

Геохимические признаки участия морской воды в метаморфизме базитов сергеевского комплекса (Сихотэ-Алинь)

В. Т. Казаченко, Е. В. Перевозникова

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, г. Владивосток,
пр-т 100-летия Владивостоку, 159, e-mail: vkazachenko@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2025 г., принята к печати 17.10.2025 г.

Объектом исследований магматических пород являлись выходы в окрестностях сел Сергеевка, Владимиро-Александровское (Окраинско-Сергеевский террейн) и Каменка (Каменский аллохтон), объектом исследования яшм, марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд служили выходы в Ольгинском, Дальнегорском (Таухинский террейн) и Малиновском (Самаркинский террейн) рудных районах. *Цель.* Выявление событий в истории Сихотэ-Алиня, повлиявших на изменение геохимических параметров кембрийских (?) базитов сергеевского комплекса. *Задачи исследования* заключались в изучении петрографии, петрохимии и геохимии метабазитов сергеевского комплекса и метаморфизованных триасовых металлоносных осадков. *Методы.* Использованы методы гравиметрии и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, а также масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (для определения редких элементов). Применялись методы определения изотопного состава Nd, Pb и Sr. Диагностика минералов проводилась под микроскопом и подтверждалась определением состава на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. *Результаты.* Получены аналитические данные для метабазитов и метаультрабазитов сергеевского комплекса (породообразующие и редкие элементы, изотопные отношения Nd, Sr и Pb), изучены их минералогия и внутреннее строение. Получены аналитические данные для яшм (породообразующие и редкие элементы), марганцево-силикатных и силикатно-магнетитовых пород и руд (редкие элементы, изотопные отношения Nd) триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня. *Выводы.* Полученные материалы указывают на влияние диафореза на изменение геохимических характеристик метабазитов. Использование методов геохимии магматических и осадочных пород и хемостратиграфии позволило объяснить закономерное изменение парных значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Sm/Nd, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Y/Nb и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Zr/Y в метабазитах сергеевского комплекса до значений в металлоносных осадках триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня участием морской воды в метаморфических процессах. Судя по участию морской воды, отношению изотопов Sr в измененных породах и геологическим данным, диафорез сергеевских базитов проявился во время средне-позднеюрской аккреции.

Ключевые слова: метабазиты, сергеевский комплекс, геохимия, аккреция, диафорез, Сихотэ-Алинь

Geochemical evidence of seawater involvement in the metamorphism of Sergeevsky basites (Sikhote-Alin)

Valentin T. Kazachenko, Elena V. Perevoznikova

Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, 159 Vladivostok 100th Anniversary av.,
Vladivostok 690022, Russia, e-mail: vkazachenko@mail.ru

Received 16.06.2025, accepted 17.10.2025

Research subject. The igneous rocks examined in this study were collected from outcrops located in the vicinity of Sergeevka and Vladimiro-Alexandrovskoye (Okraïnsko-Sergeevsky terrane), as well as Kamenka (Kamensky allochthon), villages. The studied jaspers, manganese silicate rocks, and silicate-magnetite ores were sampled from outcrops within the Olginsky and Dalnegorsky ore regions (Taukha terrane) and the Malinovskiy ore region (Samarka terrane). *Aim.* To clarify the geological events in the evolution of the Sikhote-Alin region that determined changes in the geochemical parameters of the Cambrian (?) basites of the Sergeevsky complex. To that end, the petrography, petrochemistry, and geochemistry of the metabasites of the Sergeevsky complex and metamorphosed Triassic metalliferous sediments were studied. *Methods.* Gravimetry, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), and inductively coupled

Для цитирования: Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. (2026) Геохимические признаки участия морской воды в метаморфизме базитов сергеевского комплекса (Сихотэ-Алинь). *Литосфера*, **26**(2), 372-396. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-372-396>. EDN: LYLCOA

For citation: Kazachenko V.T., Perevoznikova E.V. (2026) Geochemical evidence of seawater involvement in the metamorphism of Sergeevsky basites (Sikhote-Alin). *Lithosphere (Russia)*, **26**(2), 372-396. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-372-396>. EDN: LYLCOA

plasma mass spectrometry (ICP-MS) were employed, the latter for the determination of trace and rare elements. The isotopic compositions of Nd, Pb, and Sr were also analyzed. Mineral identification was performed using optical microscopy and subsequently confirmed by compositional analysis with an X-ray spectral microanalyzer (JXA-8100). *Results.* Analytical data were obtained for metabasites and metaultrabasites of the Sergeevsky complex, including major and trace element compositions and Nd, Sr, and Pb isotopic ratios; their mineralogy and internal structures were also investigated. In addition, analytical data were acquired for jaspers (major and trace elements), as well as for manganese-silicate and silicate-magnetite rocks and ores (trace elements and Nd isotopic ratios) of the Triassic chert formation of the Sikhote-Alin. *Conclusion.* The obtained data indicate that metamorphic processes significantly influenced the geochemical characteristics of the metabasites. The integrated application of igneous and sedimentary geochemistry, in combination with chemostratigraphic analysis, made it possible to elucidate the systematic variation in paired parameters ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Sm/Nd, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Y/Nb, and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Zr/Y) in the metabasites of the Sergeevsky complex, trending toward values characteristic of metalliferous sediments of the Triassic chert formation of Sikhote-Alin. This trend is interpreted as evidence for seawater involvement in metamorphic processes. The involvement of seawater, supported by Sr isotopic ratios in the altered rocks and regional geological data, suggests that diaphoresis of the Sergeevsky basites occurred during Middle-Late Jurassic accretion.

Keywords: metabasites, Sergeevsky complex, geochemistry, accretion, diaphoresis, Sikhote-Alin

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам изменения магматических пород океанической коры в различных структурах дна океана и геодинамических обстановках посвящено много публикаций. Значительное их число касается проблемы серпентинизации ультрабазитов (Früh-Green et al., 2001; Силантьев, 2003; Scambelluri et al., 2004; Краснова, 2014), актуальность решения которой имеет особое значение в связи с вопросами происхождения древних стратиформных колчеданных, полиметаллических и иных месторождений и современных гидротермально-осадочных залежей (такого же состава) дна океанов (Богданов и др., 2002; Змиевский, 2017). Во многих работах рассмотрена проблема изменения габброидов в зонах субдукции в связи с образованием эклогитов и гранулитов (Früh-Green et al., 2001; Лю и др., 2019; Dietrich et al., 2024). Реже рассматриваются низкотемпературные метаморфические изменения этих пород при субдукционно-аккреционных процессах (Шулятин и др., 2012; Пейве и др., 2024). Как показано в данной работе, результаты подобных исследований могут быть использованы в качестве критериев участия морской воды в метаморфизме древних габброидов и (вместе с геологическими данными) индикаторов аккреционно-субдукционных событий в истории крупных геологических структур. Многие исследования посвящены важному в рамках данной статьи вопросу подвижности элементов при изменении магматических пород океанической плиты (Штейнберг и др., 1991; Чашухин, 2012), главным образом ультрабазитов, при их серпентинизации.

Использование диаграммы $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Sm/Nd и модифицированной диаграммы К.С. Конди Nb/Y-Zr/Y позволило получить данные, по которым кембрийские (?) породы сергеевского комплекса являются производными источника, близкого по составу

к примитивной мантии (BSE) (Казаченко, Перезвоникова, 2023). Вместе с тем было показано, что на изменение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и Sm/Nd в породах основного-среднего состава оказали влияние последующие геологические события. Целью данных исследований являлось выяснение таких событий в геологической истории Сихотэ-Алиня. Задачи заключались в изучении петрографии, петрохимии и геохимии метабазитов сергеевского комплекса и метаморфизованных триасовых металлоносных осадков.

Измененные породы основного и среднего состава, относимые к сергеевскому комплексу (далее – сергеевские метабазиты), слагают аллохтоны в Самаркинском террейне – фрагменте средне-позднеюрской аккреционной призмы (рис. 1). Они местами имеют гнейсовидную или полосчатую текстуру. По (Синица, 2004), гнейсовидная текстура образовалась при плутонообразовании, а по (Крук и др., 2018) – при метаморфизме в ордовике в условиях амфиболитовой фации. Известно, что Sm/Nd (и, соответственно, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) почти не изменяется при гипергенезе и метаморфизме – значительное фракционирование Sm и Nd зафиксировано лишь при гидротермальной проработке пород (Сергеев и др., 2015). Поэтому метаморфизмом без участия подвижной флюидной фазы, обеспечивавшей подвижность вещества, равно как и ассимиляцией осадочных или магматических образований, а также смешением магм (учитывая возрастные и геохимические особенности осадочных и магматических пород Сихотэ-Алиня) объяснить особенности изменения геохимических характеристик сергеевских метабазитов (в том числе и изотопных отношений Nd, Sr и Pb) невозможно. Таким событием в истории Сихотэ-Алиня мог быть диафторез, проявившийся вдоль тектонических нарушений. Метабазиты содержат зоны катаклаза и милонитизации, с которыми сочеталось развитие диафторических

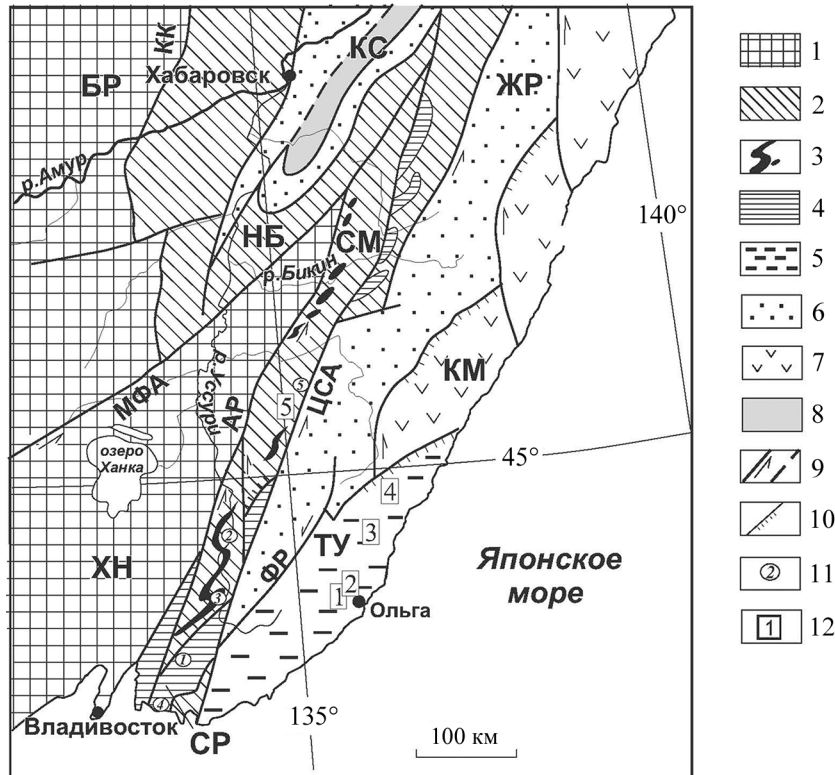


Рис. 1. Положение изученных объектов в Сихотэ-Алине. Тектоническая основа – по А.И. Ханчуку (Геодинамика..., 2006), с небольшими изменениями.

1 – континентальные массивы: Ханкайский (ХН), Буреинский (БР); 2 – юрские террейны (фрагменты аккреционных призм): СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский; 3 – аллохтонные тектонические пластины пород калиновского комплекса; 4 – Украинско-Сергеевский террейн (СР) и его фрагменты, включенные в структуры юрской аккреционной призмы; 5–8 – меловые террейны-фрагменты: 5 – неокомовой аккреционной призмы (ТУ – Таухинский), 6 – приконтинентального спредингового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский), 7 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский), 8 – альбской аккреционной призмы (КС – Киселевско-Маноминский); 9 – левые сдвиги, в том числе: КК – Куканский, АР – Арсеньевский, МФА – Мишань-Фушуньский (Алчанский), ЦСА – Центральный Сихотэ-Алинский, ФР – Фурмановский; 10 – надвиги; 11 – места отбора образцов: 1, 2 – окрестности с. Сергеевка (1) и Каменка (2) (сергеевский и авдокимовский комплексы), 3 – окрестности с. Верхняя Бреевка (Бреевский карьер, калиновский комплекс), 4 – окрестности с. Владимиро-Александровское (Владими́ро-Александровский перидотитовый массив), 5 – окрестности с. Дальний Кут (массив Дальнего Кута); 12 – изученные площади с выходами триасовых контактово-метаморфизованных металлонесных осадков: 1 – Широкопаднинская, 2 – Мокрушинская, 3 – Высокогорская, 4 – Садовая, 5 – Горная.

Fig. 1. Position of the studied objects in the Sikhote-Alin. Tectonic base after A.I. Khanchuk (Geodynamics..., 2006) with little changes.

1 – ХН – Khanka massif, БР – Bureya massif; 2 – Jurassic terranes (fragments of accretionary prisms): СМ – Samarka, НБ – Nadankhada-Bikin; 3 – allochthonous tectonic plates of rocks of the Kalinovsky complex; 4 – Okraïnsko-Sergeevsky terrane (СР) and its fragments included into the structures of the Jurassic accretionary prism; 5–8 – Cretaceous terranes – fragments of: 5 – Neocomian accretionary prism (ТУ – Taukha), 6 – the near-continent spreading turbidite basin (ЖР – Zhuravlevsko-Amursky), 7 – the Barremian-Albian island-arc system (КМ – Kemsky), 8 – the Albian accretionary prism (КС – Kiselevsko-Manominsky); 9 – left-lateral faults including: КК – Kukansky, АР – Arsenevsky, МФА – Mishan-Fushunsky (Alchansky), ЦСА – Central Sikhote-Alin, ФР – Furmanovsky; 10 – thrusts; 11 – sampling sites: 1 – the suburbs of the village of Sergeevka (rocks of the Sergeevsky and Avdokimovsky complexes), 2 – the suburbs of the village of Kamenka (Sergeyevsky and Avdokimovsky complexes), 3 – the suburbs of the village of Verkhnyaya Breevka (Breevsky quarry, Kalinovsky complex), 4 – the suburbs of the village of Vladimiro-Alexandrovskoe (Vladimiro-Alexandrovsky peridotite massif), 5 – the suburbs of the village of Dalny Kut (Dalny Kut massif); 12 – the studied areas with the exposures of the Triassic contact-metamorphosed metalliferous sediments: 1 – Shirokopadninskaya area, 2 – Mokrushinskaya area, 3 – Vysokogorskaya area, 4 – Sadovaya area, 5 – Gornaya area.

минералов (серицита, хлорита, пренита, соссюрита, цоизита, эпидота и карбоната) (Синица, 2004). Кливаж милонитизированных габброидов соориентирован с кливажом филлитизированных сло-

стых пород от D до J, развитых вблизи габброидных массивов, так что диафторез и сопутствующая деформация проявились не раньше позднего мезозоя (Синица, 2004). Следовательно, они могли быть

связаны с известным событием в истории Сихотэ-Алиня – образованием Самаркинской аккреционной призмы.

Связь диафтореза с аккрецией и, таким образом, с серпентинизацией ассоциирующих с метабазитами ультраосновных пород сергеевского комплекса и образованием меланжа в основаниях аллохтонов предполагает участие в реакциях морской воды. Основным подходом, позволившим доказать участие морской воды в диафторезе и ее средне-позднеюрский возраст, являлось сопоставление (на основе принципов хеостратиграфии) геохимических характеристик метабазитов сергеевского комплекса и наиболее близких по времени образования к началу аккреции хемогенно-биогенных отложений Сихотэ-Алиня, а также использование Sr-кривой. Контактво-метаморфизованными аналогами хемогенно-биогенных отложений являются яшмы, марганцево-силикатные (сложенные главным образом силикатами Mn) породы и силикатно-магнетитовые руды триасовой кремневой формации. Их протолиты были металлоносными осадками (обогащенными Mn и Fe биогенными кремнистыми илами) примыкавших к островам акваторий (Казаченко и др., 2016), по изотопному составу и отношениям редких элементов (в силу их хемогенно-биогенной природы) сопоставимыми с морской водой. Поэтому важной задачей исследования являлось изучение геохимии REE, Y, Nb, Zr и изотопного состава Nd, Pb и Sr в породах сергеевского комплекса, а также в яшмах, марганцево-силикатных породах и силикатно-магнетитовых рудах триасовой кремневой формации.

Основным доказательством участия морской воды в диафторезе в статье является совпадение парных значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-\text{Sm}/\text{Nd}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-\text{Y}/\text{Nb}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-\text{Zr}/\text{Y}$ (и, соответственно, значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, Sm/Nd , Y/Nb и Zr/Y) в наиболее измененных образцах сергеевских метабазитов и метаморфизованных триасовых металлоносных осадках. Сюда же следует добавить и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, значения которого (вместе с геологическими данными) указывают на соответствие времени диафтореза (определенного по стронциевой кривой) времени аккреции. Предположение о случайном совпадении значений такого числа геохимических параметров генетически не связанных друг с другом пород (в нашем случае они связаны через состав морской воды) лишено всяких оснований.

