

MARBLE MÉLANGE: COMPOSITION VARIATIONS AND FORMATION MECHANISMS**E.V. Sklyarov** ^{1✉}, **A.V. Lavrenchuk**^{2,3}, **A.M. Mazukabzov**¹

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The Olkhon terrane in the Western Baikal area accommodates four types of carbonate-silicate mixtures: injection (protrusion), metamorphic-boudinated, mingling, and tectonite marble mélangé. The outcrops of injection mélangé consist of a carbonate matrix with inclusions of native silicic rocks found in the immediate vicinities, commonly cover large areas and lack any distinct linearity in the map view. Mélangé of the metamorphic boudinage type comprises diopsidite and tremilote-diopsidite fragments in a dolomitic or calcite-dolomitic matrix. Its origin is apparently due to tectonism and related metamorphism of quartz sandstones in Neoproterozoic strata on the passive margin of the Siberian craton. Mingling mélangé appears as calcite marble or carbonate-silicate (calciphyre) veins with metadolerite and granite inclusions of different sizes. The veins formed by intrusion of carbonate and silicate melt batches and subsequent fragmentation of silicate rocks that crystallized earlier. Marble tectonites localized in narrow zones record the late phase of ductile marble injection.

KEYWORDS: mélangé; marble; strike-slip tectonics; metamorphism; deformation; Olkhon terrane

FUNDING: Financial support for the research: grant 20-05-00005 from the Russian Federation of Basic Research; grant 075-15-2019-1883 from the Government of the Russian Federation. The research activities involved work equipment of CCU "Geodynamics and Geochronology" at the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

RESEARCH ARTICLE

Received: September 13, 2021

Revised: October 8, 2021

Accepted: October 11, 2021

Correspondence: Eugene V. Sklyarov, skl@crust.irk.ru**English version:** see article page online**FOR CITATION:** Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., 2021. Marble mélangé: variations of composition and modes of formation. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (4), 805–825. doi:10.5800/GT-2021-12-4-0556

МРАМОРНЫЙ МЕЛАНЖ: ВАРИАЦИИ СОСТАВА И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ

Е.В. Скляр¹, А.В. Лавренчук^{2,3}, А.М. Мазукабзов¹

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В пределах Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье) выделены и охарактеризованы четыре типа «мраморно-силикатных смесей», для которых мы используем термин «меланж»: инъекционный (протрузивный), метаморфогенно-разлинзованный, инъекционно-минглинговый и мраморные тектониты. Для инъекционного (протрузивного) типа меланжа характерны проявления, занимающие значительные площади и не имеющие в плане отчетливой линейной (пластовой) конфигурации, в качестве включений в карбонатном матриксе всегда находятся фрагменты силикатных пород, присутствующих в ближайшем окружении. Метаморфогенно-разлинзованный тип меланжа характеризуется присутствием фрагментов диопсидов и тремолит-диопсидовых пород в доломитовом или кальцит-доломитовом матриксе. Его образование объясняется тектонометаморфическим преобразованием кварцевых песчаников неопротерозойских осадков пассивной окраины Сибирского кратона. Инъекционно-минглинговый тип меланжа представлен жильными телами кальцитовых мраморов или карбонатно-силикатных пород (кальцифиров) с разноразмерными фрагментами метаморфизованных долеритов и гранитов. Они образовались в результате внедрения порций карбонатного и силикатного расплавов с последующим фрагментированием закристаллизовавшихся раньше силикатных пород. Мраморные тектониты фиксируют позднюю стадию инъекционного внедрения мраморов в вязкопластическом состоянии, локализуясь в узких зонах в пределах мраморного меланжа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: меланж; мрамор; Ольхонский террейн; сдвиговый тектогенез; метаморфизм; деформации

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственных заданий ИЗК СО РАН и ИГМ СО РАН при поддержке РФФИ (грант 20-05-00005) и Правительства Российской Федерации (грант № 075-15-2019-1883). В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1993 году Валентин Сергеевич Федоровский с соавторами выделил в пределах Ольхонского террейна Западного Прибайкалья новый, не описанный ранее тип меланжа – мраморный [Fedorovsky et al., 1993], в самом общем виде представляющий собой тела мраморов, в разной степени насыщенные фрагментами силикатных пород разного размера (от первых миллиметров до десятков метров). Как ни странно, Западное Прибайкалье до сих пор является единственным местом широкого распространения мраморного меланжа; за почти тридцать лет в геологической периодике не появилось ни одной публикации с упоминанием чего-либо подобного в других регионах. Можно предполагать уникальность Ольхонского террейна, но, скорее всего, есть и другие причины отсутствия описания подобных образований в геологических структурах мира, среди которых наиболее вероятными представляются три. Первой причиной критического отношения к термину «мраморный меланж» может быть то, что наблюдаемые фрагменты силикатных пород в мраморах других регионов традиционно воспринимаются в качестве результата будинажа более компетентных по отношению к карбонатным породам силикатных прослоев первично-осадочного или осадочно-вулканогенно-карбонатного разреза. Поскольку такой

механизм образования карбонатно-силикатных «смесей» в метаморфических комплексах вполне реален, другие варианты их генезиса просто не рассматривались. Второй причиной может быть то, что статья с характеристикой мраморного меланжа была опубликована на русском языке в журнале «Геотектоника», не слишком известном и доступном для большинства зарубежных специалистов. И, наконец, третья и, на наш взгляд, более важная причина заключается в нюансах дефиниции термина «меланж», имеющего, несмотря на длительную историю изучения, несколько разных толкований. Возможно, приведенное в статье [Fedorovsky et al., 1993] описание силикатно-карбонатных «смесей» Ольхонского террейна и объяснение их природы не соответствовали представлениям специалистов о меланже. Вопрос о правомерности использования термина «меланж» применительно к этим «смесям» требует специального обсуждения, которое имеет смысл только после описания их особенностей, поэтому в дальнейшем мы будем вслед за В.С. Федоровским [Fedorovsky et al., 1993] называть карбонатные породы с фрагментами силикатных пород мраморным меланжем, в ряде случаев используя и термин «карбонатно-силикатная смесь».

Детальное изучение разных и очень многообразных проявлений мраморного меланжа Ольхонского

террейна за почти тридцать лет после первой публикации о нем позволило выделить несколько его типов с различными возможными механизмами их образования, среди которых, как ни странно, не оказалось ни одного, отвечающего варианту классического будинажа. Точнее, механизм будинажа осуществлялся, но не в варианте метаморфизма и деформаций первоначально осадочно-вулканогенного разреза, при котором фрагментировались бы слои силикатного состава при интенсивном тектогенезе. Описанию разных типов мраморного меланжа Ольхонского террейна и попытке определения механизмов их формирования и посвящена настоящая статья.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЛЬХОНСКОГО ТЕРРЕЙНА

Прежде чем приступить к характеристике террейна, считаем необходимым дать некоторые терминологические пояснения. Для обозначения этой геологической структуры разными авторами используются разные термины: террейн, композитный террейн, супертеррейн, коллизионная система, аккреционно-коллизионная система [Fedorovsky et al., 1995, 2017, 2020; Sklyarov, 2005; Dobretsov, Buslov, 2007; Fedorovsky, Sklyarov, 2010; Buslov, 2011, 2014; Donskaya et al., 2017; Sklyarov

et al., 2020; и др.]. Поскольку в статье абсолютно не затрагиваются вопросы тектонического «состояния» и эволюции геологических образований Ольхонского региона, а тем более терминологии, мы отдали предпочтение термину «террейн» по двум основным причинам: 1) термин широко использовался применительно к рассматриваемой геологической структуре в публикациях; 2) он самый короткий и добавляет меньше знаков при ограниченном объеме статьи.

За многолетнюю историю изучения метаморфических образований о. Ольхон и прилегающих территорий Западного побережья Байкала (Приольхонье) взгляды на их структуру и возраст претерпели серьезную трансформацию: от высокометаморфизованных раннедокембрийских осадочно-вулканогенных толщ, хорошо сохранивших первичную стратификацию [Pavlovsky, Eskin, 1964; Eskin et al., 1979; и др.] до сложенно построенных пакетов сдвиговых пластин разной природы с раннепалеозойским (500–460 млн лет) возрастом основных магматических и метаморфических событий [Fedorovsky, Sklyarov, 2010; Donskaya et al., 2017, и ссылки в этих работах]. Ольхонский террейн является составной частью Байкальского раннепалеозойского коллизионного пояса [Donskaya et al., 2000], примыкающего к южной части Сибирского кратона (рис. 1).

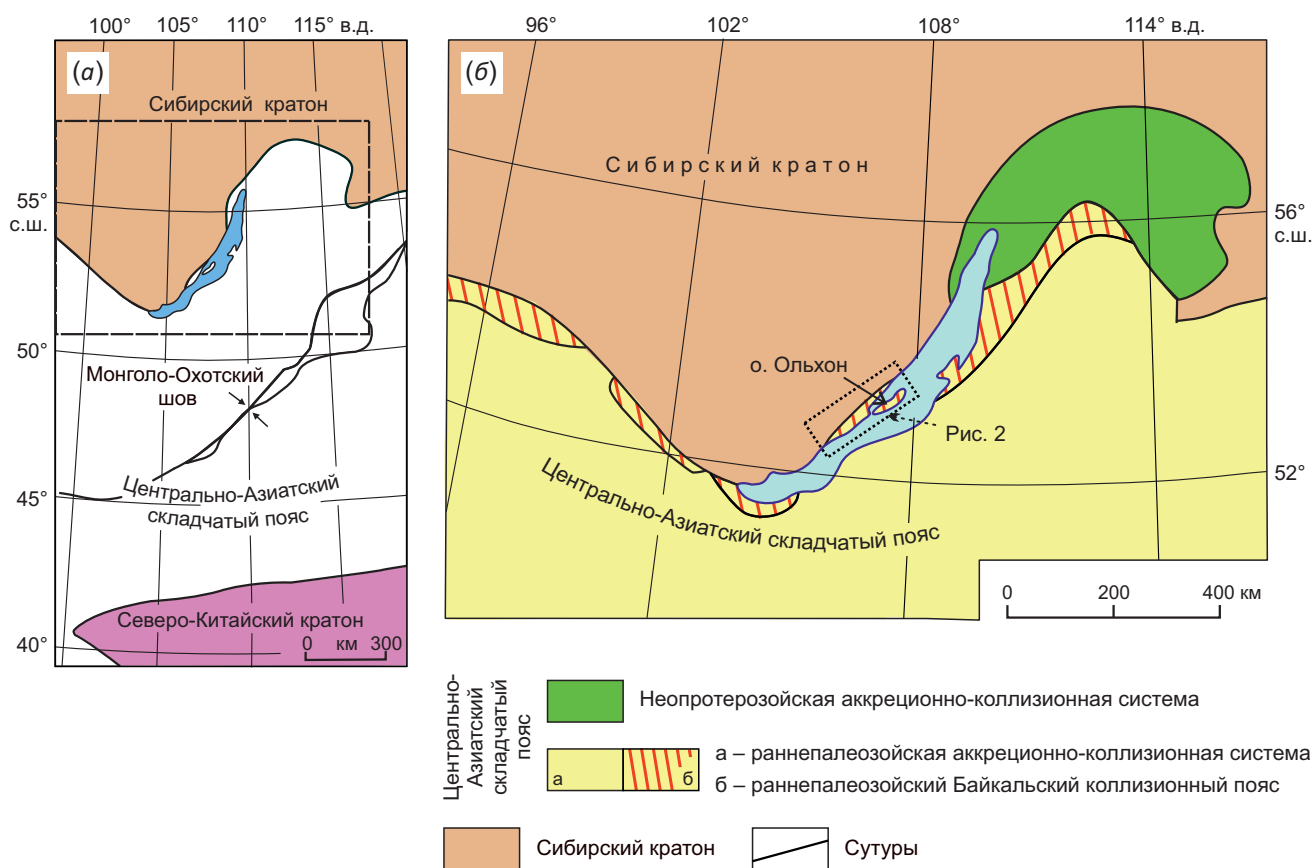


Рис. 1. Тектоническая схема Центральной Азии (а) и схема метаморфических террейнов в обрамлении Сибирского кратона (б) (по [Donskaya et al., 2017], с изменениями).

Fig. 1. Simplified tectonics of Central Asia (a) and metamorphic terranes in the Early Palaeozoic Baikal collisional belt of northern CAO (b), modified from [Donskaya et al., 2017].

В первом приближении в составе террейна выделяются две крупные структуры, рассматриваемые ранее в качестве метаморфизованных осадочно-вулканогенных серий [Pavlovsky, Eskin, 1964]: ольхонская, существенно гнейсовая с подчиненным количеством мраморов, амфиболитов и кварцитов, а также массивами габбро и гранитов и многочисленными жилами пегматит-аплитов, и ангинская, существенно карбонатно-амфиболитовая, в пределах которой более 50 % общего объема составляют массивы габбро. По существу, такое разделение сохранилось и сейчас, только трактовка этих структур существенно изменилась (рис. 2). Более-менее цельной структурой остался Крестовский субтеррейн, отвечающий ангинской серии в старом толковании (мраморно-амфиболитовая толща на рис. 2). Остальная же часть Ольхонского террейна имеет более сложное строение, представленное композитом крупных фрагментов, имеющих разный возраст и природу протолитов [Donskaya et al., 2017]. Структура Ольхонского террейна, по представлениям В.С. Федоровского, [Fedorovsky et al., 1995] была сформирована в результате нескольких этапов тектогенеза (покровный, купольный, сдвиговый), сопровождавшихся высокотемпературными метаморфическими преобразованиями, базитовым и гранитоидным магматизмом. Охарактеризованные в многочисленных публикациях структурно-вещественные парагенезисы, отвечающие раннему надвигообразованию, последующему купольному тектогенезу и завершающим сдвиговым деформациям, были сформированы в раннем палеозое в результате двух коллизионных событий (микроконтинент – островная дуга и микроконтинент – континент) [Sklyarov, 2005; Fedorovsky, Sklyarov, 2010]. Наиболее мощно и многообразно проявлены процессы сдвигового тектогенеза, определившие генеральную структуру Ольхонского региона, в которой выделяются пакеты сдвиговых пластин различного состава, морфологии и внутренней структуры.

