

УДК: 553.311.2

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-451-464

К вопросу о генезисе месторождений Первого Северного железорудного узла

© 2019 г. Г. А. Петров^{1,2}¹Уральская геологосъемочная экспедиция, 620014, г. Екатеринбург, ул. Вайнера, 55²Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail georg_petrov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2018 г., принята к печати 27.09.2018 г.

Объект исследований. Объектом исследований являются железные руды и рудовмещающие толщи Первого Северного железорудного узла, в северной части Тагильского прогиба, в состав которого входят три мелких промышленных объекта, ныне почти полностью отработанных – это 1-е Северное, Суходойское и Пещерное месторождения, а также несколько рудопроявлений. **Материалы и методы.** В процессе работы проводился анализ опубликованных материалов и производственных отчетов по перечисленным выше объектам, а также собственные полевые наблюдения и поиск месторождений-аналогов в литературных источниках. **Результаты.** До настоящего времени считалось, что магнетитовые руды образовались при контактово-метасоматическом взаимодействии живецких известняков и интрузий габбро-долеритов и долеритов. Наши исследования показали, что типичные скарны на месторождениях распространены весьма ограниченно или отсутствуют, а рудные тела залегают согласно с напластованием осадочных и вулканогенных пород. Наиболее близкими аналогами, по мнению автора, являются известняково-железорудные месторождения района Лан-Дилль в Германии, что позволило предложить альтернативную (вулканогенно-осадочную) модель формирования железорудных залежей Первого Северного железорудного узла. **Выводы.** Привлечение вулканогенно-осадочной модели позволяет изменить поисковые признаки и существенно уточнить (увеличить) перспективы обнаружения новых промышленных месторождений железных руд.

Ключевые слова: Урал, железо, вулканогенно-осадочные месторождения

On the genesis of deposits of the Pervy Severny iron ore district

Georg A. Petrov^{1,2}¹Uralian geological survey expedition, 55 Vainera st., Ekaterinburg, 620014 Russia;²Institute of geology and geochemistry UB of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia
e-mail georg_petrov@mail.ru

Received 23.03.2018, accepted 27.09.2018

Object of research. The object of research is iron ore and ore-bearing strata of The Pervy Severny iron ore district in the Northern part of the Tagil depression, which includes three small industrial objects, now almost completely spent – this is the Pervoe Severnoe, Sukhodoyskoye and Peshchernoe deposits, as well as several ore occurrences. **Materials and methods.** In the course of work, the analysis of published materials and production reports on the above objects, as well as their own field observations and search for deposits-analogues in literary sources was carried out. **Results.** Hitherto it was believed that magnetite ore was formed by contact-metasomatic interaction of Givetian limestone and intrusions of dolerites and gabbro-diorites. Our research has shown that the typical skarns are very restricted or absent, and the ore bodies occur in accordance with the sedimentary and volcanic rocks. The closest analogues, according to the author, are the known iron ore deposits of the Lan-Dill Region in Germany, which allowed us to offer an alternative (volcanogenic-sedimentary) model of the formation of iron ore deposits of the Pervy Severny iron ore district. **Summary.** Attraction of volcanogenic-sedimentary model allows to change search signs and significantly to specify (increase) prospects of detection of new industrial deposits of iron ores.

Keywords: Urals, iron, volcanogenic-sedimentary deposits

Acknowledgements

The author is sincerely grateful to A.V. Maslov, V.V. Maslennikov, E.S. Kontar and M.T. Krupenin for discussion of problems, useful critical remarks and recommendations.

Research partially performed in the framework of theme № AAAA A18-118053090044-1 of the state task of the IGG UB RAS.

Для цитирования: Петров Г.А. (2019) К вопросу о генезисе месторождений Первого Северного железорудного узла. *Литосфера*, 19(3), 451-464. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-451-464

For citation: Petrov G.A. (2019) On the genesis of deposits of the Pervy Severny iron ore district. *Litosfera*, 19(3), 451-464. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-451-464

ВВЕДЕНИЕ

Первый Северный железорудный узел находится на восточном склоне Северного Урала, в север-

ной части Тагильского прогиба. Узел состоит из трех мелких промышленных объектов, ныне почти полностью отработанных – это Первое Северное, Суходойское и Пещерное месторождения (рис. 1),

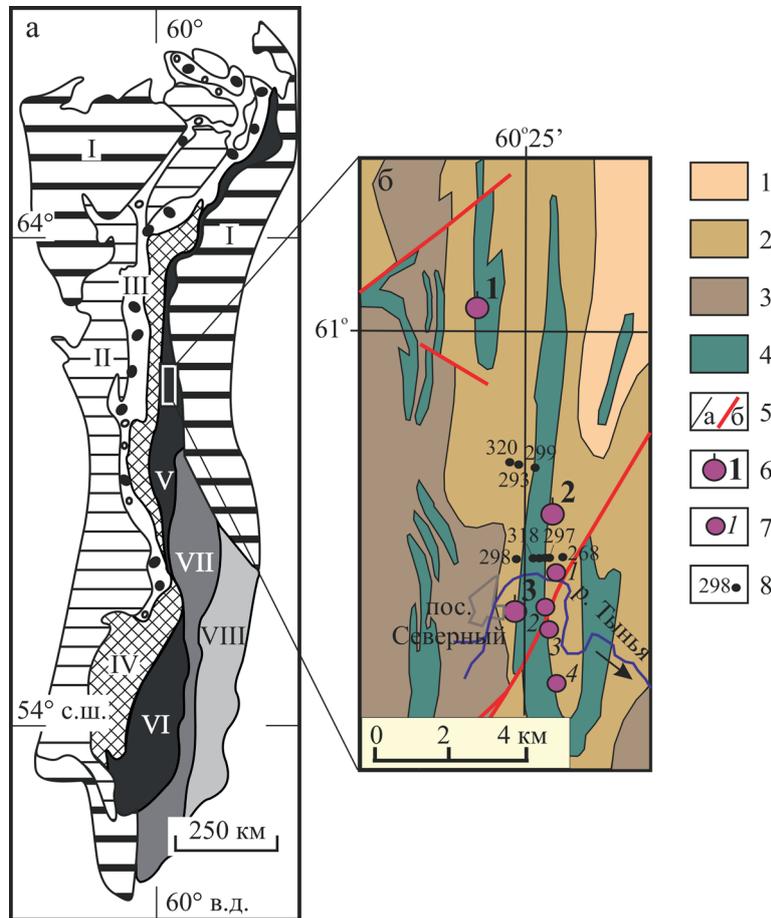


Рис. 1. Обзорная карта (а) и схема геологического строения района Первого Северного железорудного месторождения (б), по [Шилов и др., 1989] с упрощениями.

а. I – мезозойско-кайнозойские отложения; II – Предуральский прогиб; III–VIII – мегазоны (III – Западно-Уральская, IV – Центрально-Уральская, V – Тагильская, VI – Магнитогорская, VII – Восточно-Уральская, VIII – Зауральская). Контуrom показан изученный район.

б. 1 – нерасчлененные верхнедевонские образования: сланцы глинисто-алеуритистые, глинисто-кремнистые, песчаники, известняки, туфопесчаники, линзовидные прослои известняков, андезиты, дациты; 2 – живетские образования: песчаники, туфопесчаники, туффиты, сланцы известково-глинистые, глинисто-кремнистые, кремнистые, конгломераты, известняки, андезибазальты, дациандезиты, дациты; 3 – эйфельские образования: известняки, песчаники, туфопесчаники, туффиты, базальты; 4 – верхнедевонские долериты, габбродолериты; 5 – стратиграфические и интрузивные границы (а), разрывные нарушения (б); 6 – железорудные месторождения: 1 – Пещерное, 2 – Суходойское, 3 – Первый Северный рудник; 7 – железорудные проявления: 1 – Тыньинское, 2 – Восточная аномалия, 3 – Северо-Казанское, 4 – Южно-Казанское; 8 – поисково-разведочные скважины, показанные на рис. 2, и их номера.

Fig. 1. Overview map (a) and the scheme of the geological structure of the area of the Pervoe Severnoe iron ore deposit (b) by [26] with simplifications.

а. I – Mesozoic-Cenozoic sediments; II – Pre-Uralian foredeep; III–VIII – megazones: III – West, Uralian, IV – the Central Uralian, V – Tagil, VI – Magnitogorsk, VII – East-Uralian, VIII – Trans-Uralian). The outline shows the study area.

б. 1 – undifferentiated Upper Devonian formation: shales clay-aleuritic, clay-siliceous, sandstones, limestones, tuffaceous sandstones, lenses of limestones, andesites, dacites; 2 – Givetian formation: sandstones, tuffaceous sandstones, tuffites, schists calcareous-clay, clay-siliceous, siliceous, conglomerates, limestones, andesibasalts, dacite-andesites, dacites; 3 – Eifelian formation: limestones, sandstones, tuffaceous sandstones, tuffites, basalts; 4 – Upper Devonian dolerites, gabbrodolerites; 5 – stratigraphic and intrusive boundaries (a), faults (b); 6 – iron ore deposits: 1 – Peshchernoe, 2 – Sukhodolskoe, 3 – the Pervy Severny Rudnik; 7 – iron ore manifestations: 1 – Tun'inskoe, 2 – Vostochnaya anomaliya, 3 – Severo- Kazanskoe, 4 – Yuzhno-Kazanskoe; 8 – exploration boreholes, shown in Fig. 2 and their numbers.