Тренды точек состава метабазитов сергеевского комплекса на использованных диаграммах являются линиями смешения вещества двух источников, одним из которых были породы, по геохимическим параметрам аналогичные наименее измененным ультрабазитам Владимиро-Александровского массива (т. е. породам сергеевского комплекса), а другим – морская вода, параметры которой “запечатлены” в метаморфизованных триасовых метал-

лоносных отложениях Сихотэ-Алиня. Это обстоятельство потребовало приведения в статье краткой характеристики геологической позиции, минералогии и геохимии не только метабазитов, но и метаультрабазитов сергеевского комплекса и метаморфизованных триасовых металлоносных отложений.

Фрагменты триасовой кремневой формации во время средне-позднеюрской и позднеюрской-раннемеловой аккреций вместе с фрагментами палеозойских и триасовых рифов и аллохтонами палеозойских пород сергеевского и калиновского комплексов включены в состав Самаркинского (и его аналога – Наданьхада-Бикинского) и Таухинского террейнов соответственно.

Объектами исследований магматических пород являлись выходы метабазитов в окрестностях с. Сергеевка и метаультрабазитов вблизи с. Владимиро-Александровское (Окраинско-Сергеевский террейн), а также метабазитов в окрестностях с. Каменка Чугуевского района (Каменский аллохтон) (см. рис. 1). Объектами исследования марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд являлись их коренные выходы в Ольгинском и Дальнегорском (Таухинский), а также в Малиновском (Самаркинский террейн) рудных районах.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ИЗУЧЕННЫХ ПОРОД

Метабазиты слагают аллохтонные пластины в Самаркинской террейне (см. рис. 1). На контактах с ними вмещающие породы превращены в сланцы различного состава или в тектонический меланж. В основании пластин присутствует тектонический серпентинитовый меланж мощностью до 150–200 м (Мазарович, 1985).

Самым крупным аллохтоном является Окраинско-Сергеевский террейн, образующий тектонические покровы и клиппы на Самаркинском и вместе с ним смятый в складки. Значительную его часть занимают метабазиты сергеевского и рвущие их позднекембрийские-раннеордовикские граниты таудеминского комплексов (Ханчук, 2000). Тела метабазитов содержат тектонические блоки (размером до 1 × 3 км) метаморфизованных пород авдокимовского комплекса: амфиболитов, плагиоклаз-амфиболовых и кварц-плагиоклазовых сланцев, кальцифиров (Коваленко, Давыдов, 1991) и др., сохранивших структурные признаки габбро или базальтов (Казаченко, Перевозникова, 2023). На метабазитах залегают верхнедевонские туфы (Синица, 2004), а на гранитах – пермские вулканические и осадочные отложения (Ханчук, 2000).

Измененные породы основного и среднего состава сергеевского комплекса считались метагаббро (Коваленко, Давыдов, 1991) или амфиболовыми габбро- и диоритогнейсами (Ханчук, 2000). По составу их относили к ряду “габбро-кварцевый

диорит” (Синица, 2004), однако он больше отвечает габбро-монцогаббро-диорит-монцонитовой серии (рис. 2). Эти породы содержат зоны дробления и ретроградного метаморфизма фации зеленых сланцев (Крук и др., 2018).

Возраст метабазитов составляет, по разным оценкам, ≈ 338 – 364 млн лет (К-Аг-метод) (Берснев, 1974), 457 – 485 млн лет (К-Аг-метод) (Никогосян, 1973), 2.1 млрд лет (Rb-Sr метод по валовому составу пород) (Коваленко, Давыдов, 1991), 517.2 млн лет (возраст цирконов, LA-ICP-MS метод) (Крук и др., 2018).

Ультраосновная часть сергеевского комплекса представлена выходами метаяльтрабазитов в окрестностях с. Владимиро-Александровское (так называемый Владимиро-Александровский перидотитовый массив), ключа Кириенкова и серпентинитового меланжа на юге Сихотэ-Алиня (Мазарович, 1985). Их принадлежность к сергеевскому комплексу согласуется с приведенными ниже изотопными данными.

Согласно (Государственная..., 2011), Владимиро-Александровский массив площадью $(0.1$ – $0.7) \times 3$ км является тектонической пластиной и сложен в основном перидотитами, пироксенитами,

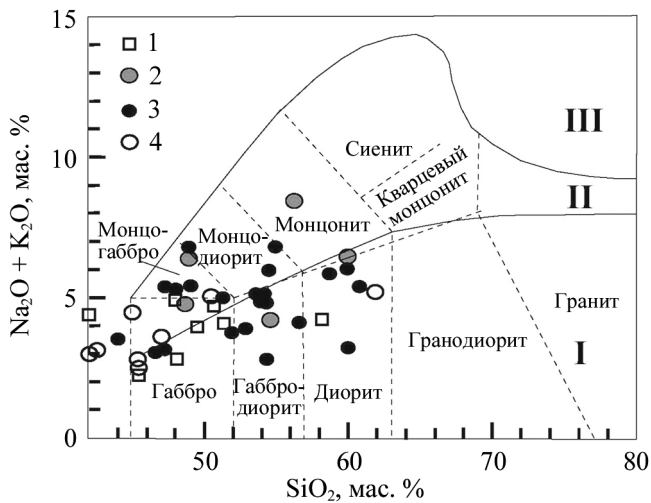


Рис. 2. Положение точек состава метабазитов сергеевского комплекса на диаграмме (Le Maitre et al., 2002).

1 – (Коваленко, Давыдов, 1991); 2 – (Синица, 2004); 3 – (Крук и др., 2018); 4 – данная работа. I–III – ряды щелочности: нормальной щелочности (I), умеренно-щелочной (II) и щелочной (III).

Fig. 2. The position of structure points of the metabasites of the Sergeevsky complex on the diagram (Le Maitre et al., 2002).

1 – (Kovalenko, Davydov, 1991); 2 – (Sinita, 2004); 3 – (Kruk et al., 2018); 4 – this work. I–III the series of alkalinity: normal alkalinity (I), average alkaline (II) and alkaline (III).

троктолитами и габбро. Возраст пород (К-Аг метод) составляет 563 и 572 млн лет. По Г.А. Белову и Г.А. Вачаеву (Мазарович, 1985), на глубине он представляет собой “переслаивание” трещиноватых каолинизированных и серпентинизированных пород и серой тектонической глины с обломками перидотитов.

Серпентинитовый меланж состоит из тальцитов, серпентинитов, амфиболитов, глыб серпентинизированных пироксенитов, серпентинизированных, оталькованных или карбонатизированных дунитов и других пород (Мазарович, 1985). Серпентиниты по главным особенностям распределения REE близки к породам Владимиро-Александровского массива (рис. 3д, е).

Триасовая кремневая формация сложена кремнями, аргиллитами, мергелями, глинистыми и кремнистыми известняками. Нижняя часть (оленек–средний анизий) обогащена прослоями глинистых и углеродистых разностей, а верхняя сложена светло-серыми кремнями. В основании последней присутствуют кремнисто-родохрозитовые, марганцево-силикатные породы и силикатно-магнетитовые руды. Они вместе с яшмами слагают общую пачку или сменяющие друг друга по простиранию пластовые и линзообразные тела мощностью десятки см – первые м, протяженностью десятки–первые сотни м. Возраст яшм формации – поздний анизий–ладин (Волохин и др., 2003). Вышележащие кремни относятся к карнию и норю.

Марганцево-силикатные породы занимают стратифицированное (одинаковое на всех изученных площадях) положение в триасовом разрезе. На поверхности их выходы группируются в серии линейных зон протяженностью до 4.3 км и более, маркируя выходы смятого в складки горизонта.

Выходы метаморфизованных триасовых металлоносных осадков и яшм изучены на Горной (Самаркинский), Широкопаднинской, Мокрушинской и Садовой (Таухинский террейн) площадях (см. рис. 1). На Высокогорской площади (Таухинский террейн) известны только яшмы и кремнисто-родохрозитовые породы. Марганцево-силикатные породы встречаются вблизи гранитоидных интрузий Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса и Хунгари-Татибинского интрузивного комплекса, с удалением от которых сменяются кремнями с дисперсным родохрозитом. Одинаковое положение марганцево-силикатных пород в триасовых разрезах Таухинского и Самаркинского террейнов свидетельствует о синхронном накоплении исходных осадков в едином осадочном бассейне.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение породообразующих элементов и потерь при прокаливании (п. п. п.) в магматических породах (табл. 1) выполнено в лаборатории

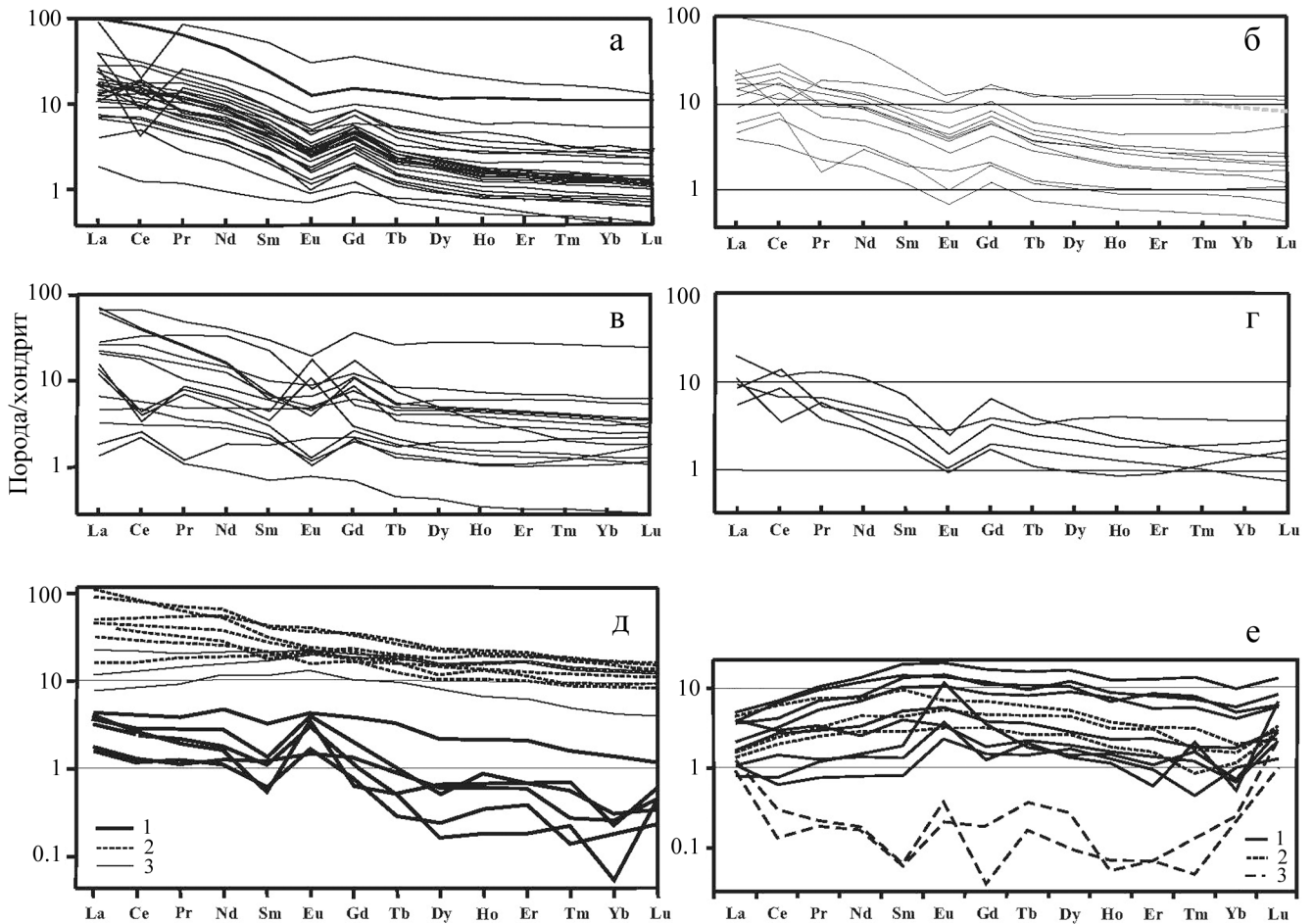


Рис. 3. REE-спектры пород и руд Сихотэ-Алия.

а – яшмы Широкопаднинской площади; б – марганцево-силикатные породы Горной площади; в – марганцево-силикатные породы Широкопаднинской площади; г – силикатно-магнетитовые руды Широкопаднинской площади; д – метaulтрабазиты Владимиро-Александровского массива (1), metabasites сергеевского (2) и авдокимовского (из включений в сергеевских) (3) комплексов; е – метaulтрабазиты Бреевского аллохтона (калиновский комплекс) (1) и массива Дальнего Кута (2) (авдокимовский комплекс?); серпентиниты бухты Мелководной (сергеевский комплекс) (3). Для нормирования содержания REE в изученных породах по хондритам использованы данные (Evensen et al., 1978). Исходные данные для построения спектров приведены в табл. 2–6 и (Казаченко, Перевозникова, 2023).

Fig. 3. REE-spectrum of the rocks and ores of the Sikhote-Alin.

а – jaspers of the Shirokopadninskaya area; б – manganese-silicate rocks of the Gornaya area; в – manganese-silicate rocks of the Shirokopadninskaya area; г – silicate-magnetite ores of the Shirokopadninskaya area; д – metaultrabasites of the Vladimiro-Alexandrovsky massif (1), metabasites of Sergeevsky (2) and Avdokimovsky (from inclusions in Sergeevsky) complexes (3); е – metaultrabasites (Breevsky allochthon, Kalinovsky complex) (1) and the Dalny Kut massif (2) (Avdokimovsky complex?); serpentinites of the Melkovodnaya bay (Sergeevsky complex) (3). Data (Evensen et al., 1978) were used for normalized the REE content in the studied rocks for chondrites. The original data for constructing the spectra are given in Tables 2–6 and (Kazachenko, Perevoznikova, 2023).

аналитической химии ДВГИ ДВО РАН методами гравиметрии (SiO_2 , H_2O и п. п. п.) и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500 Duo, Thermo Scientific, США (TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5). Особенность пробоподготовки – сплавление навески с LiBO_2 . Редкие элементы в магматических породах (табл. 2) определялись там же методом масс-спектрометрии с индук-

тивно-связанной плазмой на спектрометре Agilent 7500 с (Agilent Technologies, США). Особенностью пробоподготовки являлось сплавление навески с LiBO_2 . Внутренними стандартами при измерениях были In и Bi при конечной концентрации их в растворе 10 мг/т. Для контроля качества применялись стандарты: JG-3, JB-3, JA-2 Геологической службы Японии и СГ-3 (ГСО № 3333-85), СТ-2 А (ГСО № 8671-2005), Россия. Относительная погрешность

Таблица 1. Химический состав пород сергеевского комплекса, мас. %

Table 1. Chemical composition of the rocks of the Sergeevsky complex, wt %

№ п. п.	Проба	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	П. п. п.	Сумма
1	C-10-08-Д	46.90	1.21	16.60	10.60	0.21	6.75	8.85	3.29	0.38	0.24	0.05	4.50	99.57
2	C-10-09-Б	50.90	1.31	12.90	7.99	0.17	3.63	8.85	3.08	1.84	0.20	0.05	8.70	99.61
3	C-10-12В	45.10	1.56	18.09	11.79	0.17	6.72	9.01	3.26	1.11	0.12	He обн.	2.80	99.72
4	C-10-18	45.60	1.25	17.15	13.59	0.18	4.74	10.42	2.44	0.41	0.07	0.25	4.30	100.40
5	C-10-26-А	45.78	1.34	15.95	10.91	0.20	6.45	15.34	2.04	0.26	0.45	0.03	1.51	100.26
6	C-10-26-Б	42.62	1.84	21.46	11.08	0.17	4.72	12.31	2.47	0.66	0.63	0.05	1.61	99.62
7	C-10-12Д	41.50	1.68	23.26	7.57	0.08	7.00	12.09	1.80	1.22	0.03	0.40	3.60	100.23
8	Л-10-2В	51.20	1.14	23.07	6.52	0.13	1.95	7.68	5.21	1.26	0.31	0.20	1.75	100.42
9	Л-10-2Г	50.52	1.39	21.12	7.48	0.15	2.03	8.33	5.63	0.55	0.42	0.30	2.50	100.41
10	ВА-1	37.60	0.32	10.91	12.67	0.15	20.96	5.99	0.47	0.08	0.02	0.72	7.50	97.40
11	ВА-4	38.35	0.09	16.90	10.19	0.13	15.01	9.12	0.84	0.23	0.02	0.52	6.31	97.71
12	ВА-6	36.87	0.05	10.41	13.16	0.16	23.78	5.37	0.08	0.01	0.02	0.43	8.89	99.23
13	ВА-11	35.66	0.08	3.4	16.61	0.22	31.89	1.48	0.16	0.02	0.03	0.95	9.30	99.80
14	ВА-12	40.20	0.02	29.77	2.73	0.03	1.98	19.37	0.89	0.11	0.03	0.20	4.40	99.73
15	ВА-13	39.81	0.09	24.38	7.35	0.09	6.96	14.32	0.97	0.24	0.02	0.25	4.80	99.28

Примечание. 1–7 – метабазиты (с. Сергеевка); 8, 9 – метабазиты (с. Каменка); 10–15 – породы Владимиро-Александровского массива. Все Fe принято за Fe⁺³. Аналитики: Н.В. Зарубина, Г.А. Горбач, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало, В.Н. Каминская.

