

На правах рукописи



ВЕТРОВА Наталья Игоревна

**ГЕОХИМИЯ И C-, Sr-ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ
ПОЗНЕДОКЕМБРИЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (ХОРБУСУОНСКАЯ СЕРИЯ И
ДАШКИНСКАЯ СВИТА)**

специальность 25.00.09–геохимия, геохимические методы

поиска полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Научный руководитель:

Летникова Елена Феликсовна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Покровский Борис Глебович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии изотопов и геохронологии ФГБУН Геологического института РАН

Ершова Виктория Бэртовна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая кафедрой региональной геологии ФГБОУ высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета

Ведущая организация:

ФГБУ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

Защита состоится 18 декабря 2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д003.067.02, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3; факс: (383) 333-21-30; e-mail: gaskova@igm.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН. Адрес сайта: <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование».

Автореферат разослан «25» октября 2018 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Доктор геолого-минералогических наук



Гаськова О.Л.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В настоящее время геохимия и изотопия являются неотъемлемой частью геологии. Они позволяют определять состав, возраст горных пород, оценивать степень их вторичных изменений, устанавливать источники вещества при их образовании. Одним из современных изотопных методов является Sr-хемостратиграфия (СИС). Она позволяет устанавливать интервал накопления карбонатных пород и коррелировать немые толщи, лишенные руководящих органических остатков и геохронологических данных о их возрасте. На данный момент российскими и зарубежными исследователями получена обширная аналитическая база данных вариаций изотопного состава Sr и С воды в мировом палеоокеане, отвечающих геохимическим критериям сохранности этих изотопных систем [Veizer, Compston, 1976; Knoll, Walter, 1992; Derry et al., 1992, Кузнецов и др., 2003; 2014, Halverson et al., 2005, 2007, 2010 и др.].

Данная работа направлена на пополнение мировой базы данных изотопного состава Sr и С докембрийских карбонатных отложений. Объектами исследования стали карбонатные отложения Сибирской платформы - хорбусуонская серия Оленекского поднятия и дашкинская свита осянкой серии Енисейского кряжа. Отличительной особенностью исследования является решение как прямой задачи - установление интервала осадконакопления для пород дашкинской свиты, так и решение обратной задачи для карбонатных пород хатыспытской свиты с ограниченным временным интервалом накопления. Так изотопный состав стронция океанической воды 560-550 млн лет назад ранее был установлен по различным разрезам. Однако эти данные противоречивы, что обусловлено небольшим количеством кондиционных образцов и скрытыми перерывами в осадочных последовательностях [Sawaki et al., 2010; Burns et al., 1994]. В данной работе удалось восстановить в полном объеме историю эволюции изотопного состава стронция в палеоокеане на этот период времени.

Цель данного исследования - установить изотопный состав Sr и С наименее измененных позднекембрийских карбонатных пород хорбусуонской и дашкинской свиты осянкой серий Сибирской платформы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Оценить степень постседиментационных преобразований карбонатных отложений для обоснования сохранности Rb-Sr и С изотопных систем.

2. Изучить изотопный состав стронция и углерода в наименее измененных образцах карбонатных пород.

3. Сопоставить полученные Sr- и C-изотопные данные вышеуказанных отложений с хорошо изученными, геохронологически охарактеризованными типовыми разрезами мира, на основании которых построены стандартные кривые вариаций изотопного состава стронция и углерода в воде палеоокеана, и установить временной интервал их седиментации.

4. Установить изотопный состав Sr и C воды палеоокеана для возрастного интервала 560-550 млн лет.

Фактический материал, личный вклад, методы исследования. Коллекция образцов хорбусуонской серии была предоставлена к.г.-м.н. Б.Б. Кочневым (ИНГТ СО РАН) и состоит из 140 образцов карбонатных пород, из них: 21 маастахской свиты, 100 хатыспытской свиты, 19 туркутской свиты. Карбонатные породы дашкинской свиты ослянской серии (27 образцов) были отобраны лично автором во время полевых работ 2012 года.

Автором проведено петрографическое изучение карбонатных пород, а также выполнена основная часть аналитических работ: разложение 149 образцов для определения содержаний Ca, Mg, Fe, Sr, Mn атомно-абсорбционным методом; минералогическое исследование 6 проб на растровом сканирующем электронном микроскопе с ЭДС системой химического анализа MIRA 3LMU (ИГМ СО РАН); селективное растворение карбонатных пород и выделение Rb и Sr методом ионнообменной хроматографии; масс-спектрометрическое измерение изотопного состава Sr 29 образцов хорбусуонской серии проводилось на масс-спектрометре Finnigan MAT-262 в одноленточном режиме с использованием Та-эмиттера (Байкальский аналитический ЦКП СО РАН, Иркутск), 19 образцов дашкинской свиты на масс-спектрометре TritonPlus (Екатеринбург, ИГГ УрО РАН) в двухленточном режиме.

Измерения атомно-абсорбционным методом на приборе Thermo Scientific SOLAAR AA Spectrometer были проведены Н.В. Андросовой (ИГМ СО РАН), изотопный состав С и О 70 проб карбонатных пород был измерен А.Н. Пыряевым на масс-спектрометре Finnigan MAT-253 (ИГМ СО РАН), содержания Rb и Sr определены В.Ю. Киселевой на многоколлекторном масс-спектрометре МИ-1201АТ (ИГМ СО РАН).

Научная новизна работы. На основе изучения карбонатных отложений хорбусуонской серии Оленекского поднятия впервые удалось восстановить в полном объеме эволюцию изотопного состава Sr и С мирового океана для возрастного интервала 560-550 млн лет. Это

позволило дополнить стандартную кривую вариации изотопного состава стронция в палеоокеане в позднем докембрии.

Получены Sr- и C-изотопные данные для пород дашкинской свиты Енисейского кряжа, пригодные для целей хемотратиграфии.

Показана эффективность применения минералогических методов для выявления образцов с наименее нарушенной Rb-Sr изотопной системой при высоких первично-осадочных концентрациях Fe и Mn.

Практическая значимость работы. Данные Sr-хемотратиграфии имеют практическую значимость и актуальны при проведении геологосъемочных и прогнозно-поисковых работах. Полученные ограничения по возрасту и изотопно-геохимические характеристики осадочных пород способствуют выявлению новых закономерностей размещения полезных ископаемых и критериев их прогнозирования.

Полученные Sr- и C-изотопные характеристики могут быть использованы при корреляции карбонатных отложений позднедокембрийского возраста и пополнить мировую базу данных изотопного состава воды в палеоокеане.

Защищаемые положения:

1. Геохимические и изотопные (Sr, O и C) характеристики карбонатных пород маастахской и хатыспытской свит хорбусуонской серии Оленекского поднятия и дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа свидетельствуют об их ненарушенных Rb-Sr и углеродной изотопных системах, отражающих отношение изотопов этих элементов в морской воде в момент седиментации и их пригодности для целей изотопной хемотратиграфии.

2. Первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для наименее измененных карбонатов хорбусуонской серии варьирует в интервале от 0.70783 до 0.70826, значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ – в интервале от -2.2 до +5.5‰. Накопление этих отложений происходило в венде, при этом изотопный состав стронция в воде палеоокеана 560-550 млн лет составлял 0.70783-0.70806.

3. Первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для наименее измененных карбонатов дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа варьирует в интервале от 0.70566 до 0.70621, значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ – от +3.7 до +4.4‰. Накопление этих отложений происходило в рифее.

Апробация работы и публикации. Различные положения работы были апробированы на международных и российских конференциях: международная конференция «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск (2012, 2013 г.г.); 6-я Сибирская международная конференция молодых учёных по наукам о Земле, г. Новосибирск, 2012 г.; всероссийское совещание «Ленинградская школа литологии», г. Санкт-Петербург, 2012 г.; XXV Всероссийская молодежная конференция

«Строение литосферы и геодинамика», г. Иркутск, 2013 г.; совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса», Иркутск 2013 г.; 10-я конференция прикладной изотопной геохимии, Будапешт, 2013 г.; XX симпозиуме по геохимии изотопов, Москва, 2013 г.; всероссийской школе «Виртуальные и реальные литологические модели», Екатеринбург, 2014 г.; генеральная ассамблея «Европейского союза геологических наук», Вена, 2014 г.

Положения диссертации отражены в 14 публикациях, три из которых опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из списка ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и содержит 59 рисунков и 6 таблиц в Приложении. Список литературы включает в себя 211 наименований. Общий объем диссертации - 166 страниц.

Работа начата в лаборатории геодинамики и магматизма (№212) и закончена в лаборатории литогеодинамики осадочных бассейнов (№220) ИГМ СО РАН. Диссертация подготовлена в рамках исследований по проекту РНФ 16-17-10076.

Благодарности. Автор искренне благодарен научному руководителю д.г.-м.н. Е.Ф.Летниковой. За огромный вклад в понимание автором методики СИС и поддержку при проведении аналитических работ автор выражает признательность И.А. Вишневецкой, Г.А. Докукиной, В.Ю. Киселевой, Н.Г. Солошенко и всем коллегам, и друзьям, способствовавшим выполнению работы. Автор признателен Б.Б.Кочеву за предоставление коллекции образцов пород хорбусуонской серии и плодотворное сотрудничество при интерпретации полученных данных. И, конечно, работа не была бы написана без понимания и поддержки любимой семьи.

ГЛАВА 1. Методика изотопных исследований карбонатных отложений

Стронциевая изотопная (хемо)стратиграфия в настоящее время является устоявшимся инструментом [Elderfield, 1986; McArthur, 1994; Veizer et al., 1999], который служит двум основным целям. Во-первых, изотопный состав Sr (отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) карбонатной породы помогает ограничивать интервал осадконакопления, основываясь на вариациях этого отношения в морской воде [McArthur et al., 2001]. Во-вторых, вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения морской воды отражают глобальные тектонические и экологические события [Halverson et al., 2007] и поэтому могут быть использованы при палеогеодинамических реконструкциях [Banner, 2004; Li et al., 2011].

Sr-изотопная хемотратиграфия базируется на трех принципах:

1. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ одинаково во всем объеме Мирового океана и окраинных морей в каждый заданный момент геологического времени [Goldberg, 1963; Faure, 1986; Aberg, Wickman, 1987; Hodell et al., 1989]. Этот принцип основывается на том, что время пребывания Sr в океане составляет от 2.5 до 4 млн лет, что более чем в 1000 раз больше времени перемешивания воды в океане (~ 1500 лет) [Elderfield, 1986].

2. Изотопный состав стронция в морской воде отражает баланс вещества между континентальным и мантийным потоками вещества. Континентальный поток, формирующийся в ходе денудации континентальной коры обладает более высоким $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношением (~0.7115), чем мантийный поток, образующийся при гидротермальной переработке базальтов в срединно-океанических хребтах (~0.7035) [Faure et al., 1965; Veizer, Compston, 1974; Palmer, Edmond, 1989; Jacobsen, Kaufman, 1999; Семихатов и др., 2002].

3. Реконструкция величин отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в палеоокеанах возможна путем анализа кальцийсодержащих минералов (главным образом карбонатов), осаждавшихся непосредственно в морской воде и включивших в свой состав стронций в изотопном равновесии со средой седиментации [Peterman et al., 1970; Koenig et al., 1985].

Изотопный состав C осадочных карбонатов несет в себе информацию о экзогенных процессах. Здесь основными факторами являются уровень биопродуктивности и интенсивность циркуляции вод бассейна седиментации, где главным является скорость захоронения органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и скорость окисления накопленного $C_{\text{орг}}$ ранее [Фор, 1989; Виноградов, 2009].

Для корректной работы СИС необходимым условием является сохранность изотопной системы хотя бы части пород изучаемого комплекса отложений, отражающих первичный изотопный состав Sr морской воды в момент седиментации. Для отбора наименее измененных постседиментационными процессами пород в современной практике применяется комплексный подход - это полевое изучение карбонатных последовательностей морского генезиса, петрографические и геохимические исследования. Для карбонатных пород геохимическими критериями служат выбранные пределы отношений Mn/Sr и Fe/Sr и значений $\delta^{18}\text{O}$, а также анализ ковариаций между изотопными и геохимическими параметрами карбонатных пород [Veizer, 1983; Kaufman et al., 1993, 1995; Knoll et al., 1995; Кузнецов и др., 2003].

Для удаления вторичных образований применяется методика селективного растворения. Это способствует удалению легкорастворимых химических элементов, не входящих в кристаллическую решетку

первичных карбонатных минералов [Горохов и др., 1995; Семихатов и др., 2002; Li et al., 2011].

Детально описаны использованные методики: пробоподготовка карбонатных пород для измерения содержаний Ca, Mg, Mn, Fe, Sr атомно-абсорбционным методом и основные принципы этого метода, методики селективного разложения карбонатных пород и ионно-обменной хроматографии для выделения Rb и Sr, принципы масс-спектрометрического измерения, методики исследования изотопных составов C и Sr. Корректность измерений изотопов Sr контролировалась параллельным измерением в каждой серии образцов изотопного стандарта NBS-987, C и O - международным (NBS19) и российским (ДВГИ) стандартами. Все значения изотопного состава углерода и кислорода приводятся в промилле (‰), $\delta^{13}\text{C}$ относительно стандарта PDB, $\delta^{18}\text{O}$ относительно стандарта SMOW.