В пределах террейна проявлены как минимум два этапа метаморфизма [Sklyarov et al., 2020], характеризующиеся различными РТ-условиями. Метаморфизм гранулитовой фации характерен для узкой полосы, прилегающей к коллизионному шву, отделяющему Ольхонский террейн от Сибирского кратона. Возраст метаморфизма около 500 млн лет [Gladkochub et al., 2008]. Метаморфические преобразования остальной части террейна варьируются от гранулитовой до эпидот-амфиболитовой фации и соответствуют основным коллизионным событиям во временном интервале 460–470 млн лет [Volkova et al., 2010; Sklyarov et al., 2020].

Карбонатные (кальцитовые, доломит-кальцитовые и доломитовые мраморы) и карбонатно-силикатные (кальцифиры) породы составляют около 20 % всего объема пород Ольхонской коллизионной зоны (рис. 3). Нередко мраморы слагают относительно маломощные (10–100 м) и протяженные (первые километры, иногда десятки километров) тела пластовой формы, присутствие которых для многих исследователей служило одним из поводов для интерпретации геологической ситуации как простого и относительно ненарушенного разреза метаморфизованных осадочно-вулканогенных образований. Кажущаяся простота разреза вступает в явное противоречие с результатами структурного анализа и множеством сдвиговых пластин, детально закартированных на площади региона [Fedorovsky, Sklyarov, 2010]. Нередко карбонатные породы образуют сложные «смеси» с кварцитами и породами основного состава (амфиболиты, базитовые гранулиты), занимающие разные по конфигурации площади. Это послужило основой для логичного предположения об аллохтонном положении большинства карбонатных образований региона [Sklyarov et al., 2013a]. Справедливости ради следует отметить, что еще в статье о мраморном меланже В.С. Федоровский с соавторами отметили, что «...в Ольхонском регионе истинно стратиграфическое положение сохранилось не более

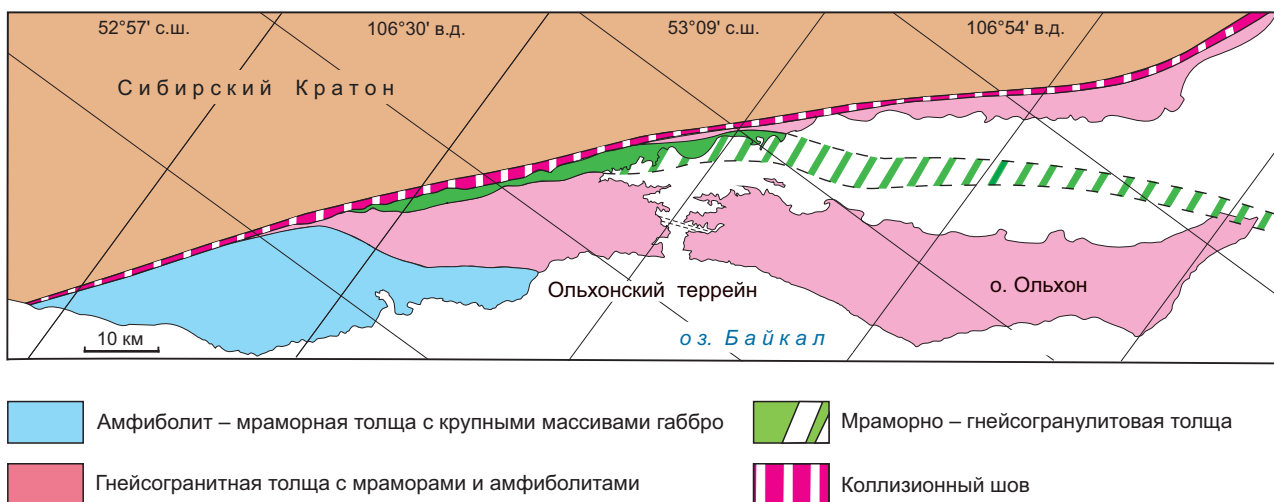


Рис. 2. Упрощенная тектоническая схема Ольхонского террейна (по [Donskaya et al., 2017], с изменениями).

Fig. 2. Simplified tectonics of the Olkhon terrane, modified after [Donskaya et al., 2017].

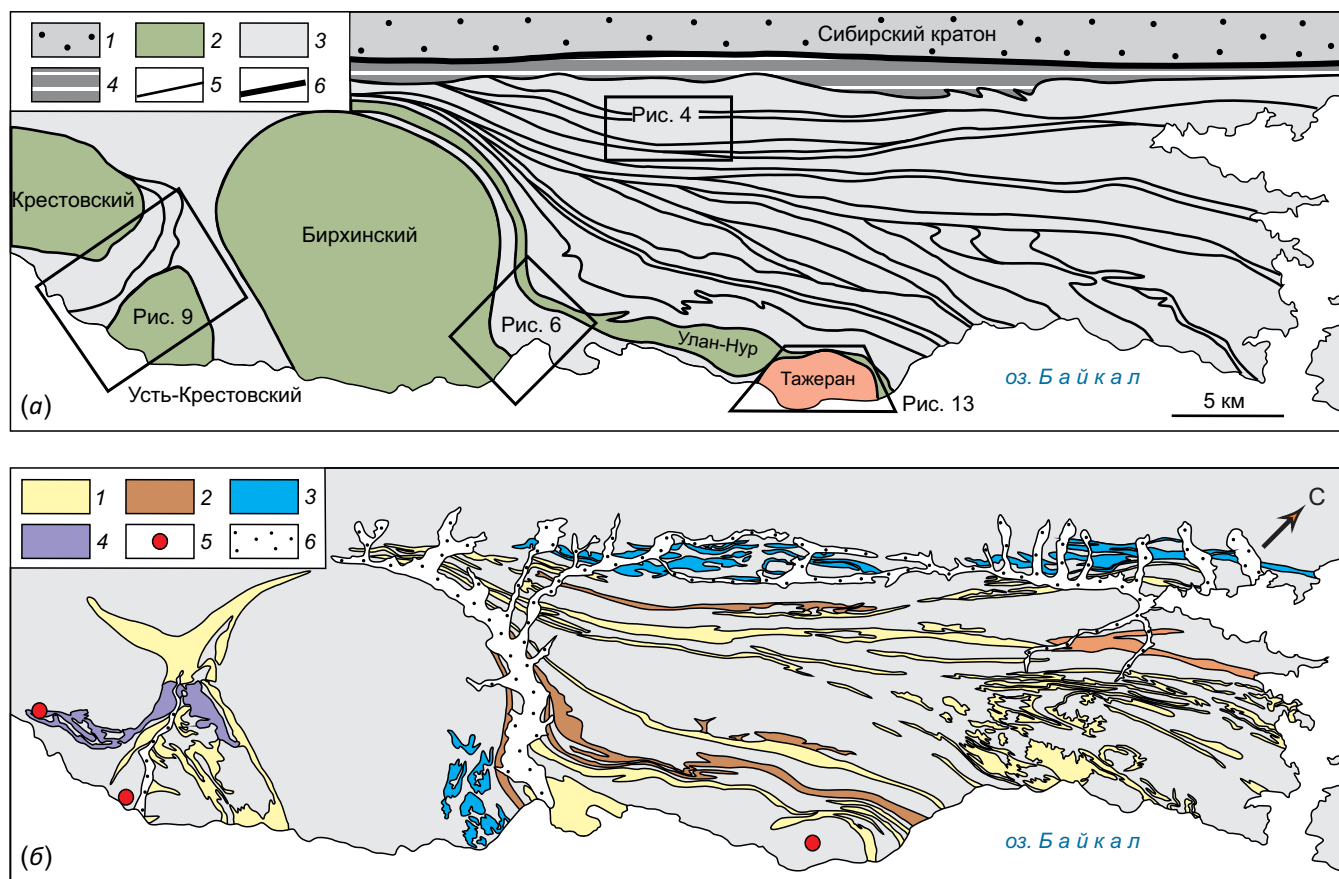


Рис. 3. Схема основных сдвигов (а) и распространения карбонатных пород (б) центральной части Ольхонского террейна. (а): 1 – раннедокембрийские образования Сибирского кратона; 2 – крупные массивы габбро; 3 – метаморфические комплексы Ольхонского террейна; 4 – раннепалеозойский коллизионный шов; 5 – вязкопластические сдвиги; 6 – кайнозойский шов. (б): 1 – кальцитовые мраморы; 2 – доломитовые и кальцит-доломитовые мраморы; 3 – инъекционный тип меланжа; 4 – метаморфогенно-разлинзованный тип меланжа; 5 – инъекционно-минглинговый тип меланжа; 6 – современные алювиальные отложения.

Fig. 3. Main shear zones (а) and carbonate rocks (б) of the central Olkhon terrane. (а): 1 – Early Precambrian complexes of the Siberian craton; 2 – large gabbro intrusions; 3 – metamorphic complexes of the Olkhon terrane; 4 – Early Paleozoic collisional suture zone; 5 – shear zones; 6 – Cenozoic suture. (б): 1 – calcite marble; 2 – dolomite and calcite-dolomite marbles; 3 – injection mélange; 4 – metamorphic-boudinated mélange; 5 – mingling mélange; 6 – recent alluvium.

чем у половины тел мраморов. Другая их половина оказалась вовлеченной в протрузивный процесс, заняла аллохтонное положение и утратила связь со стратиграфическим разрезом» [Fedorovsky et al., 1993, с. 38].

3. СОСТАВ, СТРУКТУРА И ХАРАКТЕР ПРОЯВЛЕНИЯ МРАМОРНОГО МЕЛАНЖА

Прежде чем приступить к характеристике карбонатно-силикатных комплексов Ольхонского террейна, целесообразно привести основные положения статьи В.С. Федоровского с соавторами [Fedorovsky et al., 1993], отталкиваясь от которых можно дополнять и развивать его идею.

– Мраморный меланж сложен матриksom мелко-, средне- до крупнозернистых мраморов белого или серого цвета, содержащим мелкие или крупные фрагменты силикатных пород, реже мраморов, отличающихся по цвету или структуре. Размеры фрагментов от нескольких миллиметров до десятков метров.

– Состав фрагментов весьма разнообразный: мафитовые гранулиты, разнообразные гнейсы, амфиболиты, метагаббро, метадолериты, граниты, карбонатно-силикатные породы, кварциты, разнообразные метасоматические породы, образовавшиеся в результате взаимодействия силикатных и карбонатных пород. Важная особенность – обломки в меланже «местного происхождения». Например, гранулиты встречаются только в зоне гранулитового метаморфизма. Фрагменты экзотических пород, отсутствующих в структуре террейна, не отмечены.

– В матриксе меланжа резко преобладают кальцитовые мраморы, реже встречаются силикатно-карбонатные породы (кальцифиры), в которых доля силикатного материала может составлять 15–30%. Доломитовые и доломит-кальцитовые мраморы в составе меланжа встречаются значительно реже.

– Мраморный меланж может слагать как линейные тела, протягивающиеся на первые километры, нередко

линзующиеся, так и тела сложной формы, размером от десятков метров до первых километров.

– Проявления мраморного меланжа можно рассматривать в качестве своеобразных протрузий в глубинных горизонтах земной коры. Их появление вызвано локальным увеличением давления, обусловленного, вероятно, высокой скоростью деформаций и сложной конфигурацией деформируемых блоков (пластин) при сдвиге тектогенезе.

– По всем признакам карбонатно-силикатные «смеси» Ольхонского террейна отвечают принятому определению меланжа (этот пункт мы обсудим более подробно ниже).

Детали состава и структуры мраморного меланжа были рассмотрены на примере нескольких участков зоны Тонта с гранулитовой степенью метаморфизма, а также междуречья рек Анга – Бегул и пади Широкая Крестовского субтеррейна с эпидот-амфиболитовой степенью метаморфизма. И действительно, в зоне Тонта и Крестовском субтеррейне мраморные меланжи наиболее широко распространены, однако они были

отмечены и на других участках. Исследования последних лет позволили дополнить реестр проявлений мраморного меланжа и выделить четыре его типа, которые с некоторой степенью условности можно назвать: инъекционный (протрузивный), метаморфогенно-разлинзованный, инъекционно-минглинговый и мраморные тектониты. Обоснование названий типов меланжа мы рассмотрим в разделе «Обсуждение результатов», ниже приведем описание этих типов.