а также несколько рудопроявлений (заверенных буровыми исследованиями геофизических аномалий) – Восточная аномалия, Северо-Казанская, Южно-Казанская, Тыньинская и др. Первое Северное месторождение открыто в 1831 г., впоследствии неоднократно изучалось и эксплуатировалось. Первые сведения о геологическом строении месторождения можно найти в работах А.И. Успенского, в XX в. оно изучалось Е.Д. Стратоновичем, К.Б. Вайнбергом, А.Д. Пахомовым, К.И. Прохоровой и другими исследователями. В отчетах о проведении поисковых и разведочных работ [Усенко, 1956ф, 1957ф; Шевалдин, 1962ф] и публикациях [Баклаев, 1973; Геология СССР, 1973; Овчинников, 1998; и др.] генетический тип месторождений и проявлений определяется как скарново-магнетитовый. Считается, что магнетитовые руды образовались при контактово-метасоматическом взаимодействии живецких известняков и прорывающих их силлов, штоков и даек габбро-долеритов и долеритов. На основе анализа материалов поисковых и разведочных работ, а также собственных полевых наблюдений мы предложили альтернативную (вулканогенно-осадочную) модель формирования железорудных залежей.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная работа опирается на полевые наблюдения автора и фондовые материалы – отчеты о геологоразведочных и поисковых работах, выполненных на территории Первого Северного железорудного узла в 50–60-е гг. XX столетия. Соответственно, главными методами исследования являлись изучение и анализ документации старых горных выработок, архивных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Месторождения Первого Северного железорудного узла расположены в северной части Тагильского прогиба, в области распространения девонских толщ (см. рис. 1). Рудовмещающими породами являются живецкие (по В.А. Шилову [1989]) образования: песчаники, туфопесчаники, туффиты, сланцы известково-глинистые, глинисто-кремнистые, кремнистые, конгломераты, известняки, андезибазальты, дациандезиты, дациты; по современным представлениям, эти образования относятся к высотинской свите верхнего эйфеля–нижнего живета [Жданов, 2009]. Ниже по разрезу залегают эйфельские известняки, песчаники, туфопесчаники, туффиты, базальты тальгийской свиты. Рудовмещающая толща перекрывается позднеживецко-франской лимкинской свитой, в состав которой входят сланцы глинисто-алевритистые, глинисто-кремнистые, песчаники, известняки, туфопесчани-

ки, линзовидные прослои известняков, андезиты, дациты. Перечисленные стратифицированные образования прорываются силлами, дайками и штоками долеритов и габбро-долеритов верхнедевонского (?) ивдельского комплекса.

Как уже упоминалось, железорудные месторождения и проявления Первого Северного узла традиционно относятся к скарново-магнетитовому типу. Между тем при проведении геологоразведочных работ на Первом Северном месторождении было установлено, что “...скарны на месторождении встречаются в незначительном количестве... Для Главного рудного поля и Восточной аномалии наиболее характерны амфиболовые и амфибол-хлоритовые скарны... Причем эти скарны здесь образовались путем эндоморфного изменения самих же диабазов, о чем свидетельствуют постепенные переходы между диабазом и амфиболовыми скарнами...” [Усенко, 1956ф, с. 52]. А.И. Шевалдин [1962ф], выполнявший поисковые работы, при характеристике контактово-метасоматических горных пород Суходойского месторождения указывал [с. 66]: “...Типичные минералы высоких температур: пироксен, гранат и даже менее высокотемпературная роговая обманка здесь не наблюдаются. Нет ... реликтов для суждения о том, что эти высокотемпературные минералы уничтожены последующими процессами...” Отмечается лишь развитие тремолит-актинолитового амфибола и хлорита по диабазам. На Пещерном месторождении также “совершенно отсутствуют скарны и какие-либо скарновые образования. Совершенно не встречены высокотемпературные минералы пироксен и гранат...” [Шевалдин, 1962ф, с. 68]. Маломощные интервалы гранатсодержащих скарнов встречены на некоторых рудопроявлениях (где отсутствуют промышленные тела магнетитовых руд). Так, по А.И. Шевалдину [1962ф], на Северо-Казанском проявлении, на контакте диабазов и известняков, встречено тело гранат-пироксен-амфиболовых скарнов мощностью 0.5 м; на Южно-Казанском проявлении мощность подобных пород составила 10–15 см; маломощные тела амфибол-пироксеновых скарнов известны также и на Тыньинском рудопроявлении. Упомянутый автор, характеризуя особенности железорудных месторождений Первого Северного узла, пишет [с. 83]: “...Итак, контактово-метасоматические процессы на месторождениях Первой Северной группы характеризуются следующими основными чертами: 1) отсутствием типичных скарновых образований, присущих месторождениям, связанным с гранитоидами; 2) невыраженным высокотемпературным этапом в ходе метасоматического процесса при почти полном отсутствии минеральных ассоциаций этого диапазона...”

Таким образом, как следует из материалов геологоразведочных работ, на всех промышленных месторождениях типичные скарны отсутствуют; их

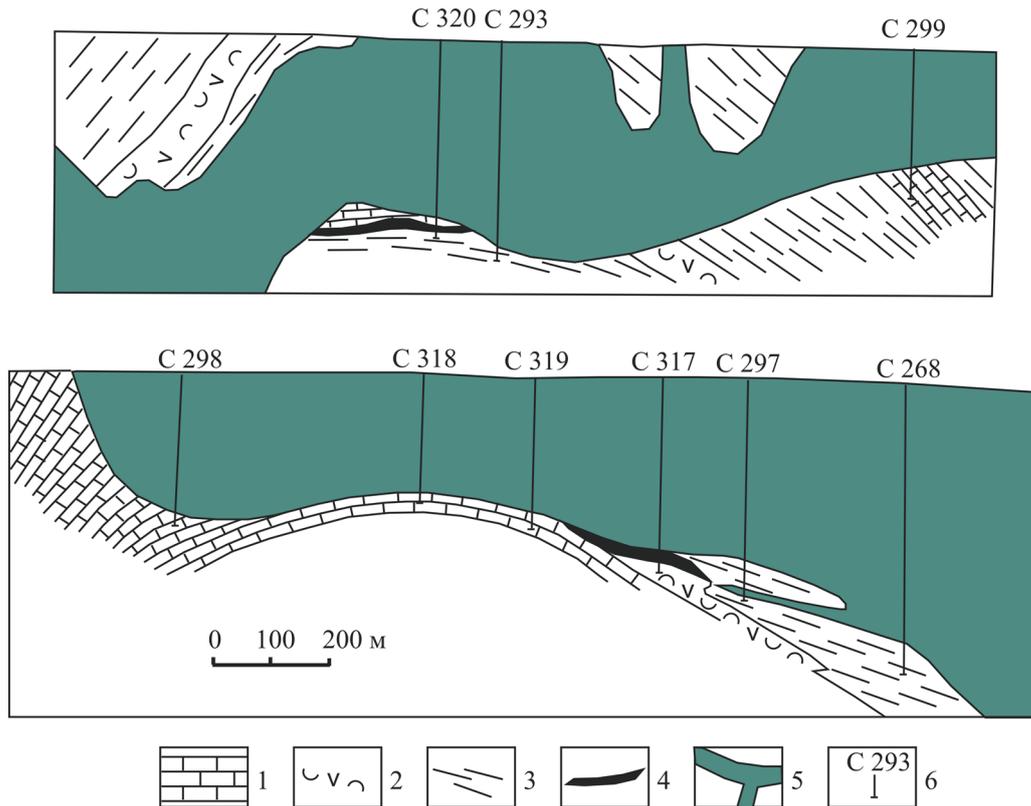


Рис. 2. Разрезы по линиям поисковых скважин, по [Шевалдин, 1962].

1 – известняки; 2 – андезибазальтовые туфы; 3 – карбонатно-глинистые и кремнисто-глинистые сланцы; 4 – железорудные тела; 5 – долериты и габбродолериты; 6 – поисковые скважины и их номера.

Fig. 2. The sections along the lines of exploratory boreholes, after [Shevaldin, 1962].

1 – limestone; 2 – andesibasaltics tuffs; 3 – calcareous-clay and siliceous-argillaceous shale; 4 – ore bodies; 5 – dolerites and gabbrodolerites; 6 – exploration boreholes and their numbers.

маломощные ореолы наблюдаются только на рудопроявлениях с незначительным развитием магнетитовой минерализации, т. е. создается впечатление об отсутствии связи между интенсивностью контактово-метасоматических преобразований и масштабами магнетитового оруденения. Пластообразные и линзовидные железорудные тела располагаются среди вулканогенных пород, глинистых сланцев и известняков (рис. 2).

Предшествующие исследователи [Усенко, 1957ф; Шевалдин, 1962ф] считали важным поисковым фактором наличие крупных долеритовых силлов, перекрывающих куполообразные известняковые постройки (или ядра антиклинальных складок, сложенные известняками), с такими структурами связывалось формирование залежей Первого Северного и Суходойского месторождений.

По данным А.И. Шевалдина [1962ф], *Первое Северное месторождение* состоит из двух рудных тел, имеющих восточное падение под углом $\approx 40^\circ$ и более; протяженность тел – 450 и 430 м, тела выклиниваются на глубине 30–70 м от поверхности.