Приведены геологические особенности и изотопные характеристики карбонатных пород типовых осадочных разрезов докембрия мира, и стандартные кривые вариаций $\delta^{13}\text{C}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения в палеоокеане. Продемонстрировано тестирование методики СИС, поставленной в ИГМ СО РАН, на соответствие мировому уровню на примере докембрийских карбонатных отложений Дзабханского микроконтинента.

ГЛАВА 2. Особенности геологического строения докембрийских осадочных комплексов Оленекского поднятия

Приведены особенности геологического строения докембрийских и раннепалеозойских отложений Оленекского поднятия. Показано, что накопление этих отложений с перерывами и размывами протекало в мелководных прибрежно-морских фациях [Шпунт и др., 1979; Розен и др., 2006; Сметанникова и др., 2013].

Детально рассмотрен вендский комплекс Оленекского поднятия. Он сложен породами хорбусуонской серии (маастахская, хатыспытская, туркутская свиты), которые образуют единый трансгрессивный цикл прибрежно-морских отложений.

Маастахская свита начинается с кварцевых песчаников и гравелитов, которые сменяются грубыми, косослоистыми песчаниками [Шпунт и др., 1982; Мельников и др., 2005]. Верхняя часть свиты сложена преимущественно карбонатными отложениями, отлагавшимися в прибрежной зоне.

Хатыспытская свита начинается с горизонта брекчированных глинистых известняков, которые залегают на строматолитовых доломитах маастахской свиты [Rogov et al., 2012]. Основная часть свиты сложена тонкослоистыми битуминозными известняками с горизонтами

калькаренитов. Отложения этой свиты формировались в обстановках открытого шельфа. Граница хатыспытской и перекрывающей ее туркутской свиты обычно проводится по смене известняков на доломиты. Контакт между свитами обычно резкий, иногда с брекчиями выщелачивания, что указывает на резкую смену обстановок осадконакопления и возможный небольшой перерыв.

Хатыспытская свита имеет представительную палеонтологическую характеристику - остатки эдиакарского типа бентосного образа жизни [Вендская..., 1985; Мельников и др., 2005], органостенные макроскопические остатки миаохенского типа [Grazhdankin et al., 2008], следы жизнедеятельности *Nenoxites* [Rogov et al., 2012]. Анализ распространения эдиакарских палеосообществ в различных обстановках осадконакопления в сочетании с имеющимися геохронологическими данными показывает, что хатыспытская ассоциация может относиться либо к редкинскому, либо к беломорскому временному интервалу (580-559 и 559-550 млн лет, соответственно) [Grazhdankin, 2014]. Однако наличие свидетельств интенсивной биотурбации, которая отсутствует в аналогах редкинского горизонта, указывает на принадлежность хатыспытской свиты именно к беломорскому горизонту [Rogov et al., 2012], что позволяет ограничить возрастной диапазон ее накопления 559(560)-550 млн лет.

Туркутская свита сложена преимущественно доломитами. Отложения свиты формировались в мелководном морском бассейне при нормальной и повышенной солености, о чем свидетельствуют горизонты кавернозных пород и брекчий выщелачивания. В отложениях свиты обнаружены мелкораковинные остатки *Cambrotubus* sp., *Anabarites* sp. [Карлова, 1987; Рогов и др., 2015], характерные для нижней части немакит-далдынского яруса верхнего венда [Хоментовский, Карлова, 1992]. Верхняя граница осадконакопления хорбусуонской серии определяется U-Pb SHRIMP датировкой по цирконам 543.9 ± 0.3 млн лет из прорывающих туфобрекчий в основании кессюсинской свиты [Bowring et al, 1993].

ГЛАВА 3. Изотопно-геохимические характеристики карбонатных пород хорбусуонской серии Оленекского поднятия

В результате петрографического и геохимического изучения карбонатных пород хорбусуонской серии выявлены пробы с высокой долей нерастворимого остатка от 10 до 50%, которые в дальнейшем при изотопных исследованиях не использовались. По данным рентгенофазового анализа на порошковом дифрактометре ДРОН-3М нерастворимый остаток представлен в основном кварцем реже калиевым полевым шпатом, смектитом, слюдой, каолинитом, хлоритоидом, амфиболом, хлоритом и пиритом.

Маастахская свита представлена чистыми доломитами ($Mg/Ca \sim 0.55$). Количество Fe и Mn возрастает от подошвы к кровле от 2300 до 6500 мкг/г и от 200 до 720 мкг/г, соответственно. Содержание Sr остается на низком уровне, варьируя от 30 до 60 мкг/г. При этом значения $\delta^{18}O_{SMOW}$ колеблются в пределах от 23.1‰ в низах разреза до 21.8‰ в верхах, что говорит о незначительных постседиментационных преобразованиях. Значения отношений Fe/Sr и Mn/Sr превышают таковые принятые А.Б. Кузнецовым с соавторами (2003) как геохимические критерии сохранности Sr-изотопной системы ($Fe/Sr \leq 3$, $Mg/Ca \leq 0.608$, $Mn/Sr \leq 1.2$) (Рис. 1).

В рамках изучения вопроса о степени постседиментационных изменений карбонатных отложений маастахской свиты проведено исследование состава карбонатных минералов на сканирующем микроскопе TESCAN MIRA 3LMU. Показано, что повышенные концентрации Fe и Mn являются первичноосадочными, т.к. максимальные концентрации этих элементов обнаружены в центральных частях зерен, а в каймах и поровом пространстве их концентрации минимальны. Таким образом, карбонатные отложения маастахской свиты могут быть использованы в целях Sr-хемостратиграфии. Подобный подход при диагностике образцов с ненарушенной Rb-Sr изотопной системой был применен впервые [Vishnevskaya et al., 2017].

Хатыспытская свита представлена переслаиванием известняков ($Mg/Ca \leq 0.1$), доломитистых известняков ($Mg/Ca \sim 0.2$) и мергелистых доломитов (доля доломита до 60%). Доля мергелей в этой последовательности постепенно возрастает к кровле свиты. В известняках и доломитах отмечены крайне низкие содержания Mn (10-60 мкг/г). В доломитистых известняках содержания варьируют в больших пределах от 20 до 430 мкг/г для Mn и от 250 до 6200 мкг/г для Fe. Содержание Sr в известняковых прослоях изменяется в интервале 160-2200 мкг/г, в доломитистых известняках изменяется от 190 до 980 мкг/г, а в карбонатном веществе мергелистых прослоев колеблется от 90 до 1300 мкг/г. Проведенные геохимические исследования (Рис. 1) карбонатных пород хатыспытской свиты позволили выявить пробы с наименее нарушенной изотопной системой, для которых в дальнейшем были проведены изотопные исследования.