3.1. Инъекционный (протрузивный) меланж

Тектонотипическая местность проявления мраморного меланжа – великолепно обнаженное плато, расположенное между урочищами Тонта и Улан-Харгана (рис. 4). Здесь картируется полоса развития пород пестрого состава, метаморфизованных в условиях гранулитовой фации. Около половины всех карбонатных структур – линейно вытянутые тела, расположенные среди пироксеновых и двупироксеновых мафических гранулитов, гнейсов и кварцитов. Линейные карбонатные тела не только часто содержат мелкие и крупные

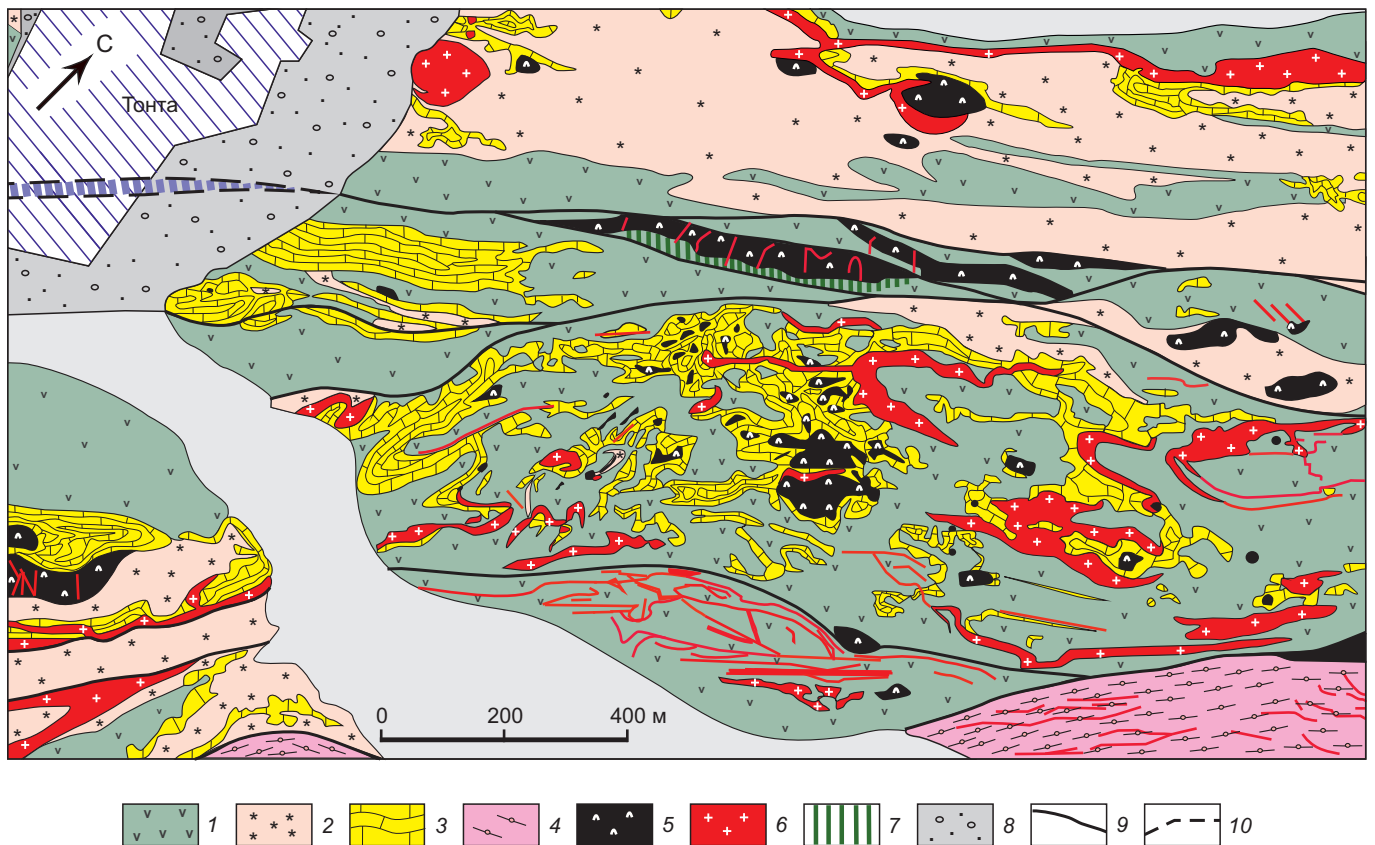


Рис. 4. Фрагмент аэрокосмической геологической карты юго-западной части зон Черноруд и Тонта Ольхонского региона (по [Fedorovsky et al., 2012]).

1 – гиперстеновые, двупироксеновые гнейсы и базитовые гранулиты; 2 – кварциты; 3 – мраморный меланж; 4 – биотитовые, гранат-биотитовые гнейсы; 5 – фассаитовые метапироксениты и метагаббро; 6 – синметаморфические граниты; 7 – скарны и скарноиды; 8 – четвертичные глицьогравитационные валунники; 9 – геологические границы; 10 – сuture.

Fig. 4. Aerospace geological map of the southwestern Chernorud and Tonta zones. A fragment [Fedorovsky et al., 2012].
1 – hypersthene and two-pyroxene gneiss and mafic granulite; 2 – quartzite; 3 – marble mélange; 4 – biotite and garnet-biotite gneisses; 5 – fassaite pyroxenite and gabbro; 6 – synmetamorphic granite; 7 – skarn and skarnoids; 8 – Quaternary glacial boulders and gravity sliding features; 9 – geologic boundaries; 10 – sutures.

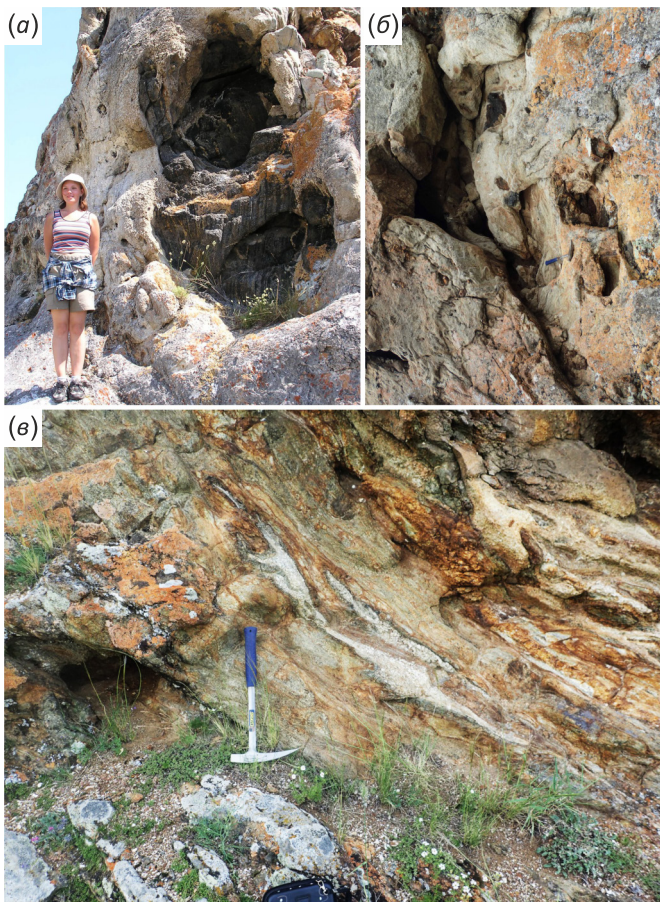


Рис. 5. Детали мраморного меланжа участка Тонта.

(а) – крупный фрагмент мафитовых гранулитов в крупнозернистых мраморах; (б) – мелкие фрагменты (от первых сантиметров до десятков сантиметров) мафитовых гранулитов, пироксеновых гнейсов, метагаббро и гранитов в среднезернистых мраморах; (в) – инъекции среднезернистых мраморов в пироксеновых гнейсах, на контакте мрамора и гнейса реакционная кайма существенно пироксенового состава.

Fig. 5. Marble mélange in the Tonta zone.

(a) – large fragment of mafic granulite in massive coarse-grained calcite marble; (б) – mafic granulite, pyroxene gneiss, metagabbro, and granite inclusions in medium-grained calcite marble; (в) – injections of medium-grained calcite marble in pyroxene gneiss, with a marble-gneiss pyroxene reaction zone.

включения силикатных пород разного состава, но и пересекают структуры, образованные гнейсами и кварцитами. Состав включений в мраморных меланжах отвечает составу пород, расположенных в непосредственной близости. Вторая половина тел меланжа образует в плане крупные нелинейные структуры с извилистыми очертаниями.

Размеры включений силикатных пород в меланже различны, чаще всего от нескольких сантиметров до первых метров (рис. 5, а, б). Вместе с тем детальное картирование показывает, что маломощные тела меланжа нередко обволакивают довольно крупные блоки силикатных пород протяженностью до сотен метров. Иногда мраморы образуют «затеки» в силикатные породы, на контактах с которыми в последних образуются реакционные каймы сантиметровой мощности (рис. 5, в). В большинстве задокументированных участков распространения мраморного меланжа карбонатный матрикс однороден по структуре. Наблюдаются вариации размера зернистости мраморов (от мелко- до крупнозернистых) как в пределах одного тела меланжа, так и между разными телами. Признаки формирования в карбонатных породах плоскостных и линейных структурных элементов нередко отсутствуют. Реже наблюдаются насыщенные разноразмерными обломками карбонатные породы, для которых характерны типичные структуры тектонитов (описание см. ниже). Насыщенность мраморов фрагментами силикатных

пород крайне неравномерная: иногда они могут составлять до 70 % тела меланжа, а нередко наблюдаются участки, в которых силикатные обломки практически полностью отсутствуют.

Второй участок широкого распространения инъекционного меланжа расположен в междуречье рек Анга – Бегул (рис. 6). В этой части террейна резко преобладают метагаббро бегульского комплекса, по геохимическим характеристикам отличающиеся от всех остальных габброидов в регионе. Кальцитовые мраморы являются вторым по распространенности типом пород в этом сегменте и обычно представлены мелкозернистыми разновидностями. Нередко в них отчетливо проявлено линейное структурирование, подчеркиваемое тонкими прожилками или линзовидными выделениями кварца. В западной части участка мраморы не содержат фрагментов ассоциирующих с ними силикатных пород, но в центральной и юго-восточной части нередко насыщены включениями метагаббро крупного размера – от 2–3 до 40–50 м (рис. 7, а). Степень насыщения мраморов обломками габбро увеличивается по мере приближения к контактам с габброидами. Но в целом насыщенность мраморов фрагментами метагаббро невелика, последние составляют не более 5 % всего объема карбонатных тел. В полях распространения габбро встречаются фрагменты мраморов, обычно вытянутой формы, размеры которых по длинной оси составляют первые десятки метров. К сожалению, степень

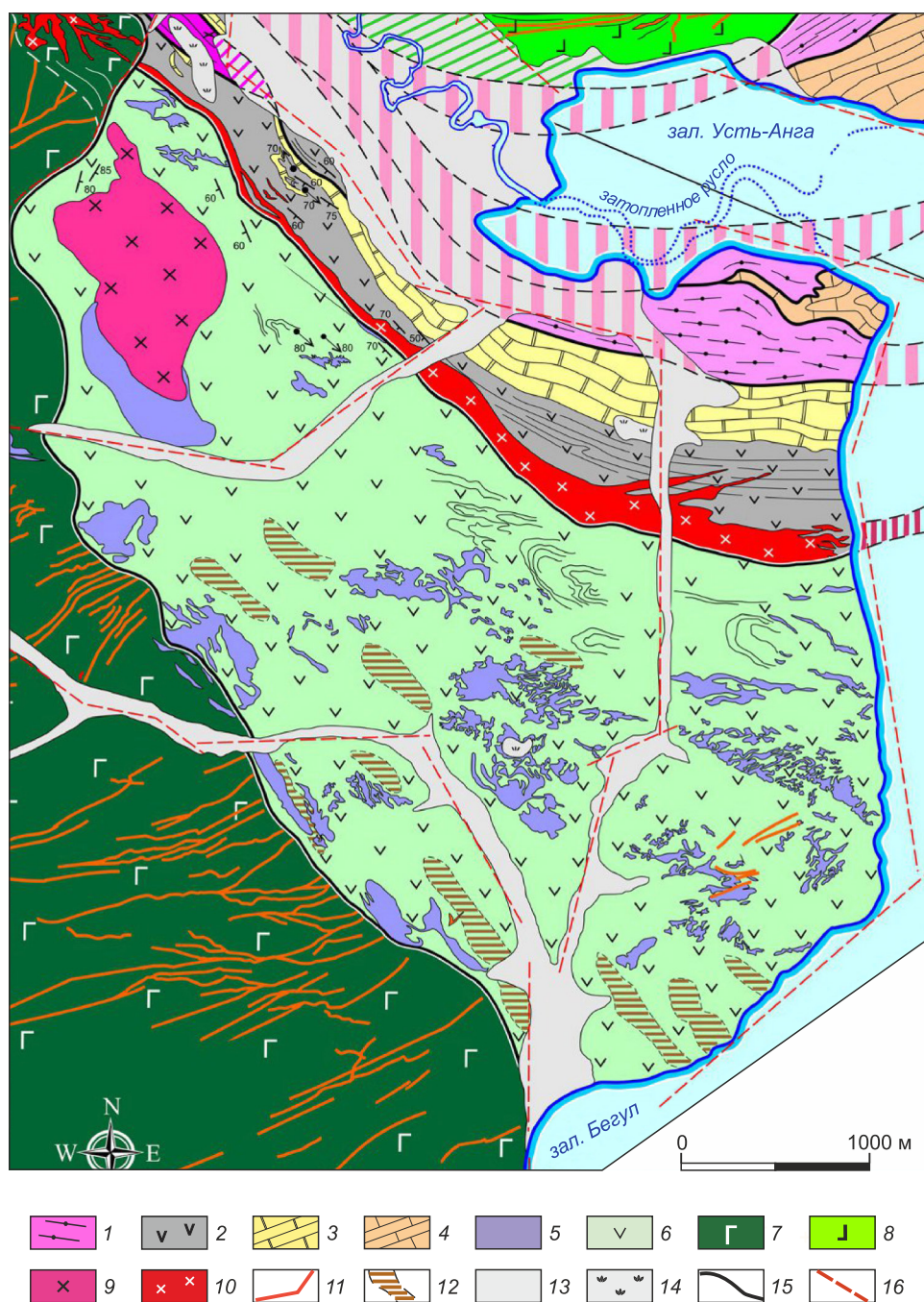


Рис. 6. Фрагмент аэрокосмической геологической карты междуречья Анга – Бегул (Байкал). Зона Правая Анга (по [Sklyarov et al., 2013b]).

1 – биотит-мусковитовые, гранат-биотит-мусковитовые микрогнейсы; 2 – тонкоплитчатые амфиболиты; 3 – доломитовые и кальцит-доломитовые мраморы; 4 – кальцитовые мраморы; 5 – инъекционные карбонатные (кальцитовые) породы; 6 – микрогаббро и амфиболиты по ним; 7 – Бирхинский комплекс: монцогаббро, монцогаббро-нориты, монцодиориты; 8 – амфиболиты и базитовые blastsмилониты по габброидам Бирхинского комплекса; 9 – малокрыстовский комплекс: биотитовые диориты и гранодиориты; 10 – Аинский комплекс: биотитовые, гранат-биотитовые, гранат-биотит-мусковитовые аплиты, граниты, реже пегматиты; 11 – Верхнебирхинский жильный комплекс: биотитовые, гранат-биотитовые аплиты, граниты, реже пегматиты; 12 – зоны синметаморфической метасоматической проработки; 13 – современные аллювиальные отложения; 14 – гейзериты; 15 – основные сдвиги; 16 – кайнозойские разломы.

Fig. 6. Aerospace geological map of the Anga – Begul interfluvium (Baikal). Right Anga zone. A fragment [Sklyarov et al., 2013b].