Note. 1–7 – metabasites (Sergeevka village); 8, 9 – metabasites (Kamenka village); 10–15 – rocks of the Vladimiro-Alexandrovsky massif. All Fe is assumed to be Fe⁺³. Analysts: N.V. Zarubina, G.A. Gorbach, E.A. Tkalina, N.V. Khurkalo, V.N. Kaminskaya.

составляет 5–15% (для Hf – 15–20%). Пределы обнаружения, г/т: Y, Nb, La, Ce – 0.01, Zr – 0.02; Pr, Sm, Eu, Tb, Er, Yb, Lu – 0.002; Nd – 0.005; Gd, Ho, Tm – 0.003; Dy – 0.001; Hf – 0.004; Cr – 0.9; Co – 0.03; Ni, Zn – 0.3; Cu – 0.1. Редкие элементы в яшмах, марганцево-силикатных породах и силикатно-магнетитовых рудах (табл. 3–5) определены в ХИАЦ ИТИГ методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICP-MS Elan DRC II Perkin Elmer (США).

Пробоподготовка и измерения изотопного состава Nd (см. табл. 2, 4, 5) выполнены в Геологическом институте Кольского научного центра РАН. Анализы выполнялись на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) в статическом двухленточном режиме с использованием рениевых и танталовых лент. Среднее значение отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте La Jolla за периоды измерений составило 0.511835 ± 18 (N = 15). Погрешность в отдельном анализе не превышала 0.004%. Холостое внутрилабораторное загрязнение составляло 0.3 нг, а точность определения концентрации – ±0.5%. Изотопные отношения нормализованы по ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 и пересчитаны на принятую величину ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте La Jolla – 0.511860.

Подготовка проб к анализу и измерения изотопного состава Pb (табл. 6) на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT261 в режиме одновременной регистрации ионных токов с погрешностью внутри опыта 0.01% (2σ) выполнены в Институте геологии и геохронологии до-

кембрия РАН (г. Санкт-Петербург). Измерения проводились в одноленточном режиме на рениевых испарителях с использованием силикатного эмиттера в смеси с H₃PO₄. Уровень лабораторного загрязнения не превышал 0.1 нг. Поправка изотопных отношений на фракционирование выполнялась по методике двойного изотопного разбавления с использованием трассера ²³⁵U-²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb. Ошибки измерения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb по результатам параллельных анализов BCR-1 не превышают 0.03, 0.03 и 0.05% соответственно.

Пробоподготовка и определение изотопного состава Sr (см. табл. 6) проводились там же на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре Triton. Воспроизводимость результатов определения концентраций Sr, вычисленная из многократных анализов стандарта BCR-1, составляла ±0.5%, а величина холостого опыта – 0.2 нг. По 6 измерениям получены следующие значения: (Sr) = 336.7 мкг/г, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.705036 ± 22. Воспроизводимость изотопных анализов контролировалась по стандарту SRM-987. За время 10 измерений ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в нем составляло 0.710241 ± 15 (2σ). Изотопный состав Sr нормализован по величине ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.37521 и приведен к табличному значению стандарта SRM-987 – ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710240.

Диагностика минералов проводилась под микроскопом и подтверждалась определением их составов на приборе JXA-8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) INCAx-sight. Аналитическая

Таблица 2. Содержания редких элементов (г/г)* и изотопный состав Nd** в породах сергеевского комплекса
Table 2. Contents of rare elements (ppm)* and the isotopic composition of Nd** in the rocks of the Sergeevsky complex

Элемент	Пробы														
	C-10-09-Б 1	C-10-12-В 2	C-10-12-Д 3	C-10-18 4	C-10-26-А 5	C-10-26-Б 6	C-10-08-Д 7	Л-10-2-В 8	Л-10-2-Г 9	ВА-1 10	ВА-4 11	ВА-6 12	ВА-11 13	ВА-12 14	ВА-13 15
Y	28.11	21.35	11.88	15.02	37.24	36.79	18.42	21.06	20.79	3.69	1.06	0.57	1.09	0.41	1.15
Zr	191.90	32.33	14.77	82.34	152.20	69.64	52.54	803.20	519.70	9.92	4.13	2.05	2.07	2.13	4.70
Nb	20.62	4.53	1.01	2.71	7.30	4.67	3.89	3.44	4.54	0.46	0.18	0.14	0.15	0.14	0.20
La	28.33	11.58	1.94	11.64	22.99	12.69	11.10	10.32	15.67	1.06	0.83	0.45	0.40	1.04	1.05
Ce	55.71	28.00	5.48	20.99	51.31	34.02	24.16	24.96	33.56	2.72	1.62	0.79	0.81	1.74	1.88
Pr	6.19	4.08	0.93	2.48	7.10	5.42	3.21	3.72	4.39	0.39	0.21	0.13	0.11	0.19	0.28
Nd	25.14	18.55	5.56	10.25	32.10	26.91	13.77	17.35	19.29	2.31	0.88	0.54	0.62	0.80	1.37
Sm	5.05	4.40	1.79	2.20	6.62	6.79	2.83	4.01	4.06	0.52	0.18	0.09	0.18	0.09	0.21
Eu	1.28	1.36	0.84	0.83	2.12	2.41	1.34	2.12	2.18	0.26	0.19	0.10	0.09	0.22	0.24
Gd	5.58	4.46	2.14	2.58	7.32	7.37	3.62	3.99	4.90	0.80	0.23	0.16	0.28	0.14	0.46
Tb	0.70	0.63	0.37	0.43	1.13	1.04	0.47	0.62	0.64	0.13	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04
Dy	4.21	3.09	1.97	2.12	5.73	5.80	2.69	3.18	3.41	0.57	0.17	0.06	0.15	0.04	0.14
Ho	0.93	0.74	0.39	0.44	1.21	1.29	0.60	0.73	0.72	0.13	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05
Er	2.35	1.89	1.07	1.56	3.55	3.37	1.65	2.17	2.10	0.36	0.12	0.07	0.10	0.03	0.12
Tm	0.36	0.23	0.13	0.21	0.45	0.43	0.22	0.24	0.25	0.04	0.02	0.004	0.01	0.01	0.02
Yb	2.20	1.63	0.71	1.18	2.74	2.57	1.47	1.79	1.64	0.23	0.05	0.03	0.04	0.01	0.04
Lu	0.31	0.25	0.11	0.18	0.43	0.35	0.22	0.22	0.28	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512518 ± 10	0.512435 ± 5	0.512554 ± 14	0.512407 ± 9	0.512466 ± 10	0.512335 ± 16	0.512424 ± 4	0.512575 ± 11	0.512547 ± 10	0.512596 ± 17	0.512664 ± 10	0.512510 ± 18	0.512646 ± 15	0.512464 ± 18	0.512562 ± 14

Примечание. 1–15 – см. табл. 1. * Аналитики: Н.В. Зарубина, Ю.М. Иванова, М.Г. Блохин. ** Ответственные исполнители: Т.Б. Баянова, Е.В. Макарова.

Note. 1–15 – see Table 1. * Analysts: N.V. Zarubina, Yu.M. Ivanova, M.G. Blokhin. ** Responsible performers: T.B. Bayanova, E.V. Makarova.

Таблица 3. Содержание REE в яшмах Широкопаднинской площади, г/т

Table 3. Content of REE in jaspers of the Shirokopadninskaya area, ppm

Элемент	Пробы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
La	6.43	2.54	4.70	4.87	3.57	4.55	4.10	7.16	9.10	3.35	5.54	4.10
Ce	12.90	5.48	15.43	13.23	9.45	12.81	9.59	16.03	12.69	9.30	10.51	16.93
Pr	1.59	0.58	1.14	1.21	1.01	1.17	0.98	1.88	1.87	0.86	1.46	1.14
Nd	6.86	2.37	4.67	4.94	4.19	4.76	3.87	7.49	6.70	3.47	5.77	4.81
Sm	1.41	0.47	0.96	0.96	0.90	0.96	0.74	1.47	1.16	0.70	1.10	1.06
Eu	0.28	0.10	0.21	0.23	0.18	0.21	0.16	0.27	0.21	0.15	0.22	0.26
Gd	1.72	0.56	1.25	1.21	1.09	1.22	0.91	1.57	1.26	0.88	1.18	1.44
Tb	0.19	0.06	0.13	0.12	0.12	0.13	0.10	0.15	0.13	0.10	0.13	0.15
Dy	1.13	0.36	0.85	0.63	0.66	0.71	0.57	0.82	0.71	0.57	0.73	0.83
Ho	0.24	0.07	0.17	0.12	0.13	0.13	0.11	0.15	0.13	0.11	0.13	0.15
Er	0.67	0.21	0.52	0.33	0.34	0.36	0.28	0.39	0.35	0.30	0.36	0.42
Tm	0.09	0.03	0.08	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06
Yb	0.59	0.18	0.50	0.33	0.31	0.32	0.23	0.32	0.32	0.27	0.32	0.36
Lu	0.09	0.03	0.07	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05

Элемент	Пробы											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
La	0.67	6.24	9.16	13.64	1.48	5.90	4.27	2.67	6.51	10.26	4.58	2.59
Ce	1.20	14.40	17.39	30.57	4.64	8.62	9.98	6.25	14.28	27.82	19.50	6.41
Pr	0.16	1.56	2.40	3.13	0.38	1.21	0.98	0.67	1.68	2.70	1.43	0.69
Nd	0.66	5.96	9.97	11.29	1.49	4.31	3.84	2.65	6.50	10.55	5.65	2.62
Sm	0.17	1.18	2.14	2.00	0.30	0.75	0.73	0.51	1.30	2.20	1.18	0.51
Eu	0.06	0.22	0.46	0.37	0.08	0.14	0.14	0.11	0.24	0.45	0.22	0.08
Gd	0.28	1.37	2.55	2.28	0.36	0.83	0.89	0.61	1.43	2.55	1.65	0.56
Tb	0.04	0.15	0.31	0.23	0.04	0.09	0.09	0.07	0.15	0.28	0.13	0.07
Dy	0.28	0.75	1.68	1.17	0.22	0.44	0.47	0.36	0.79	1.40	0.68	0.38
Ho	0.05	0.14	0.31	0.22	0.04	0.08	0.09	0.07	0.14	0.27	0.12	0.07
Er	0.13	0.37	0.84	0.67	0.12	0.22	0.25	0.19	0.40	0.70	0.34	0.19
Tm	0.02	0.05	0.11	0.10	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.09	0.04	0.03
Yb	0.10	0.33	0.64	0.69	0.11	0.20	0.21	0.17	0.34	0.61	0.33	0.16
Lu	0.01	0.05	0.09	0.11	0.02	0.03	0.03	0.02	0.05	0.09	0.05	0.02

Примечание. Аналитики: Д.В. Авдеев, Л.С. Боковенко.

Note. Analysts: D.V. Avdeev, L.S. Bokovenko.

погрешность не превышала: 1) при концентрациях элемента от 1 до 5 мас. % – ± 10 отн. %; 2) от 5 до 10 мас. % – ± 5 отн. %; 3) свыше 10 мас. % – ± 2 отн. %. Предел обнаружения в зависимости от элемента изменялся от 0.04 до 0.1 мас. %. Для обеспечения электропроводимости применялось графитовое напыление.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа базируется на результатах анализа и обобщения новых и частично опубликованных ранее геологических, минералогических и геохимических материалов по породам сергеевского комплекса, а также яшмам и контактово-метаморфизованным металлоносным осадкам триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня.

Магматические породы

Получены аналитические данные для метабазитов и метаультрабазитов сергеевского комплекса (породообразующие и редкие элементы, изотопные отношения Nd, Sr и Pb) и изучены их минералогия и внутреннее строение.

Петрография, петрохимия и минералогия метабазитов сергеевского комплекса рассматривались в (Коваленко, Давыдов, 1991; Сеница, 2004; и др.). Из-за метаморфизма их диагностика по минеральному составу затруднительна. Изученные нами образцы сложены в основном измененным плагиоклазом (до 65 мол. % An) и паргаситом с включениями апатита и титанита. Паргасит вдоль трещин замещен хлоритом. При высокой степени изменения в нем присутствуют включения ильменита и (вдоль

Таблица 4. Содержание редких элементов (г/т)* и изотопный состав Nd** в марганцево-силикатных породах Горной площади
 Table 4. Content of rare elements (ppm)* and isotopic composition of Nd** in manganese silicate rocks of the Gornaya area

Элемент	Пробы																	
	ЭВ-01-58	ЭВ-06-1	ЭВ-06-2	ЭВ-06-3	ЭВ-06-4	ЭВ-06-5	ЭВ-06-6	ЭВ-06-7	ЭВ-06-8	ЭВ-06-9	ЭВ-06-10	ЭВ-06-11	ЭВ-06-12	ЭВ-06-13	ЭВ-06-14	ЭВ-06-15		
Y	4.56	2.87	3.93	4.47	4.53	1.47	4.46	3.61	4.71	2.86	3.86	3.60	4.01	7.88	3.45	2.01		
Zr	8.76	4.96	7.89	9.68	5.41	2.86	9.95	7.95	7.19	4.80	8.58	5.72	7.22	10.54	5.50	4.53		
Nb	0.71	0.79	1.59	0.79	1.43	0.25	0.96	0.79	1.18	0.56	0.91	0.84	0.87	2.36	0.59	0.41		
La	6.30	3.39	4.87	5.55	2.78	2.15	4.78	3.70	3.71	2.89	4.60	3.17	4.53	7.94	2.31	2.02		
Ce	16.18	12.91	19.30	19.13	10.41	7.68	18.58	13.48	17.73	9.33	19.36	13.33	16.74	27.63	11.19	7.54		
Pr	1.81	0.98	1.69	1.32	0.62	0.23	1.02	0.75	0.86	0.54	1.17	1.01	1.38	2.13	0.80	0.60		
Nd	7.78	4.55	6.63	6.74	3.89	2.17	5.48	4.47	5.23	3.59	5.93	4.65	6.31	9.44	3.89	2.80		
Sm	1.65	1.06	1.43	1.46	0.91	0.46	1.21	1.03	1.58	0.77	1.28	1.08	1.43	2.09	1.00	0.59		
Eu	0.36	0.24	0.28	0.36	0.33	0.15	0.34	0.26	0.37	0.14	0.33	0.27	0.39	0.69	0.25	0.10		
Gd	1.95	1.32	2.01	1.88	1.28	0.65	1.77	1.48	2.14	1.06	1.82	1.44	2.20	3.26	1.26	0.71		
Tb	0.20	0.17	0.23	0.22	0.16	0.07	0.20	0.17	0.25	0.12	0.20	0.16	0.25	0.36	0.15	0.09		
Dy	0.96	0.93	1.25	1.28	0.97	0.43	1.09	1.03	1.29	0.67	1.05	0.90	1.38	1.97	0.84	0.48		
Ho	0.17	0.16	0.23	0.25	0.18	0.08	0.21	0.19	0.21	0.12	0.18	0.16	0.28	0.38	0.15	0.08		
Er	0.46	0.45	0.63	0.70	0.45	0.23	0.58	0.51	0.54	0.33	0.49	0.46	0.79	1.12	0.40	0.23		
Tm	0.06	0.06	0.09	0.10	0.06	0.04	0.08	0.07	0.07	0.04	0.07	0.06	0.12	0.16	0.05	0.03		
Yb	0.42	0.39	0.61	0.67	0.37	0.28	0.52	0.40	0.53	0.26	0.49	0.40	0.79	1.17	0.36	0.20		
Lu	0.07	0.05	0.09	0.10	0.05	0.04	0.07	0.05	0.08	0.04	0.07	0.05	0.12	0.21	0.05	0.02		
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	-	-	-	-	-	-	0.512323	0.512315	0.512371	-	-	-	-	-	-	-		