Рудные тела приурочены к верхней части крупной линзы известняков (мощность ее составляет 100–120 м), на контакте с силлом долеритов. В разрезе отмечаются также туфоалевролиты и карбонатно-глинистые сланцы. Руды представлены магнетитом с примесью небольшого количества кальцита, сидерита и кварца. Средний состав руд, мас. %: Fe – 55.8, S – 1.26, P – 0.127, Cu – 0.042, Si – 5.51.

Суходойское месторождение расположено в 2.8 км севернее Первого Северного. Рудное тело мощностью от 7 до 77 м (средняя мощность 38–39 м) находилось под силлом долеритов на глубине 50–190 м, образуя куполовидную структуру. В верхней части “купола” по долеритам развиваются хлорит-актинолитовые метасоматиты (рис. 3). Руды, по мнению А.И. Шевалдина, метасоматически замещают известняки; последние подстилают рудное тело и имеют мощность 1.5–30 м. Ниже по разрезу находятся метаморфизованные вулканокластиты и углеродисто-глинистые сланцы с живетской фауной. Руды месторождения представлены магнетитом с примесью сидерита и кальци-

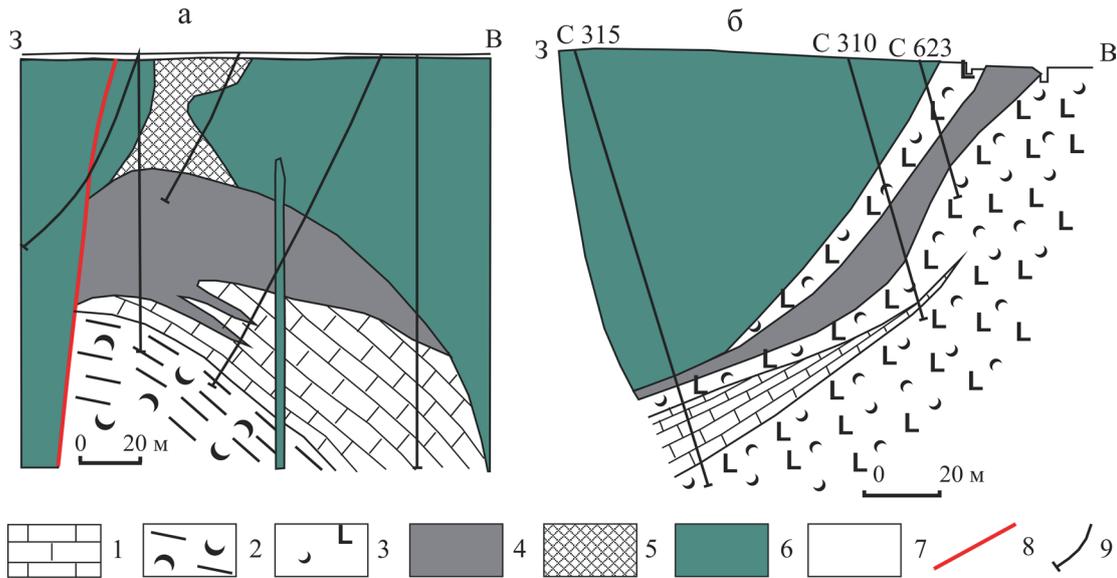


Рис. 3. Геологические разрезы месторождений Первого Северного рудного узла: а – Суходойского (по [Геология СССР, 1973]), б – Пещерного (по [Шевалдин, 1962]).

1 – известняки; 2 – туфосланцы; 3 – туфа пироксен-плагиофировых базальтов; 4 – железорудные тела; 5 – хлорит-амфиболовый метасоматит по долеритам с обильной вкрапленностью магнетита; 6 – долериты и габбродолериты; 7 – покрывные отложения; 8 – разрывные нарушения; 9 – буровые скважины и их номера.

Fig. 3. Geological sections of the deposits of Pervyi Severnyi ore district: а – Sukhodolskyi after [Geologia SSSR, 1973]; б – Peschernyi after [Shevaldin, 1962].

1 – limestone; 2 – tuffaceous shales; 3 – tuff of pyroxene-plagioclase basalts; 4 – ore bodies; 5 – chlorite-amphibole metasomatic rocks on dolerite with abundant disseminated magnetite; 6 – dolerites and gabbrodolerites; 7 – covering strata; 8 – faults; 9 – boreholes and their numbers.

та, сочетание этих минералов в разных пропорциях обусловило характерную пятнистую текстуру. Кроме указанных минералов в рудах в небольшом количестве содержатся кварц, пирит, халькопирит, хлорит, актинолит, лимонит. Средний состав руд, мас. %: Fe – 49.2, S – 1.108, P – 0.107, Cu – 0.108, Si – 6.06. Кроме того, присутствуют, мас. %: $TiO_2 + V_2O_5$ – до 0.08, Cr_2O_3 – 0–0.204, Ni – 0.01–0.19, Co – 0.013–0.026, MnO – до 0.65.

Пещерное месторождение находится в 7.5 км к северу от Суходойского. Разрез здесь сложен преимущественно кристаллокластическими туфами пироксен-плагиоклазовых базальтов (по А.И. Шевалдину, возможно, это лаво- и гиалокластиты) с прослоями и линзами известняков, а также силами и дайками долеритов (см. рис. 3). Общее падение вулканогенно-осадочной толщи и долеритовых силлов – западное под углом 60–65°. Рудные тела мощностью от 3.5 до 15 м залегают согласно напластованию среди туфов (вулканокластитов?), реже – на контакте последних и долеритов. Выделяются два главных рудных тела протяженностью 550 и 380 м. В незамещенных фрагментах туфов (вулканокластитов?) отмечается кристаллизация роговой обманки, по которой, в свою очередь, развиваются актинолит и хлорит. Описывается также замещение туфов (вероятно, имеются в виду вул-

канокластиты) магнетитом без развития амфиболов. В одной из скважин, в мраморизованных известняках вблизи контакта с долеритами, отмечена вкрапленность андрадитового граната, замещаемого магнетитом. В состав руд входят магнетит, амфибол, кварц, хлорит, кальцит, гематит, апатит, пирит, халькопирит, ильменит. Среди руд часто отмечаются незамещенные и в разной степени замещенные участки туфов. Средний состав руд, мас. %: Fe – 53.2, S – 0.11, P – 0.06, Cu – 0.014.

Рудопроявления (Тыншинское, Восточная аномалия, Северо-Казанское и Южно-казанское) имеют строение, сходное с охарактеризованными выше месторождениями, при значительно меньших масштабах оруденения. На некоторых из них отмечаются скарны (см. выше).

В публикациях вопросы геологического строения района Первого Северного рудного узла и входящих в него месторождений освещены довольно кратко. Наиболее развернутые описания железорудных объектов приведены в томе XII “Геологии СССР” [1973] и монографии Л.Н. Овчинникова [1998]. В многотомном издании “Геологии СССР” (т. XII “Полезные ископаемые”) месторождения Первого Северного (Суходойского) рудного узла охарактеризованы А.И. Усенко. Он занимался разведкой месторождений, его взгляды на строение



Рис. 4. Срастания магнетита и карбонатного минерала. Первое Северное месторождение.

Fig. 4. Fusion of magnetite and carbonate mineral. Pervoe Severnoe deposit.

и происхождение железорудных залежей приведены выше. Л.Н. Овчинников приводит весьма краткие характеристики рудных объектов, в целом соответствующие описаниям геологов-разведчиков. Уточнены лишь составы минеральных парагенезисов контактово-термальных ореолов долеритовых тел, приводятся данные о наличии в них феррогортонолита, гриналита, сидероплезита, дафнита и ильваита.

В 2017 г. автор настоящей статьи посетил все три месторождения (Первый Северный рудник, Суходойское и Пещерное) в целях выяснения особенностей их геологического строения. В настоящее время карьеры упомянутых месторождений затоплены, борта выработок заросли лесом и частично обрушились, что определяет фрагментарность обнаженности горных выработок. Тем не менее некоторые наблюдения удалось сделать.

На Первом Северном месторождении в бортах старого карьера наблюдаются выходы долеритов, мелкозернистых мраморизованных известняков, разнообразных метасоматитов и железных руд. Метасоматиты представлены джаспероидами (окварцованными, часто брекчиевидными известняками с хлоритом и сульфидами), серицит-(хлорит)-кварц-карбонатными березитами и хлорит-альбит-карбонатными эйситами. Зоны метасоматитов, как правило, приурочены к разрывным нарушениям и являются более поздними по отношению к магнетитовым залежам. Рудные тела магнетитового и карбонатно-магнетитового состава имеют линзо-

видную форму и залегают в мраморизованных известняках, они окружены густой сетью сидеритовых, реже сульфидно-карбонатных прожилков, образующих в известняках штокверковые зоны. Иногда в рудных телах наблюдаются срастания магнетита и карбонатного минерала (рис. 4). Границы железорудных тел и известняков четкие, чаще всего волнистые и извилистые. Признаки скарновой минерализации (граната, пироксена, амфибола, эпидота и др.) в известняках, долеритах и железных рудах не обнаружены.