1 – fine-grained Bt-Ms and Grt-Bt-Ms gneisses; 2 – foliated amphibolite; 3 – dolomitic and calcite-dolomitic marbles; 4 – calcite marble; 5 – injected calcitic rocks; 6 – microgabbro and amphibolite after them; 7 – Birkhin complex of monzogabbro, monzogabbro-norite, and monzodiorite; 8 – amphibolite and mafic blastomylonite after Birkhin gabbro; 9 – Maly Krestovskiy complex of Bt-diorite and granodiorite; 10 – Aya complex of Bt, Grt-Bt, Grt-Bt-Ms aplite, granite, and less abundant pegmatite; 11 – Upper Birkhin complex of Bt, Grt-Bt aplite, granite, and pegmatite; 12 – zones of synmetamorphic metasomatic processing; 13 – recent alluvium; 14 – Cenozoic geyserite; 15 – large strike-slip faults; 16 – Cenozoic faults.



Рис. 7. Детали мраморного меланжа на участке Бегул (а) и на севере о. Ольхон (б, в). (а) – крупный фрагмент метагаббро (20×5 м) в кальцитовом мраморе; (б) – линзовидные фрагменты амфиболитов и амфиболовых гнейсов в кальцитовом мраморе; (в) – фрагменты амфиболитов в полосчатых силикатно-карбонатных породах (кальцифирах).

Fig. 7. Marble mélange in the Begul zone and in northern Olkhon Island. (а) – metagabbro block (20×5 m) in calcite marble, Begul zone; (б, в) – lenses of amphibolite and amphibole gneiss in calcite marble (б) and fragments of amphibolite in calc-silicate rocks (в), Olkhon Island.

обнаженности не позволяет установить их точную конфигурацию.

Проявления инъекционного мраморного меланжа (рис. 7, б, в) широко распространены также в северной части о. Ольхон, где они обычно слагают линейные тела мощностью от первых метров до десятков метров. В большинстве случаев хорошо проявлена полосчатость, выраженная чередованием полос мраморов, обогащенных и обедненных мелкими силикатными обломками, или ориентировкой будинообразных тел амфиболитов и известково-силикатных пород.

3.2. Мраморные тектониты

Карбонатно-силикатные образования, которые мы назвали мраморными тектонитами, встречаются на всех охарактеризованных участках в зонах распространения мраморов и имеют весьма специфичный облик, напоминающий милониты или бластомилониты. Характерными их особенностями является насыщенность мелкими фрагментами силикатных пород, а также полосчатая (часто тонкополосчатая) структура мраморов и насыщенность мелкими фрагментами разнообразных силикатных пород, среди которых

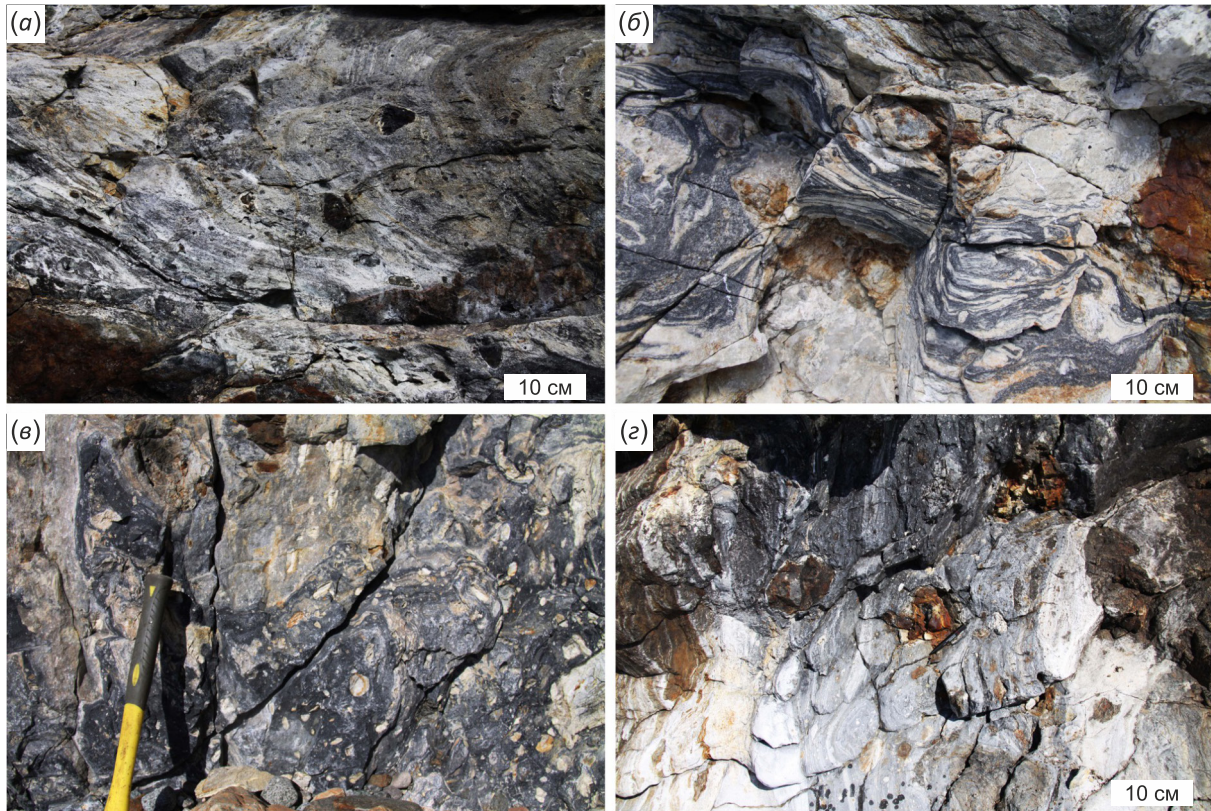


Рис. 8. Детали структуры мраморных тектонитов (падь Широкая).

(а) – складка течения в полосчатых мраморных тектонитах; во фрагментах силикатных пород резко преобладают амфиболиты; (б) – полосчатость в мраморных тектонитах, обусловленная чередованием богатых и бедных мелкой сыпью графита мраморов; в более крупных фрагментах преобладают граниты; (в) – сложные вязкопластичные структуры в богатых графитом мраморных тектонитах; во фрагментах преобладают кварц и граниты; (з) – полосчатые мраморные тектониты, в обломках метадолериты, граниты, кварц, скарнированные метабазиты.

Fig. 8. Marble tectonites (Shirokaya Valley).

(а) – flow fold in marble tectonite, with mainly amphibolitic inclusions; (б) – foliated marble tectonite, with intercalated graphite-rich and graphite-poor bands, with mainly granitic large inclusions; (в) – complex ductile structures in graphite-rich marble tectonite, with mainly quartz and granitic inclusions; (з) – foliated marble tectonite, with metadolerite, granite, quartz, and skarned mafic inclusions.

уверенно диагностируются метадолериты, граниты и агрегаты кварца (рис. 8). В отличие от инъекционного типа мраморного меланжа, они образуют линейные тела обычно небольшой мощности (от 20 см), редко достигающей первых десятков метров. В единичных случаях тектониты слагают зоны между блоками силикатных пород, но нередко присутствуют и в пределах распространения описанного выше инъекционного типа мраморного меланжа. В последнем случае мощность зон тектонитов обычно составляет 20–40 см, редко увеличиваясь до 1–2 м. Наряду с обломками силикатных пород в мраморном матрикс обычно в значительных количествах присутствуют новообразованные силикатные минералы. На разных участках распространения мраморных тектонитов это могут быть форстерит, диопсид, амфибол или флогопит, редко плагиоклаз или калишпат.

3.3. Метаморфогенно-разлинзованный меланж

Этот типа меланжа зафиксирован только в тектонической пластине Крестовского островодужного субтер-

рейна, сложенной доломитовыми и кальцит-доломитовыми мраморами, диопсидитами, кварц-диопсидовыми и диопсид-кальцит-доломитовыми породами. В составе остальной части субтеррейна из карбонатных пород встречаются только кальцитовые мраморы и кальцифиры. Пластина имеет S-образную конфигурацию, неоднородна по структуре и составу, которые меняются по направлению с востока на запад (рис. 9).

Самая восточная субширотная часть пластины сложена доломитовыми и кальцит-доломитовыми мраморами, в которых редко встречаются участки с мелким шестоватым тремолитом. В центральной части пластины среди доломитовых мраморов обнажается «массив» практически мономинеральных крупнозернистых диопсидитов, пропитанных многочисленными кварцевыми прожилками, часто создающими сетчато-полосчатую структуру. Такая структура хорошо видна на выветрелой поверхности (рис. 10, а), когда на месте менее устойчивого к выветриванию диопсида образуются выемки в сетчатом каркасе кварца. Диопсид имеет белый цвет, обусловленный отсутствием

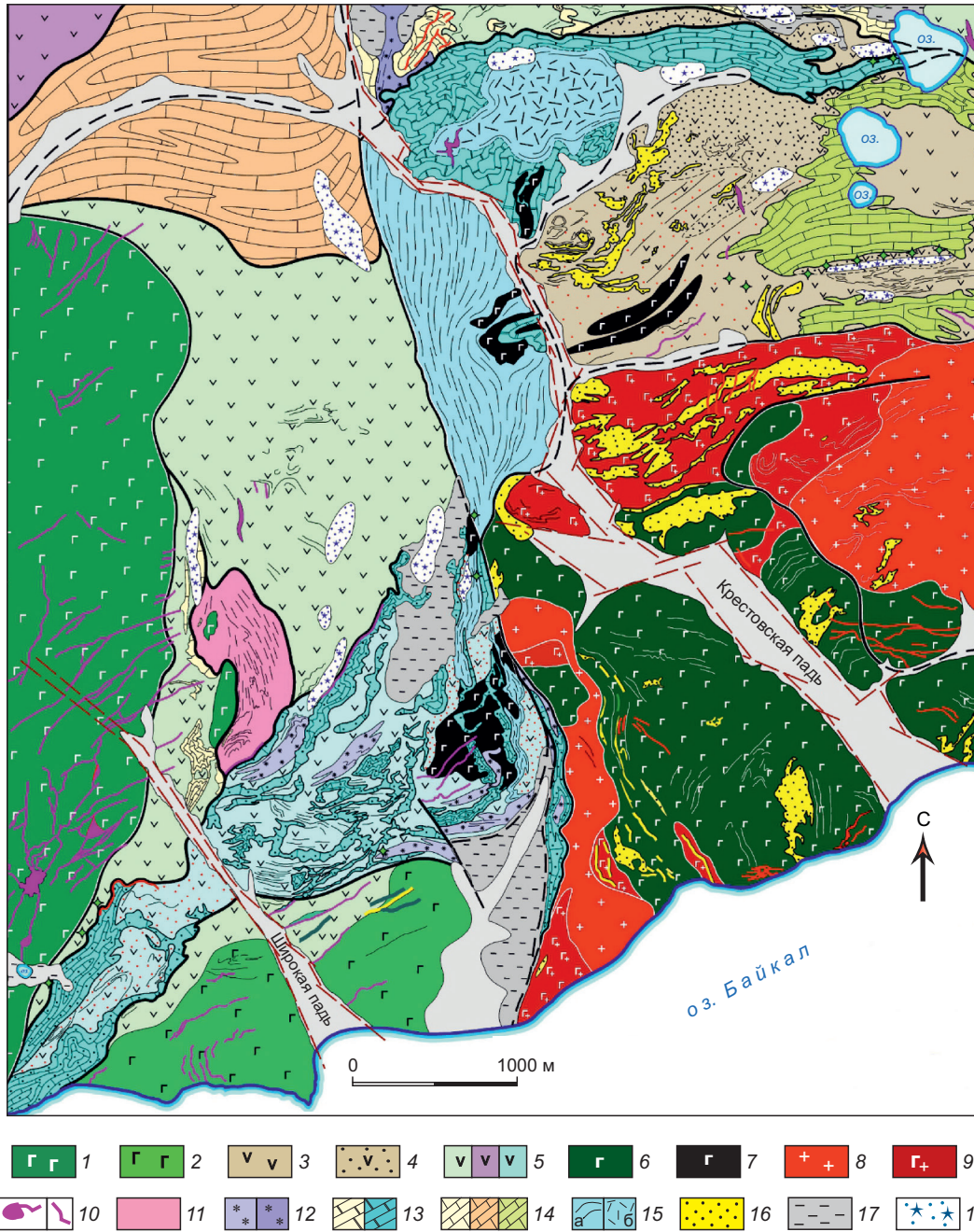


Рис. 9. Фрагмент аэрокосмической геологической карты юго-западной части Ольхонского региона (Байкал) (по [Sklyarov et al., 2012]).

1-2 – Бирхинский комплекс: пироксениты, оливковые габбро, габбро-нориты, анортозиты и их амфиболизированные аналоги первой фазы (1) и монцогаббро, монцогаббро-нориты, монцодиориты и их амфиболизированные разности второй фазы (2); 3 – метапорфириты; 4 – метапорфириты интенсивно тектонизированные и метасоматизированные; 5 – амфиболиты по порфирам из разных тектонических зон; 6-7 – Устькрестовский комплекс: флогопитовые монцогаббро первой фазы (6) и титанфассаитовые монцогаббро второй фазы (7); 8 – биотитовые гранодиориты и граниты Малокрестовского комплекса; 9 – комбинированные габбро-гранитные интрузии и дайки; 10 – граниты Верхнебирхинского комплекса; 11 – биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы; 12 – кварциты; 13 – доломитовые и кальцит-доломитовые мраморы; 14 – кальцитовые мраморы; 15 – диопсид-кальцит-доломитовые (а) и мономинеральные диопсидовые и кварц-диопсидовые (б) породы; 16 – инъекционные кальцитовые и силикатно-карбонатные породы; 17 – четвертичные отложения; 18 – гейзериты.

Fig. 9. Aerospace geological map of the southwestern Olkhon terrane. A fragment [Sklyarov et al., 2012].