Элемент	Пробы																	
	ЭВ-06-16	ЭВ-06-17	ЭВ-06-18	ЭВ-06-19	ЭВ-06-20	ЭВ-06-21	ЭВ-06-22	ЭВ-06-23	ЭВ-06-24	ЭВ-06-25	ЭВ-06-26	ЭВ-06-27	ЭВ-06-28	ЭВ-06-29	Мп-83-35			
Y	3.66	2.46	3.31	0.90	6.77	1.97	2.85	5.41	2.47	2.31	38.71	3.00	6.80	8.63	4.65			
Zr	5.63	4.87	6.50	1.32	4.77	4.85	4.49	8.18	4.86	4.71	51.50	5.42	11.28	13.05	6.52			
Nb	0.85	0.62	0.80	0.08	0.47	0.45	0.22	1.34	0.48	0.81	0.61	0.49	1.69	2.16	1.03			
La	3.31	3.45	2.61	1.48	5.65	1.72	1.80	6.51	3.05	2.68	9.11	2.94	6.93	8.14	5.02			
Ce	12.42	14.07	12.71	3.20	10.90	6.36	8.25	21.11	11.45	10.11	9.07	10.49	22.78	23.25	12.57			
Pr	1.18	0.87	0.88	0.32	1.54	0.55	0.64	2.00	0.75	0.78	2.60	0.85	2.18	2.32	1.11			
Nd	4.67	3.97	4.27	1.34	6.29	2.29	2.85	8.52	3.50	3.12	12.62	3.52	8.75	9.79	6.04			
Sm	1.06	0.83	1.03	0.28	1.31	0.48	0.73	1.75	0.77	0.66	3.42	0.77	1.84	2.11	1.26			
Eu	0.21	0.14	0.22	0.06	0.33	0.09	0.20	0.24	0.24	0.14	0.93	0.18	0.47	0.51	0.32			
Gd	1.33	0.96	1.55	0.38	1.83	0.67	0.99	2.37	0.92	0.91	5.10	1.11	2.54	2.89	1.71			
Tb	0.17	0.11	0.18	0.05	0.23	0.08	0.12	0.25	0.11	0.11	0.73	0.12	0.29	0.33	0.21			
Dy	1.00	0.58	0.97	0.26	1.33	0.44	0.71	1.48	0.62	0.65	4.69	0.76	1.62	1.90	1.26			
Ho	0.17	0.10	0.19	0.05	0.26	0.09	0.13	0.28	0.11	0.12	1.07	0.15	0.29	0.36	0.24			
Er	0.46	0.31	0.54	0.14	0.69	0.25	0.34	0.68	0.30	0.34	3.20	0.42	0.77	0.95	0.60			
Tm	0.06	0.04	0.08	0.02	0.09	0.03	0.05	0.08	0.03	0.05	0.46	0.06	0.10	0.13	0.08			
Yb	0.41	0.29	0.48	0.13	0.57	0.22	0.33	0.53	0.23	0.34	3.10	0.41	0.70	0.87	0.53			
Lu	0.05	0.04	0.07	0.02	0.09	0.03	0.05	0.07	0.03	0.05	0.48	0.06	0.10	0.14	0.07			

Примечание. * Аналитики: Д.В. Авдеев, Л.С. Бокоренко. ** Ответственные исполнители: Т.Б. Баянова, Е.В. Макарова. Прочерк – не определялось.
 Note. * Analysts: D.V. Avdeev, L.S. Bokorenko. ** Responsible performers: T.B. Bayanova, E.V. Makarova. Dash – not determined.

Таблица 5. Содержание редких элементов (г/т)* и изотопный состав Nd** в силикатно-магнетитовых рудах Широкопаднинской площади**Table 5.** Content of rare elements (ppm)* and the isotopic composition of Nd** in silicate-magnetite ores of the Shirokopadninskaya area

Элемент	Пробы											
	МТ-81-3	МТ-81-12	Ш-86-43	Ш-86-81	Ш-86-88	Ш-86-89	Ш-86-110	Ш-86-111	Ш-86-114	Ш-86-116	Ш-86-119	Ш-86-120
Y	1.07	8.67	5.79	5.35	4.33	5.37	2.32	5.60	4.38	5.56	3.59	18.43
Zr	2.88	16.32	15.12	1.62	7.03	1.24	13.52	49.89	51.56	7.78	10.84	146.32
Nb	1.29	2.20	1.78	0.31	0.21	0.76	2.71	13.05	6.53	1.09	2.125	8.95
La	0.90	6.83	2.34	2.25	2.29	6.59	2.08	7.38	3.61	3.38	4.10	16.65
Ce	4.16	13.52	9.12	3.07	4.05	11.87	7.99	11.16	6.54	13.86	3.32	11.31
Pr	0.26	1.58	0.53	0.64	0.60	1.51	0.52	1.77	0.91	0.76	0.79	5.11
Nd	0.93	6.42	2.16	3.28	2.61	6.23	2.06	7.57	3.68	3.22	2.53	21.23
Sm	0.23	1.42	0.70	0.87	0.55	1.26	0.40	1.62	0.84	0.79	0.52	4.53
Eu	0.08	0.54	0.22	0.24	0.12	0.24	0.08	0.22	0.13	0.23	0.09	0.51
Gd	0.31	1.78	1.19	1.15	0.83	1.51	0.54	1.94	1.02	1.24	0.63	4.41
Tb	0.04	0.25	0.20	0.19	0.10	0.20	0.07	0.23	0.14	0.19	0.10	0.62
Dy	0.22	1.51	1.65	1.21	0.61	1.10	0.37	1.16	0.82	1.49	0.57	3.74
Ho	0.04	0.30	0.38	0.23	0.12	0.19	0.07	0.20	0.16	0.35	0.11	0.79
Er	0.10	0.79	1.04	0.63	0.32	0.49	0.23	0.50	0.46	0.97	0.29	2.38
Tm	0.01	0.11	0.15	0.09	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07	0.14	0.04	0.36
Yb	0.10	0.69	1.02	0.54	0.24	0.39	0.36	0.38	0.51	0.93	0.21	2.31
Lu	0.01	0.10	0.15	0.08	0.04	0.05	0.06	0.05	0.08	0.14	0.03	0.35
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	–	–	–	–	–	–	–	0.512297 ± 8	–	0.512367 ± 8	–	0.512331 ± 4

Примечание. * Аналитики: Д.В.Авдеев, Л.С.Бокоченко. ** Ответственные исполнители: Т.Б. Баянова и Е.В. Макарова. Прочерк – не определялось.

Note. * Analysts: D.V. Avdeev, L.S. Bokovenko. ** Responsible performers: T.B. Bayanova and E.V. Makarova. Dash – not determined.

Таблица 6. Изотопные отношения Pb и Sr в породах сергеевского комплекса**Table 6.** Isotopic ratios of Pb and Sr in the rocks of the Sergeevsky complex

№ п. п.	Проба	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb _n	±2 σ, %	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb _n	±2 σ, %	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb _n	±2 σ, %	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2 σ
1	С-10-08-Д	18.193	0.039	15.589	0.043	38.034	0.052	–	–
2	С-10-09-Б	19.335	0.040	15.638	0.043	39.451	0.053	0.706888	3
3	С-10-12-В	18.122	0.039	15.566	0.043	38.090	0.053	0.706552	6
4	С-10-18	18.620	0.039	15.628	0.043	38.408	0.053	–	–
5	С-10-26-А	18.732	0.039	15.616	0.043	38.425	0.052	0.707144	3
6	С-10-12-Д	18.096	0.039	15.552	0.043	37.879	0.052	0.706491	5
7	С-10-26-Б	18.523	0.040	15.617	0.044	38.304	0.053	–	–
8	ВА-6	18.169	0.045	15.580	0.049	38.093	0.057	–	–
9	ВА-11	18.298	0.046	15.585	0.049	38.112	0.057	–	–
10	ВА-12	18.149	0.040	15.584	0.045	38.065	0.061	–	–
11	ВА-13	18.197	0.040	15.579	0.044	38.088	0.053	–	–

Примечание. 1–7 – метабазиты (с. Сергеевка), 8–11 – породы Владимиро-Александровского массива. Прочерк – не определялось. Ответственный исполнитель – В.М. Саватенков.

Note. 1–7 – metabasites (Sergeevka village), 8–11 – rocks of the Vladimiro-Alexandrovsky massif. Dash – not determined. Responsible executor – V.M. Savatenkov.

спайности) титанита. Иногда первичный плагиоклаз полностью замещен кварцем и альбитом или порода состоит из реликтов паргасита и клинопироксена в мелкокристаллической массе из вторичных паргасита, пирротина, циркона, апатита, эпидота, алланита-(Ce) и титанита (с включениями

ильменита). Отдельные участки сложены эпидотом или альбитом. Обнаружено мелкое зерно платины. Подробно минералогия и петрография этих пород рассмотрены в (Казаченко, Перевозникова, 2023).

Метабазиты относятся к толлейтовой и высококальциевой известково-щелочной сериям (Казаченко,

Перевозникова, 2023), характеризуются более высокими (предварительно нормированными по хондритам) содержаниями легких REE относительно тяжелых и этим отличаются от пород авдокимовского и калиновского комплексов (см. рис. 3д, е). В некоторых REE-спектрах отчетливо выражены Eu-минимумы и Gd-максимумы.

Снизу вверх оливиновые разности Владимирско-Александровского массива сменяются пироксен-роговообманковыми, а наиболее поздние габброиды, троктолиты и анортозиты образуют маломощные полосы и секущие жилы (Государственная..., 2011).

Габбро представлено массивной средне- или мелкозернистой, иногда порфирированной породой, сложенной авгитом и лабрадором. Клинопироксен иногда полностью замещен хлоритом, роговой обманкой, карбонатом и тремолитом. Плаггиоклаз сосюритизирован и серицитизирован. Присутствуют зерна титаномагнетита, ильменита и апатита. Верлиты состоят из оливина, почти полностью замещенного тальком и серпентином, клинопироксена и заместившей его и оливин роговой обманки. Встречаются зерна основного плаггиоклаза и шпинели. Оливиниты, троктолиты и анортозиты сложены главным образом оливином, оливином и плаггиоклазом или плаггиоклазом соответственно. Плаггиоклаз, как правило, сосюритизирован, цеолитизирован и серицитизирован, а оливин в разной степени замещен серпентином.

Яшмы, марганцево-силикатные породы и силикатно-магнетитовые руды

Получены аналитические данные для яшм (породообразующие и редкие элементы) (см. табл. 3), марганцево-силикатных и силикатно-магнетитовых пород и руд (редкие элементы, изотопные отношения Nd) (см. табл. 4, 5). Изучены минералогия и внутреннее строение этих пород.

Яшмы – радиолариты или кремни с примесью глинистого вещества и остатками радиоларий, кроме кварца, содержат немного калиевого полевого шпата, альбита, биотита или гидрослюда. Имеют ярко-красный цвет из-за дисперсного гематита, содержат аксессуарные рутил, титанит, апатит, барит, касситерит, циркон, торанит и др.

Яшмы рассечены системами трещин, вдоль которых красная окраска сменяется зеленовато-светло-серой. Гематит и гидрослюда замещены хлоритом или (реже) хлоритом и биотитом, а вместо рутила или наряду с ним присутствуют ильменит или пиррофанит. Встречаются сфалерит, стибнит, самородные Au и Ag, другие самородные элементы и интерметаллиды.

REE-спектрам яшм (см. рис. 3а) свойственны признаки более высоких содержаний (предварительно нормированных по хондритам) легких

REE относительно тяжелых, Eu-минимумы, Gd-максимумы и Ce-аномалия – положительная или отрицательная, появление которой связывают в основном с морскими обстановками или метасоматическими изменениями пород.

Марганцево-силикатные породы. Преобладают родонит, пироксмангит, спессартин, бариевые полевые шпаты и кварц. Распространены пиррофанит, тефроит, Ва-содержащий флогопит, манганактинолит, марганокуммингтонит и другие минералы. Присутствуют аксессуарные соединения Th, U, REE, Ni, Co, Au, Ag, Pt, Pd и других металлов. Содержание MnO достигает 47 мас. %. Всем REE-спектрам пород Горной и Широкопаднинской площадей, неизменных гидротермальных процессах, свойственны возрастание содержаний (предварительно нормированных по хондритам) в направлении от тяжелых REE к легким, Eu-минимумы и Gd-максимумы (см. рис. 3б, в). Почти во всех спектрах Горной площади присутствует положительная Ce-аномалия (см. рис. 3б), обусловленная особенностями фациальных условий осадконакопления в связи с более близким положением относительно окраины Ханкайского массива.

Силикатно-магнетитовые руды представлены тонко- и мелкокристаллическими разностями тальк-магнетитового (\pm хлорит) и манганактинолит-магнетитового состава с сингенетическими микровключениями касситерита, ильменита, самородных золота, платины, сперрилита и других минералов. Они содержат 49.26–91.37 мас. % ($FeO + Fe_2O_3$), обогащены MnO (до 0.82) и SnO_2 (до 0.65) и отличаются более высокими (предварительно нормированными по хондритам) содержаниями легких REE относительно тяжелых, наличием Eu-минимума и Gd-максимума (см. рис. 3г) в REE-спектрах.

Появление марганцево-силикатных пород вместо кремнисто-родохрозитовых по мере приближения к гранитоидным интрузиям указывает на их контактово-метаморфическую природу (Казаченко и др., 2016). В этом отношении Mn оруденение Сихотэ-Алиня подобно локализованному в кремневых формациях силикатно-карбонатным и силикатно-оксидно-карбонатным рудам Mn других регионов мира. Стратифицированное и одинаковое положение марганцево-силикатных пород в триасовых разрезах Таухинского и Самаркинского террейнов указывает на их первично осадочную природу и синхронное накопление исходных осадков в едином осадочном бассейне. Источниками Mn, Fe, Ni, Co, Au, Pt, Pd и других металлов в метаморфизованных металлоносных осадках триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня являлись продукты экзогенного разрушения слагавших острова пород сергеевского комплекса, накопившиеся в прилегающих к островам акваториях.

В последнее время на примере Сихотэ-Алиня с использованием геологических данных и результатов геохимического и минералогического изучения магматических и метаморфических пород и руд показана важнейшая роль осадочных палеобассейнов в металлогении крупных геологических структур. Определяющее влияние на металлогению Сихотэ-Алиня оказали процессы гипергенеза слагающих острова базитов и ультрабазитов сергеевского комплекса и процессы осадконакопления в лагунах и прилегающих к островам акваториях в период от нижней границы карбона до конца триаса. Коры выветривания служили источниками Mn, Fe, Pb и других металлов, концентрировавшихся в морских осадках. Впоследствии литифицированные металлонесные осадки с геохимическими метками пород сергеевского комплекса вовлекались в метаморфические, магматические и гидротермальные процессы, определившие присутствие в Сихотэ-Алине разновозрастных богатых или обогащенных полиметаллами, В, Mn, Fe, Sn, W, Au, Ag, Pt и Pd руд и пород различных генетических типов (Казаченко и др., 2016).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Металлонесные осадки – богатые органикой и гидроксидами Mn и Fe биогенные кремнистые илы – накапливались в прилегающих к островам акваториях (Казаченко и др., 2016). Mn, Fe и другие металлы поступали в виде коллоидных растворов. Во время средне-позднеюрской и позднеюрско-раннемеловой аккреций яшмы и испытавшие диагенез металлонесные осадки в составе фрагментов триасовой кремневой формации были включены в Самаркинский и Таухинский террейны соответственно. При внедрении гранитоидов Хунгаритатибинского плутонического (K_1) и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического (K_2 -Р) поясов они претерпели контактовый метаморфизм.

Отношения концентраций REE и изотопов Nd в морской воде, протолитах яшм и триасовых металлонесных осадках из-за их хемогенно-биогенной природы во время осадконакопления были одинаковы. Этим обусловлены общие особенности пород и руд, нашедшие отражение в REE-спектрах (см. рис. 3а, б, г): повышенные нормированные содержания легких REE относительно тяжелых, Еу-минимумы и Gd-максимумы. На рис. 4а их точки тяготеют к субгоризонтальному тренду из-за небольших вариаций Sm/Nd, главным образом в пределах ≈ 0.20 – 0.23 , близких к современному в морской воде (0.21) (Фор, 1989). В таких же или близких по возрасту (юрских) кремнях Таухинского террейна при нулевом содержании Al_2O_3 точке на тренде тоже соответствует Sm/Nd ≈ 0.21 (рис. 4б). Значение отношения характеризует хемогенно(аутигенно)-биогенную часть кремней и соответствует совре-

менному значению в морской воде. Таким образом, Sm/Nd в морской воде в триасовое и юрское время было близким к современному. Этот вывод согласуется с результатами изучения карбонатных пород прошлого, указывающими на относительное постоянство Sm/Nd (≈ 0.21) в морской воде на протяжении длительного геологического времени (Крупенин и др., 2015).

