
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 552.2

DOI: [10.46698/VNC.2020.48.31.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.48.31.008)

Оригинальная статья

Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР

Б. Л. Пхарое ^{1,2}, А. Н. Евдокимов ¹

¹Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: benedictpharoe1@gmail.com;

²Совет по наукам о земле, государственная геологическая служба, Претория 0001, Южно-Африканская Республика, e-mail: evdokimov48@list.ru

Статья поступила: 21.10.2020, после рецензирования: 16.11.2020, принята к публикации: 30.11.2020

Резюме: Актуальность работы. Северо-западный регион ЮАР до недавнего времени не являлся промышленно марганценосным. Однако результаты изучения последних лет дают основание думать, что здесь могут быть залежи марганцевых руд. Марганцевое оруденение в этом регионе встречается в виде марганцевых конкреций, порошкообразного марганцевого вада и марганцевых корок в коре выветривания. Марганцевые конкреции приурочены к аллювиальной части «Westwits alluvium» рудного разреза и марганцевый вад накапливался в карстовых структурах, образовавшихся в результате приповерхностного выветривания, выщелачивания и растворения подстилающих марганценосных неоархейских доломитов. Предполагается два потенциальных источника марганца: первый расположен непосредственно под рудным телом, а второй – на существенном удалении от него. Если первый источник рудного вещества поставлял марганец из подстилающих доломитов в процессе их выветривания, то второй вариант подразумевает существенный перенос металла из неизвестных коренных источников, расположенных на значительном удалении от области рудонакопления. Таким образом, для решения этого вопроса, необходимо провести экспериментальные исследования, изучающие природу, минералогию и источник сноса терригенных отложений «вмещающих материалов» верхнего рудного разреза. **Цель работы** – уточнить природу марганценосных терригенных залежей «Westwits alluvium» и, что самое важное, определить их коренной источник поступления и собственно минеральный состав. **Методики исследования** включали: петрографическое описание пород, геохимические анализы методами XRF и SEM, подсчеты объемного состава детритовых минералов и анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты.** В результате проведенных исследований было установлено, что терригенные зёрна в основном представлены кварцем. Содержание полевых шпатов, минералов цемента и глинистых минералов не более 20%. Использована классификация составов терригенного материала, основанная на подсчете в объемных процентах зерен кварца, полевого шпата, обломочных зерен других пород (вулканических, магматических и метаморфических пород), слюды и др. По этим данным были определены вероятные источники сноса, которыми являются породы Рэнд-Антиклинального хребта, расположенного к югу от изучаемого региона, а также архейские граниты, гнейсы и мафические-ультрамафические породы Каапваальского кратона. Осадконакопление происходило в низменной равнине с тропическим умеренно влажным и субгумидным климатом. Здесь, при повышенном pH воды происходило интенсивное выщелачивание пород и замещение детритовых зерен разного минерального состава диоксидом марганца.

Ключевые слова: марганцовистый аллювий, третичный, терригенные отложения, Каапваальский кратон, Южная Африка.

Для цитирования: Пхарое Б.Л., Евдокимов А.Н. Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 124 – 149. DOI: 10.46698/VNC.2020.48.31.008.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования ЮАР. Выражается благодарность Санкт-Петербургскому горному университету за возможность учиться в аспирантуре и за использование ряда приборов: SEM-EDS, XRD, поляризационные микроскопы и другие инструменты.

===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION =====
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

DOI: [10.46698/VNC.2020.48.31.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.48.31.008)

Original paper

Composition and provenance reconstruction of terrigenous deposits in the North-West of South Africa

B. L. Pharoe ^{1, 2}, A. N. Evdokimov ¹

¹Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106,
Russian Federation, e-mail: benedictpharoe1@gmail.com;

²Council for Geoscience, P/Bag X 112, Pretoria 0001, South Africa,
e-mail: evdokimov48@list.ru