1-2 – Birkhin complex of phase (1) pyroxenite, olivine gabbro, gabbro-norite, and anorthosite, and phase (2) monzogabbro and monzogabbro-norite; 3 – metaporphry; 4 – sheared and metasomatized mataporphry; 5 – amphibolitized porphyry in different tectonic zones; 6-7 – Ust'-Krestovsky complex of phase 1 phlogopite-bearing monzogabbro (6), phase 2 Ti-fassaite monzogabbro (7); 8 – biotite granodiorite and granite of the Maly Krestovsky complex; 9 – mingling dikes and intrusions; 10 – granite of the Upper Birkhinsky complex; 11 – biotite and garnet-biotite gneisses; 12 – quartzite; 13 – dolomite and calcite-dolomite marbles; 14 – calcite marble; 15 – diopside-calcite-dolomite (a) and quartz-diopside (b) rocks; 16 – injected calciphyre; 17 – Quaternary sediments; 18 – Cenozoic geysirite.

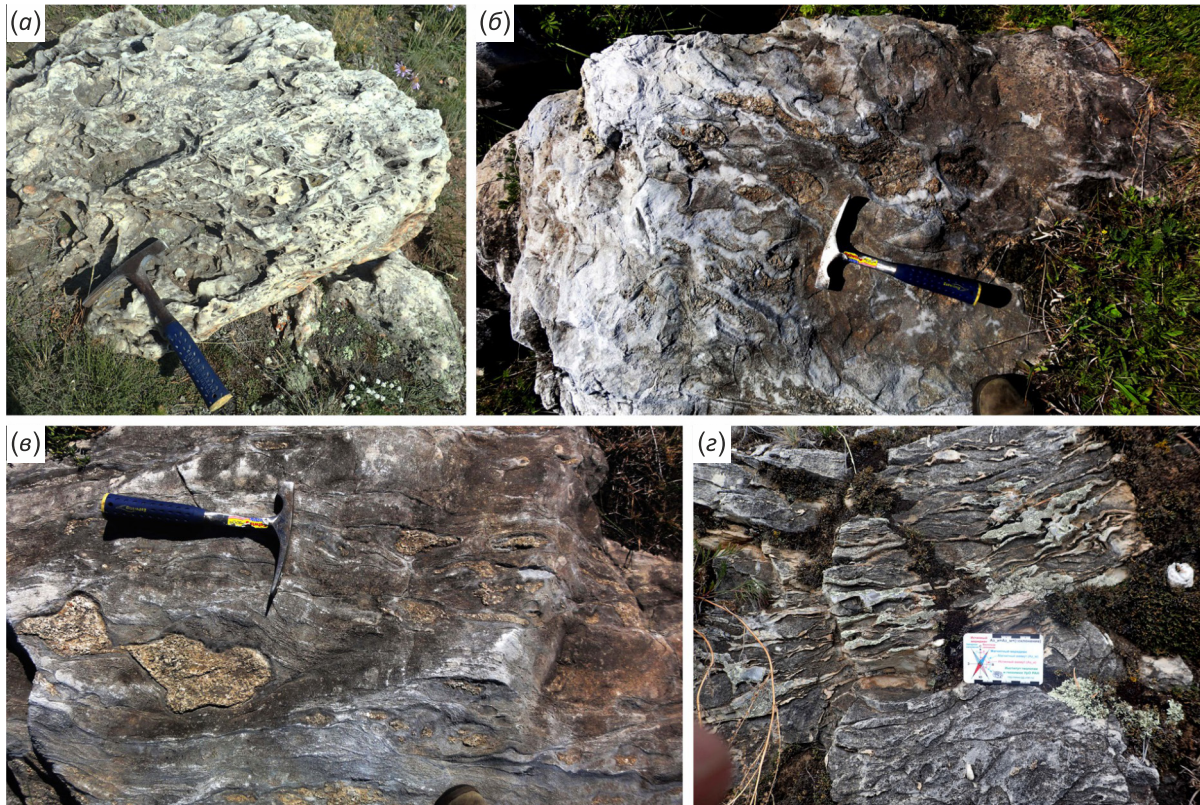


Рис. 10. Детали структуры кварц-диопсид-кальцит-доломитовой толщи Ольхонского террейна (а, б, в) и кварц-доломитовой толщи голоуспенской свиты, примыкающей на юго-западе к Ольхонскому террейну (з).
 (а) – кварц-диопсидовая порода: сетчато-полосчатый каркас кварца и выветрелые на поверхности фрагменты диопсидов;
 (б, в) – фрагменты диопсидов в кальцит-доломитовом матриксе; (з) – доломиты с «прослоями» кварца.
Fig. 10. Exposed quartz-diopside-calcite-dolomite rocks of the Olkhon terrane (а, б, в) and Neoproterozoic quartz-dolomite rocks of the Goloustnaya Fm. adjacent to the Olkhon terrane in the southwest (з).
 (а) – quartz-diopside rock, reticulate-banded quartz framework and weathered surfaces of diopsides; (б, в) – diopside fragments in calcite-dolomitic matrix; (з) – dolomite with quartz layers.

в химическом составе железа, обычны длиннопризматические кристаллы от нескольких миллиметров до 5 см. Доля кварца в породе варьируется от 0 до 90 об. %, изредка присутствуют более мощные (М до 1 м) кварцевые жилы. С доломитовыми мраморами кварц-диопсидовые породы имеют резкие контакты.

По простиранию доломитовые мраморы сменяются к западу кварц-диопсид-кальцит-доломитовыми и диопсид-доломит-кальцитовыми породами, имеющими отчетливую линейную структуру. Этими породами, ассоциирующими с доломитовыми мраморами, сложена субмеридиональная часть пластины. Диопсидовые и кварц-диопсидовые стяжения часто образуют «слои» в карбонатном матриксе, но еще чаще слагают линзы и будины размером от 1 до 20 см по короткой оси и до 1–2 м по длинной (рис. 10, б, в). Кроме диопсидовых фрагментов в мраморе могут присутствовать маломощные вытянутые линзы кварца. Именно эти породы, слагающие участок перегиба всей пластины, можно отнести к специфическому типу мраморного меланжа.

В западной части пластины северо-восточного простирания в карбонатной толще фиксируются крупные фрагменты (от первых метров до десятков метров)

амфиболитов, метадолеритов, кварцитов. И в самом западном окончании пластины в береговых скалах, в зоне тектонического контакта с Крестовским массивом габброидов, обнажаются мраморные тектониты, описание которых приведено выше.

3.4. Инъекционно-минглинговый меланж

Этот тип меланжа встречается в пределах Крестовского субтеррейна (см. рис. 9) и представлен главным образом жильными телами карбонатных и силикатно-карбонатных (кальцифиры) пород с фрагментами метадолеритов, реже гранитов. Наиболее выразительно структура этих образований проявлена в береговых обнажениях между падами Крестовская и Широкая. Здесь в краевой части Усть-Крестовского массива субщелочных габброидов [Lavrenchuk et al., 2017] закартирована серия жильных тел кальцитовых мраморов и кальцифиров (рис. 11), некоторые из которых ассоциируют с пироксеновыми порфиритами. Последние формируют дайкообразные тела неправильной формы (рис. 12, а), которые иногда фрагментируются на отдельные блоки (рис. 12, б), что и создает впечатлительное мраморное меланжа.

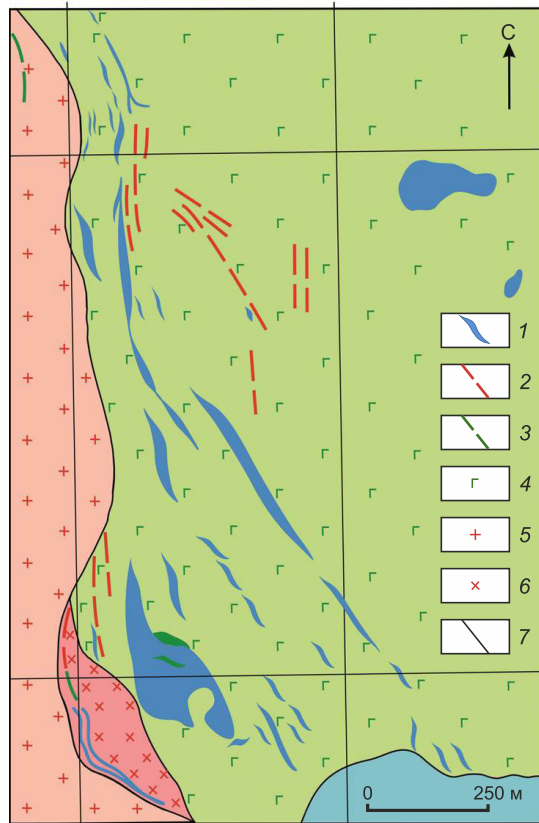


Рис. 11. Дайки карбонатных и карбонатно-силикатных пород в габбро Усть-Крестовского массива.
 1 – дайки карбонатных и карбонатно-силикатных пород; 2 – гранитные жилы; 3 – дайки и тела долеритов; 4 – габбро; 5 – граниты; 6 – диориты; 7 – геологические границы.

Fig. 11. Marble and calc-silicate dikes in gabbro of the Ust-Krestovskiy Intrusion.
 1 – marble and calc-silicate dikes; 2 – granite veins; 3 – dolerite dikes; 4 – gabbro; 5 – granite; 6 – diorite; 7 – geological boundaries.

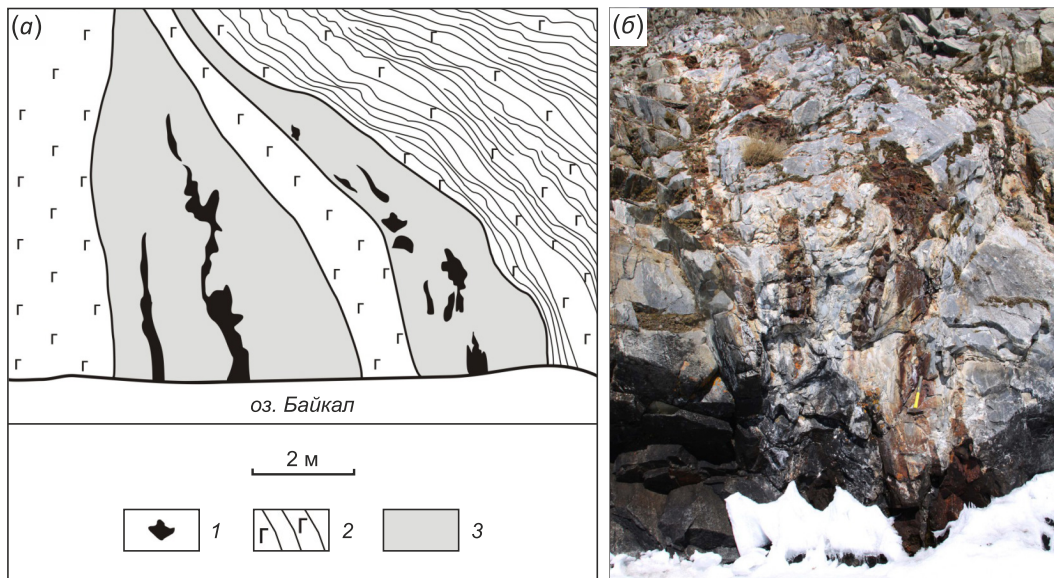


Рис. 12. Дайки ассоциирующих с долеритами мраморов в габброидах Усть-Крестовского массива. Зарисовка с фотографии (а) и фотография (б).

1 – долериты; 2 – габбро с элементами магматической расслоенности; 3 – мелкозернистые мраморы. (а) – в мраморной дайке справа две слепые дайки долеритов; (б) – на фотографии – фрагменты долеритов красно-коричневого цвета в дайке мраморов.

Fig. 12. Marble dikes associated with dolerite in gabbro of the Ust-Krestovskiy Intrusion. Sketch from photograph (a) and photograph (b).
 1 – dolerite; 2 – gabbro with magmatic layering; 3 – fine-grained marble. (a) – two blind dolerite dikes in marble (left) and dolerite fragments in marble (right); (b) – reddish-brown dolerite fragments in marble (right part of the sketch).

Другой вариант этого типа меланжа обнаружен в пределах Тажеранского массива (рис. 13), детально охарактеризованного во многих публикациях [Konev, Samoilov, 1974; Sklyarov et al., 2009, 2013a, 2021; Fedorovsky et al., 2009, 2010; Starikova et al., 2014; Doroshkevich et al., 2017]. Массив представляет собой сложную смесь сиенитов, нефелиновых сиенитов, в разной степени метаморфизованных габброидов двух типов (нормальной щелочности и субщелочных), бруситовых мраморов и разнообразных метасоматитов нескольких типов. В центральной части массива картируется полоса доломитсодержащих кальцитовых мраморов

(рис. 14), ассоциирующих со специфическими фассаитовыми пироксенитами и нефелин-пироксеновыми породами [Sklyarov et al., 2021]. С юга от этой полосы обнажаются сиениты, с севера – ороговикованные долериты нормальной щелочности (беербахиты по [Sklyarov et al., 2020]) с многочисленными телами огнейсованных сиенитов. Мраморы в контактовой части с полосой пироксенитов, расположенной между мраморами и беербахитами (метагаббро), насыщены фрагментами в разной степени скарнированных пироксенитов размером от первых сантиметров до первых десятков метров (рис. 15), которые по морфологическим