Борта карьера Суходойского месторождения сложены главным образом долеритами, лишь в северо-западной части выработки наблюдается небольшая выходы мраморизованных известняков с сидеритовыми и сульфидно-сидеритовыми прожилками. Некоторое представление о взаимоотношениях рудных тел с вмещающими породами можно получить при изучении крупных глыб из отвалов. Первое, что бросается в глаза, – признаки метасоматического замещения (или цементирования?) брекчиевидных известняков, в том числе содержащих фауну криноидей, мелкозернистым магнетитовым агрегатом (рис. 5). Вторая особенность рудных тел Суходойского месторождения (ее отмечали и геологи-разведчики, например А.И. Шевалдин) – широкое распространение сидерита и сульфидов (рис. 6); характерно развитие пятнистых пород, состоящих из мраморизованных известняков, пятен сидерита и магнетита и неравномерной вкрапленности сульфидов (главным образом пирита).

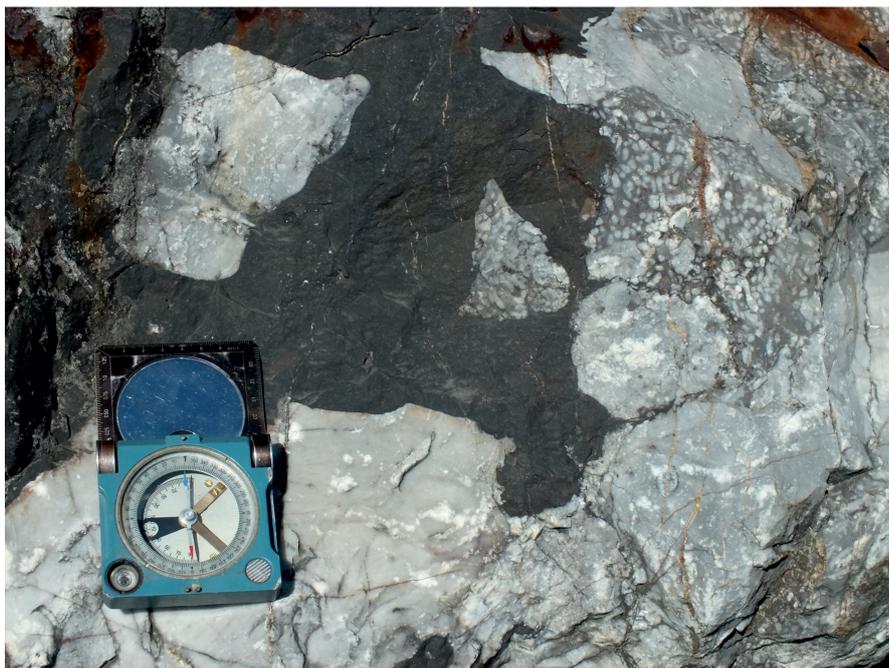


Рис. 5. Замещение (цементирование?) брекчиевидного криноидного известняка магнетитом. Суходойское месторождение.

Fig. 5. Replacement (cementation?) of brecciated crinoidea limestone by magnetite. Sukhodoiskoe deposit.

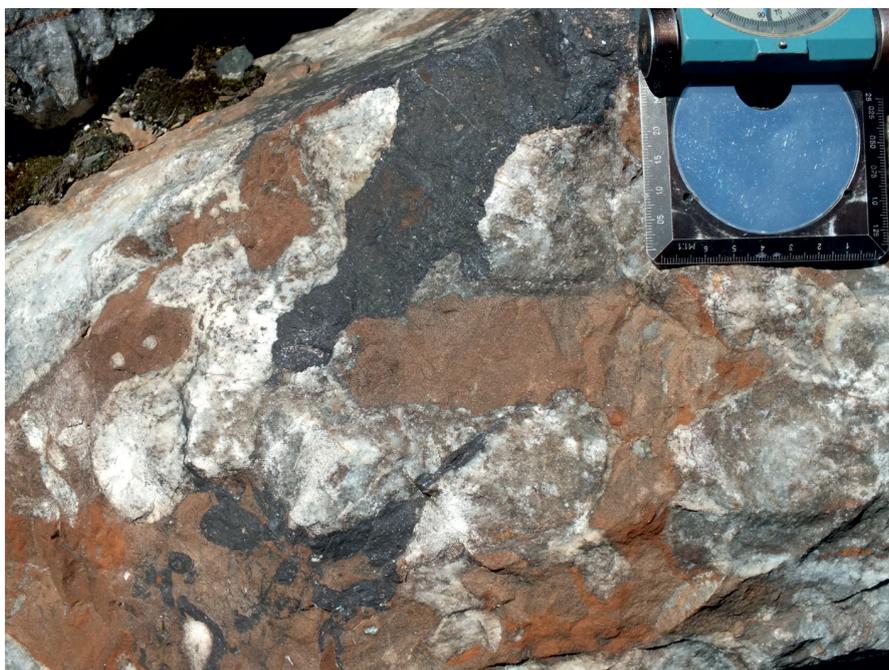


Рис. 6. Замещение (цементирование?) мраморизованного известняка сидеритом и магнетитом. Суходойское месторождение.

Fig. 6. The replacement (cementation?) of marmorized limestone, by siderite and magnetite. Sukhodoiskoe deposit.

Признаки скарновой минерализации также не наблюдались. Магнетит-хлорит-тремолитовые метасоматиты, развивающиеся по долеритам над руд-

ным телом в ядре куполовидной структуры (см. рис. 3), по нашему мнению, образовались в результате пострудной гидротермальной проработки, ши-

роко проявившейся также и на Первом Северном месторождении.

На Пещерном месторождении, как и на Суходойском, присутствуют массивные и брекчиевидные известняки, в последних матрикс замещается (цементируется?) сидеритом. Магнетитовая минерализация здесь приурочена к амфиболизированным вулканокластитам базальтового состава, переслаивающимся с известняками. Магнетит образует неравномерную вкрапленность, шлировидные и пластообразные тела среди вулканокластитов. Оролы контактово-термального метаморфизма имеют ограниченное распространение и представлены минерализацией амфибола, клинопироксена, эпидота и граната.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, анализ материалов геологоразведочных работ и собственные полевые наблюдения позволяют сделать некоторые выводы об особенностях локализации железных руд Первого Северного узла. Во-первых, рудные тела имеют карбонатно-магнетитовый, магнетитовый состав и локализуются чаще всего среди известняков, реже – среди вулканокластитов. Форма тел преимущественно линзовидная, пластообразная, границы четкие, волнистые. Иногда наблюдаются признаки замещения (цементирования?) обломочных известняков магнетитом (см. рис. 5). Во-вторых, вблизи рудных тел чаще всего не видны признаки скарно-вой минерализации (за исключением описанных выше случаев). В-третьих, магнетитовые тела в известняках обычно окружены сидеритовыми штокверками (Первый Северный рудник), в других случаях (Суходойское месторождение) формируются пятнистые пирит-сидерит-магнетитовые породы (см. рис. 6).

Описания из геологических отчетов и наши полевые наблюдения позволяют говорить о своеобразии железорудных объектов Первого Северного рудного узла. Они заметно отличаются от типичных скарно-магнетитовых месторождений Урала, пространственно ассоциирующих с интрузиями гранитоидов [Баклаев, 1973; Овчинников, 1998]. Прежде всего, бросается в глаза отсутствие или крайне незначительное распространение скарнов. Вопрос о генезисе железных руд нуждается в дальнейшем исследовании, пока же, в качестве рабочей гипотезы, можно предположить, что указанные месторождения формировались в тесной связи с накоплением вмещающих их вулканогенно-осадочных образований. Типичными объектами такого типа считаются месторождение Западный Каражал в Казахстане, группа месторождений в Рейнских сланцевых горах (Германия).

Западно-Каражалское месторождение находится в Атасуйском рудном районе, в Карагандин-

ской области Центрального Казахстана [Сапожников, 1963; Рудные месторождения СССР, 1978]. Разрез представлен углеродисто-кремнистыми, углеродисто-глинисто-кремнистыми известняками с прослоями и линзами кремнистых пород, базальтов, их туфов (лавокластитов?) и лавобрекчий верхнего девона–нижнего карбона, с пластами и линзами магнетитовых, гематитовых и марганцевых руд. Присутствуют также дайки порфиroidных диоритов. Главная рудная залежь образует пластообразное тело, согласно залегающее с вмещающими породами; оно прослеживается по простиранию на 6.5 км и по падению – на 800 м. Мощность залежи в среднем 20–40 м. Рудный пласт залегаёт между углито-кремнистыми известняками с прослоями яшм в лежащем боку и известняками с прослоями яшмовидных пород – висячем. В нижней части рудной залежи развиты гематитовые руды, в средней – преимущественно магнетитовые, в верхней – бедные гематитовые марганцевые руды. В основании магнетит-гематитовой залежи прослеживается тонкий марганцеворудный пласт. Главные рудные минералы – гематит и магнетит, второстепенные – сидерит, барит, пирит, в небольших количествах встречаются арсенипирит, халькопирит, сфалерит, галенит. В балансовых железных рудах средние содержания, в мас. %: Fe – 55.6, MnO – 0.46, SiO₂ – 12.4, S – 0.6, P – 0.03. Запасы железных руд (первоначальные) по категориям А + В + С₁ = 310 млн т [Рудные месторождения СССР, 1978].