Туркутская свита сложена доломитами ($Mg/Ca \sim 0.55$; доля силикакластической примеси не более 2%) с крайне низким содержанием Sr (30-60 мкг/г) и Mn (40-90 мкг/г), содержание Fe достигает 270 мкг/г. Несмотря на большую разницу между величинами содержаний Fe и Mn в туркутской свите, выявлена прямая зависимость содержаний этих элементов. Геохимические характеристики (Рис. 1) карбонатных

отложений туркутской свиты указывают на их возможное постседиментационное изменение с нарушением первичной изотопной системы.

Изотопный состав углерода и стронция карбонатных пород хорбусуонской серии

Изотопный состав С доломитов маастахской свиты варьирует в положительной области, повышаясь от +3.6‰ внизу разреза до +6.5‰ в кровле. Подобные высокие положительные значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ характерны для коротких периодов в истории Земли. Одним из них является ранний венд. Карбонаты маастахской свиты показывают вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения в узком интервале от 0.708095 до 0.708245 (Рис. 1).

Для хатыспытской свиты значение $\delta^{13}\text{C}$ в приподошвенной части наследует положительную величину (+3.5‰) подстилающей маастахской свиты, но затем выше по разрезу, понижается и варьирует около нуля (+0.6...-2‰). Изотопный состав кислорода изменяется от 22.7 до 28.0‰. Для образцов карбонатных пород хатыспытской свиты характерны широкие вариации $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения, при этом основная часть варьирует около 0.70806.

Величина $\delta^{13}\text{C}$ для карбонатов туркутской свиты варьирует около нуля от -0.2 до +0.7‰. Изотопный состав кислорода 21-23‰ превышает пороговое значение 20‰. Карбонаты туркутской свиты (3 образца) показывают широкий интервал вариаций $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения от 0.70854 до 0.70914. Эти значения можно считать лишь изотопной меткой данных отложений, т.е. истинный изотопный состав Sr в момент седиментации был 0.70854 или ниже.

Анализ полученных результатов и их сопоставление со сводными кривыми вариации изменения отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в позднем докембрии [Kaufman et al., 1993; Кузнецов и др., 2003; Halverson et al., 2010] приводит к ряду важных стратиграфических выводов. Отсутствие прямых данных о возрасте маастахской свиты долгое время не позволяло уверенно относить ее к венду. Доломиты маастахской свиты характеризуется устойчивыми положительными значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в интервале от +2.2 до +5.5‰ [данная работа, Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996]. Данные по Sr изотопии ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7080$) для этой свиты указывают на ее формирование в позднем неопротерозе (эдиакарии). Подобное сочетание изотопных параметров Sr и C для карбонатов наиболее характерно для верхней части межледникового интервала, разделяющего гляциоэпохи Марино (650-630 млн. лет) и Гаскье (580-575 млн лет) возраст которой может быть оценен в интервале 600-580 млн лет [Halverson et al., 2010]. Подтверждением этого являются данные U-Pb датирования детритовых цирконов методом LA-ICP-MS из песчаников маастахской свиты [Vishnevskaya et al., 2017].

Возраст цирконов наиболее молодой популяции составляет 613 млн лет, что хорошо согласуется с возрастным интервалом, определенным нами методом Sr-хемотратиграфии в совокупности с данными по изотопии С. Вендские карбонатные породы с такими изотопными характеристиками Sr и С широко распространены на юге Сибири (енисейская [Летникова и др., 2011], байкальская [Летникова и др., 2006], боксонская и хубсугульская [Вишневецкая и др., 2013] серии). На этом отрезке геологической истории (после оледенения Марино, но до появления эдиакарской мягкотелой биоты) во многих разрезах мира установлено событие Шурам (Вонока) – крупнейший экскурс $\delta^{13}\text{C}$ в отрицательную область (до -12‰). Принимая во внимание относительно маломощный интервал изученного разреза маастахской свиты, можно предположить, что данное событие в нем не зафиксировано или, возможно, это обусловлено наличием перерыва в накоплении в период проявления этого события.

Известняки хатыспытской свиты имеют весьма выдержанные значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ без отчетливых трендов их изменения по разрезу, что может указывать на относительно короткое время их накопления. Подобные значения этого отношения характерны для карбонатных отложений в разрезах с возрастом от 650 до 580 млн лет [Кузнецов и др., 2003; Halverson et al., 2010; Kaufman et al., 1993]. Типичным для них являются высокие положительные значения $\delta^{13}\text{C}$. В нашем случае, эти значения варьируют от -1.5 до +1.5‰ [данная работа, Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996]. При этом, находки эдиакарской биоты с учетом ее таксономической специфики, а также широкое распространение ихнофоссилий [Rogov et al., 2012] позволяют сравнивать отложения хатыспытской свиты с беломорским горизонтом венда восточной части Восточно-Европейской платформы, датируемом в интервале 550-560 млн лет [Гражданкин, 2004]. Следует отметить, что на существующих на сегодняшний день кривых вариаций изменения изотопного состава Sr в позднедокембрийском палеоокеане временной интервал 560-550 млн лет назад не охарактеризован точными данными [Halverson et al., 2010]. Таким образом, совокупность данных по биостратиграфии и изотопии С дают нам возможность утверждать, что полученные нами Sr-изотопные характеристики карбонатных отложений хатыспытской свиты ~0.7078-0.7081 являются показателями изотопного состава Sr в воде палеоокеана 560-550 млн лет назад.

Полученные Sr-изотопные характеристики доломитов туркутской свиты, вероятно, не отвечают первичному изотопному составу Sr в среде карбоната накопления. При этом, истинные значения могут быть ниже или близкими к 0.70854, характерными для пограничного венд-кембрийского интервала международной стратиграфической шкалы вблизи возрастной

отметки 542 млн лет, что полностью согласуется с полученными геохронологическими данными [Bowring, 1993; Vishnevskaya et al., 2017].

Проведенные исследования позволили впервые в мировой практике получить в полном объеме Sr-изотопные характеристики карбонатных пород, отлагавшихся в палеоокеане 560-550 млн лет назад. Это позволит в дальнейшем проводить более корректные корреляции вендских отложений.

Показано, что изотопные характеристики пород хорбусуонской серии не находят полных аналогов среди таковых в породах типовых разрезов мира (Рис. 2). Наиболее близкими изотопными характеристиками для хатыспытской свиты обладает вторая пачка свиты Даушанто: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношение варьирует около 0.7080, но в тоже время значения $\delta^{13}\text{C}$ в свите Даушанто значительно выше ($\sim +5\text{‰}$), чем в хатыспытской свите ($\sim 0\text{‰}$), а также нижняя часть свиты Кхуфай Омана $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношение 0.70798 – 0.70801, при этом значения $\delta^{13}\text{C}$ от +3.2 до +4.2. Sr-изотопные характеристики хатыспытской свиты аналогичны таковым в карбонатных отложениях верхней части цаганоломской свиты, возраст седиментации которой 580-550 млн лет, но различаются по изотопному составу углерода.