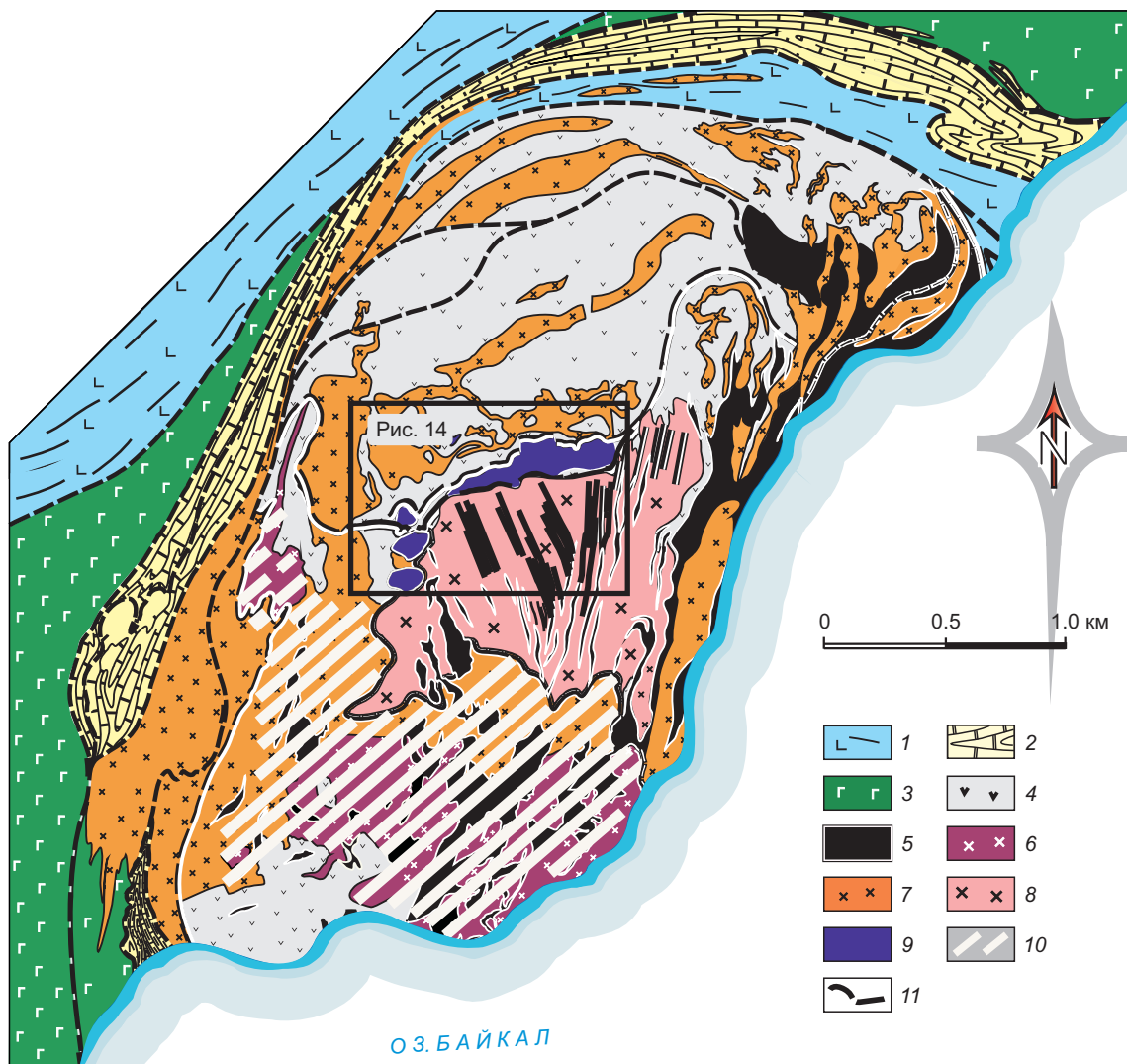


Рис. 13. Геологическая карта Тажеранского габбро-сиенитового массива (after [Fedorovsky et al., 2009; Sklyarov et al., 2021]). 1-3 – вмещающие породы (500 млн лет): амфиболиты, гнейсы (1), кальцитовые мраморы (2), метаморфизованные габбро, монцогаббро, монзониты, сиениты (3); 4-8 – Тажеранский массив (460–470 млн лет): беербахиты по толеитовым габбро и долеритам (4), субщелочные габбро и микрогаббро (5), нефелиновые сиениты (6), сиениты огнейсованные (7) и массивные (8), 9 – доломитсодержащие кальцитовые мраморы в ассоциации с пироксенитами; 10 – область распространения бруситовых мраморов с магнезиальными метасоматитами; 11 – синметаморфические shear-зоны.

Fig. 13. Geology of the Tazheran gabbro-syenite complex, after [Fedorovsky et al., 2009; Sklyarov et al., 2021]. 1-3 – country rocks, 500 Ma: amphibolite, silicate-carbonate gneiss (1), calcite marble (2), metamorphosed gabbro, monzogabbro, monzonite, and syenite, Birkhin complex (3); 4-8 – Tazheran complex, 460–470 Ma: beerbachite after tholeiitic dolerite and gabbro (4), subalkaline gabbro and microgabbro (5), nepheline syenite (6), foliated (7) and massive (8) syenites; 9 – dolomite-bearing calcite marble in association with pyroxenite; 10 – brucite marbles; 11 – synmetamorphic shear zones.

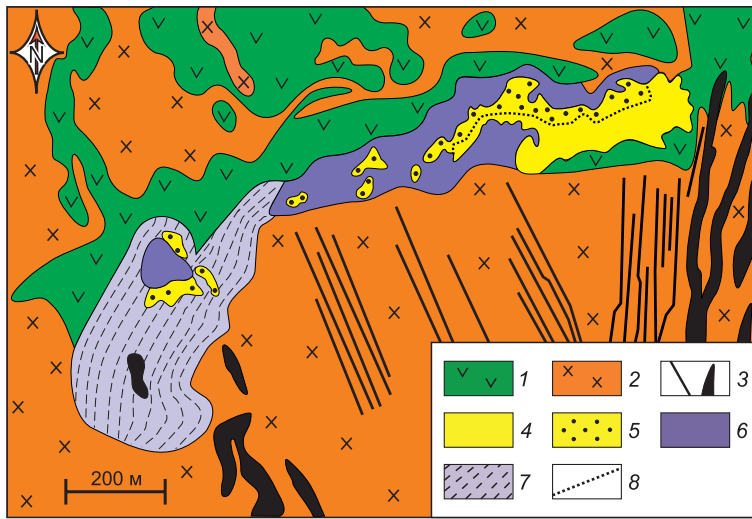


Рис. 14. Геологическая карта района распространения пироксенитов и нефелин-фассаитовых пород (по [Sklyarov et al., 2021]).

1 – беербахиты; 2 – сиениты; 3 – субщелочные габбро и микрогаббро; 4–5 – доломитсодержащие кальцитовые мраморы (4), насыщенные фрагментами пироксенитов (5); 6 – пироксениты и нефелин-фассаитовые породы; 7 – зона распространения гранат-мелилит-пироксеновых и мелилит-волластонитовых метасоматических пород; 8 – граница между мраморами «чистыми» и с фрагментами пироксенитов.

Fig. 14. Enlarged simplified local geology of pyroxenite and nepheline-fassaite rocks and their surroundings, after [Sklyarov et al., 2021].

1 – beerbachite after tholeiitic dolerite and gabbro; 2 – syenite; 3 – subalkaline gabbro and microgabbro; 4 – 5 – dolomite-bearing calcite marble (4) with abundant pyroxenite fragments (5); 6 – pyroxenite and nepheline-fassaite rocks; 7 – garnet-melilite-pyroxene and melilitewollastonite metasomatic rocks; 8 – boundary between marbles with and without pyroxenite.

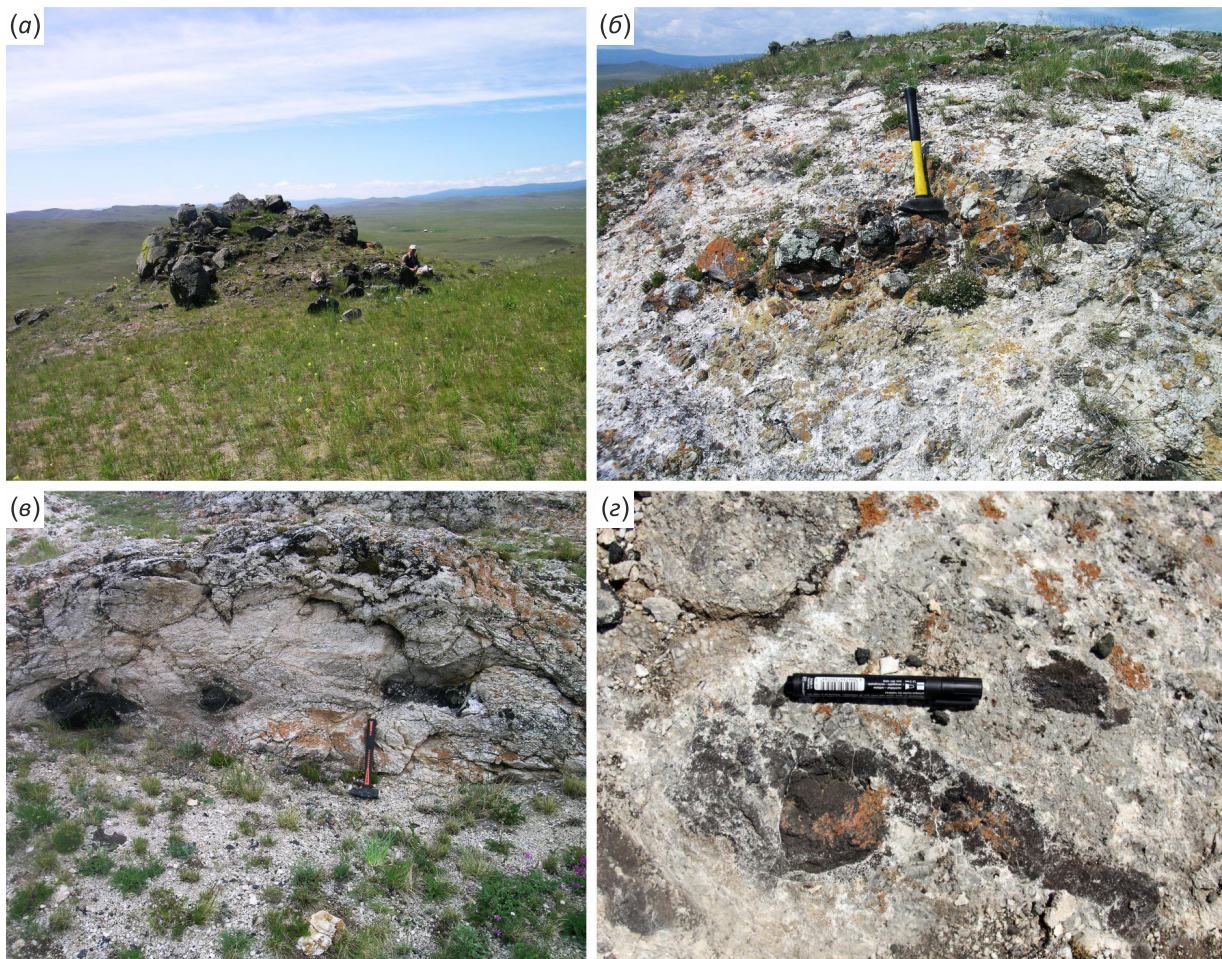


Рис. 15. Фотографии пироксенитов в мраморах (по [Sklyarov et al., 2021]).

(а) – крупный (до 15 м в диаметре) фрагмент пироксенитов; (б) – линза скарнированных пироксенитов; (в) – несколько фрагментов пироксенитов размером в десятки сантиметров; (г) – мелкие фрагменты скарнированных пироксенитов.

Fig. 15. Pyroxenite inclusions in marbles, after [Sklyarov et al., 2021].

(а) – large pyroxenite inclusion (up to 15 m in diameter); (б) – lens of skarned pyroxenite; (в) – pyroxenite inclusion (decimeter sizes); (г) – small inclusion of skarned pyroxenite.

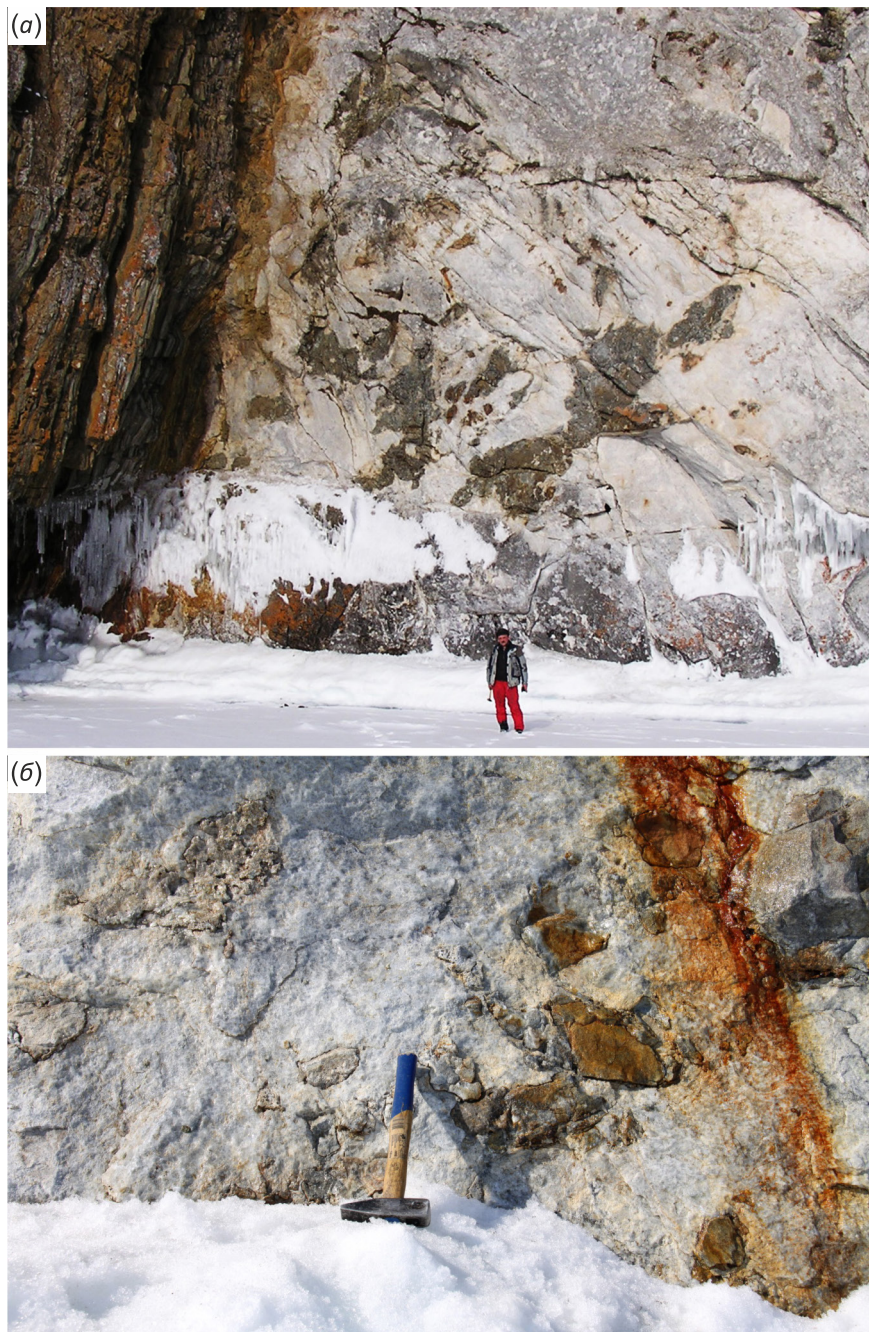


Рис. 16. Фрагменты метагаббро (а) и гранитов (б) в кальцитовых мраморах. Северо-восточное побережье о. Ольхон.
Fig. 16. Metagabbro (a) and granite (б) inclusions in calcite marble. Cliffs in northeastern coast of Olkhon Island.