Received: 21.10.2020, revised: 16.11.2020, accepted: 30.11.2020

Abstract: Relevance. The North-West region of the Republic of South Africa was previously not considered to constitute of manganese mineralization of industrial value. However, recently published articles indicated the presence of secondary manganese mineralization in the weathering crust, underlain by the manganiferous Neoproterozoic dolomites. Manganese mineralization in this region occurs in the form of manganese nodules, powdered manganese wad, and manganese crusts. Manganese nodules are confined to the alluvial part of the ore section known as the «Westwits alluvium» and manganese wad is accumulated in karstic structures formed as a result of near-surface weathering, leaching, and dissolution of underlying manganese-bearing Neoproterozoic dolomites. Two potential sources of manganese are assumed: the first relates to the dolomites which are located directly under the ore body, and the second relates to the source areas of terrigenous deposits. If the first hypothesis suggests that manganese ore substances were supplied from the underlying dolomites during their weathering, the second option then implies a significant transfer of metal from unknown root sources located at a considerable distance from the area of ore accumulation. Thus, it is necessary to conduct petrographic study to reconstruct their source regions and understand the close relations with Mn mineralization. **Aim** is to clarify the nature of the manganese-bearing terrigenous deposits «Westwits alluvium» and, most importantly, to determine their root source of supply and the actual mineral composition. **Methodology** of study includes mainly: petrographic study of rocks, geochemical analyses with the use of XRF and SEM methods, modal compositional analysis of the detrital minerals, and analysis of discrimination diagrams. **Results.** As a result of the conducted research, it was found that terrigenous grains consist mainly of detrital quartz grains. The content of feldspars, cement minerals and clay minerals seldom exceeds 20%. The classification of terrigenous material based on the calculation of the volumetric percentage of the detrital framework grains: quartz, feldspar, clastic grains of other rocks types (volcanic, igneous and metamorphic rocks), mica, indicated probable source areas of the terrigenous sediments. These include metasedimentary rocks of the Rand Anticline Ridge which is located south of the studied region, and Archean granites, gneisses, and mafic-ultramafic rocks of the Kaapvaal Craton. In the basin of deposition, sedimentation occurred in a lowland plain within tropical region, characterized by moderately humid and sub-humid climatic conditions. These conditions, combined with oxidation and increased pH of the basin waters, contributed to the replacement of detrital grains with manganese dioxide.

Keywords: Manganiferous alluvium, Neogene, Tertiary, Terrigenous deposits, Kaapvaal Craton, South Africa.

For citation: Pharoe B.K., Evdokimov A.N. Composition and provenance reconstruction of terrigenous deposits in the North-West of South Africa. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 124 – 149. DOI: 10.46698/VNC.2020.48.31.008.

Acknowledgements: The work was financially supported by the South African Ministry of Education. We are also grateful to the Saint Petersburg Mining University for the opportunity to enrol in a graduate school and for using a number of analytical instruments: SEM-EDS, XRD, polarizing microscopes and other instruments.

Введение

Северо-западный регион (известный как Хайфельд) ЮАР, расположенный на северном фланге Каапваальского кратона, имеет потенциал для разведки мелкомащтабной марганцевой минерализации вторичного происхождения, образовавшейся в зоне гипергенеза на верхней части разреза неогархейских доломитов (рис. 1). Этот регион до недавнего времени не являлся промышленно рентабельным. Однако, результаты исследований указывают на наличие оксидной минерализации марганца [Van Niekerk et al., 1999; Pack et al., 2000; Pharoe, Liu, 2018]. Первоисследователем этого региона является Де Вилльерс [De Villiers, 1960]. Им было обнаружено несколько небольших марганцевых рудопроявлений в коре выветривания, подстилаемой неогархейскими марганценосными доломитами серии Мальмани (AR₂) Трансваальской супергруппы. Его работа включает в себя анализ трех образцов марганценосных доломитов, отобранных на различных стратиграфических уровнях разреза. Полученные результаты показали в доломитах относительно высокое содержание марганца (сред. содержание – 5 масс.%), и Де Вилльерс пришел к выводу, что доломиты, вероятно, являлись источником формирования марганцевого вада. В последнее время были выполнены исследования, направленные на уточнение полученных данных о перспективах марганценосности региона, а также на выяснение генезиса рудного вещества [Pharoe, Liu, 2018; Pharoe et al., 2020]. Одним из аргументов в пользу перспективности территории на марганец являются многочисленные упоминания в литературе о сохранившейся здесь коре выветривания на толще карбонатных пород неогархейского возраста [Beukes et al., 1999; Van Niekerk et al., 1999; Pack et al., 2000; Pharoe et al., 2020]. Вероятным результатом корообразования могла быть концентрация марганцевых минералов до промышленных объемов.