Железорудные месторождения Рейнских сланцевых гор приурочены к мульдам Лан и Дилль в северо-восточной части Гессенского синклинория [Формозова, 1963; Осадкообразование..., 1968; Саркисян и др., 1984]. Рудовмещающая известняково-вулканогенная формация имеет площадное распространение на поверхности около 6000 км², а под перекрывающими нижнекаменноугольными образованиями – в несколько раз больше [Формозова, 1963]. Нижняя возрастная граница формации варьирует от эмса до середины живета, подстилающими являются глинисто-сланцевые образования нижнего девона. В состав рудовмещающей толщи входят вулканогенные породы – дациты и трахиты (“кератофиры”, по [Формозова, 1963]), базальты и долериты, известковые туфы (возможно, лаво- и гиалокластиты?) основного состава (“шальштейны”), известняки, глинистые и кремнистые сланцы; широко распространены силлы и дайки долеритов (рис. 7).

Рудные тела имеют пластовую и линзовидную форму, чаще всего они приурочены к границе шальштейнов и известняков среднего девона. Руды состоят главным образом из магнетита и гематита, в качестве второстепенных минералов отмечаются сидерит, пирит, хлорит, кальцит. Наблюдается развитие гематита по раннему магнетиту и пирит-

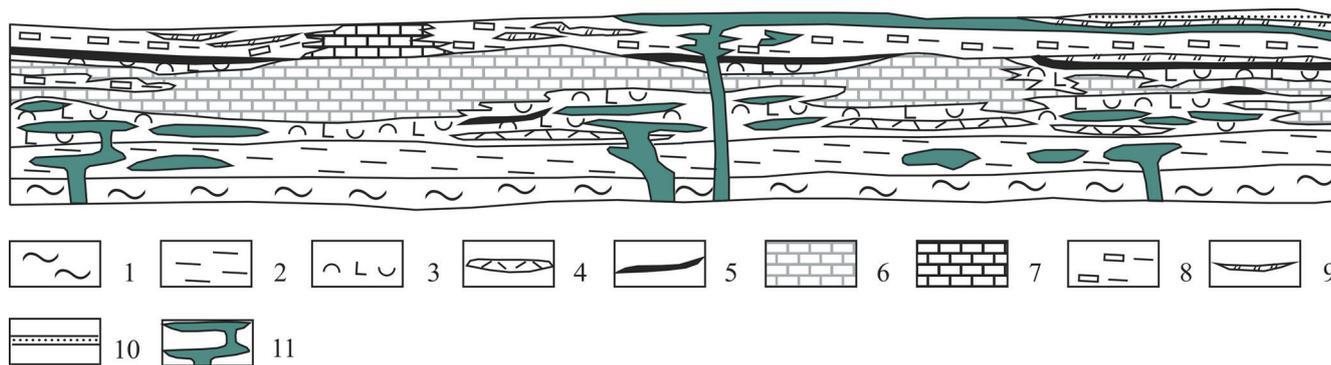


Рис. 7. Схематический фациальный профиль девонских образований в восточной части мульды Лан, по [Kegel, 1923].

1 – нижнедевонские сланцы; 2–6 – средний девон: 2 – глинистые сланцы с прослоями и конкрециями известняков, 3 – известковые туфы основного состава (“шалштейны”), 4 – дациты и трахиты (“кератофиры”), 5 – рудные тела, 6 – слоистые (глубоководные) известняки; 7–9 – верхний девон: 7 – рифогенные известняки, 8 – известковые сланцы, 9 – кремнистые сланцы; 10 – граувакки и алеролиты нижнего карбона (“кульм”); 11 – долериты.

Fig. 7. Schematic facies profile of Devonian formations in the Eastern part of the Lan depression, according to [Kegel, 1923].

1 – Lower Devonian shales; 2–6 – Middle Devonian: 2 – shales with interbeds and nodules of limestone, 3 – calcareous tuffs of basic composition (“shalstein”), 4 – dacites and trachytes (“keratophyre”), 5 – the ore body, 6 – layered (deep-water) limestones; 7–9 – Upper Devonian: 7 – reef limestones, 8 – calcareous shale, 9 – siliceous shales; 10 – greywackes and siltstones of the Lower Carboniferous (“Kulm”); 11 – dolerites.

ту, а также наличие рудных тел различного состава в разных частях мульды – существенно сидеритовых, сидерит-магнетитовых, пирит-магнетитовых, магнетит-гематитовых, кальцит-гематитовых, гематитовых. В. Кегель [1923], детально изучавший месторождения, описывает следующую последовательность кристаллизации рудных минералов (от более ранних к поздним): пирит–сидерит–магнетит–гематит; при этом контактово-термальное и гидротермально-метасоматическое влияние даек и силлов долеритов на состав и строение рудных тел, по мнению исследователя, было минимальным. Состав руд в различных месторождениях сильно варьирует, содержание Fe колеблется от 20–26% в окисно-карбонатных рудах до 50–53% (до 61%) в магнетитовых рудах.

Л.Н. Формозова [Осадкообразование..., 1968] отмечает, что месторождения типа Лан-Дилль широко распространены не только в Рейнских горах, но и в Динаридах, в горном Алтае и других регионах. По ее мнению, “...рудноносными являются вулканогенно-карбонатные формации, связанные с подводным вулканизмом спилито-кератофирового состава.... Наиболее богатые железные руды этой группы формаций связаны с основным и средним вулканизмом.... Среди пород вулканогенно-карбонатной группы формаций всегда присутствуют яшмы, фтаниты, кремнистые сланцы и кремнистые известняки.... Рудное вещество отлагалось или на склонах подводных вулканических построек, или в западинах дна, лишенных придонных течений и волнений. Западины релье-

фа, благоприятные для образования руд, не всегда были глубоководными. Рудные залежи формировались и в мелководных лагунах, отгороженных от моря коралловыми рифами...” [Осадкообразование..., 1968, с. 121-122].

По данным исследования современных подводных гидротермальных процессов (например, [Бутузова, 1969]), железо поступает на придонную поверхность в двухвалентной форме, главным образом в виде гидрокарбонатов. При смешивании с морской водой железо быстро переходит в трехвалентную форму и оседает на дно в виде гелевидных хлопьев гидроокиси и ржаво-бурого тонкого железистого ила. В fumarольных полях присутствует большое количество источников сероводорода, который, просачиваясь через железистый ил, восстанавливает железо, что приводит к образованию сульфидов, карбонатов и разнообразных окисных и закисных минералов. “Конкретное соотношение минералогических форм в осадке является функцией многих факторов: pH среды, количества и состава вулканических газов, концентрации сероводорода, скорости накопления осадка и, наконец, времени его существования” [Бутузова, 1969, с. 67].

Касаясь интерпретации вероятных обстановок образования гидротермальных железных руд, можно отметить, что формирование тех или иных рудных минералов зависит от многих параметров. Так, при pH = 4.5 уменьшение активности (a) серы (H₂S) в гидротермальном растворе приводит к уменьшению минимальной температуры поля устойчивости магнетита с 300 до 200°C (по [Davidson, 1992]). Су-

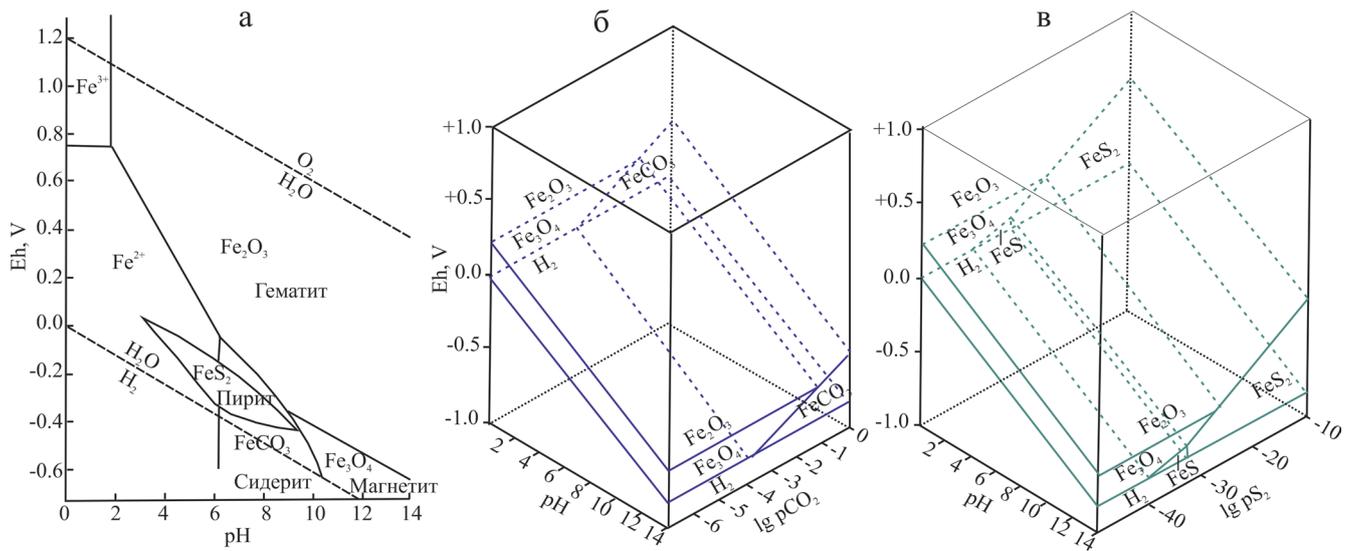


Рис. 8. Поля стабильности минералов железа на диаграммах Eh–pH (а) (по [Tucker, 2009]), Eh–lg pCO₂ (б) Eh–lg pS₂ (в) (по [Garrels, Christ, 1965]) при 25° С и 1 атм общего давления в присутствии воды.