Идентичность REE-спектров не измененных гидротермальными процессами яшм, силикатно-магнетитовых и марганцево-силикатных руд и пород Таухинского и Самаркинского террейнов связана с накоплением их протолитов (осадков) в общем водном бассейне практически в одно и то же время. Точки составов этих руд и пород на рис. 5 образуют тренд 5. Большинство точек состава приурочено к его средней части с небольшими вариациями Sm/Nd (≈ 0.21 – 0.26) из-за отмеченного выше влияния морской воды. Вариации современного $^{143}Nd/^{144}Nd$ в морской воде велики, но с возрастанием глубины $\epsilon_{Nd(T)}$ стремится к постоянной величине. Это особенно характерно для Тихого океана (Frank, 2002). В метаморфизованных металлонесных осадках Сихотэ-Алиня почти постоянным является не только значение Sm/Nd, но и $^{143}Nd/^{144}Nd$ (см. рис. 5), которое в момент осадконакопления составляло ≈ 0.512055 (определено графическим способом) и тоже, как можно полагать, соответствовало значениям в морской воде. Положение тренда 5 отвечает современному положению изохроны морской воды, “запечатленной” в триасовых хемогенно-биогенных осадках. Расположение точек марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд на общей изохроне указывает на относительное постоянство $^{143}Nd/^{144}Nd$ в морской воде (по крайней мере, в глубоководной части бассейна) и некоторую ее неоднородность по Sm/Nd во время осадконакопления. Наклон тренда 5 соответствует наклону изохроны пород с источником РМ (BSE) и возрастом 235 млн лет (граница анизия и ладина) (см. рис. 5), т. е. согласуется с возрастом яшм и метаморфизованных металлонесных осадков.

Измененные сергеевские базиты аллохтонов средне-позднеюрской Самаркинской аккреционной призмы и серпентинизированные ультраосновные породы тектонического меланжа в их основаниях, относящиеся к одному магматическому комплексу, встречаются совместно. Естественно предположить, что характерные для них изменения – милонитизация и диафторез базитов, а также образование меланжа и серпентинизация ультрабазитов связаны с одними и теми же тектоническими и гидротермальными процессами, сопровождавшими средне-позднеюрскую аккрецию.

Серпентинизация океанической коры и образование колчеданных и полиметаллических руд по рециклинговой концепции обусловлены воздействием морской воды, проникающей в породы по си-

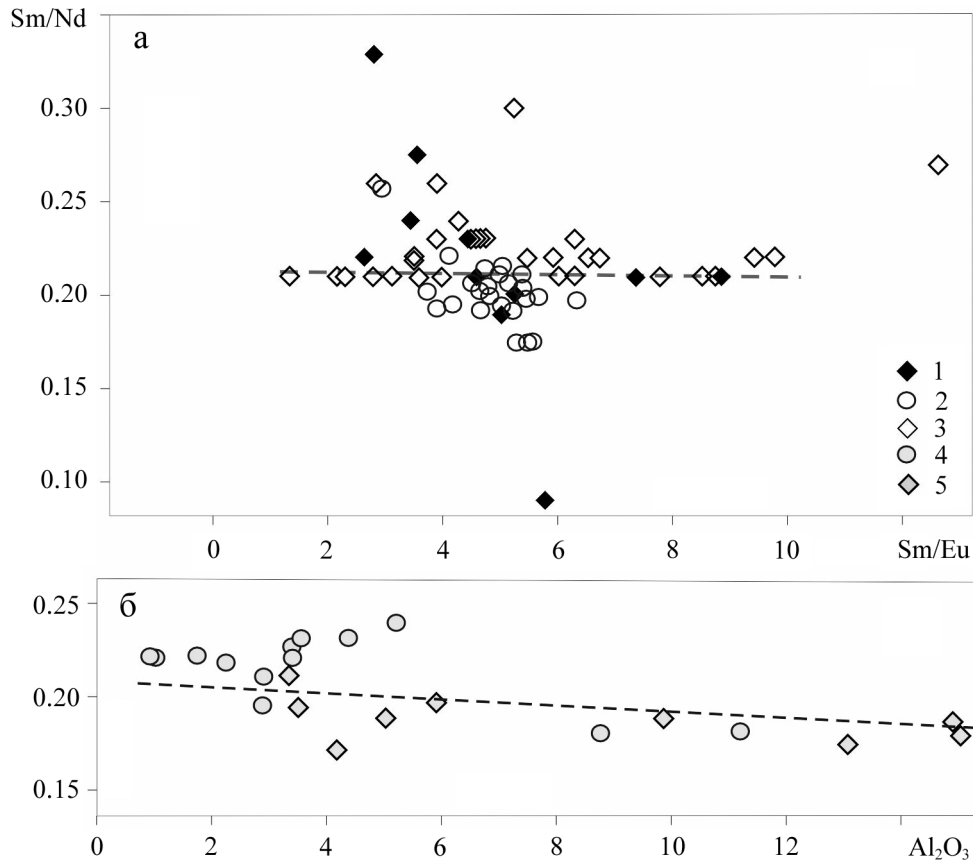


Рис. 4. Положение точек составов метаморфизованных металлоносных осадков и кремней Сихотэ-Алиния на диаграммах Sm/Nd–Sm/Eu и Sm/Nd–Al₂O₃.

1–3 – силикатно-магнетитовые руды (1), яшмы (2) Широкопаднинской площади и марганцевосиликатные породы Горной площади (3); 4, 5 – кремни триасовые горбушинского (5) и юрские эрдагуозского (6) комплексов (исходные данные заимствованы из (Кемкин, 2019)).

Fig. 4. The position of structure points of Sikhote-Alin metamorphosed metalliferous sediments on the diagrams Sm/Nd–Sm/Eu and Sm/Nd–Al₂O₃.

1–3 – silicate-magnetite ores (1), jaspers (2) of the Shirokopadninskaya area and manganese-silicate rocks of the Gornaya area (3); 4, 5 – siliceous rocks of Triassic Gorbushinsky (4) and Jurassic Erdagouzsky (5) complexes (the original data for siliceous rocks of the Gorbushinsky and Erdagouz complexes from (Kemkin, 2019)).

стемам трещин, нагревающейся и поднимающейся вверх. Проявления гидротермальной разгрузки на океанском дне обнаружены в рифтовых зонах СОХ, на активных океанических окраинах островодужного типа, в областях внутриплитного вулканизма и других обстановках (Змиевский, 2017; и др.). В моделях (Scambelluri et al., 2004; и др.) (рис. 6а) пододвигающейся плите (океанической мантии по авторам) свойственна так называемая океаническая (петельчатая) серпентинизация ультрабазитов под воздействием морской воды при низких температуре ($\leq 300^\circ\text{C}$) и давлении (≤ 0.25 ГПа). С нею связано наибольшее изменение химического состава пород (Краснова, 2014; и др.). Естественно предположить, что океаническая серпентинизация ультрабазитов в зонах субдукции сопровождается диафорезом пород основного состава.

Важное значение для дальнейшего изложения имеет вопрос о подвижности редких элементов в гидротермальных процессах в океанической коре с участием разогретой морской воды. На примере гарцбургитов Кимперсайского массива изучено поведение REE при регрессивной петельчатой серпентинизации ультрамафитов и показано, что при степени серпентинизации 70–80 мас. % концентрация REE снижается примерно на порядок, исчезает Eu-минимум, спектр приобретает U-образную форму, близкую к форме спектра океанической воды (Штейнберг и др., 1991). Данные (Чашухин и др., 2012) свидетельствуют о значительных изменениях концентраций почти всех элементов при серпентинизации гарцбургитов Кимперсайского и дунитов Нижнетагильского массивов (см. рис. 6б), в том числе и используемых ниже Sm, Nd, Eu, Y, Sr, Nb

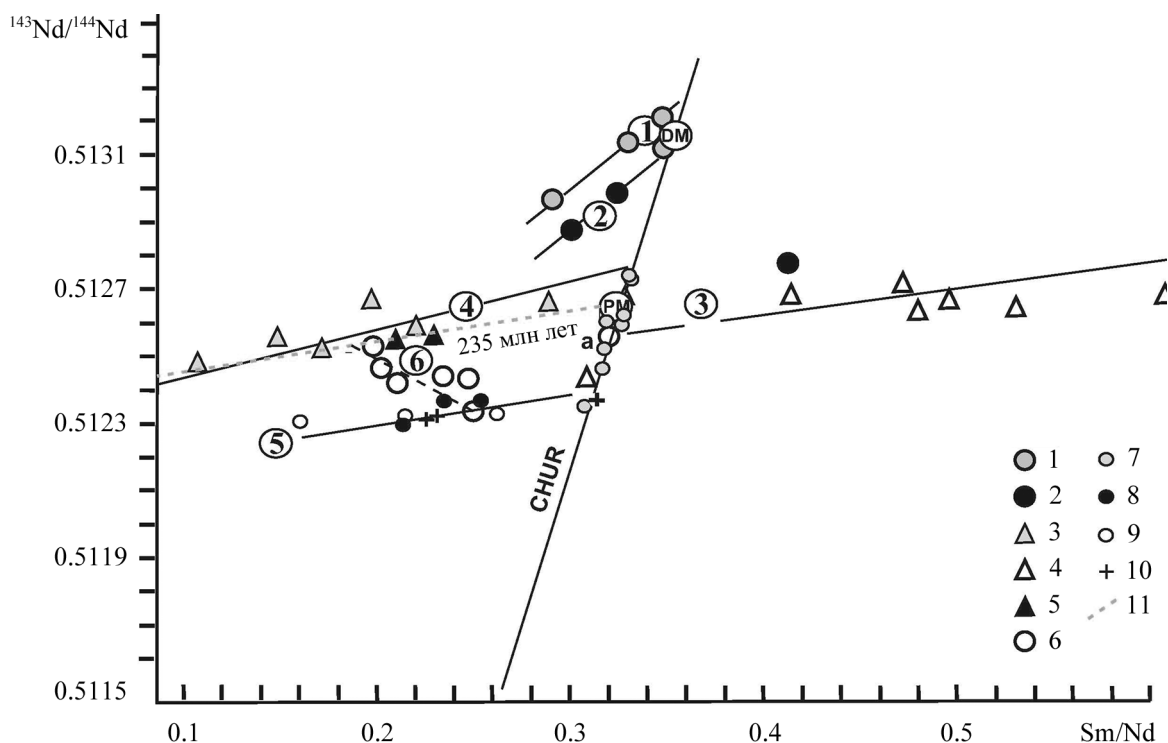


Рис. 5. Положение точек составов изученных пород на диаграмме $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – Sm/Nd для базит-гипербазитовых комплексов Сихотэ-Алиня (Казаченко, Перевозникова, 2023), с изменениями и дополнениями.

1, 2 – авдокимовский комплекс: включения в метабазах сергеевского комплекса (1) и породы перидотитового массива окрестностей с. Дальний Кут (2); 3, 5, 6 – сергеевский комплекс: метаяльтрабазиты Владимиро-Александровского массива (3), каменские метабазиты (5), сергеевские метабазиты (6); 4 – калиновский комплекс – ультрабазиты Бреевского аллохтона; 7 – хондриты; DM и PM (в кружках) – деплетированная и примитивная мантии соответственно; 8–10 – триасовые метаморфизованные металлонесные осадки: силикатно-магнетитовые руды (8) и марганцево-силикатные породы (9) Широкопаднинской площади; марганцево-силикатные породы Горной площади (10); 11 – изохрона производных примитивной мантии для 235 млн лет – при построении использована точка PM и вычисленное начальное значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Цифры в кружках – номера трендов. Точка “а” соответствует пробе С-10-12Д.

Fig. 5. The position of structure points of the studied rocks on the diagram $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ – Sm/Nd for the basite-hyperbasite complexes of the Sikhote-Alin (Kazachenko, Perevoznikova, 2023), with changes and additions.

1, 2 – Avdokimovskiy complex: inclusions in the metabasites of the Sergeevskiy complex (1) and rocks of the peridotite massif near the village Dalny Kut (2); 3, 5, 6 – Sergeevskiy complex: metaultrabasites of the Vladimiro-Alexandrovskiy massif (3), Kamensky metabasites (5), Sergeevskiy metabasites (6); 4 – ultrabasites of the Breevskiy alloxtone (Kalinovskiy complex); 7 – chondrites; DM and PM (in circles) – depleted and primitive mantles, respectively; 8–10 – Triassic metamorphosed metalliferous sediments: silicate-magnetite ores (8) and manganese-silicate rocks (9) of the Shirokopadninskaya area; manganese-silicate rocks of the Gornaya area (10); 11 – isochron of derivatives of the primitive mantle for 235 million years – the PM point and the calculated original value of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ were used in the construction.

The numbers in the circles are trend numbers. Point “a” corresponds to sample C-10-12D.

и Zr. Этот вывод применим и к диафторезу габбро под воздействием морской воды, обусловленному тем же гидротермальным процессом, что и серпентинизация ультрабазитов. Вывод подтверждается (см. ниже) эмпирическими данными – диаграммами, свидетельствующими о приспособлении сергеевских базитов к морской воде по изотопным отношениям Nd, Sr и Pb, а также отношениям концентраций REE, Y, Nb и Zr. С подвижностью Zr связаны также эпигенетическая природа циркона в сергеевских метабазах (Казаченко, Перевозникова, 2023) и присутствие в нем равновесных включений не свойственных габбро минералов, но характер-

ных для ассоциаций, образовавшихся при диафторезе этих пород (рис. 7).

REE-спектры метабазитов (см. рис. 3д) в некотором отношении похожи на спектры яшм, марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд (см. рис. 3а–г). Для них тоже характерно возрастание нормированных содержаний легких REE относительно тяжелых. Однако Eu-минимум и Gd-максимум отмечаются редко и выражены слабо. Метабазиты сергеевского комплекса по особенностям спектров отличаются от пород калиновского и авдокимовского комплексов и метаяльтрабазитов Владимиро-Александровского

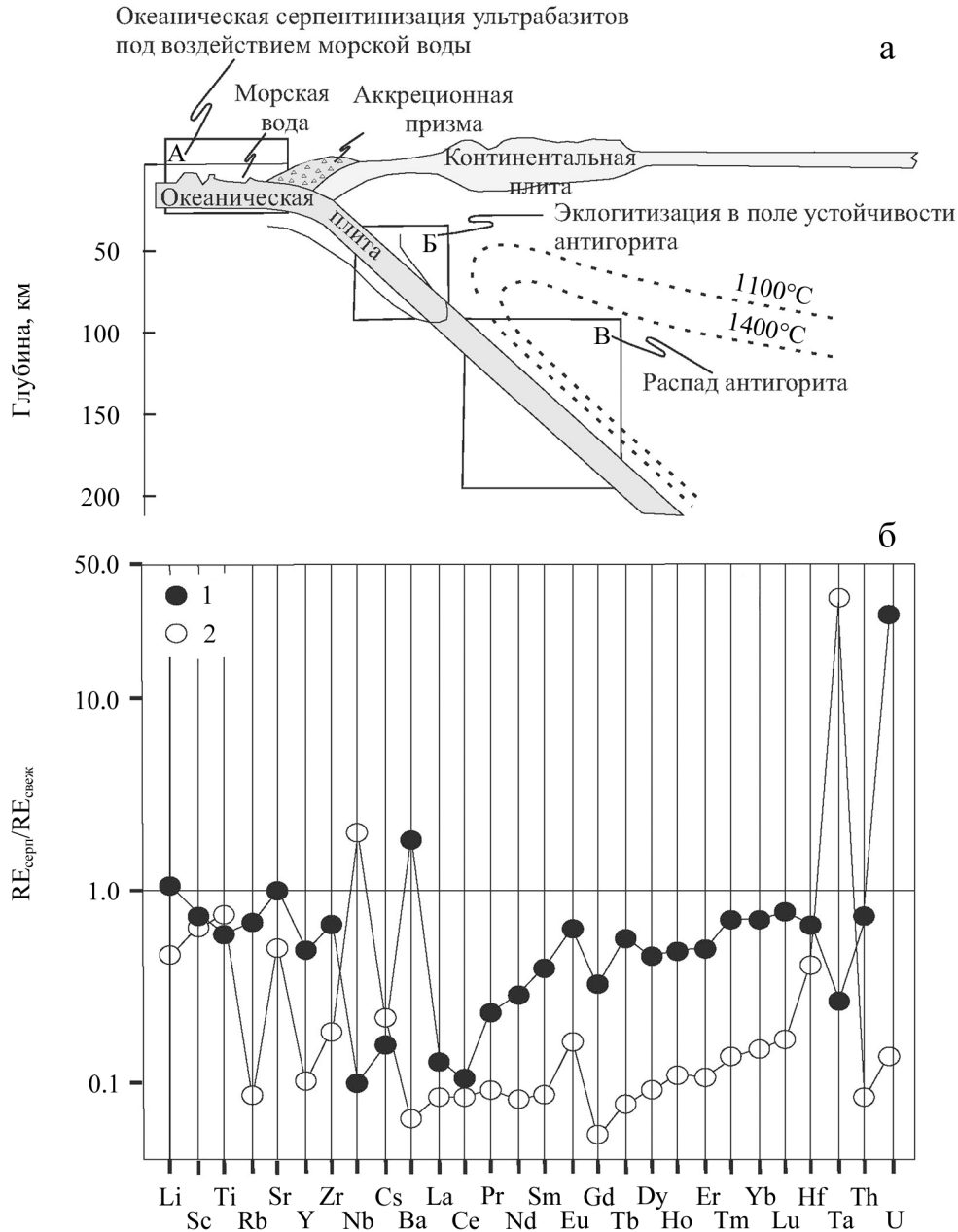


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая условия и способы гидратации и дегидратации океанической плиты при субдукции, по (Scambelluri et al., 2004; и др.), с изменениями и дополнениями (а), и отношения концентраций редких элементов в полностью серпентинизированных и не серпентинизированных ультрамафитах Кимперсайского и Нижнетагильского массивов (Чашухин, 2012) (б).