Известно, что развитие постгондванского Африканского ландшафта было в основном сформировано накоплением третичных терригенных отложений вдоль древних эрозионных поверхностей (несогласий), известных как африканская поверхность поднятия и эрозии I и II, которые, по оценкам, развивались в позднем Мелу и в середине кайнозоя соответственно [Burke, Gunnell, 2008]. Поэтому для определения типа тектонической обстановки осадконакопления были развиты схемы классификации вещественного и гранулометрического составов, позволяющие определить на исследуемой территории не только вероятные коренные источники, но и направления сноса и области накопления терригенных осадков.

Для более систематизированного подхода к анализу составов зерен терригенного материала в отложениях региона детритовые зерна были разделены на группы, каждая из которых охарактеризована одним или двумя одинаковыми для этой группы свойствами зерен.

Например, обломки пород и зерна минералов, образованные в ходе денудации континентальной суши, представленной поднятиями фундамента в виде выступов кратонов, должны быть сходны между собой по преимущественно кварц-

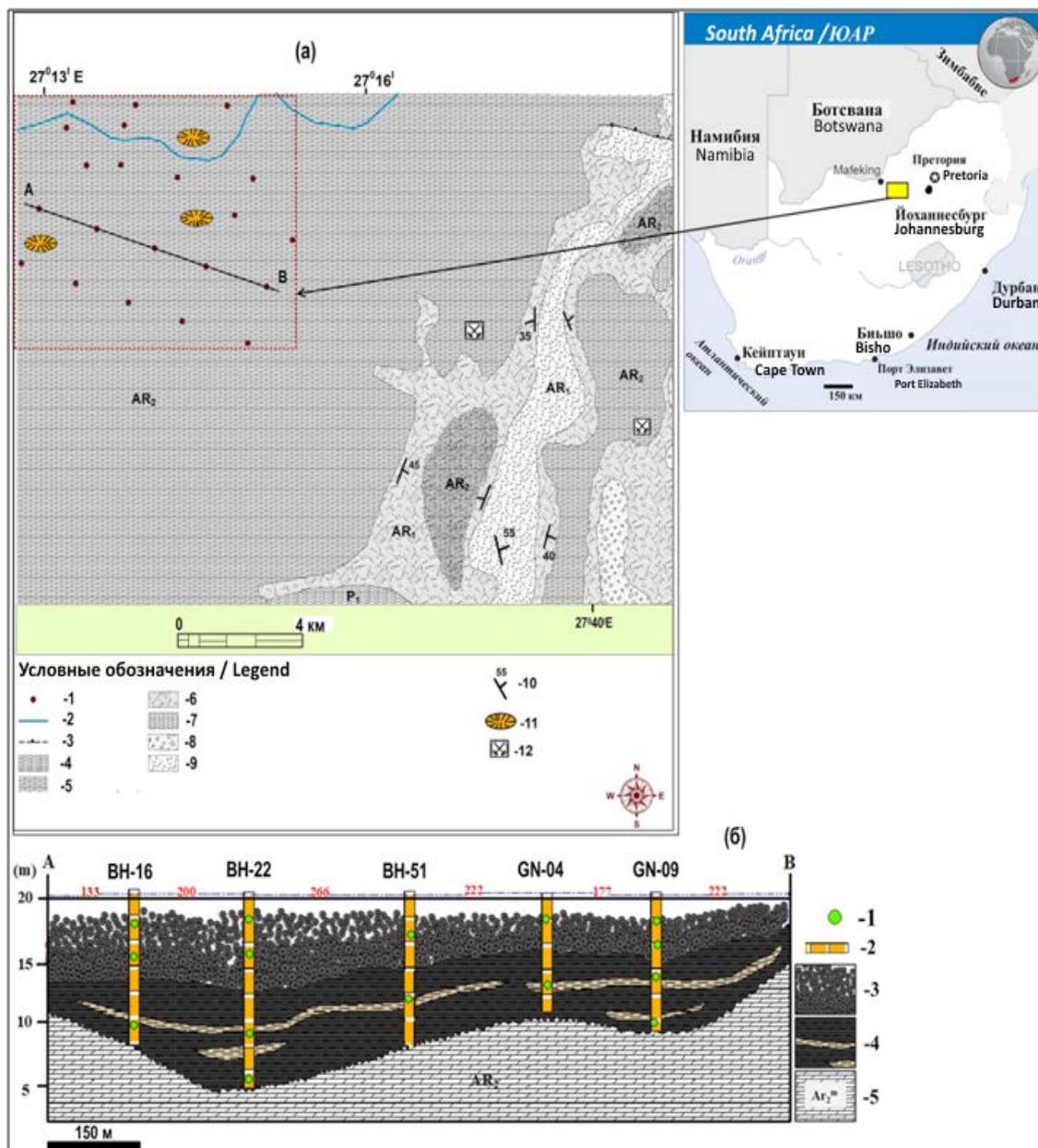


Рис. 1. Схема геологического строения (а) и разрез Северо-Западного рудопоявления Мп, ЮАР (б). (а): 1 – разведочные шурфы, 2 – палеодолины, 3 – разломы, 4 – алевролит (P₁), 5 – марганецсодержащие доломиты серии Мальмани (AR₂), 6 – кварцит из свиты Чёрного Рифа (AR₁), 7 – алевролит с прослоями песчаников (AR₁), 8 – золотоносные конгломераты с прослоями песчаников (AR₁), 9 – несортированные терригенные отложения, конгломераты и песчаники (AR₁), 10 – элементы залегания, 11 – карстовые воронки (P), 12 – исторические места разработки месторождений. (б): 1 – точки отбора проб, 2 – разведочные шурфы, 3 – марганцевые конкреции (N), 4 – порошкообразный марганцевый вад с прослоем глины (K₂?), 5 – марганецсодержащий доломит серии Мальмани (AR₂)/