Fig. 8. Stability fields of iron minerals in the diagram Eh–pH (а) (by [Garrels, Christ, 1965]), Eh–lg pCO₂ (б), Eh–lg pS₂ (в) (by [Garrels, Christ, 1965]) at 25° C and 1 atm of total pressure in the presence of water.

щественное значение для кристаллизации магнетита имеют окислительно-восстановительный потенциал (Eh), а также концентрации CO₂ и S во флюидах (рис. 8). При высоких содержаниях углекислоты, при прочих равных условиях будет кристаллизоваться сидерит, а поступление сернистых флюидов приведет к образованию пирита и пирротина. В приповерхностных обстановках (при $T = 25^{\circ}\text{C}$) магнетит устойчив при низком Eh (<0.3) и высоком pH (>9), что соответствует восстановительной щелочной среде. М.Е. Такер [Tucker, 2009] считает, что подобные обстановки могли возникнуть при диагенезе осадков, в условиях дефицита кислорода и участия восстановительных флюидов.

В настоящее время рассматривается несколько моделей формирования вулканогенно-осадочных месторождений железа. Первая, эксгалационно-осадочная, модель предусматривает осаждение рудных минералов из гелей и золь на морском дне с последующим преобразованием осадков в процессе диагенеза и фильтрации различных растворов [Kegel, 1923; Формозова, 1963; Осадкообразование..., 1968; Саркисян и др., 1984; Tucker, 2009]. Предполагается, что рудное вещество поступает на поверхность с гидротермальными растворами, сопровождающими вулканическую деятельность.

Последователи другой модели обосновывают образование железных руд района Лан-Дилль в процессе подводного преобразования (гальмиролиза при участии изливающихся на дно синвулканических гидротерм) базальтовых вулканокластиков и окончательной переработки последних в процессе диагенеза [Hümmel, 1922; Hentschel, 1960;

Rösler, 1964; Flick et al., 1990]. Большой вклад в изучение процессов формирования железных (в том числе магнетитовых) руд по гялокластитам в процессе гальмиролиза внес В.В. Масленников [Масленников, 1999, 2004; Аюпова, Масленников, 2005; Maslennikov et al., 2012; и др.]. Еще раньше на важность процесса подводного выветривания базальтов для формирования железорудных и колчеданных залежей на Урале обращал внимание А.В. Пуркин [Пуркин, Денисова, 1987]. В.В. Масленниковым [1999] на основе изучения особенностей продуктов гальмиролиза гялокластитов базальтового, андезитового, риолитового и смешанного состава в присутствии сульфидов железа и карбонатных минералов было показано, что магнетитовые продукты гальмиролиза (рис. 9) формируются в больших количествах в присутствии базальтов, пирита и кальцита (известняков). В небольших количествах магнетитовая минерализация сопровождается гальмиролизом при наличии кислых вулканитов, сульфидов железа и известняков, а также базальтов, риолитов и пирита (стекла и вулканиты кислого состава увеличивают поле устойчивости гематита). Эмпирически установленная закономерность локализации тех или иных продуктов гальмиролиза в зависимости от состава горных пород, подвергающихся подводному выветриванию, была объяснена В.В. Масленниковым различием электрохимического потенциала различных компонентов. В частности, наименьшим значением электрохимического потенциала (и максимальной основностью) обладают углеродистое вещество, кальцит (известняк) и базальты, максимальным – кварц, пирит и

серная кислота. Таким образом, формирование значительных магнетитовых залежей возможно лишь при участии компонентов, обладающих минимальными значениями электрохимического потенциала, – базальтов и известняков.

Вероятным представляется также участие в формировании магнетитовых и сидеритовых залежей термофильных железоредуцирующих бактерий (которые, в частности, активно участвуют в разложении вулканического стекла в подводных условиях) [Бабанин и др., 1998; Заварзина, 2004]. Сидеритовые руды крупного Бакальского месторождения на Южном Урале образовались, по мнению ряда специалистов [Крупенин, 1999; Кузнецов и др., 2005; Prochaska, Krupenin, 2013], гидротермально-метасоматическим путем при просачивании железистых растворов, возникших в процессе катагенеза при уплотнении песчано-глинистых толщ и дегидратации глинистых минералов, в карбонатные резервуары.

ВЫВОДЫ

Изложенные данные, на наш взгляд, свидетельствуют о формировании железорудных залежей Первого Северного узла в процессе накопления вулканогенных и карбонатных отложений и последующего преобразования, вероятно, при участии синвулканических и катагенетических (диагенетических?) растворов. Сейчас пока сложно определить, какому из рудообразующих процессов (эксталяционно-осадочному, гальмиролизу, катагенетическим и диагенетическим преобразованиям, деятельности железоредуцирующих бактерий и др.) принадлежала ведущая роль в формировании рудных скоплений, это задача будущих исследований. Тем не менее переход от “скарновой” модели к “вулканогенно-осадочной” имеет большое значение для прогнозирования новых железорудных месторождений. Ранее при определении потенциально рудоносных площадей исследователи исходили из постулата о приуроченности магнетитовых залежей к крупным телам габбро-долеритов и ивдельского комплекса, прорывающих девонские вулканогенно-осадочные образования. Соответственно, перспективными считались районы с большим количеством габбродолеритовых интрузий (см., например [Основные черты..., 2010]). Если считать руды “вулканогенно-осадочными”, при прогнозировании новых перспективных районов следует в первую очередь искать палеобассейны с подводным преимущественно базальтовым вулканизмом и карбонатной, терригенно-карбонатной и кремнисто-карбонатной седиментацией.

При проведении поисковых и геологоразведочных работ специалисты использовали два главных критерия [Усенко, 1957; Шевалдин, 1962].

1. Рудные залежи приурочены к контакту долеритов (габбродолеритов) и известняков, реже

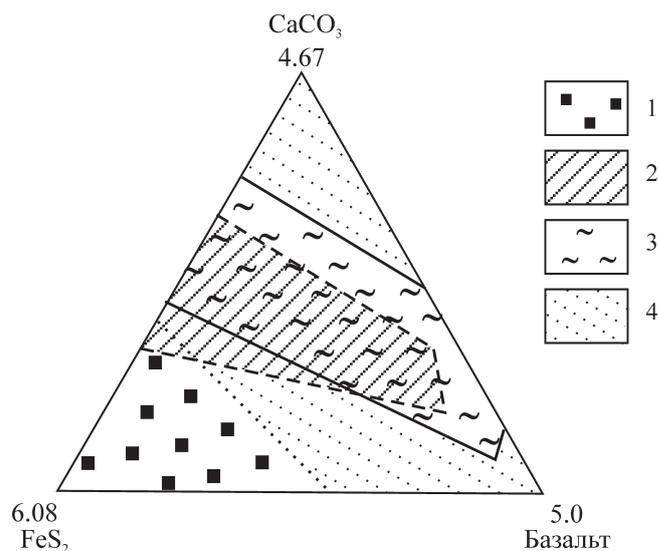


Рис. 9. Диаграмма устойчивости продуктов гальмиролиза в зависимости от состава исходных компонентов в присутствии пресной воды, по [Масленников, 1999].

Цифры – химические потенциалы электрона в Эв, по [Ракчеев, 1989]. 1–4 – продукты гальмиролиза: 1 – пирит-кварцевые, 2 – гематитовые, 3 – магнетитовые, 4 – прочие.

Fig. 9. Diagram of stability of products of halmyrolysis depending on the composition of the starting components in the presence of water, according to [Maslennikov, 1999].

Figures – chemical potentials of the electron in eV [Rakcheev, 1989]. 1–4 – products of halmyrolysis: 1 – pyrite-quartz, 2 – hematite, 3 – magnetite, 4 – other.

вулканогенно-осадочных пород. Особенно перспективными считались ядра антиклинальных складок, сложенные известняками и перекрытые силлами долеритов.

2. Главным рудным минералом является магнетит, что позволяет широко использовать данные магниторазведки, т. е. один из главных методов поисков – разбуривание магнитных аномалий.

Необходимо отметить, что такой подход дал свои результаты: были открыты, разведаны и отработаны три промышленных месторождения, обнаружено несколько рудопроявлений [Усенко, 1957ф; Шевалдин, 1962ф]. К сожалению, в настоящее время указанный подход себя исчерпал – почти все более и менее значительные магнитные аномалии разбурены и ожидать существенного увеличения ресурсного потенциала сложно. Если же обратиться к “вулканогенно-осадочной” модели, то взгляд на перспективы рудоносности Первого Северного узла будет не столь пессимистичным. Во-первых, следует отказаться от “привязки” рудных тел к габбродолеритовым массивам. Главным инструментом для поисков новых залежей должен

стать фациальный анализ, который позволит выделить участки распространения вулканогенных и осадочных образований, наиболее благоприятных для локализации железных руд. Важно также обратить внимание на поиск потенциальных рудовмещающих палеодепрессий. Во-вторых, если принять во внимание минеральный состав месторождений-аналогов (Западно-Каражальского, Лан-Дилль), то следует предположить вероятность присутствия гематитовых руд, которые не вызывают значимых аномалий магнитного поля. Таким образом, потенциальные железорудные месторождения в Ивдельском районе не обязательно будут сопровождаться магнитными аномалиями, а запасы гематитовых руд должны быть сопоставимыми или большими по сравнению с магнетитовыми.