признакам и особенностям структуры можно рассматривать в качестве мраморного меланжа. Подобный тип меланжа встречается и в других частях Ольхонского террейна, например в северной части о-ва Ольхон, где отдельные линейные тела мраморов насыщены фрагментами метагаббро (рис. 16, а) или гранитов (рис. 16, б).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенное выше описание показывает существенные различия между четырьмя типами мраморного меланжа, что предполагает и возможность разных

механизмов их образования. Для инъекционного типа меланжа в большинстве случаев характерны проявления, занимающие значительные площади и не имеющие в плане отчетливой линейной (пластовой) конфигурации. В то же время отдельные тела внутри этих полей могут иметь линейную форму, субсогласную со структурной ориентировкой (в основном крутопадающей) вмещающих силикатных пород (участок Тонта). Фрагменты силикатных пород в мраморах варьируются по размеру от первых сантиметров до десятков метров. Совсем мелкие обломки (менее 1 см) в целом не характерны. Их состав полностью соответствует

составу вмещающих силикатных пород конкретных доменов Ольхонского террейна. В одних случаях (Тонта) это гранулиты среднего и основного состава, метагаббро, кварциты, граниты, в других (Бегул) – только метагаббро, резко отличающиеся по геохимическим особенностям от отмеченных выше габброидов, в третьих (о. Ольхон) – амфиболиты и известково-силикатные породы. Метаморфогенная полосчатость во фрагментах гранулитов среднего и основного состава (Тонта) имеет разнообразную ориентировку, свидетельствующую о более ранних условиях пикового метаморфизма и о неприменимости механизма будинажа более компетентных силикатных пород, тем более что в пределах небольших участков распространения мраморного меланжа можно встретить весь спектр пород гранулитовой зоны, а не только непосредственно ассоциирующихся с мраморами. Все это позволяет предполагать механизм инъецирования более пластичных мраморов в верхние горизонты, которые насыщаются обломками вмещающих силикатных пород в процессе дробления последних в активной фазе сдвигового тектогенеза в условиях высоких температур и давлений. Поскольку для этой зоны выделены два этапа высокотемпературного метаморфизма, достигающего гранулитовой фации, которые имеют возраст 500 и 470 млн лет [Sklyarov et al., 2020], логичным будет предположение о том, что гранулиты были сформированы в первый этап метаморфизма, а инъецирование мраморов связано со вторым этапом метаморфизма, сопровождаемого массовым сдвиговым тектогенезом.

Мраморные тектониты (второй тип меланжа), характеризующиеся большим количеством мелких (первые сантиметры и мельче) силикатных обломков и новообразованных метаморфических минералов, распространены в основном в толще мраморного меланжа и отражают финальные стадии сдвигового тектогенеза, когда вязкопластические и хрупкие деформации локализируются в узких зонах и приводят к дополнительному дроблению присутствующих в меланже силикатных фрагментов, а также появлению ярко выраженной полосчатой текстуры в мраморах. По существу, два вышеописанных типа меланжа могут быть результатом одного процесса во время сдвигового тектогенеза, но разных его стадий.

Метаморфогенно-разлинзованный тип меланжа резко отличается от инъекционного прежде всего тем, что проявлен только в тектонической пластине, сложенной доломитовыми и кальцит-доломитовыми мраморами, а также однородным составом фрагментов силикатных пород, представленным только диопсидитами или тремолит-диопсидовыми (\pm кварц) породами. Долгое время механизм его формирования оставался непонятен, особенно из-за того, что в этой толще присутствовал еще и небольшой «массив» диопсидитов и кварц-диопсидовых пород (см. рис. 9). Возможное объяснение феномена появилось после более детального изучения контактирующих с Ольхонским террейном породных комплексов. К юго-западу от террейна

в пределах Сибирского кратона обнажены образования неопротерозойской байкальской серии, в составе которой присутствуют мощные толщи доломитов и кварцевых песчаников с доломитовым цементом (голоустенская свита) [Khomentovsky et al., 1972]. В нижнем течении р. Качергат (правый приток р. Бугульдейка) песчаники массивные, претерпевшие только стадию катагенеза. Объемное соотношение обломков кварца и доломитового цемента может существенно варьироваться. Непосредственно в контактовой зоне с коллизионным швом, отделяющим Ольхонский террейн от кратона, породы байкальской серии уже претерпели стадию метакатагенеза и даже низкотемпературного зеленосланцевого метаморфизма. В них в небольшом количестве появляется тальк, а также происходит перераспределение кремнезема в толще: кварц сегрегируется в серию тонких прожилков, обычно субпараллельных, но иногда и сетчато-полосчатых (см. рис. 10, г). В Крестовском субтеррейне при синтетектоническом метаморфизме, соответствующем РТ-условиям эпидот-амфиболитовой фации [Sklyarov et al., 2020], в результате реакции кварца с доломитом (1) образуется диопсид:



В присутствии водного флюида может появляться также тремолит ($\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$), который, как и диопсид, характеризуется отсутствием железа, алюминия и щелочей. В случае резкого преобладания обломков кварца над доломитовым цементом весь доломит расходуется на реакцию и остается избыточный SiO_2 , который сегрегируется в отдельные прожилки, пронизывающие образовавшийся диопсидит (см. рис. 10, а). Если же доломитовый матрикс преобладал в песчанике над обломочным кварцем, то расходуется весь SiO_2 , а порода имеет в таком случае диопсид-(+тремолит+кальцит)-доломитовый состав. Соотношение карбонатной и силикатной составляющих в метаморфической породе будет определяться только соотношением обломков и цемента в кварцевых песчаниках протолита. Поскольку метаморфизм Ольхонского террейна синдеформационный, связан со сдвиговым тектогенезом, сегрегированные в «прослой» или линзы диопсидиты на поздних стадиях процесса могут дробиться, что и создает меланжевый облик пород средней части доломитовой пластины.

Если предложенный нами механизм образования метаморфогенно-разлинзованного типа меланжа верен, а породы неопротерозойской байкальской серии действительно являются протолитом рассматриваемой пластины, то это может внести серьезные коррективы в существующие представления об Ольхонском террейне, по которым он формировался на значительном удалении от кратона и был причленен к последнему только в раннем палеозое [Gladkochub et al., 2008; Donskaya et al., 2017, и ссылки в них]. Байкальская же серия всегда рассматривалась в качестве пассивной окраины Сибирского кратона. Если же в составе террейна присутствуют

и породные комплексы кратона, то это существенно усложняет историю формирования террейна.

Инъекционно-минглинговый меланж также имеет свою специфику, подразумевающую собственный механизм образования. Этот тип меланжа проявлен в основном в жильных телах небольшой мощности и содержит в обломках только интрузивные породы, нередко с неплохой сохранностью магматических структур и текстур, хотя и претерпевшие метаморфические минеральные преобразования. Жильная форма тел меланжа и характер взаимоотношений силикатных и карбонатных пород свидетельствуют о субсинхронном внедрении карбонатов и силикатных магм (см. рис. 10, 11) и о фрагментировании закристаллизованных порций силикатного расплава, чаще базитового состава, при еще мобильном состоянии карбонатного вещества.

Характер инжектирования карбонатов (расплавное или вязкопластическое) далеко не очевиден. Ранее [Sklyarov et al., 2013a] было высказано осторожное предположение о том, что жильные тела мраморов могли быть результатом внедрения карбонатного расплава. Прямыми признаками кристаллизации из расплава являются расплавные включения в новообразованных силикатных минералах. В карбонатах их выявление вряд ли возможно вообще, учитывая перекристаллизацию на более поздних стадиях остывания системы. Свидетельством последнего являются массово проявленные процессы полисинтетического двойникования кальцита или доломита, характеризующие относительно низкие температуры термальной эволюции системы в условиях стресса [Burkhard, 1993]. Но проблема заключается в том, что силикатные минералы в мраморных дайках Ольхонского террейна имеют метаморфогенно-метасоматический генезис, поскольку даже в случае кристаллизации из расплава они были метасоматически преобразованы при взаимодействии карбонатной и силикатной составляющих в процессе остывания. В таком случае необходим комплекс косвенных признаков, указывающих на природу карбонатных и карбонатно-силикатных инъекций. В пользу расплавного состояния карбонатов при внедрении могут свидетельствовать явно жильная форма карбонатных тел, изотропная структура карбонатных пород с равномерным распределением новообразованных силикатных минералов и отсутствие признаков вязкопластического течения.

Дополнительным аргументом в пользу расплавного внедрения мраморов могут быть признаки взаимодействия карбонатного и базитового расплавов в Тажеранском массиве, обусловившего кристаллизацию своеобразных пироксенитов и нефелин-пироксеновых пород [Sklyarov et al., 2021]. Поскольку температура кристаллизации пироксенитов выше, чем у карбонатного расплава, закристаллизовавшиеся пироксениты могли дробиться, захватываться карбонатным расплавом и подвергаться метасоматическим преобразованиям в процессе остывания системы, что и создает картину мраморного меланжа. Исходя из этих соображений,

мы предполагаем, что жильные тела карбонатных и карбонатно-силикатных пород имеют интрузивную природу, как и мраморы с фрагментами пироксенитов Тажеранского массива.

Мраморы из жильных тел и меланжа в Тажеранском массиве по изотопно-геохимическим и минералогическим особенностям резко отличаются от карбонатитов мантийного происхождения [Doroshkevich et al., 2017] и соответствуют первично осадочным карбонатам. Они могли быть только результатом плавления карбонатных толщ осадочного происхождения в коровых условиях, что для большинства петрологов представляется маловероятным из-за высоких температур выплавления карбонатного расплава (более 1200 °C) в мантийных условиях [Wyllie, Tuttle, 1960], нереальных в земной коре. Однако еще в ранних экспериментах по плавлению карбонатов было показано существенное различие между температурой плавления в «сухих» и «мокрых» условиях, аналогичное силикатным системам. Температура плавления кальцита в присутствии водного флюида опускается до 740 °C при давлении 1 кбар [Wyllie, Tuttle, 1960], плавно снижаясь по мере роста давления. Добавка в систему MgO снижает температуру плавления карбонатов до 600 °C [Fanelli et al., 1986]. При фиксированном составе флюида ($X_{\text{CO}_2}=0.05$) кривая солидуса гранита в водонасыщенных условиях примерно совпадает с линией плавления кальцита, а кривая плавления доломита расположена на 100 °C ниже [Lentz, 1999]. Это означает, что в условиях флюидонасыщенной нижней коры плавление доломитов начнется раньше появления гранитных выплавок, а плавление кальцитовых мраморов будет субсинхронно с последними. Таким образом, появление коровых карбонатных расплавов вполне реально в случае присутствия в нижней коре карбонатных толщ и водного флюида. Внедрение мантийных базитовых магм могло обеспечивать необходимую для плавления температуру и субсинхронное внедрение в верхние горизонты порций базитового и карбонатного расплавов.

Теперь вернемся к вопросу о корректности применения термина «меланж» к охарактеризованным карбонатно-силикатным смесям Ольхонского террейна. В многочисленных публикациях, начиная с самых ранних [Greenly, 1919; Belostotsky, 1967; Hsu, 1968; Knipper, 1971; и мн. др.], были определены разные характерные признаки меланжа и выделены два основных их типа – францисканский и анкарийский. Наиболее емкое и полное определение меланжа было дано С.Д. Соколовым: «МЕЛАНЖ в геологии (от франц. *mélange* – смесь, мешанина), тектонич. смесь горных пород хаотического строения. Состоит из однородной деформированной, раздробленной и рассланцованной основной массы алевропелитовой размерности (менее 0.1 мм) и погруженных в эту массу включений как местных, так и экзотических пород. Включения бывают разного размера: неск. сантиметров (обломки), неск. метров (глыбы), десятки метров (блоки), неск. сотен метров (пластины). По составу осн. массы различают: М. терригенный,

серпентинитовый и др.; по разнообразию включений – мономиктовый и полимиктовый; по генезису – аккреционный (образование связано с процессом аккреции тектонической), субдукционный (обусловлен субдукцией), протрузивный (возникает при внедрении пород в вышележащие слои в холодном состоянии) и др. Сложенные М. геологические тела могут достигать в длину нескольких километров. Нередко тела М. образуют зоны протяженностью в десятки и сотни километров, которые отображают на геологич. картах. М. – характерный элемент строения складчатых поясов разного возраста. Серпентинитовые М. часто ассоциируются с офиолитами, терригенные М. – с аккреционными призмами» [Great Russian Encyclopedia, 2012]. Если исходить из этого определения, то ни один из вышеописанных типов меланжа Ольхонского террейна, строго говоря, не подходит под термин «меланж». Метаморфогенно-разлинзованный тип обусловлен процессами синтетонического метаморфизма и не содержит «инородных» обломков пород, инъекционно-минглиновый тип объясняется процессами взаимодействия карбонатной и силикатной магм и тоже не может быть отнесен к классическому меланжу. Инъекционный тип меланжа и мраморные тектониты могли бы быть отнесены к протрузивному меланжу (см. определение меланжа выше), но мешают два обстоятельства: нет «раздробленной и рассланцованной основной массы алевропелитовой размерности» и не «возникает при внедрении пород в вышележащие слои в холодном состоянии» [Great Russian Encyclopedia, 2012], поскольку формируется при высоких температурах и давлениях. Имеющиеся противоречия можно разрешить двумя способами: либо отказаться от применения термина «меланж» к охарактеризованным выше мраморно-силикатным смесям, наплавив новые геологические термины, либо расширить имеющееся определение меланжа, добавив к ним термин «мраморный меланж», как это предлагал В.С. Федоровский с соавторами [Fedorovsky et al., 1993]. Последний вариант представляется нам наиболее разумным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы сознательно использовали термин «меланж» в названии статьи и в тексте, хотя по имеющимся в литературе толкованиям его наполнения охарактеризованные в статье мраморно-силикатные смеси ему не соответствуют. Всего выделено четыре типа таких «смесей», для которых предлагаются разные механизмы их образования.