Fig. 1. Geological map of the North West manganese ore deposit (a) and a geologic cross section (A-B) which runs across boreholes BH-16, BH-22, BH-51, GN-04 and GN-9 on the map (b); where in (a): 1 – exploration pits, 2 – paleovalleys, 3 – faults, 4 – siltstone (P₁), 5 – manganese-bearing dolomites of the Malmani series (AR₂), 6 – quartzite of the Black Reef Formation (AR₁), 7 – siltstone with sandstone layers (AR₁), 8 – gold-bearing conglomerates with sandstone layers (AR₁), 9 – poorly-sorted terrigenous deposits, conglomerates and sandstones (AR₁), 10 – elements of occurrence, 11 – karst craters (P), 12 – historical sites of manganese mining.

полевошпатовому составу [MacLennan, Taylor, 1991]. В таких минералогических ассоциациях, в подчиненных количествах, могут быть: дистен, силлиманит, гранат, слюды и темноцветные минералы.

Напротив, терригенный материал, образованный в результате денудации магматических пород, слагающих островные дуги, должен быть насыщен темноцветными силикатными минералами: пироксеном, амфиболом, плагиоклазом, магнетитом, ильменитом и рутилом.

Терригенный материал размытых орогенных областей будет характеризоваться контрастными составами детритовых зерен, представляющими собой магматические комплексы, метаморфические и осадочные образования.

Пропорции вкладов детритового материала из областей проявления различных тектонических обстановок можно оценить по результатам анализов минеральных составов слагающих эти области горных пород [Dickinson et al., 1983; Jafarzadeh, Hosseini-Barzi 2008]. В то же время, эволюционные тренды изменения составов детритового материала в пространстве и во времени позволяют наметить смену его источников и пути транспортировки из областей обрамления бассейна.