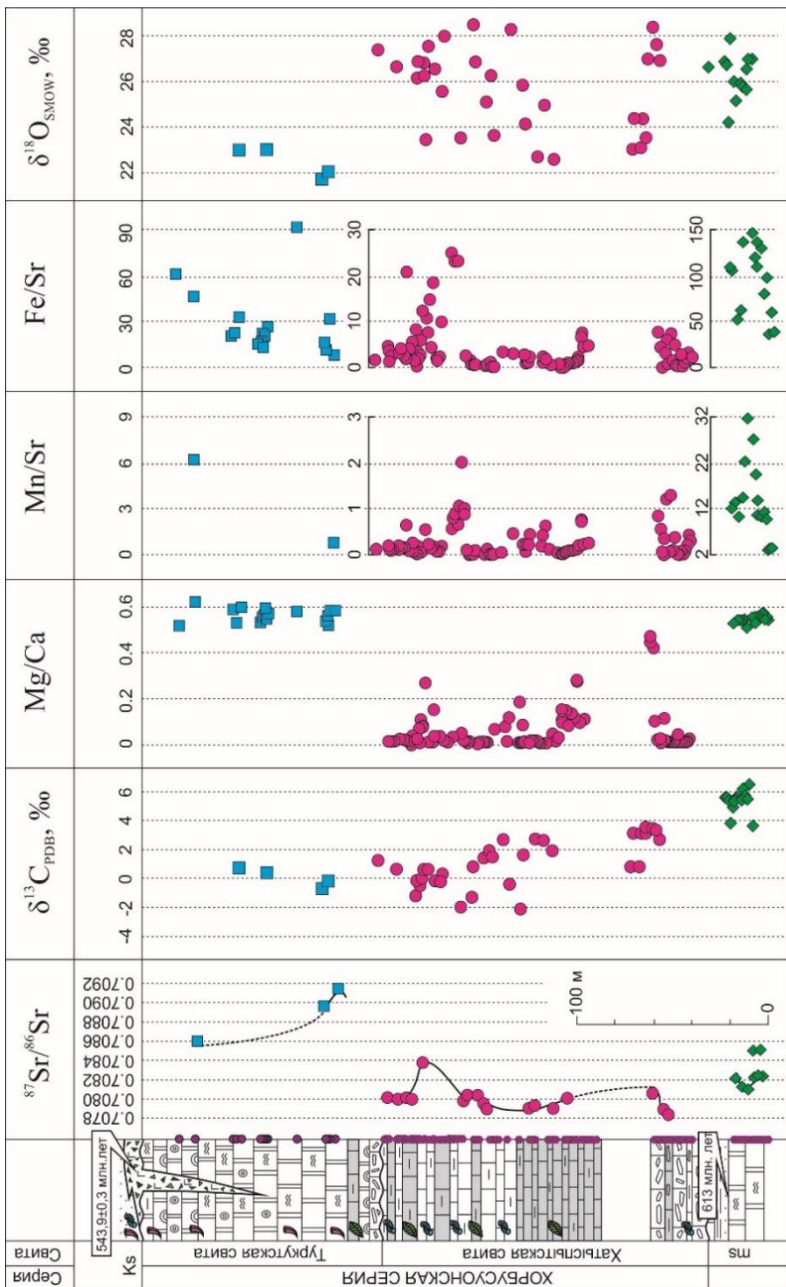


Рис.1 Распределение значений Mg/Ca, Mn/Sr и Fe/Sr и изотопный состав Sr, C и O для карбонатных отложений хорбузонской серии

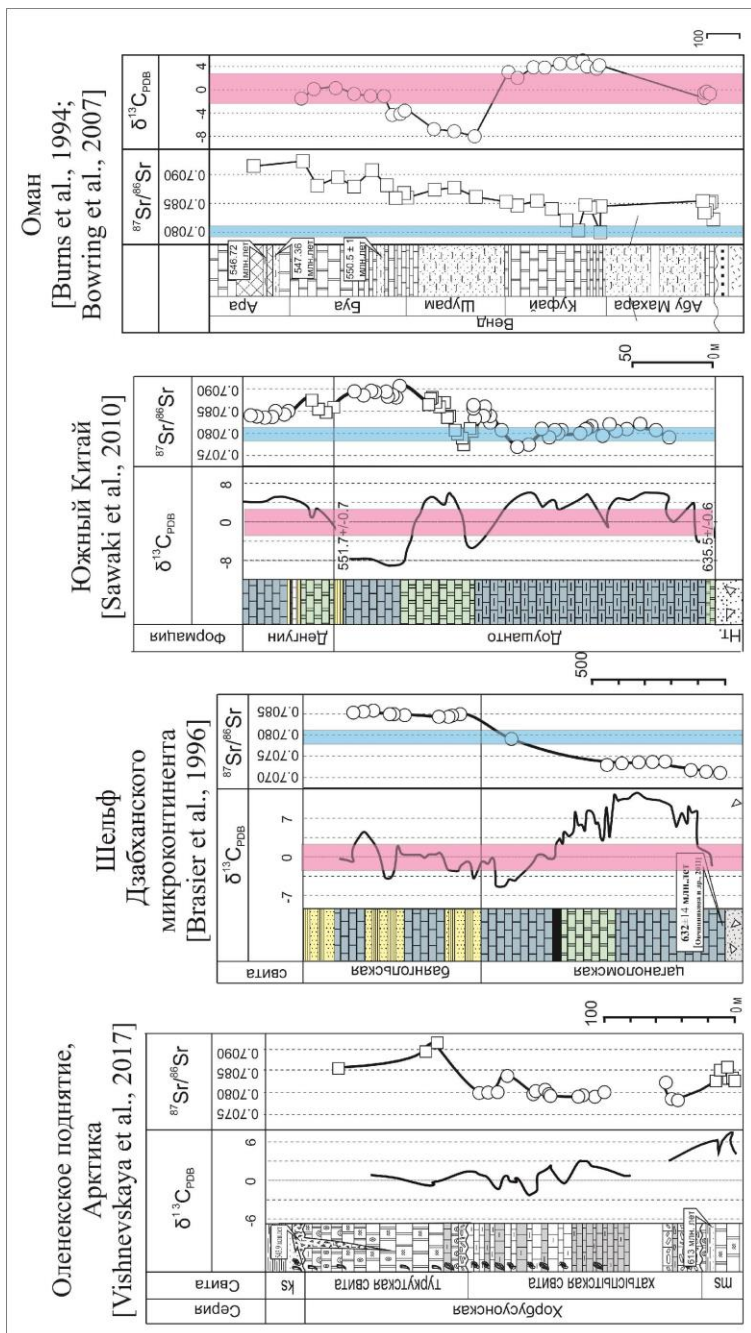


Рис.2 Корреляция значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{13}\text{C}$ карбонатных пород хатыльгской свиты с типовыми разрезами мира

ГЛАВА 4. Особенности геологического строения докембрийских и раннепалеозойских осадочных комплексов юга Енисейского кряжа

Приведены геологические особенности строения позднедокембрийских осадочных комплексов южной части Енисейского кряжа Сибирской платформы. Среди них выделяется пять крупных осадочных последовательностей, отвечающих различным циклам седиментации в осадочных бассейнах, этой краевой структуры платформы - раннепротерозойский, ранне-среднерифейский, верхнерифейский, ранневендский и верхневендско-раннекембрийский [Шенфильд и др., 1991; Зуев и др., 2006].