а. А – область океанической серпентинизации ультрабазитов с поглощением большого количества морской воды, Б – область эклогитизации в поле стабильности антигорита с уменьшением его доли в ассоциациях и высвобождением ограниченного количества воды; В – область неустойчивости антигорита и выделения большого количества воды.
 б. 1 – гарцбургиты западного блока Кемпирсайского массива, 2 – дуниты Нижнетагильского массива.

Fig. 6. Geodynamic diagram showing conditions and methods of hydration and dehydration of the oceanic plate during subduction (Scambelluri et al., 2004; and others), with minor changes and additions (a), and the ratios of the concentration of rare elements in serpentized and non-serpentized Ultramafians of the Kempirsai and Nizhny Tagil massifs (Chashchukhin, 2012) (б).

а. А – the area of oceanic serpentinization of ultrabasites with the absorption of a large amount of seawater, Б – the area of eclogitization in the field of antigorite stability with a decrease of its part in associations and the release of a limited amount of water; В – the area of antigorite instability and the release of a large amount of water.
 б. 1 – harzburgites of the western block of the Kempirsai massif, 2 – dunites of the Nizhny Tagil massif.

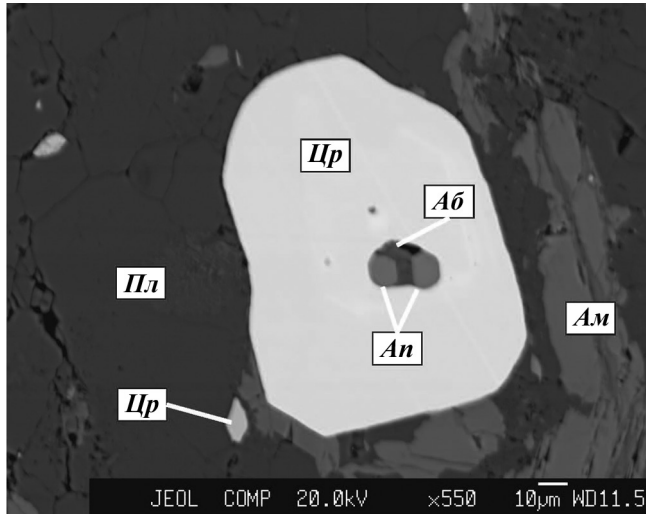


Рис. 7. Включение альбита в цирконе, свидетельствующее об образовании последнего при диафторезе сергеевских метабазитов.

Аб – альбит, *Ам* – амфибол, *Ап* – апатит, *Пл* – плагиоклаз, *Цр* – циркон.

Fig. 7. Inclusion of albite in zircon, indicating the formation of the latter during diaphthoresis of Sergeevsky metabasites.

Ab – albite, *Am* – amphibole, *An* – apatite, *Pl* – plagioclase, *Zr* – zircon.

массива (см. рис. 3д, е). Sm/Nd изменяется в небольших пределах и является близким к современному в морской воде.

Точки составов изученных метабазитов и метаультрабазитов Сихотэ-Алиня на диаграмме (см. рис. 5) образуют тренды, являющиеся изохронами, прямо указывающими на точки составов мантийных источников вещества. Мантийная природа их вещества подтверждается геохимическими данными и изотопным составом Nd, Sm, Sr и Pb (Казаченко, Перевозникова, 2023). Исключение составляют метабазиты сергеевского комплекса, все точки которых (кроме одной, обозначенной буквой “а”) образуют тренд б, который, судя по его направленности, не может быть изохроной. Он является линией смешения двух компонентов, один конец которой с максимальными значениями $^{143}Nd/^{144}Nd$ и Sm/Nd в наименее измененных диафторезом образцах сергеевских базитов располагается на тренде Владимиро-Александровского массива, а другой, отвечающий наиболее измененным образцам, – на тренде (изохроне) триасовых металлоносных осадков (см. рис. 5). Его положение из-за большого периода полураспада ^{147}Sm (при прочих равных условиях) должно мало отличаться от положения изохроны морской воды, “запечатленной” в хемогенно-биогенных осадках юрского возраста. Такие же закономерности наблюдаются и на диа-

граммах (рис. 8). Точки составов сергеевских базитов и на этих диаграммах образуют линии смешения, концы которых, соответствующие наименее и наиболее измененным диафторезом образцам, расположены на трендах пород Владимиро-Александровского массива и метаморфизованных триасовых металлоносных осадков соответственно. Вне трендов (см. рис. 5, 8) размещены точки (обозначены буквой “а”) только одной пробы, возможно, из-за влияния гидротермальных процессов. На этих диаграммах нижние концы трендов метабазитов сергеевского комплекса располагаются в пределах небольших интервалов значений Sm/Nd , Y/Nb и Zr/Y , к которым приурочены почти все точки марганцево-силикатных пород и силикатно-магнетитовых руд. Кроме того, они почти точно указывают на точки отношений средних содержаний Y, Nb и Zr в марганцево-силикатных породах Самаркинского террейна (см. рис. 8), что невозможно объяснить случайным совпадением. Можно полагать, что отношения средних содержаний в марганцево-силикатных породах Горной площади, включенных (как и метабазиты сергеевского комплекса) во время средне-позднеюрской аккреции в состав Самаркинского террейна, наиболее близко соответствовали значениям Y/Nb и Zr/Y в морской воде во время образования их протолитов.

Таким образом, в метабазитах сергеевского комплекса парные значения $^{143}Nd/^{144}Nd-Sm/Nd$, $^{143}Nd/^{144}Nd-Y/Nb$ и $^{143}Nd/^{144}Nd-Zr/Y$ (и, соответственно, значения $^{143}Nd/^{144}Nd$, Sm/Nd , Y/Nb и Zr/Y) с возрастанием степени диафтореза закономерно изменялись от значений в ультрабазитах сергеевского комплекса до значений в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках (см. рис. 5, 8) и, следовательно, в морской воде триасово-юрского времени. Эти закономерности, базирующиеся на эмпирических данных, можно объяснить только участием морской воды в диафторезе базитов сергеевского комплекса во время средне-позднеюрской аккреции. Средне-позднеюрское время диафтореза согласуется с геологическими данными и изотопным составом Sr в наиболее измененных метабазитах сергеевского комплекса. Участие морской воды в диафторезе базитов и серпентинизация ультрабазитов сергеевского комплекса во время средне-позднеюрской аккреции указывают на связь этих изменений с одним и тем же гидротермальным процессом, проявившимся в породах разного химического состава.

Одним из наиболее надежных индикаторов степени изменения ультрабазитов океанической коры при серпентинизации является значение $^{87}Sr/^{86}Sr$ и уровень содержания этого элемента (Силантьев, 2003). Характерный сдвиг точек изотопных составов перидотитов в сторону резкого возрастания значений $^{87}Sr/^{86}Sr$, как показано на примере серпентинизированных пород разломной зоны Стелмейт

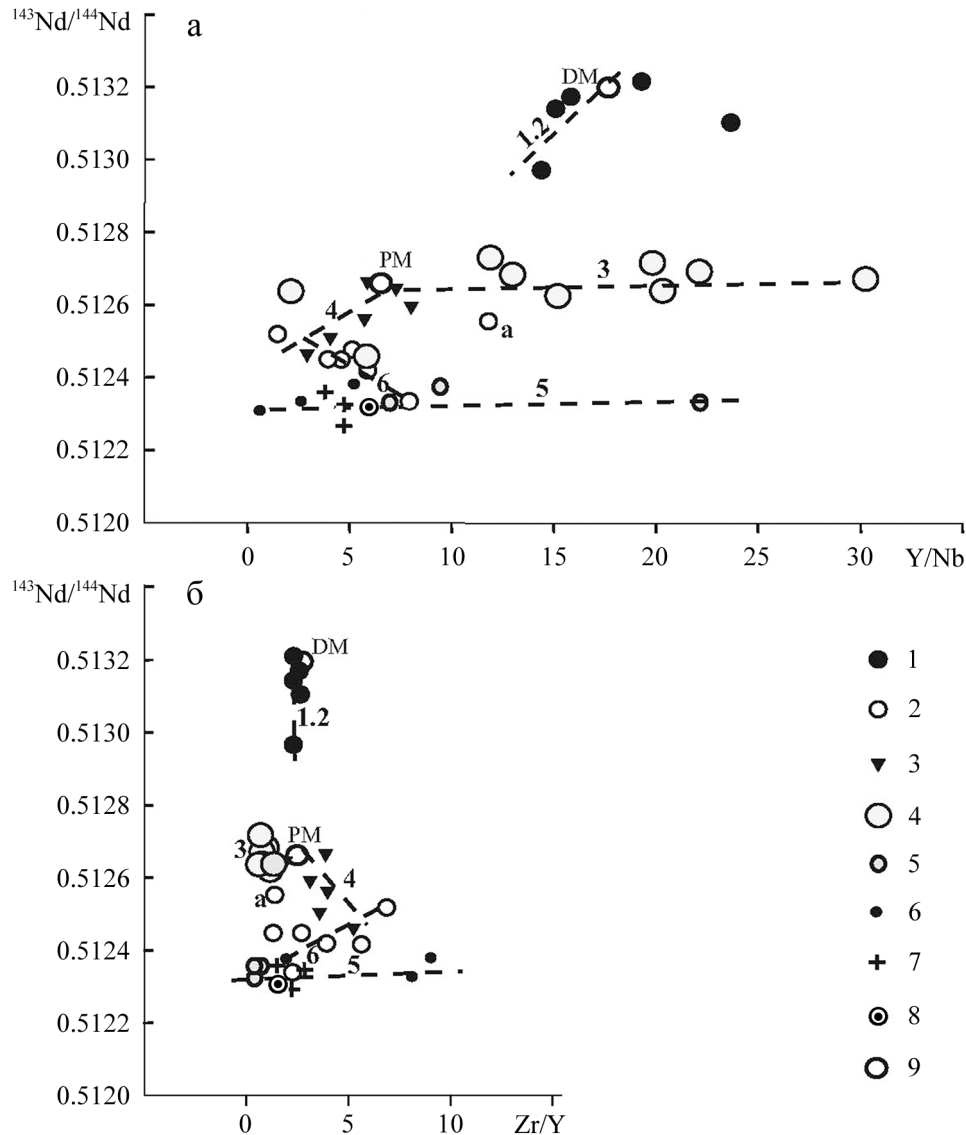


Рис. 8. Положение точек метабазитов сергеевского комплекса на диаграммах $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Y/Nb (a) и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Zr/Y (б).

1 – метабазиты авдокимовского комплекса; 2, 3 – метабазиты (окрестности с. Сергеевка) (2) и метабазиты (Владими́ро-Александровский массив, окрестности с. Влади́ро-Александровское) сергеевского комплекса (3); 4 – метабазиты Калиновского комплекса; 5–7 – марганцево-силикатные породы (5) и силикатно-магнетитовые руды (6) Широкопаднинской площади, марганцево-силикатные породы (7) Горной площади; 8 – точки состава марганцево-силикатных пород Самаркинского террейна, вынесенные на тренды 5 метаморфизованных триасовых металлоносных осадков по отношению средних (из 32 анализов) значений Y и Nb (a), Zr и Y (б); 9 – точка мантийного источника.

Fig. 8. The position of the metabasite points of the Sergeevsky complex on diagrams $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Y/Nb (a) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Zr/Y (б).

1 – metabasites of the Avdokimovsky complex; 2, 3 – metabasites (near of the village of Sergeevka) (2) and metaultrabasites (Vladimiro-Alexandrovsky massif, near of the village of Vladimiro-Alexandrovskoye) of the Sergeevsky complex (3); 4 – metaultrabasites of the Kalinovskiy complex; 5–7 – manganese-silicate rocks (5) and silicate-magnetite ores (6) of the Shirokopadninskaya area, manganese-silicate rocks (7) of the Gornaya area; 8 – the points of composition of manganese-silicate rocks of the Samarka terrane, mapped to trends of 5 metamorphosed Triassic metalliferous sediments by the ratios of the average (out of 32 analyses) values of Y and Nb (a), Zr and Y (б); 9 – the point of the mantle source.

(Тихий океан), отражают взаимодействие пород с просачивавшимся морским флюидом (Краснова, 2014). Аномально высокое значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и

низкое значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (рис. 9б), приближающиеся к типичным составам морских карбонатов и морской воды, в серпентинизированных породах

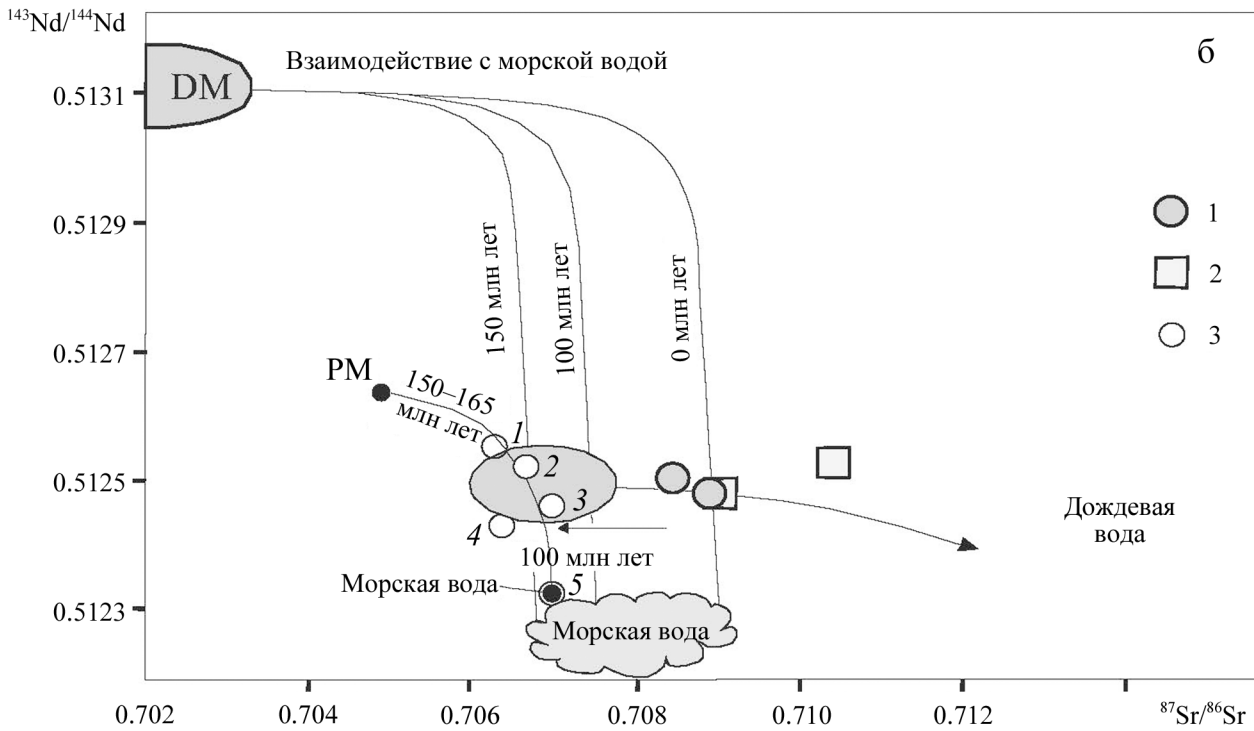
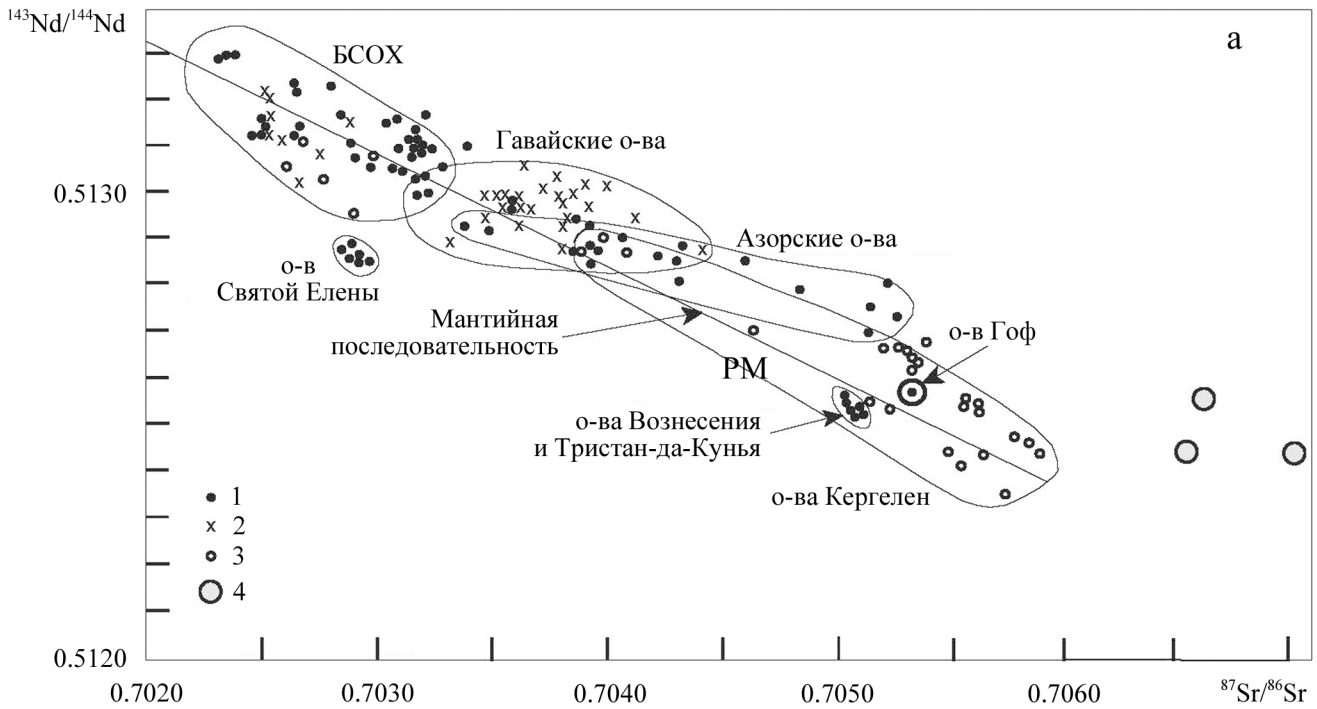