Цель работы

Основной целью данной работы является уточнение природы марганценовых терригенных залежей «Westwits alluvium» и, что самое важное, определение их коренного источника поступления и собственно минерального состава.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи был произведен сбор каменного материала на стенке разреза шурфов (ТС_01, ТС_02, ТС_03....., ТС_16), а также выполнена документация обнажений и горных выработок. Эта работа проводилась в ходе активной подготовки месторождения к эксплуатации, во время производства вскрышных работ и устройства карьера (рис. 2). Изучение каменного материала, определение его петрографического и минералогического составов, а также литологических особенностей, химического состава позволяет восстановить историю формирования марганценовых залежей, определить их место в тектонической модели развития района. Из проб было изготовлено 15 шлифов для выполнения петрографических исследований. Химические анализы проводились с помощью рентгенофлуоресцентной спектromетрии на спектрометре XRF MagiX Fast. Для качественного и полуколичественного химического анализа использовали сканирующую электронную микроскопию, проведенную на JSM-6460Lv и JSM7001F в режимах вторичных электронов и композиционного контраста, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами X-Act и X-MAX80 в Центре Коллективного Пользования Санкт-Петербургского горного университета.

Для количественной оценки минерального состава использовался метод подсчета зерен минералов [Dickinson et al., 1983; Dickinson, 1985; Pettijohn et al., 1972; Pettijohn, 1975; Stunner et al., 1981; Шутов, 1972; Weltje et al., 1998; Varga et al., 2007; Motova et al., 2016]. В ходе подсчета, детритовые зерна были разделены по группам: Qm (монокристаллический кварц), Qp (поликристаллический кварц), P (плагиоклаз полевой шпат), K (калиевый полевой шпат), Lv (вулканические или мета-вулканические обломки пород) и Ls (зерна осадочных и метаосадочных пород). Модальный анализ составов терригенных отложений базируется на результатах подсчетов не менее 300 детритовых зерен в одном образце.