“Вулканогенно-осадочные” месторождения Первого Северного железорудного узла вряд ли являются уникальными образованиями для Урала. Участие вулканогенно-осадочных процессов в формировании железорудных залежей ранее было обосновано для Гороблагодатского и Естюнинского месторождений на Среднем Урале [Кузнецов, 2001; Рудницкий, Кузнецов, 2014]; считается, что стратиформные рудные тела были впоследствии преобразованы скарновым процессом, связанным с внедрением сиенитовых интрузий. На присутствие вулканогенно-осадочных залежей на Урале и в Тургайском прогибе указывали Н.М. Беляшов [1978], Я.Н. Белевцев [Белевцев и др., 1982], А.М. Дымкин [Главные..., 1990] и другие исследователи. Ведущая роль процессов гальмиролиза и микробальной переработки гиалокластитов в формировании кремнисто-железистых отложений и окисных железных руд в районах древнего подводного вулканизма подчеркивалась В.В. Масленниковым с соавторами.

Автор искренне благодарен А.В. Маслову, В.В. Масленникову, Е.С. Контарю и М.Т. Крупенину за обсуждение проблем, полезные критические замечания и рекомендации.

Исследования частично выполнены в рамках темы № АААА-А18-118053090044-1 Государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аюпова Н.Р., Масленников В.В. (2005) Роль гальмиролиза в накоплении железа и марганца. *Рудные месторождения: вопросы происхождения и эволюции. Мат-лы IV Уральского минералогического совещания*. Миасс: Ин-т минералогии УрО РАН, 52-54.
- Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Верховцева Н.В., Шипилин А.М. (1998) О биогенном происхождении магнетита и грейгита в осадках водоемов и в почвах. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, Астрономия*, (6), 36-40.
- Баклаев Я.П. (1973) Контактново-метасоматические месторождения железа и меди на Урале (закономерности их размещения и локализации). М.: Наука, 231 с.
- Белевцев Я.Н., Бухарев В.П., Гончарук А.Ф. (1982) Вулканогенно-осадочные железорудные месторождения складчатых областей. Киев: Наук. Думка, 188 с.
- Беляшов Н.М. (1978) Полигенные месторождения магнетитовых руд в Тургае. *Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук*. М.: ВИМС, 41 с.
- Бутузова Г.Ю. (1969) Современный вулканогенно-осадочный железорудный процесс в кальдере вулкана Санторин (Эгейское море) и его влияние на геохимию осадков. М.: Наука, 115 с.
- Геология СССР. (1973) Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Полезные ископаемые. М.: Недра, 632 с.
- Главные рудные геолого-геохимические системы Урала. (1990) М.: Наука, 269 с.
- Жданов А.В. (2009) Легенда Уральской серии листов Госгеолкарты-1000/3 (актуализированная версия). СПб: ВСЕГЕИ, 380 с.
- Заварзина Д.Г. (2004) Образование магнетита и сидерита термофильными железоредуцирующими бактериями. *Палеонтол. журн.*, (6), 3-8.
- Крупенин М.Т. (1999) Условия формирования сидеритоносной бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 256 с.
- Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Овчинникова Г.В., Горюхов И.М., Маслов А.В., Каурова О.К., Эльмис Р. (2005) Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr изотопная характеристика и Pb-Pb возраст. *Литология и полезн. ископаемые*, (3), 1-22.
- Кузнецов А.Ж. (2001) Ритмично-слоистые магнетитовые руды Гороблагодатского магнетитового месторождения на Среднем Урале. *Изв. Уральского гос. горн. ун-та*, 13, 140-142.
- Масленников В.В. (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 348 с.
- Масленников В.В. (2004) Гальмиролиз и железнакопление. *Международная научная горно-геологическая конференция “Топорковские чтения”*, вып. VI, г. Рудный, 33-45.
- Овчинников Л.Н. (1998) Полезные ископаемые и металлогения Урала. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 412 с.
- Осадкообразование и полезные ископаемые вулканических областей прошлого. Т. II. Полезные ископаемые (железные и марганцевые руды, фосфориты и бокситы). (1968) М.: Наука, 351 с.
- Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала. (2010) СПб: ВСЕГЕИ, 274 с.
- Пуркин А.В., Денисова Т.А. (1987) Геологические критерии прогнозирования и поисков на Урале скрытых стратиформных медноколчеданных месторождений, сформированных по продуктам субмаринного выветривания базальтов. Свердловск: Уралгеология, 190 с.
- Ракчеев А.Д. (1989) Новые физико-химические методы изучения минералов, горных пород и руд. Справочник. М.: Недра, 230 с.
- Рудницкий В.Ф., Кузнецов А.Ж. (2014) О способах отложения руд Естюнинского скарново-магнетитового

- месторождения на Среднем Урале. *Металлогения древних и современных океанов-2014*. Миасс: ИМин УрО РАН, 91-94.
- Рудные месторождения СССР. (1978) Т. 1. М.: Недра, 352 с.
- Сапожников Д.Г. (1963) Караджальские железо-марганцевые месторождения. М.: Наука, 196 с.
- Саркисян С.Ш., Святловский А.Е., Брызгалина С.П. (1984) Геологические основы вулканогенного рудообразования. М.: Недра, 237 с.
- Усенко А.И. (1957) Геологический отчет с подсчетом запасов по Суходойскому, Восточному Суходойскому, Тыньинскому, Северо-Казанскому и Южно-Казанскому участкам Первого Северного месторождения по состоянию разведанности на 1-е мая 1957 г. МЧМ СССР, трест "Уралчерметразведка", Северная комплексная ГРП. (Не опубликовано)
- Усенко А.И., Семерун А.К. (1956) Геологический отчет с подсчетом запасов железных руд месторождения Первый Северный рудник (Ивдельский район Свердловской области). МЧМ СССР, трест "Уралчерметразведка". (Не опубликовано)
- Формозова Л.Н. (1963) Эксталяционно-осадочные месторождения железных руд типа Лан-Дилль и геологическая обстановка их образования. *Вулканогенно-осадочные и терригенные формации*. М.: Наука, 161-208.
- Шевалдин А.И. (1962) Отчет по результатам геолого-поисковых и разведочных работ, проведенных в районе Первого Северного месторождения за 1957–1961 гг. Главгеология РСФСР, Уральское геологическое управление, Северная экспедиция, пос. Первый Северный. (Не опубликовано)
- Шилов В.А., Топорков В.Я., Ульянова В.П., Никулина Г.С. (1989) Государственная геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Средне-Уральская. Лист Р-41-XXV (Ивдель). Свердловск: ПГО Уралгеология, 227 с.
- Davidson G.J. (1992) Hydrothermal Geochemistry and Ore Genesis of Sea-Floor Volcanogenic Copper-Bearing Oxide Ores. *Econ. Geol.*, **87**, 889-912.
- Flick H., Nesbor H.D., Behnisch R. (1990) Iron ore of the Lahn-Dill type formed by diagenetic seeping of pyroclastic sequences – a case study on the Schalstein section at Gänsberg (Weilburg). *Geol. Rundschau*, **79**(2), 401-415.
- Garrels R., Christ Ch.L. (1965) Solutions, Minerals and Equilibria. N.Y.: Harper & Row, 450 p.
- Hentschel H. (1960) Zur Frage der Bildung der Eisenerze vom Lahn-Dill-Typ. *Freib. Forschungsh.*, **79**, 82-105.
- Hümmel K., (1922) Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmurose. *Geol. Rundschau*, **13**, 40-81.
- Kegel W. (1923) Zur Kenntnis der devonischen Eisenerzlager in der südlichen Lahnmulde. *Z. Prakt. Geol.*, **31**(1-2), 20-29.
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganeseiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geol. Rev.*, **47**, 5-41.
- Prochaska W., Krupenin M. (2013) Formation of magnesite and siderite deposits in the Southern Urals – evidence of inclusion fluid chemistry. *Miner. Petrol.*, **107**(1), 53-65.
- Rösler H.J. (1964) Genetische Probleme der Erze des sogenannten erweiterten Lahn-Dill-Typus. *Ber. Geol. Des. DDR*, **9**, 445-454.
- Tucker M.E. (2009) Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks. London: John Wiley & Sons, 272 p.