Рис. 9. Корреляция изотопного состава Nd и Sr в базальтах срединно-океанических хребтов (БСОХ) и океанических островов, по (Фор, 1989) (а) и современное положение линии смешения производных примитивной мантии и морской воды 150–165 млн лет назад (по результатам изучения метабазитов сергеевского комплекса и метаморфизованных триасовых металлоносных осадков) в сравнении с положением линий смешения деплетированной мантии и морской воды сейчас, 100 и 150 млн лет назад, по (Краснова, 2014) (б).

а. 1 – Атлантический океан, 2 – Тихий океан, 3 – Индийский океан, 4 – метабазиты сергеевского комплекса, Сихотэ-Алинь.
б. Серое поле характеризует составы перидотитов разломной зоны Стелмейт, нормированных по возрасту. Положение тренда смешения серпентинизированного перидолита, нормированного по 100 млн лет ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70784$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512529$) и воды с изотопным отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.71200$ объясняется изменениями породы в субэкринных условиях (Краснова, 2014).

1, 2 – аполлерцолитовые серпентиниты (1) и окварцованные аподуниты (2) хр. Стелмейт (Тихий океан), 3 – метабазиты сергеевского комплекса.

Точки 1–4 вынесены по измеренным значениям $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в метабазитах сергеевского комплекса. Точка 5 размещена на линии смешения по минимальному измеренному значению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (в образце, для которого определение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отсутствует). Точка морской воды вынесена по $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в метаморфизованных триасовых металлоносных осадках и по $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для периода 150–165 млн лет назад, определенному по стронциевой кривой для средней–поздней юры и раннего мела (рис. 10).

Fig. 9. The correlation of Nd and Sr isotopic compositions in basalts of the mid-oceanic ridges (БСОХ) and oceanic islands according to (For, 1989) (a) and the current position of the mixing line of derivatives of the primitive mantle and seawater 150–165 Ma ago (based on the results of studying the metabasites of the Sergeevsky complex and metamorphosed Triassic metalliferous sediments) in comparison with the position of the mixing lines of depleted mantle and seawater now, 100 and 150 Ma ago according to (Krasnova, 2014) (б).

а. 1 – Atlantic Ocean, 2 – Pacific Ocean, 3 – Indian Ocean, 4 – metabasites of the Sergeev complex, Sikhote-Alin.

б. Gray field characterizes the age-normalized compositions of the Stellmate fault zone peridotites. The position of the mixing trend of serpentinized lherzolite, normalized for 100 million years ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70784$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512529$) and water with an isotopic ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.71200$ is explained by rock changes under subaerial conditions (Krasnova, 2014).

1, 2 – apollertolitic serpentinites (1) and quartered apodunites (2) of the Stellmate ridge (Pacific Ocean), 3 – metabasites of the Sergeevsky complex.

Points 1–4 are derived from the measured values of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the metabasites of the Sergeevsky complex. Point 5 is located on the mixing line at the minimum measured value of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (in a sample for which $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ is not defined). The seawater point is plotted according to $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ in metamorphosed Triassic metalliferous sediments and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for the period 150–165 Ma ago, determined by the strontium curve for the Middle-Late Jurassic and Early Cretaceous (Fig. 10).

разломной зоны Стелмейт, согласно результатам геохимического моделирования, могут быть связаны с низкотемпературным метаморфизмом при отношениях морская вода/порода существенно больше 1. Аномально высоким значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и низким значением $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ обладают и метабазиты сергеевского комплекса, вследствие чего их точки смещены относительно линии мантийной последовательности (см. рис. 9а). На рис. 9б показано положение точек сергеевских метабазитов на предполагаемой линии смешения вещества производных примитивной мантии и морской воды юрского времени (150–165 млн лет назад). В нижней части эта линия практически совпадает с линией смешения деплетированной мантии и морской воды 150 млн лет назад, по (Краснова, 2014), а ее окончание – с верхней границей поля морской воды.

Изотопное отношение Sr является важным показателем возраста хемогенно-биогенных образований, так как в морской воде оно неоднократно изменялось на протяжении фанерозоя (рис. 10а). Для реконструкции эволюции этой характеристики из-за высокого содержания Sr использованы карбонатные раковины фораминифер, брахиопод, белемнитов и конодонтов, биогенный барит, зубы рыб и некоторые фосфатные пелоиды (Veizer et al., 1999; и др.). Для юры и мела предложена кривая, построенная по белемнитам Юрских гор (Швейцария) (рис. 10б) (Rais, 2007; Weissert et al., 2008).

Сергеевские метабазиты отличаются высоким значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.706491–0.707144; см. табл. 6). Такие или близкие к ним значения соответствуют значениям в морской воде, существовавшей ≈150–165 млн лет назад (см. рис. 10б), что согласуется со средне-позднеюрским временем аккреции и, соответственно, метаморфизма. Это в совокупности

с рассмотренными выше особенностями изменения парных значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Sm/Nd, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Y/Nb, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ –Zr/Y и геологическими данными свидетельствует о влиянии на значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ метабазитов сергеевского комплекса морской воды при их метаморфизме во время средне-позднеюрской аккреции.

Образование гнейсовидной текстуры метабазитов сергеевского комплекса происходило, очевидно, при плутонообразовании (Синица, 2004) и не приводило к наблюдаемому закономерному изменению таких изотопных и геохимических параметров пород, как Sm/Nd, Y/Nb, Zr/Y, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Закономерности изменения этих параметров вместе с геологическими данными указывают на более поздний диафторез, протекавший с участием морской воды во время средне-позднеюрской аккреции. Его проявление – развитие диафторических минералов (серпичита, хлорита, пренита, эпидота, карбоната и др.) в зонах катаклаза и милонизации, а также, с разной интенсивностью, в объеме пород. Кливаж милонитизированных метабазитов сориентирован с кливажом расположенных рядом филлитизированных слоистых пород от D до J, и, следовательно, диафторез и сопутствующая деформация проявились не раньше позднего мезозоя (Синица, 2004). Этот вывод согласуется со средне-позднеюрским временем аккреции и изменения изотопных и геохимических характеристик базитов сергеевского комплекса.

Считается, что значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в морской воде определяется свойствами континентальных источников (Frank, 2002). В триасе и юре, при накоплении металлоносных осадков (современное $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.51225$ –0.51240) и метаморфизме ме-

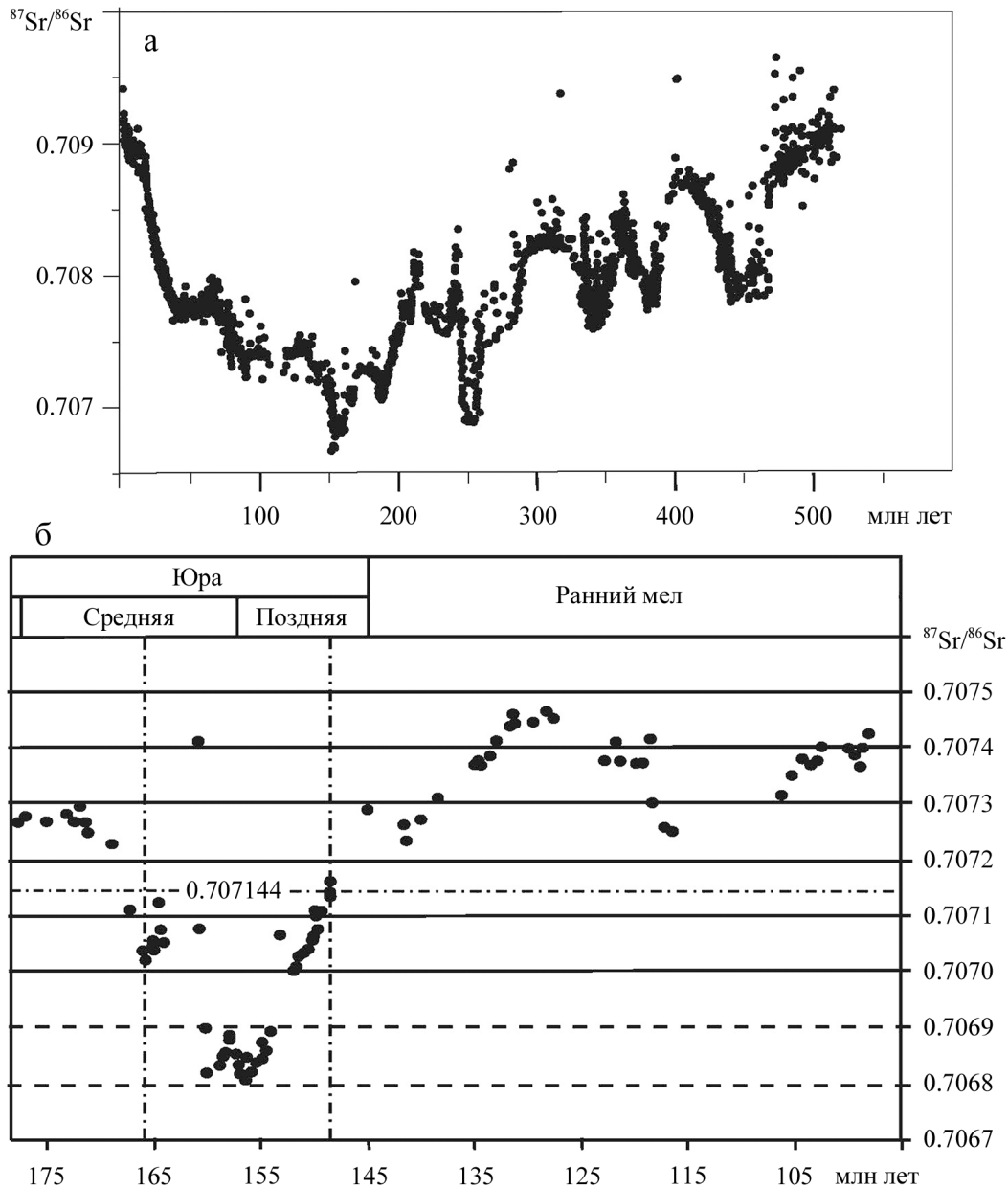


Рис. 10. Вариации изотопного состава стронция в морской воде в фанерозое (а) и средней юре–раннем мелу (б).

а – по результатам обобщения данных по брахиоподам, белемнитам, конодонтам и микриту матрицы (Veizer et al., 1999); б – по белемнитам Юрских гор, Швейцария (Rais, 2007; Weissert et al., 2008).

Горизонтальная и две вертикальные штрихпунктирные линии на “б” отвечают изолиниям максимальной величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в метабазитах сергеевского комплекса и предельным значениям возраста их метаморфизма соответственно.

Fig. 10. Variations in the isotopic composition of strontium in seawater in the Phanerozoic (a) and in the Middle Jurassic-Early Cretaceous (b).

а – based on the results of generalization of data on brachiopods, belemnites, conodonts, and micrite matrix (Veizer et al., 1999); б – based on belemnites of the Jurassic Mountains, Switzerland (Rais, 2007; Weissert et al., 2008).

The horizontal and two vertical dotted lines in “б” correspond to the isolines of the maximum $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value in the metabasites of the Sergeevsky complex and the age limits of their metamorphism, respectively.

табазитов сергеевского комплекса (≈ 0.51230 в наиболее измененных), судя по совпадению современных значений или пределов изменения в этих обра-

зованиях и в осадках северной части Тихого океана – ≈ 0.51220 – 0.51242 (Othman et al., 1989), оно определялось составом последних.

REE, Sr, Pb и Ca способны занимать общие позиции в структурах богатых Ca или REE минералов. Следовательно, диафторез метабазитов, который, судя по петрографическим данным и изменению изотопного состава Nd, сопровождался разложением или перекристаллизацией подобных минералов, должен был приводить также к изменению изотопных отношений Pb. Действительно, часть точек сергеевских метабазитов, содержащих Pb плюмовой природы, располагается (рис. 11) на общем тренде пород калиновского комплекса, Владимиро-Александровского массива, а также руд полиметаллических месторождений Дальнегорской группы. Другая часть из-за диафтореза отличается

более высокими (надсубдукционными) значениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и смещена в сторону полей базальтов Алеутской островной дуги. Такой же характер изменения (возрастание, но в гораздо большей степени) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, как и в метабазитах сергеевского комплекса, связанный с воздействием морской воды, отмечался и для серпентинизированных пород хребта Стелмейт. Он объясняется возможным привнесом U морской водой (Краснова, 2014).