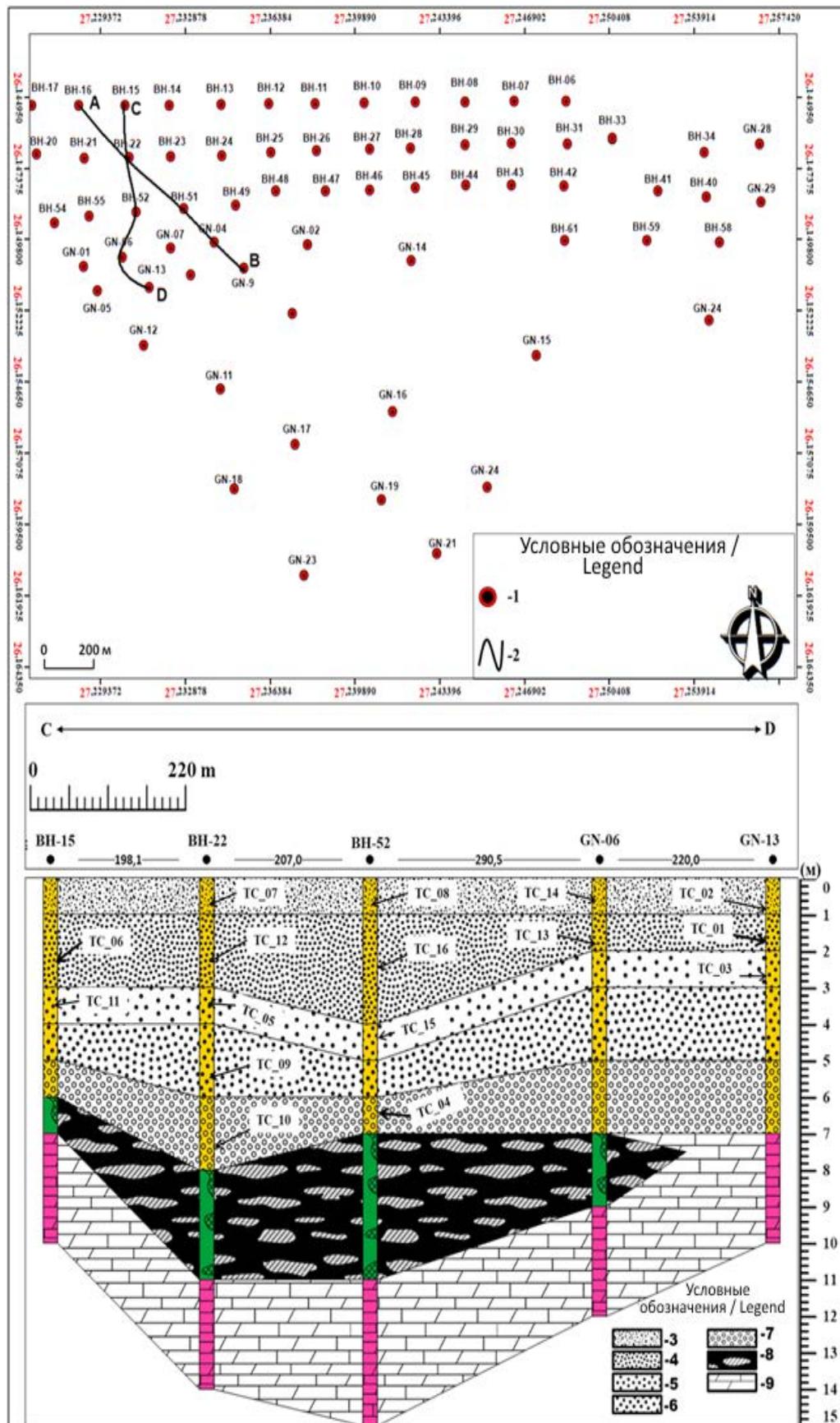


Рис. 2. План участка работ и геологический разрез по линии C-D с указанием точек отбора проб: 1 – разведочные шурфы, 2 – профили, 3 – мелкоконкреционные марганцевые руды (N_1), 4 – мелко-

среднеконкреционные марганцевые руды (N_1), 5 – среднеконкреционные марганцевые руды (N_1), 6 – крупноконкреционные марганцевые руды (N_1), 7 – крупноконкреционные марганцевые руды с фрагментами калькрета (N_1), 8 – марганцевый вад ($K_2??$), 9 – марганецсодержащий доломит с прослоем известняка (AR_2). /

Fig. 2. Exploration borehole plan and geological section along line C-D with indication of sampling points: 1- exploration pits, 2 – profiles, and 3 – small manganese nodules (N_1), 4- small – medium manganese nodules (N_1), 5 – medium manganese nodules (N_1), 6 – coarse manganese nodules (N_1), 7 – coarse manganese nodules with fragments of calcrete (N_1), 8- manganese wad ($K_2??$), 9- manganiferous dolomite with interlayers of limestone (AR_2).

В соответствии с методикой в шлифах подсчитывались разные по составу и по форме частицы минералов (в основном кварца, полевого шпата и фрагментов пород). Полученное число зерен разных минералов и обломков пород, исключая матрицу, цемент, слюду, тяжелые минералы, и карбонаты, – пересчитывалось на 100%, [Dickinson, 1985]. Результаты подсчета точек выносились на диаграммы.

Бинарная диаграмма « $\ln(Q/F)$ и $\ln(Q/RF)$ » по [Weltje et al., 1998] была использована для определения полуколичественного индекса выветривания осадков на период их образования. Диаграммы «Qt-F-L и Qm-F-Lt» по [Dickinson et al., 1983] применялись для определения тектонических условий образования осадочных пород. Тройная диаграмма по [Stunner et al., 1981] дала возможность определить тип материнских пород. Расчет соотношения детритовых зерен в шлифах и аншлифах был проведен с использованием петрографического поляризационного микроскопа.

Рентгенофлуоресцентный анализ собранных образцов горных пород выполнен в лаборатории при «Совете по наукам о земле» в ЮАР. Предел обнаружения порообразующих оксидов составляет 0,1%.

Гранулометрический анализ проб был сделан на просеивающей машине – As 400 control.

Геологическое строение региона

Третичные аллювиальные отложения района Хайфельд широко распространены в пределах северной части Каапваальского кратона. Они расположены в пределах древней эрозионной впадины на позднеархейском карбонатном основании, представленном доломитами серии Мальмани.