REFERENCES

- Ayupova N.R., Maslennikov V.V. (2005) The Role of halmyrolysis in the accumulation of iron and manganese. *Rudnye mestorozhdeniya: voprosy proiskhozhdeniya i evolyutsii*. Materialy IV Ural'skogo mineralogicheskogo soveshchaniya [Ore deposits: issues of origin and evolution. Proc. IV-th Ural mineralogical meeting]. Miass, IMin UrO RAN, 52-54. (In Russian)
- Babanin V.F., Trukhin V.I., Verkhovtseva N.V., Shipilin A.M. (1998) On the biogenic origin of magnetite and greigite in the sediments of ponds and in soils. *Vestn. Mosc. Univ. Ser. 3. Fizika, Astronomiya*, (6), 36-40. (In Russian)
- Baklaev Ya.P. (1973) Kontaktovo-metasomaticheskie mestorozhdeniya zheleza i medi na Urale (zakonomernosti ikh razmeshcheniya i lokalizatsii) [Contact-metasomatic deposits of iron and copper in the Urals (the laws of their location and localization)]. Moscow, Nauka Publ., 231 p. (In Russian)
- Belevtsev Ya.N., Bukharev V.P., Goncharuk A.F. (1982) Vulkanogenno-osadochnye zhelezorudnye mestorozhdeniya skladyatykh oblastei [Volcanogenic-sedimentary iron ore deposits of folded regions]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 188 p. (In Russian)
- Belyashov N.M. (1978) *Poligennyye mestorozhdeniya magnetitovykh rud v Turgae*. Avtoreferat diss. ... d-ra geol.-min. nauk [Polygenic deposits of magnetite ores in Turgay. Dr. geol. and min. sci. diss.]. Moscow, VIMS, 41 p. (In Russian)
- Butuzova G.Y. (1969) *Sovremennyyi vulkanogenno-osadochnyyi zhelezorudnyy process v kal'dere vulkana Santorin (Egeiskoe more) i ego vliyanie na geokhimiyyu osadkov* [The Modern volcanogenic-sedimentary iron-ore process in the Caldera of Santorini volcano (Aegean sea) and its impact on the Geochemistry of sediments]. Moscow, Nauka Publ., 115 p.
- Davidson G.J. (1992) Hydrothermal Geochemistry and Ore Genesis of Sea-Floor Volcanogenic Copper-Bearing Oxide Ores. *Econ. Geol.*, **87**, 889-912.
- Flick H., Nesbor H.D., Behnisch R. (1990) Iron ore of the Lahn-Dill type formed by diagenetic seeping of pyroclastic sequences – a case study on the Schalstein section at Gänsberg (Weilburg). *Geol. Rundschau*, **79**(2), 401-415.
- Formozova L.N. (1963) Exhalative-sedimentary iron ore deposits of the type of Lahn-Dill and geological environment of their formation *Vulkanogenno-osadochnyye i terri-gennyye formatsii*. [Volcanogenic-sedimentary and terrigenous formations] Moscow, Nauka Publ., 161-208. (In Russian)
- Garrels R., Christ Ch.L. (1965) Solutions, Minerals and Equilibria. N.Y.: Harper & Row, 450 p.
- Geologiya SSSR, T. XII. Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya i Kurganskaya oblasti. Poleznye iskopaemye* [Geologia of the USSR, V. XII. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk i Kurgan districts. Mineral deposits]. (1973) Moscow, Nedra Publ., 632 p. (In Russian)
- Glavnyye rudnyye geologo-geokhimicheskie sistemy Urala* [The main geology-geochemistry ore systems of the Urals (1990). Moscow, Nauka Publ., 269 p. (In Russian)

- Hentschel H. (1960) Zur Frage der Bildung der Eisenerze vom Lahn-Dill-Typ. *Freib. Forschungh.*, **79**, 82-105. (In German)
- Hümmel K., (1922) Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmurose. *Geol. Rundschau*, **13**, 40-81. (In German)
- Kegel W. (1923) Zur Kenntnis der devonischen bisenerzlagere in der südlichen Lahnmulde. *Z. prakt. Geol.*, **31**, (1-2), 20-29. (In German)
- Krupenin M.T. (1999) *Usloviya formirovaniya sideritonosnoi bakal'skoi svity nizhnego rifea (Yuzhnyi Ural)*. [The requirements of siderite-bearing formation in Bakal'skaya Formation of Lower Riphean (the Southern Urals)]. Ekaterinburg, UB of RAS, 256 p. (In Russian)
- Kuznetsov A.B., Krupenin M.T., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Maslov A.V., Kaurova O.K., Elmis R. (2005) The Formation and transformation of carbonate rocks and siderite ores of the Bakal'skaya Formation of Lower Riphean (the Southern Urals): Sr isotopic characteristics and Pb-Pb age. *Litol. Polezn. Iskop.*, (3), 1-22. (In Russian)
- Kuznetsov A.Zh. (2001) Rhythmically-laminated magnetite ore Goroblagodatskoe magnetite Deposit, Middle Urals. *Izvestiya UGGI*, **13**, 140-142. (In Russian)
- Maslennikov V.V. (1999) *Sedimentogenez, gal'miroliiz i ekologiya kolchedanonosnykh paleogidrotermalnykh polei (na primere Yuzhnogo Urala)* [Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology pyrite paleogeothermal fields (on the example of the Southern Urals)]. Miass, Geotur Publ., 348 p. (In Russian)
- Maslennikov V.V. (2004) Halmyrolysis and ferro-accumulation. *Mezhdunarodnaya nauchnaya gorno-geologicheskaya konferentsia "Toporkovskie chteniya", vyp. VI* [International scientific geological conference "Toporov reading", iss. VI]. Rudny, 33-45. (In Russian)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganeseiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geol. Rev.*, **47**, 5-41.
- Ovchinnikov L.N. (1998) *Poleznye iskopaemye i metallogeniya Urala* [Minerals and metallogeny of the Urals]. Moscow, "Geoinformmark" Publ., 412 p. (In Russian)
- Osadkoobrazovanie i poleznye iskopaemye vulkanicheskikh oblastei proshlogo T. II. Poleznye iskopaemye (zheleznye i margantsevye rudy, fosfority i boxity)* [Sedimentation and minerals of volcanic areas of the past V. II. Minerals (iron and manganese ores, phosphorites, and bauxites)]. (1968) Moscow, Nauka Publ., 351 p. (In Russian)
- Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i mineralno-syr'evoi potentsial Severnogo, Pripolyarnogo i Polyarnogo Urala* [The main features of the geological structure and mineral potential of the Northern, polar and Polar Urals] (2010). St.Petersburg, VSEGEI Publ., 274 p. (In Russian)
- Prochaska W., Krupenin M. (2013) Formation of magnesite and siderite deposits in the Southern Urals – evidence of inclusion fluid chemistry. *Miner. Petrol.*, **107**(1), 53-65.
- Purkin A.V., Denisova T.A. (1987) *Geologicheskii kriterii prognozirovaniya i poiskov na Urale skrytykh stratiformnykh mednokolchedannykh mestorozhdenii, sformirovannykh po produktam submarinnogo vyvetrivaniya bazal'tov* [Geological criteria for prediction and search in the Urals for hidden stratiform copper-plated deposits, formed by the products of submarine weathering of basalts]. Sverdlovsk, Uralgeologia Publ., 190 p. (In Russian)
- Rakcheev A.D. (1989) *Novye fiziko-khimicheskie metody izucheniya mineralov, gornykh porod i rud. Spravochnik* [New physical and chemical methods of studying minerals, rocks and ores. Handbook]. Moscow, Nedra Publ., 230 p. (In Russian)
- Rösler H.J. (1964) Genetische Probleme der Erze des sogenannten erweiterten Lahn-Dill-Typus. *Ber. Geol. Des. DDR*, **9**, 445-454. (In German)
- Rudnitskii V.F., Kuznetsov A.Zh. (2014) About the way of ore precipitation of Estuninskoye skarn-magnetite ore deposit in the Middle Urals. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2014* [Metallogeny of ancient and modern oceans – 2014]. Miass, IMin UB RAN, 91-94. (In Russian)
- Rudnye mestorozhdeniya SSSR* [Ore deposits of the USSR] (1978). V. 1. Moscow, Nedra Publ., 352 p. (In Russian)
- Sapozhnikov D.G. (1963) *Karadzhalskie zhelezo-margantsevye mestorozhdeniya* [Karajal iron-manganese deposits]. Moscow, Nauka Publ., 196 p. (In Russian)
- Sarkisyan S.Sh., Svyatlovskii A.E., Bryzgalina S.P. (1984) *Geologicheskii osnovy vulkanogennogo rudobrazovaniya*. Geological foundations of ore formation. Moscow, Nedra Publ., 237 p. (In Russian)
- Shevaldin A.I. (1962) Report on the results of geological prospecting and exploration carried out in the area of the Pervy Severny mine for 1957–1961. Glavgeologiya RSFSR, Ural Geological Administration, Northern Expedition, Pervy Severny settlement. (In Russian, unpublished)
- Shilov V.A., Toporkov V.Ya., Ul'yanova V.P., Nickulina G.S. (1989) Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR mashtaba 1 : 200 000. Seriya Sredne-Uralskaya. List P-41-XXV (Ivdel') [State geological map of the USSR scale 1 : 200 000. A Series of Middle-Urals. Sheet P-41-XXV (Ivdel)]. Sverdlovsk, PGO Uralgeologiya, 227 p. (In Russian)
- Tucker M.E. (2009) *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. London: John Wiley & Sons, 272 p.
- Usenko A.I. (1957) Geological report with reserves calculation for the Sukhodoisky, East Sukhodsky, Tynja, North-Kazan and South-Kazan districts of the Pervy Severny mine as explored on May 1, 1957. USSR Ministry of Black metals, trust "Uralchermetrazvedka", Severnyya complex geological-prospecting team. (In Russian, unpublished)
- Usenko A.I., Semerun A.K. (1956) Geological report on the calculation of iron ore reserves at the Pervy Severny mine (Ivdel district, Sverdlovsk region). USSR Ministry of Black metals, trust "Uralchermetrazvedka", Severnyya complex geological-prospecting team. (In Russian, unpublished)
- Zavarzina D.G. (2004) Formation of magnetite and siderite by thermophilic iron-reducing bacteria. *Paleontol. Zh.*, (6), 3-8. (In Russian)
- Zhdanov A.V. (2009) *Legenda Ural'skoi serii listov Gosgeokarty-1000/3 (aktualizirovannaya versia)* [The legend of the Ural series of sheets of the state geological map-1000/3 (updated version)]. St.Petersburg, VSEGEI, 380 p. (In Russian)