокочувствительный и достаточно точный метод нейтронно-активационного анализа дает важную информацию о содержаниях в докембрийских кристаллических сланцах ряда редких элементов. Эта информация может с успехом использоваться для выявления новых геохимических закономерностей основного вулканизма в докембрии.

2. Распределение редких элементов в исследованных объектах подтверждает первично-базальтовую природу кристаллических сланцев Центрального Алдана. Вместе с тем, это распределение свидетельствует о том, что исходный состав протокоры в указанном регионе был ближе к составу не океанических, а континентальных толеитов. По редкоэлементному составу метабазальты верхнеалданской серии, возраст которой составляет не менее 3,5 млрд.лет, мало отличаются от континентальных толеитов. Таким образом, подтверждается предположение А.П.Тугаринова и Е.В. Бибиковой о том, что через 1 млрд. лет после образования Земли значительная часть первоначальной океанической коры была трансформирована в континентальную [10].

3. Полученные в результате нейтронно-активационного анализа данные выступают эффективным средством типизации „немых" толщ раннего докембрия и их расчленения. На примере алданских метабазальтов установлено, что стратиграфическая типизация этих объектов может проводиться по бинарным диаграммам, построенным на основе данных о содержании пар редких элементов. Наиболее информативной оказывается диаграмма, использующая данные о содержаниях U и Th.

4. Многомерная статистическая обработка результатов, полученных с помощью нейтронно-активационного метода (факторный анализ с использованием методики главных компонент), также позволяет провести типизацию и расчленение метабазальтов. При этом главным компонентам может быть придан определенный геохимический смысл.

5. Различия в химическом составе метабазальтов верхнеалданской и федоровской серий, а также тимптоно-джелтулинского комплекса свидетельствуют о правомерности их выделения в качестве крупнейших самостоятельных стратиграфических подразделений алданского докембрия и об их формировании в течение самостоятельных тектоно-магматических циклов: верхнеалданского, федоровского и тимптоно-станового (по В.А.Руднику [8]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 1976.

2. Великославинский С.Д. Закономерности раннеархейского основного вулканизма центральной части Алданского щита. – Зап. Всесоюзн. минералогического общества, 1976. Вып. 1, ч. 105.

3. Великославинский С.Д. Петрология и геохимия кристаллических сланцев основного состава центральной части Алданского щита. Автореферат на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. Л., изд. ВСЕГЕИ, 1978.

4. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород. – Геохимия, 1962, № 7.

5. Искандерова А.Д., Неймарк Л.А., Слупицкий Ю.А. и др. Новые данные по геохронологии Алданского докембрия. – В кн.: Геологическая интерпретация данных геохронологии. Иркутск, Ин-т геохимии аналитической химии, 1977.

6. Когарко Л.Н. Отношение Ni/Co – индикатор мантийного происхождения магм. – Геохимия, 1973, № 10.

7. Лутц Б.Г. Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. М., Наука, 1975.

8. Рудник В.А. Гранитообразование и формирование земной коры в докембрии. Л., Недра, 1975.

9. Соботович Э.В., Рудник В.А., Искандерова А.Д. и др. Свинцово-изохронный возраст раннедокембрийских кристаллических сланцев Становой складчатой области. – В кн.: Геологическая интерпретация данных геохронологии. Иркутск, Ин-т геохимии аналитической химии, 1977.

10. Тугаринов А.П., Бибикова Е.В. Эволюция химического состава земной коры. – В кн.: Разделение элементов и изотопов в геохимических процессах. М., Наука, 1979.

11. Hart S.R. et al. – Earth and Planet. Sci. Letters, v.10, N 1, 1970.

12. Hart S.R., Nalwalk A.J. – Geochim. Cosmochim. Acta, v.34, N 2, 1970.

13. Haskin L.A. et al. – Meteoritic, solar and terrestrial rare-earth distributions. Pergamon Press, 1966.