Каапваальский кратон занимает площадь около 1 200 000 км² территории Южной Африки и соединен с кратоном Зимбабве на севере складчатыми метаморфическими породами пояса Лимпопо. На юге и западе Кратон Каапвааль окружен протерозойскими орогенами, а на востоке моноклиналию Лебомбо, содержащей юрские магматические породы (рис. 3). В строении кратона участвуют нижнеархейские ультраосновные и основные зеленокаменно-измененные породы, прорывающие их трондьемиты и тоналиты, гнейсы и перекрывающие их кварциты, конгломераты, песчаники и сланцы серии Витватерсранд, вулканические лавы группы Вентерсдорп и марганценозные доломиты позднеархейского возраста.

Кристаллические позднеархейские карбонатные породы, преобладающие в Северном Каапваальском кратоне, представлены доломитами серии Мальмани. В последующем, в мел-неогеновое время, на доломитах была сформирована кора выветривания. В результате карстообразования поверхность доломитов Мальмани приобрела неровную рельефную форму, осложненную в трех местах изученной площади карстовыми воронками (рис. 1). Размер карстовых воронок колеблется от 50 до 70 м в диаметре.

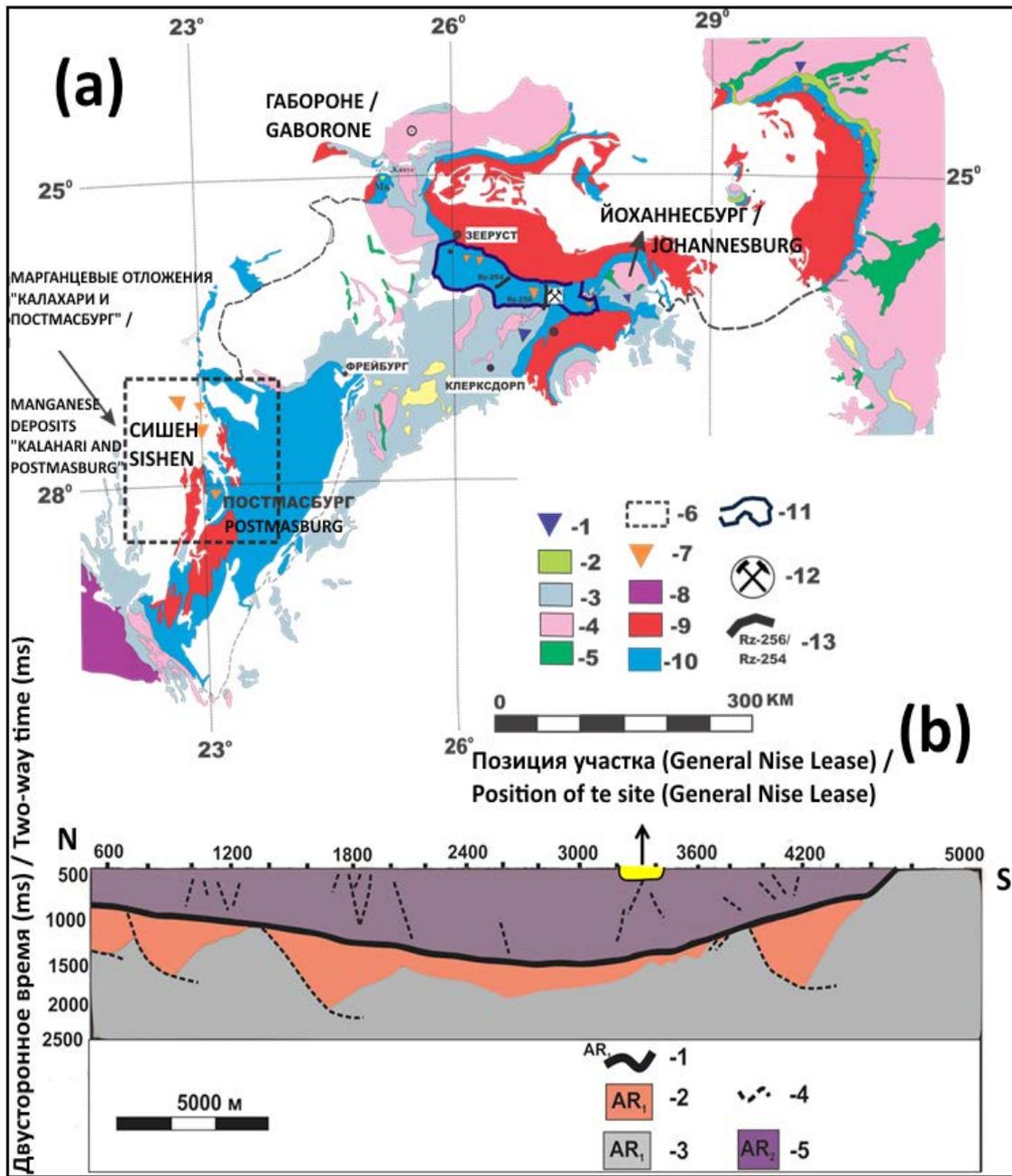


Рис. 3. (а), Геологическая карта Каапваальского Кратона по [карта изменена после Frimmel, 2014], где: (а), 1 – минерализация Au; 2 – базальный слой вулканогенно-осадочных пород (группа Волькберга, AR₂); 3 – пред-Трансваальская платформа (AR₁) (Понгола, Хейс, Витватерсранд и Вентерсдорп последовательность); 4 – архейские граниты (AR₁); 5 – архейские зеленокаменные пояса (AR₁); 6 – территория распространения марганцевых месторождений Калахари и Постмасбург; 7 – марганцевые месторождения; 8 – гранитные и метаморфические комплексы Намаква (K₁); 9 – обломочные осадочные толщи верхней части разреза (группы Претория и Постмасбург, T₂); 10 – карбонатные отложения (группы Chuniespoort и Campbell-Griquatown, AR₂); 11 – граница Северо-Западного рудопроявления марганца, представленного в настоящем исследовании; 12 – местоположение шахты (General Nice Mine); 13 – сейсмические профили, проходящие через Мальманийскую карбонатную платформу; (б), сейсмический профиль Rz-256: 1 – кварцит сериш Чёрного Рифа (AR₁), 2 – вулканические породы Вентерсдорп, 3 – граниты, гнейсы фундамента, 4-разломы, 5-марганценозные доломиты (AR₂) [Tinker et al., 2002]. /