В наибольшей степени термину «меланж» соответствуют инъекционный (протрузивный) тип и мраморные тектониты. Для них характерны фрагменты силикатных пород, присутствующих в ближайшем окружении, в мраморном матриксе. Размер фрагментов может варьироваться от первых миллиметров до нескольких десятков метров. Основное различие этих двух типов заключается в том, что мраморные тектониты обычно локализируются в узких зонах (от первых сантиметров

до нескольких метров) и содержат многочисленные мелкие обломки силикатных пород. Для обоих типов наблюдаются структуры вязкопластического течения, соответствующие механизму «протрузивного» внедрения мраморов в процессе синметаморфического сдвигового тектогенеза. Мраморные тектониты фиксируют позднюю стадию, локализуясь главным образом в узких зонах в пределах распространения мраморного меланжа.

Метаморфогенно-разлинзованный тип меланжа характеризуется присутствием фрагментов диопсидов и тремолит-диопсидовых пород в доломитовом или кальцит-доломитовом матриксе. Его образование объясняется тектонометаморфическим преобразованием кварцевых песчаников с доломитовым цементом предположительно неопротерозойской голоустенской свиты, рассматриваемой в качестве осадков пассивной окраины Сибирского кратона.

Инъекционно-минглиновый тип меланжа представлен жильными телами кальцитовых мраморов или карбонатно-силикатных пород (кальцифиров) с разнообразными фрагментами метаморфизованных долеритов, реже гранитов. Массивная текстура мраморов, жильная форма тел меланжа предполагают субсинхронное внедрение порций карбонатного и силикатного расплавов с последующим фрагментированием закристаллизовавшихся раньше силикатных пород.

Независимо от корректности применения термина «меланж» по отношению к охарактеризованным мраморно-силикатным смесям (все четыре типа), последние являются если не уникальными, то крайне редкими образованиями в пределах метаморфических комплексов. Исключительность Ольхонского террейна в этом плане обусловлена, по нашему мнению, высокой скоростью синметаморфических деформаций, связанных с процессами синдвигового тектогенеза.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны О.А. Складовой и И.Г. Барашу за помощь в оформлении иллюстраций к статье. Выражаем свою глубокую признательность А.Н. Диденко и М.М. Буслову за оперативно сделанные замечания и предложения по улучшению статьи.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Belostotsky I.I., 1967. Tectonic Nappes in Dinarides of the Devola River Basin. *Geotectonics* 6, 25–48 (in Russian) [Белостоцкий И.И. Тектонические покровы в бассейне р. Девола в динаридах // Геотектоника. 1967. № 6. С. 25–48].
- Burkhard M., 1993. Calcite Twins, Their Geometry, Appearance and Significance as Stress–Strain Markers and Indicators of Tectonic Regime: A Review. *Journal of Structural Geology* 15 (3–5), 351–368. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90132-T](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90132-T).
- Buslov M.M., 2011. Tectonics and Geodynamics of the Central Asian Foldbelt: The Role of Late Paleozoic Large-Amplitude Strike-Slip Faults. *Russian Geology and Geophysics* 52 (1), 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.005>.

Buslov M.M., 2014. Terrane Tectonics of the Central Asian Orogenic Belt. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 641–665 (in Russian) [Буслов М.М. Террейновая тектоника Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 641–665]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0147>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., 2007. Late Cambrian-Ordovician Tectonics and Geodynamics of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 48 (1), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.006>.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonterova E.I., Mazukabzov A.M., Lepekhina E.N., Cheong W., Kim J., 2017. Pre-collisional (>0.5 Ga) Complexes of the Olkhon Terrane (Southern Siberia) as an Echo of Events in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 42, 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.

Donskaya T.V., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., 2000. The Cis-Baikal Collisional Metamorphic Belt. *Doklady Earth Sciences* 374 (7), 1075–1079 (in Russian) [Донская Т.В., Склярлов Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Яковлева С.З., Бережная Н.Г. Прибайкальский коллизионный метаморфический пояс // Доклады РАН. 2000. Т. 374. № 7. С. 1075–1079].

Doroshkevich A., Sklyarov E., Starikova A., Vasiliev V., Ripp G., Izbrodin I., Posokhov V., 2017. Stable Isotope (C, O, H) Characteristics and Genesis of the Tazheran Brucite Marbles and Skarns, Olkhon Region, Russia. *Mineralogy and Petrology* 111, 399–416. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0477-8>.

Eskin A.S., Ez V.V., Grabkin O.V., Letnikov F.A., Melnikov A.B., Morozov Yu.A., Shkandry B.O., 1979. Correlation of Deep-Seated Processes in the Precambrian Metamorphic Complexes of the Baikal Area. *Nauka, Novosibirsk*, 118 p. (in Russian) [Ескин А.С., Эз В.В., Грабкин О.В., Летников Ф.А., Мельников А.И., Морозов Ю.А., Шкандрий Б.О. Корреляция эндогенных процессов в метаморфических комплексах докембрия Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1979. 118 с.].

Fanelli M.T., Cava N., Wyllie P.J., 1986. Calcite and Dolomite without Portlandite at a New Eutectic in CaO–MgO–CO₂–H₂O with Applications to Carbonatites. In: *Morphology and Phase Equilibria of Minerals. Proceedings of the 13th General Meeting of the International Mineralogical Association (September 19–25, 1982, Varna)*. Bulgarian Academy of Science, Sofia, Bulgaria, p. 313–322.

Fedorovsky V.S., Dobrzhinetskaya L.F., Molchanova T.V., Likhachev A.B., 1993. A New Type of Melange (Baikal, Olkhon Region). *Geotectonics* 4, 30–45 (in Russian) [Федоровский В.С., Добржинецкая Л.Ф., Молчанова Т.В., Лихачев А.Б. Новый тип меланжа (Байкал, Ольхонский регион) // Геотектоника. 1993. Т. 27. № 4. С. 30–45].

Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., Agatova A.R., Kotov A.B., 2012. Aerospace Geological Map South-West Part of Chernorud and Tomota Zone of Olkhon Region (Lake Baikal). A1TIS Group, Moscow.

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., 2010. The Olkhon Geodynamic Proving Ground (Lake Baikal): High-Resolution Satellite Data and Geological Maps of New Generation. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (4), 331–418 (in Russian) [Федоровский В.С., Склярлов Е.В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418]. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-4-0026>.

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E., Dobretsov N.L., Kotov A.B., Tevelev Ark.V., 2017. Aerospace Geological Map of the Olkhon Region (Baikal, Russia). Copymaster Center, Moscow.

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E., Dobretsov N.L., Kotov A.B., Tevelev Ark.V., 2020. Collision System of West Pribaikalie: Aerospace Geological Map of Olkhon Region (Baikal, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 447–452 (in Russian) [Федоровский В.С., Склярлов Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Лавренчук А.В., Старикова А.Е., Добрецов Н.Л., Котов А.Б., Тевелев Арк.В. Коллизионная система Западного Прибайкалья: Аэрокосмическая геологическая карта Ольхонского региона (Байкал, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 447–452]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0485>.

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Izokh A.E., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., 2010. Strike-Slip Tectonics and Subalkaline Mafic Magmatism in the Early Paleozoic Collisional System of the Western Baikal Region. *Russian Geology and Geophysics* 51 (5), 534–547. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.009>.

Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Kotov A.B., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E., 2009. Geological Map of the Tazheran Massif (Baikal). Scale 1:100000. A1TIS Group, Moscow (in Russian) [Федоровский В.С., Склярлов Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В., Старикова А.Е. Геологическая карта массива Тажеран (Байкал). Масштаб 1:100000. М.: Группа компаний А1ТИС, 2009].

Fedorovsky V.S., Vladimirov A.G., Khain E.V., Kargopolov S.A., Gibsher A.S., Izokh A.E., 1995. Tectonics, Metamorphism, and Magmatism of Collision Zones in Early Paleozoic Orogenic Complexes of Central Asia. *Geotectonics* 3, 3–22 (in Russian) [Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хаин Е.В., Каргополов С.А., Гибшер А.С., Изох А.Э. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. Т. 29. № 3. С. 3–22].

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Todt W., Pisarevsky S.A., 2008. Petrology, Geochronology, and Tectonic Implications of c. 500 Ma Metamorphic and Igneous Rocks along the Northern Margin of the Central-Asian Orogen (Olkhon Terrane, Lake Baikal, Siberia). *Journal of the Geological Society* 165, 235–246. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>.

Great Russian Encyclopedia, 2012. Bolshaya Rossiiskaya Entsiklopedia Publishing House, Moscow, Vol. 19. 766 p. (in Russian) [Большая Российская Энциклопедия. М.: Научное изд-во «Большая Российская энциклопедия», 2012. Т. 19. 766 с.].

Greenly E., 1919. The Geology of Anglesey. Memoirs of the Geological Survey of Great Britain. England and Wales. Vol. 1, 520 p.

Hsu K.J., 1968. Principles of Mélanges and Their Bearing on the Franciscan-Knoxville Paradox. Geological Society America Bulletin 79 (8), 1063–1074. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[1063:POMATB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[1063:POMATB]2.0.CO;2).

Khomentovsky V.V., Shenfil V.Yu., Yakshin M.S., 1972. Reference Cross-Sections of the Upper Precambrian and Lower Cambrian Deposits of the Southern Margin of the Siberian Platform. Nauka, Moscow, 356 p. (in Russian) [Хоментовский В.В., Шенфиль В.Ю., Якшин М.С. Опорные разрезы отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия южной окраины Сибирской платформы. М.: Наука, 1972. 356 с.].

Knipper A.K., 1971. History of Serpentinite Mélange in the Lesser Caucasus. Geotectonics 6, 87–101 (in Russian) [Книппер А.Л. История развития серпентинитового меланжа Малого Кавказа // Геотектоника. 1971. № 6. С. 87–101].

Konev A.A., Samoilov V.S., 1974. Contact Metamorphism and Metasomatism in the Aureole of the Tazheran Alkaline Intrusion. Novosibirsk, Nauka, 246 p. (in Russian) [Конов А.А., Самойлов В.С. Контактный метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии. Новосибирск: Наука, 1974. 246 с.].

Lavrenchuk A.V., Sklyarov E.V., Izokh A.E., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., 2017. Compositions of Gabbro Intrusions in the Krestovsky Zone (Western Baikal Region): A Record of Plume–Suprasubduction Mantle Interaction. Russian Geology and Geophysics 58 (10) 1139–1153. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.09.001>.

Lentz D.R., 1999. Carbonatite Genesis: A Reexamination of the Role of Intrusion-Related Pneumatolytic Skarn Processes in Limestone Melting. Geology 27 (4), 335–338. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027%3C0335:CGAROT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0335:CGAROT%3E2.3.CO;2).

Pavlovsky E.V., Eskin A.S., 1964. Archean Rocks in the Baikal Region: Composition and Structure. Nauka, Moscow, 128 p. (in Russian) [Павловский Е.В., Ескин А.С. Особенности состава и структуры архея Прибайкалья. М.: Наука, 1964. 128 с.].

Sklyarov E.V. (Ed.), 2005. Structural and Tectonic Correlation across the Central Asia Orogenic Collage: North-

Eastern Segment. Guidebook and Abstract Volume of the Siberian Workshop IGCP480: Irkutsk – Ulan-Ude, Russia, July 25 – August 6, 2005. IEC SB RAS, Irkutsk, 291 p.

Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., Levitsky V.I., Sal'nikova E.B., Starikova A.E. et al., 2009. Carbonatites in Collisional Settings and Pseudo-Carbonatites of the Early Paleozoic Ol'khon Collisional System. Russian Geology and Geophysics 50 (12), 1091–1106. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.008>.

Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., Starikova A.E., Yakovleva S.Z., Anisimova I.V., Fedoseenko A.M., 2013a. Carbonate and Silicate-Carbonate Injection Complexes in Collision Systems: The West Baikal Region as an Example. Geotectonics 47 (3), 180–196. <https://doi.org/10.1134/S0016852113020064>.

Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E., Kotov A.B., Mazukabzov A.M., 2013b. Aerospace Geological Map of Anga – Begul Interfluve (Baikal). The Right Anga Zone. Copymaster Center, Moscow.

Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E., Agatova A.R., Kotov A.B., 2012. Aerospace Geological Map of South-West Part of the Olkhon Region (Lake Baikal). Krestovsky – Shirokaya Zone. A1TIS Group, Moscow.

Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Kanakin S.V., 2021. Pyroxenite as a Product of Mafic-Carbonate Melt Interaction (Tazheran Massif, West Baikal Area, Russia). Minerals 11 (6), 654. <https://doi.org/10.3390/min11060654>.

Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Kotov A.B., Mazukabzov A.M., Starikova A.E., 2020. Regional, Contact Metamorphism, and Autometamorphism of the Olkhon Terrane (West Baikal Area). Petrology 28 (1), 47–61. <https://doi.org/10.1134/S0869591120010051>.

Starikova A.E., Sklyarov E.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Fedorovskii V.S., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., 2014. Vein Calciphyre and Contact Mg Skarn from the Tazheran Massif (Western Baikal Area, Russia): Age and Genesis. Doklady Earth Sciences 457, 1003–1007. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080182>.

Volkova N.I., Vladimirov A.G., Travin A.V., Mekhonoshin A.S., Khromykh S.V., Yudin D.S., Rudnev S.N., 2010. U-Pb Isotopic Dating of Zircons (SHRIMP-II) from Granulites of the Ol'khon Region of Western Baikal Area. Doklady Earth Sciences 432, 821–824. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10060243>.

Wyllie P.J., Tuttle O.F., 1960. The System CaO-CO₂-H₂O and the Origin of Carbonatites. Journal of Petrology 1 (1), 1–46. <https://doi.org/10.1093/petrology/1.1.1>.