Точки руд месторождений Дальнегорской группы расположены на общем тренде с точками пород калиновского и сергеевского комплексов (включая сергеевские метабазиты с ненарушенными изотопными отношениями и породы Владимиро-Алек-

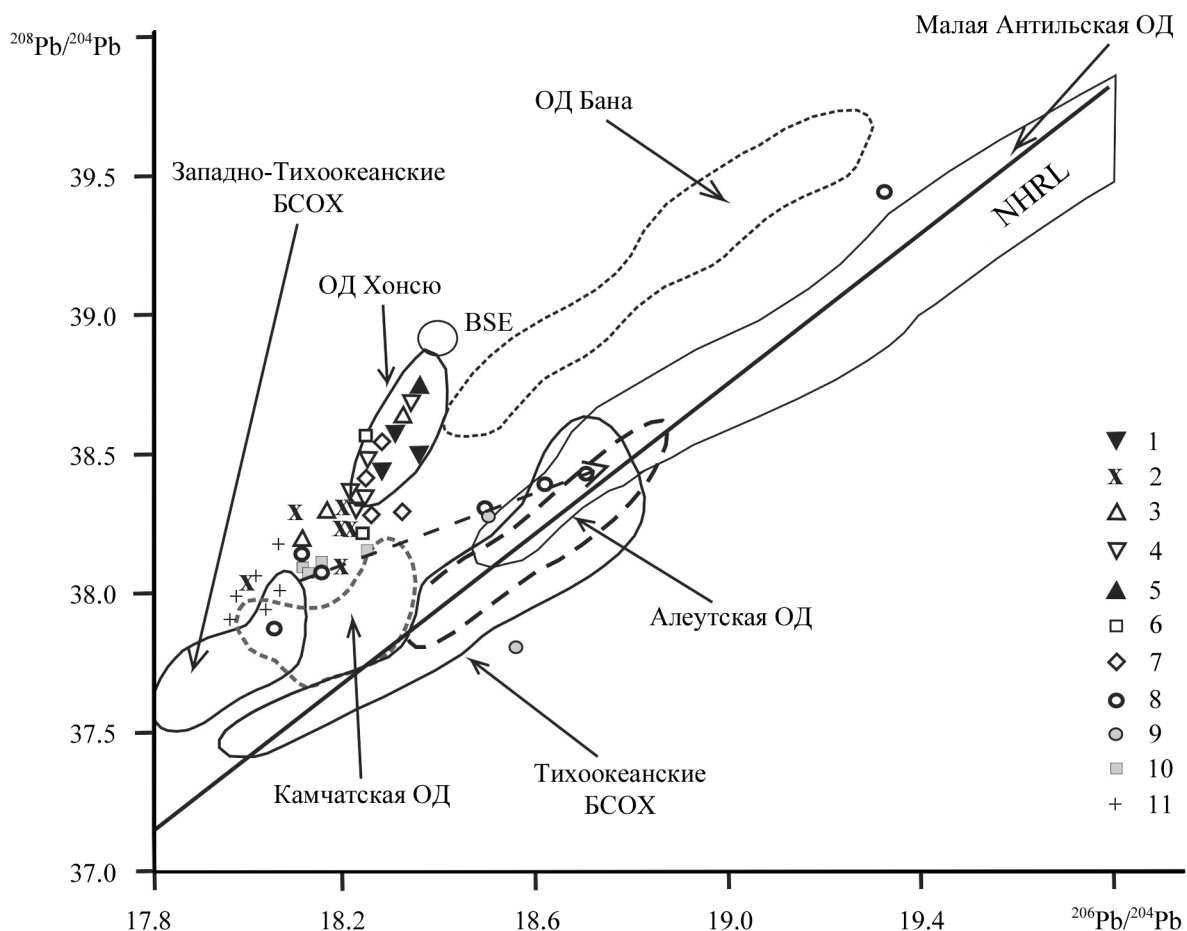


Рис. 11. Особенности изменения изотопных отношений Pb в метагабброидах Сихотэ-Алиня и рудах полиметаллических месторождений Дальнегорской группы (Казаченко и др., 2016).

1–7 – свинец месторождений: Верхнего (1), Николаевского (2), Первого Советского (3), Партизанского (4), Восточный Партизан (5), Второго Советского (6), Садового (7); 8–11 – свинец сергеевских (8) и авдокимовских (9) метабазитов, владими́ро-александровских (10) и бреевских (11) метаультрабазитов.

Fig. 11. Features of changes in the isotopic ratios of Pb in the Sikhote-Alin metagabbroids and ores of polymetallic deposits of the Dalnegorsk group (Kazachenko et al., 2016).

1–7 – lead from deposits: Verkhnee (1), Nikolaevskoe (2), Pervoe Sovetskoe (3), Partizanskoe (4), Vostochny Partizan (5), Vtoroe Sovetskoe (6), Sadovoe (7); 8–11 – lead from Sergeevsky (8) and Avdokimovsky (9) metabasites, Vladimiro-Alexandrovsky (10) and Breevsky (11) metaultrabasites.

сандровского массива) (см. рис. 11), которые и являлись для них источниками Pb и других металлов (Казаченко и др., 2016). Сохранение первичных (магматических) изотопных характеристик Pb в рудах связано с его накоплением в относительно закрытых водоемах (лагунах) островов. Изотопный состав Pb в воде таких водоемов и, соответственно, в рудах определялся составом Pb слагающих острова габброидов сергеевского и калиновского комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о влиянии на изменение изотопных отношений Nd, Sr и Pb, а также Sm/Nd в сергеевских метабазах последующих (после их образования) геологических событий.

Закономерное изменение значений Sm/Nd и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в сергеевских метабазах до значений в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках хемогенно-биогенного происхождения свидетельствует об их метаморфизме с участием морской воды. Значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в морской воде во время осадконакопления (триас) и метаморфизма (юра) сергеевских метагабброидов составляло ≈ 0.512055 , Sm/Nd было близким к 0.21, а значения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ примерно соответствовали таковым в базальтах некоторых островных дуг.

Геологические данные, участие морской воды в метаморфических реакциях, изотопные отношения Sr в измененных базитах сергеевского комплекса, характерные для морской воды, существовавшей около 150–165 млн лет назад, согласуются с представлениями об изменении изотопных и геохимических характеристик сергеевских метабазов в результате тектонических и гидротермальных процессов (диафтореза) во время средне-позднеюрской аккреции. Проявлением этих процессов выступает развитие диафторических минералов (альбита, серицита, хлорита, пренита, эпидота, карбоната и др.) в зонах катаклаза и милонизации базитов, а также образование меланжа и серпентинизация ультрабазитов сергеевского комплекса в основаниях аллохтонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берсенева И.И. (1974) Основные черты тектоники Приморского края. *Общие и региональные проблемы тектоники Тихоокеанского пояса*. Магадан, 114-125.
- Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Викентьев И.В., Леин А.Ю., Гурвич Е.Г., Сагалевиц А.М., Симонов В.А., Икорский С.В., Ставрова О.О., Аполлонов В.Н. и др. (2002) Минералого-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд и флюида поля Рейнбоу, ассоциированного с серпентинитами, Срединно-Атлантический хребет (36°14' с.ш.). *Геол. руд. месторождений*, **44**(6), 510-542.
- Волохин Ю.Г., Михайлик Е.В., Бурый Г.И. (2003) Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 252 с.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. (2006) (Под ред. А.И. Ханчука). Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 572 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2011) Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист L-(52), 53; (K-52), 53) – оз. Ханка. Объясн. записка. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 684 с.
- Змиевский М.В. (2017) Гидрохимические модели зоны разгрузки рудообразующих растворов на гидротермальном поле “Логачев”, Срединно-Атлантический хребет. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 147 с.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В. (2023) Изотопная (Sm-Nd) и геохимическая (Nb/Y-Zr/Y) систематика базит-гипербазитовых комплексов Сихотэ-Алиня. *Геохимия*, **68**(4), 341-366.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Лаврик С.Н. (2016) Геохимические и изотопные “метки” древних габброидов в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках, скарнах и рудах скарновых месторождений Сихотэ-Алиня. *Вестн. Кольского НЦ РАН*, **4**(27), 16-36.
- Кемкин И.В. (2019) Фациальные обстановки образования кремниевых пород Таухинского террейна Сихотэ-Алиня (по геохимическим данным). *Вестн. ВГУ. Сер.: Геология*, (2), 48-60.
- Коваленко С.В., Давыдов И.А. (1991) Сергеевский выступ – древняя структура Южного Сихотэ-Алиня. *ДАН СССР*, **319**(5), 1173-1177.
- Краснова Е.А. (2014) Магматическая и метаморфическая эволюция мантийного субстрата литосферы северо-западной части Тихого океана. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 26 с.
- Крук Н.Н., Голозубов В.В., Ханчук А.И., Александров И.А., Чашин А.А., Склярков Е.В. (2018) Интрузивные комплексы Сергеевского террейна – древнейшего блока Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 56 с.
- Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В. (2015) Сравнительная Sr-Nd-систематика карбонатных пород в типовых магнетитовых месторождениях нижнего рифея южно-уральской провинции. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 162, 100-106.
- Лю И., Перчук А.Л., Зиновьева Н.Г. (2019) Свидетельство кумулюсной кристаллизации и локальные проявления эклогитового метаморфизма в оливиновом габбро комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4 – Геол.*, (2), 96-105.
- Мазарович А.О. (1985) Тектоническое развитие Южного Приморья в палеозое и раннем мезозое. М.: Наука, 104 с.
- Никогосян В.А. (1973) Основные черты магматизма Центрального Сихотэ-Алиня. *Вопросы магматизма, метаморфизма и оруденения Дальнего Востока*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 67-70.
- Пейве А.А., Соколов С.Ю., Иваненко А.Н., Разумовский А.А., Патина И.С., Боголюбовский В.А., Веклич И.А., Денисова А.П., Добролюбов В.Н., Докашенко С.А., Иванова Е.С., Лапина С.А., Наумов И.А., Никитин Н.С., Уразмуратова З.Ф. (2023) Аккреция океанической коры в Срединно-Атлантическом хребте (48°–51.5° с.ш.) в ходе “сухого” спре-

- динга. Докл. РАН. Науки о Земле, **508**(2), 155-163.
- Ростовский Ф.И. (2005) Об изотопных отношениях свинца в галенитах рудных месторождений Востока Азии. *Тихоокеан. геол.*, **24**(2), 33-45.
- Сергеев С.А., Пушкарев Ю.Д., Лохов К.И., Сергеев Д.С. (2015) Обзор современных методов изотопной геохронологии (составная часть Геохронологического атласа). СПб., 31 с.
- Силантьев С.А. (2003) Вариации геохимических и изотопных характеристик реститовых перидотитов вдоль простираания Срединно-Атлантического хребта как отражение природы мантийных источников магматизма. *Петрология*, (11), 339-362.
- Синица С.М. (2004) О происхождении гнейсовой фации сергеевских габброидов (Южное Приморье). *Тихоокеан. геол.*, **23**(3), 32-36.
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 590 с.
- Ханчук А.И. (2000) Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России. *Рудные месторождения континентальных окраин*. Владивосток: Дальнаука, 5-34.
- Чашухин И.С., Чередниченко Н.В., Адамович Н.Н. (2012) О поведении редких элементов при ранней серпентинизации ультрамафитов. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 159, 125-128.
- Штейнберг Д.С., Чашухин И.С., Ковальчук А.И. (1991) Океанические воды – агент серпентинизации в альпийских ультрамафитах континентов. *Докл. АН СССР*, **320**(3), 713-715.
- Шулятин О.Г., Андреев С.И., Беляцкий Б.В., Трухалев А.И. (2012) Возраст и этапность формирования магматических пород Срединно-Атлантического хребта по геологическим и радиологическим данным. *Регион. геология и металлогения*, (50), 28-36.
- Dietrich Ju., Hermann Jö., Pettke T. (2024) Magmatic genesis, hydration, and subduction of the tholeiitic eclogite-facies Allalin gabbro (Western Alps, Switzerland). *Swiss J. Geosci.*, **117**, 12. <https://doi.org/10.1186/s00015-024-00461-8>.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. (1978) Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 1199-1212.
- Frank M. (2002) Radiogenic isotopes: tracers of past ocean circulation and erosional input. *Rev. Geophys.*, **40**(1), 1-38.
- Früh-Green G.L., Scambelluri M., Vallis F. (2001) O-H isotope ratios of high-pressure ultramafic rocks: Implications for fluid sources and mobility in the subducted hydrous mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **141**, 145-159.
- Le Maitre R., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M., Bonin B., Bateman P. (Eds) (2002) Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. *Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks (2nd ed.)*. N. Y., Cambridge University Press., 236 p.
- Othman D.B., White W.M., Patchett J. (1989) The geochemistry of marine sediments, island-arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **94**, 1-21.
- Rais P. (2007) Evidence for major paleoceanographic reorganization during the Late Jurassic; insights from sedimentology and geochemistry. Ph. D. dis. Federal Institute of Technology ETH Zürich, 149 p.
- Scambelluri M., Fiebig J., Malaspina N., Müntener O., Pettke T. (2004) Serpentine Subduction: Implications for Fluid Processes and Trace-Element Recycling. *Int. Geol. Rev.*, **46**, 595-613.
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Godderis Y., Jasper T., Korte Ch., Pawellek F., Podlaha O.G., Strauss H. (1999) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δ ¹³C and δ ¹⁸O evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, **161**, 59-88.
- Weissert H., Joachimski M., Sarnthein M. (2008) Chemostratigraphy. *Newsl. Stratigr.*, **42**(3), 145-179.

REFERENCES

- Kovalenko S.V., Davydov I.A. (1991) The Sergeevsky protrusion is an ancient structure of the Southern of Sikhote-Alin. *Dokl. AN SSSR*, **319**(5), 1173-1177. (In Russ.)
- Krasnova E.A. (2014) Magmatic and metamorphic evolution of the mantle substrate of the lithosphere of the Northwestern Pacific Ocean. Abstr. Diss. ... Cand. Geol. and Min. Sci. Moscow, 26 p. (In Russ.)
- Kruk N.N., Golozubov V.V., Khanchuk A.I., Alexandrov I.A., Chashchin A.A., Sklyarov E.V. (2018) Intrusive complexes of the Sergeevsky terrane, the oldest block of Southern Primorye. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 56 p. (In Russ.)
- Krupenin M.T., Kuznetsov A.B., Konstantinova G.V. (2015) Comparative Sr-Nd systematics of carbonate rocks in typical magnesite deposits of the Lower Riphean of the South Ural province. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 162, 100-106. (In Russ.)
- Le Maitre R., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M., Bonin B., Bateman P. (Eds) (2002) Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. *Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks (2nd ed.)*. N. Y., Cambridge University Press., 236 p.
- Lyu Y., Perchuk A.L., Zinov'eva N.G. (2019) Evidence of cumulus crystallization and local manifestations of eclogite metamorphism in the olivine gabbro of the Marunkeu complex, Polar Urals. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4 – Geol.*, (2), 96-105.
- Mazarovich A.O. (1985) The tectonic development of Southern Primorye in the Paleozoic and Early Mesozoic. Moscow, Nauka Publ., 104 p. (In Russ.)
- Nikoghosyan V.A. (1973) The main features of magmatism in Central Sikhote-Alin. *Magmatism, metamorphism and mineralization of the Far East*. Vladivostok, DVNTs AN SSSR Publ., 67-70. (In Russ.)
- Othman D.B., White W.M., Patchett J. (1989) The geochemistry of marine sediments, island-arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **94**, 1-21.
- Peive A.A., Sokolov S.Yu., Ivanenko A.N., Razumovskii A.A., Patina I.S., Bogolyubskii V.A., Veklich I.A., Denisova A.P., Dobrolyubov V.N., Dokashenko S.A., Ivanova E.S., Lapina S.A., Naumov I.A., Nikitin N.S., Urazmuratova Z.F. (2023) Accretion of oceanic crust in the Mid-Atlantic ridge (48–51.5° N) during “dry” spreading. *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **508**(2), 155-163. (In Russ.)
- Rais P. (2007) Evidence for major paleoceanographic reorganization during the Late Jurassic; insights from sedimentology and geochemistry. Ph. D. diss. Federal Institute of Technology ETH Zürich, 149 p.
- Rostovskii F.I. (2005) About of isotopic ratios of lead in galena ore deposits in East Asia. *Tikhookean. Geol.*, **24**(2), 33-45. (In Russ.)
- Scambelluri M., Fiebig J., Malaspina N., Müntener O., Pettke T. (2004) Serpentinite Subduction: Implications for Fluid Processes and Trace-Element Recycling. *Int. Geol. Rev.*, **46**, 595-613.
- Sergeev S.A., Pushkarev Yu.D., Lokhov K.I., Sergeev D.S. (2015) Review of modern methods of isotope geochronology (an integral part of the Geochronological Atlas). St.Petersburg, 31 p. (In Russ.)
- Silant'ev S.A. (2003) Variations in geochemical and isotopic characteristics of restite peridotites along the Mid-Atlantic Ridge strike as a reflection of the nature of mantle magmatism sources. *Petrologiya*, (11), 339-362. (In Russ.)
- Sinita S.M. (2004) About of the origin of the gneiss facies of the Sergeevsky gabbroids (Southern Primorye). *Tikhookean. Geol.*, **23**(3), 32-36. (In Russ.)
- Shulyatin O.G., Andreev S.I., Belyatskii B.V., Trukhalev A.I. (2012) Age and stage of formation of igneous rocks of the Mid-Atlantic ridge according of geological and radiological data. *Region. Geologiya i Metallogeniya*, (50), 28-36. (In Russ.)
- Steinberg D.S., Chashchukhin I.S., Koval'chuk A.I. (1991) Oceanic waters are an agent of serpentinization in alpine-typic ultramafic of continents. *Dokl. AN SSSR*, **320**(3), 713-715. (In Russ.)
- The State Geological Map of the Russian Federation. (2011) Scale 1:1 000 000 (3-rd gener.). Sheet (L-(52), 53; (K-52, 53) – Khanka. An explanatory note. St.Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory, 684 p. (In Russ.)
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Godderis Y., Jasper T., Korte Ch., Pawellek F., Podlaha O.G., Strauss H. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, **161**, 59-88.
- Volokhin Yu.G., Mikhailik E.V., Buri G.I. (2003) Triassic flint formation of Sikhote-Alin. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 252 p. (In Russ.)
- Weissert H., Joachimski M., Sarntheim M. (2008) Chemostratigraphy. *Newsl. Stratigr.*, **42**(3), 145-179.
- Zmievskaia M.V. (2017) Hydrochemical models of the ore-forming solutions discharge zone in the Logachev hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. Cand. geol. and min. sci. diss. St.Petersburg, 147 p. (In Russ.)