Детально рассмотрено строение ослянской серии. В составе этой серии выделяют нижнеангарскую, дашкинскую и чинеульскую свиты. Они представляют собой единый цикл осадкообразования, названный дашкинским, имеющий трансгрессивную направленность [Бабинцев и др., 2003]. В целом, ослянские отложения формировались на карбонатном шельфе при явном преобладании штормовой седиментации. Основу составляют регрессивные последовательности метрового масштаба, указывающие на периодические быстрые повышения уровня моря с последующим обмелением и проградацией отложений более мелководных обстановок [Мельников и др., 2005]. Возраст ослянской серии ограничивается по определениям комплекса микрофоссилий и микрофитофоссилий верхнерифейского возраста [Шенфильд и др., 1980, 1982; Журавлева и др., 1969; Хоментовский и др., 1972; Стратотип рифея..., 1982; Решения..., 1983] и данным изотопии Sr и С [Хабаров, Вараксина, 2011]. Приведенные данные содержат большое количество образцов претерпевших значительные изменения, которые влекут за собой повышение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения. При этом, измерения изотопного состава стронция проводились на одноколлекторном масс-спектрометре старого поколения МИ1201-Т, точность измерения которого составляет пятый знак после запятой и средней ошибкой 0.00006 (2 σ), в то время как в современной хемотратиграфии кондиционными являются данные с точностью определения до шестого знака и ошибкой не превышающей 0.000020 (2 σ).

ГЛАВА 5. Изотопно-геохимические характеристики карбонатных пород дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа

Петрографическое изучение карбонатных пород дашкинской свиты показало, что большинство образцов имеют скрытокристаллическую

структуру, реже гранобластовую. Редко встречаются небольшие прожилки кальцита, кубики пирита, кварц.

Геохимическое изучение карбонатов дашкинской свиты (27 образцов) позволило выявить породы с наименее нарушенной изотопной системой, отражающей изотопный состав Sr среды седиментации. Разрез представлен известняками ($Mg/Ca \leq 0.1$). В 13 образцах доля нерастворимого остатка составляет от 20 до 45%. Состав нерастворимого вещества определён методом рентгенофазового анализа. Так, в нижней части разреза в основном присутствует кварц, реже Fe-Mg хлорит, полевые шпаты, слюды, в верхней части разреза роль хлоритов снижается и преобладающими, после кварца, становятся полевые шпаты.

Для нижней части разреза дашкинской свиты характерны более высокие содержания Fe (1700-15400 мкг/г) и Mn (250-950 мкг/г), в то время как содержания в верхней части разреза этих элементов ниже в 2-4 раза (1600-8400 мкг/г и 70-210 мкг/г, соответственно) (Рис.3). Вероятно, повышенное количество Fe в образцах из нижней части разреза определяется составом алюмосиликатной примеси, в особенности хлоритом, попавшим в анализируемый раствор.

Содержание Sr варьирует в широких пределах от 200 до 1120 мкг/г, при этом для нижней части характерны более высокие значения 340-1120 мкг/г со значительными экскурсами. В верхней части отмечается меньшая вариативность концентраций от 140 до 340 мкг/г. Для всех образцов установлена прямая корреляция отношений Fe/Sr, Mn/Sr и Mg/Ca ($R^2=0.75-0.93$). Для выяснения природы высоких концентраций Fe в карбонатных породах дашкинской свиты было проведено изучение минерального состава с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3LMU. Установлено, что Fe концентрируется в оксидах Fe, при этом основная масса кальцита, а также зерна доломита в порах не содержат железо. Незначительные содержания Fe отмечаются в доломитах в прослоях с пиритом. В образцах с терригенной примесью, представленной кварцем, полевым шпатом, апатитом и оксидом железа, карбонаты, в том числе доломиты, безжелезистые. Основываясь на данных распределения и концентрации Fe в минералах пород дашкинской свиты можно сделать вывод о первичноосадочной природе его повышенных содержаний, и соответственно, о ненарушенности Rb-Sr изотопной системы.

Значение $\delta^{18}O_{SMOW}$ варьирует от 20.6 до 27.1‰, при этом нижняя часть разреза характеризуется более выдержанным интервалом значений 24.6-25.7‰, в то время как для верхней части наблюдается большая вариативность 20.6-27.1‰ (Рис.3).

Таким образом, несмотря на то, что образцы дашкинской свиты не соответствуют критериям предложенным А.Б. Кузнецовым с соавторами (2003), при более детальном изучении установлено, что эти породы пригодны для целей Sr-изотопной хемотратиграфии. Для изотопных исследований были отобраны образцы с применением следующих лимитирующих значений: $Mn/Sr \leq 1.3$, $Fe/Sr \leq 18$, $\delta^{18}O_{SMOW} > 20\%$.

Изотопный состав С карбонатных пород дашкинской свиты варьирует от +3.7 до +4.4‰. Первичный изотопный состав Sr в них изменяется от 0.70566 до 0.70606, с экскурсом до 0.70621 в образцах с высокими отношениями Mn/Sr и Fe/Sr. В нижней части разреза происходит постепенное снижение от 0.70585 до 0.70580, затем идет положительный экскурс до 0.70586 с последующим снижением до 0.70566 сменяющийся положительным экскурсом до 0.70585. В верхней части разреза изотопный состав Sr демонстрирует больший разброс значений от 0.70571 до 0.70620. Наименьшие значения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ отражают состав воды в момент седиментации карбонатных пород, таким образом для верхней части разреза наиболее представительными являются пять образцов для которых изотопный состав Sr варьирует в интервале 0.7057-0.7059.

Сопоставление Sr-изотопных характеристик карбонатов дашкинской свиты с данными кривой вариации отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в палеоокеане показало, что полученные характеристики ($^{87}Sr/^{86}Sr$ отношение от 0.7056 до 0.7060) отвечают рифейскому временному интервалу - 1050-750 млн лет. Наиболее вероятным является интервал 1050-1000 млн лет, т.к. в неопротерозое Енисейский кряж представлял собой активную структуру, где широко проявлены магматизм и вулканизм кислого и основного составов, метаморфизм. Накопление же пород дашкинской свиты происходило в шельфовых обстановках пассивной окраины. Установлена идентичность изотопных характеристик пород дашкинской свиты с ранее изученными породами тунгусикской серии (отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ 0.7053 – 0.7061, $\delta^{13}C_{PDB}$ +3.2...+5.2‰) Енисейского кряжа [Вишневецкая и др., 2012] и следующими карбонатными последовательностями Северной Евразии: игниканской свитой лахандинской серии Учуро-Майского региона ($^{87}Sr/^{86}Sr$ 0.7058, $\delta^{13}C_{PDB}$ от -0.1 до +3.6‰) [Bartley et al., 2001], буровой свитой Туруханского поднятия (среднее значение $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношения 0.7055, $\delta^{13}C_{PDB}$ от +0.3 до +4.6‰) [Bartley et al., 2001], серия Литтл дал горы Маккензи Канады ($^{87}Sr/^{86}Sr$ 0.7055 до 0.7062, $\delta^{13}C_{PDB}$ от +0.3 до +5.7‰) [Halverson et al., 2007] (Рис.4). Таким образом, полученные данные указывают на рифейский возраст накопления этих отложений, вероятнее всего, на рубеже 1 млрд лет.

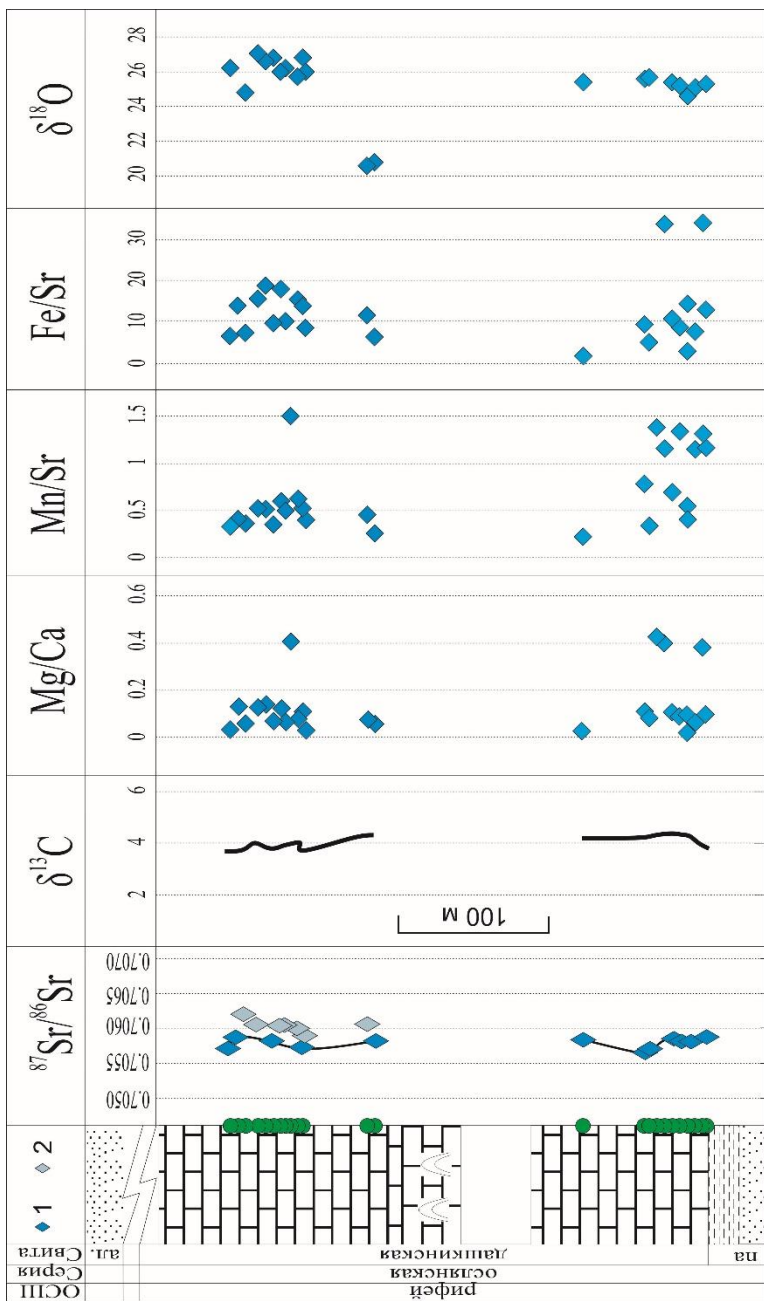


Рис.3 Распределение значений Mg/Ca, Mn/Sr и Fe/Sr и изотопный состав Sr, С и О для карбонатных отложений дашкинской свиты ослянской серии

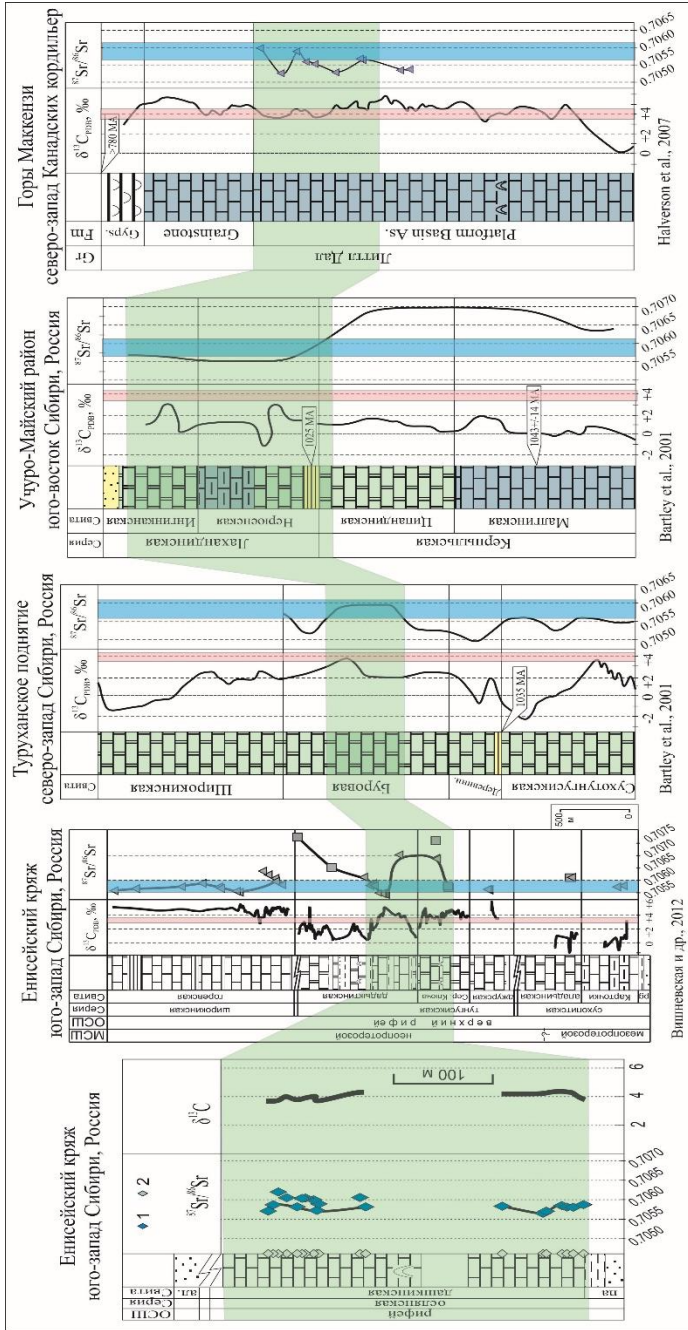


Рис.4 Корреляция значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения и $\delta^{13}\text{C}$ карбонатных пород дашкинской свиты с типовыми разрезами мира

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных петрографических и геохимических исследований карбонатных отложений маастахской и хатыспытской свит хорбусуонской серии Оленекского поднятия и дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа установлено, что эти породы не претерпели существенных постседиментационных преобразований и сохранили первичные изотопные характеристики, отражающие изотопный состав воды в палеоокеане во время их седиментации.

На основе данных Sr- и C- хеомстратиграфии установлено, что накопление карбонатных отложений дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа проходило в рифее, вероятно, на рубеже 1 млрд лет, но не моложе 750 млн лет. Изотопные характеристики и их вариации по разрезу дашкинской свиты хорошо коррелируют с таковыми в типовых разрезах неопротерозоя Сибирской платформы - Учуро-Майского региона и Туруханского поднятия.

Отложения хатыспытской свиты хорбусуонской серии Оленекского поднятия имеют достоверно установленный интервал седиментации - 550-560 млн лет. Это позволило в рамках данного исследования пополнить стандартную кривую вариаций изотопного стронция в воде палеоокеана на этот временной интервал, так как до настоящего времени полной летописи геохимических и изотопных данных не было. На основе U-Pb датирования детритовых цирконов из песчаников маастахской свиты и привлечения метода Sr- и C- хеомстратиграфии стало возможным уверенно утверждать о ранневендском, а не рифейском возрасте этой свиты.

Таким образом, проведенные геохимические и изотопные исследования позволили пополнить мировую базу данных изотопного состава воды палеоокеана в докембрии и решить несколько конкретных задач стратиграфии позднего докембрия Сибирской платформы.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вишневская И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., Киселева В.Ю., **Писарева (Ветрова) Н.И.** Sr-изотопные характеристики хорбусуонской серии венда Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // ДАН. 2013. Т. 449. №.3. С. 317–321

2. Vishnevskaya I., Letnikova E., **Pisareva (Vetrova) N.**, Proshenkin A. Chapter 18 – Chemostratigraphy of Neoproterozoic Carbonate Deposits of the Tuva–Mongolian and Dzabkhan Continental Blocks: Constraints on the Age, Glaciation and Sedimentation / in Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications, Edited by Mu. Ramkumar. 2015. P. 451-487

3. Vishnevskaya I.A., Letnikova E.F., **Vetrova N.I.**, Kochnev B.B., Dril S.I. Chemostratigraphy and detrital zircon geochronology of the neoproterozoickhorbusuonka group, northeastern Siberian platform // Gondwana Research. 2017. V.51. P. 255-271

Материалы конференций и тезисы докладов

1. Вишневская И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., **Писарева (Ветрова) Н.И.** Геохимические и изотопные особенности венд-кембрийских отложений Оленекского поднятия // Ленинградская школа литологии. Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного 100-летию со дня рождения Л.Б. Рухина (Санкт-Петербург, 25-29 сентября 2012 г.). Том II. Санкт-Петербург: СПбГУ. 2012. с. 52-54

2. **Писарева (Ветрова) Н.И.** Sr-изотопные характеристики венд-кембрийских карбонатных отложений Оленёкского поднятия (Арктика, Россия) //Материалы конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск: НГУ. 2012. С. 65

3. **Pisareva (Vetrova) N.I.** Geochemical features of the Vendian-Cambrian carbonate deposits of Olenek uplift (Arctic, Russia) //The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference. IGM&IPPG SB RAS.NSU: Novosibirsk. 2012. P. 199-200

4. **Писарева (Ветрова) Н.И.** Хемостратиграфия карбонатных пород севера Сибирской платформы: корреляция с разрезами ЦАСП // Материалы международной конференции «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск: НГУ. 2013. С. 73

5. **Писарева (Ветрова) Н.И.** Геохимия и изотопия (Sr, C, O) венд-кембрийских карбонатных отложений Оленекского поднятия //Материалы

XXV Всероссийской молодежной конференции "Строение литосферы и геодинамика". Иркутск: ИЗК СО РАН. 2013. С. 62-64

6. Писарева (Ветрова) Н.И., Вишневская И.А. Изотопный состав Sr воды палеоокеана 560-550 млн. лет назад // XX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова. М.: Акварель. 2013. С. 265-268 (ISBN 978-5-904787-31-6)

7. Vishnevskaya I., Pisareva (Vetrova) N., Kanygina N. Ediacaran carbonate sedimentation on Siberian platform and around it: strontium and carbon isotopic data // 10th Applied Isotope Geochemistry Conference Central European Geology. 2013. V. 56. № 2-3. P. 18-25

8. Вишневская И.А., Писарева (Ветрова) Н.И., Кочнев Б.Б. Изотопные характеристики венд-кембрийских карбонатных отложений Оленекского поднятия (Арктическая Сибирь) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 11. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2013. С. 56-58

9. Писарева (Ветрова) Н.И. Методические подходы Sr и C-изотопной хемотратиграфии на примере неопротерозойских карбонатных отложений Дзабханского микроконтинента // Виртуальные и реальные литологические модели. Материалы Всероссийской школы по литологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2014. С. 95-97 (ISBN 978-5-94335-106-1)

10. Вишневская И.А., Писарева (Ветрова) Н.И., Каныгина Н.А., Прошенкин А.И. Геохимия и изотопный состав Sr и C карбонатных отложений дашкинской свиты ослянской серии Енисейского кряжа // Виртуальные и реальные литологические модели. Материалы Всероссийской школы по литологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2014. С. 45-47 (ISBN 978-5-94335-106-1)

11. Vishnevskaya I., Pisareva (Vetrova) N., Kanygina N., Proshenkin A. Chemostratigraphy of early Neoproterozoic sedimentary rocks of Yenisei ridge (Siberia, Russia) // Geophysical Research Abstracts. V. 16. EGU2014-5044. 2014 EGU General Assembly 2014 (electronic edition)

Подписано в печать 16.10.2018 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60x84/16. Усл. Пч. л. 2
Тираж 100 экз. Заказ № 8024

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07