Fig. 3. Geological map of the Kaapvaal Craton [modified after Frimmel, 2014], where: 1 – Gold mineralization; 2 – Basal layer of volcanogenic-sedimentary rocks (Wolkberg Group, AR₂); 3 – Pre-

Transvaal platform (AR₁) (Pongola, Kheis, Witwatersrand and Ventersdorp Sequences); 4 – Archean granites (AR₁); 5 – Archean greenstone belts (AR₁); 6 – Territory of Kalahari and Postmasburg manganese deposits; 7 – Mn mineralization; 8 – Namaqua granite and metamorphic complexes (K₁); 9 – Clastic sedimentary units of the upper part of the section (Pretoria and Postmasburg, T₂); 10 – Carbonate deposits (Chuniespoort and Campbell-Griquatown Groups, AR₂); 11 – boundary of North West Mn mineralization; 12 – Location of the General Nice Mn Mine; 13 – Seismic profiles crossing through the Malmani carbonate platform; (b), Seismic profile Rz-256: 1 – Quartzite of the Black Reef series (AR₁), 2 – Ventersdorp volcanic rocks, 3 – Basement granites and gneisses, 4 – Faults, 5 – Manganiferous dolomites (AR₂) [Tinker et al., 2002].

В толще коры выветривания нижний слой сложен вадом чёрного цвета, его мощность варьирует от 0,5 до 1,5 м. Здесь встречаются прослои глины и песка красного цвета мощностью от 5 до 20 см. Верхний слой коры выветривания сложен марганцевыми конкрециями размером от 0,5 мм до 2 см. Мощность отложений верхнего слоя изменяется от 5 до 10 м (рис. 1б). По данным горных работ и по наблюдениям выходов аллювиальных отложений, рудный пласт простирается с запада на восток на расстояние от 4,74 до 5,28 км. В направлении север-юг он простирается на расстояние от 1,3 до 2,73 км. На рисунке 4 показано, что верхний интервал рудной части разреза датируется неогеном, подстилающий вад предположительно мелового возраста, а отложения кровли разреза четвертичные.

В тектоническом плане регион представляет собой кратон, выступ фундамента архейского возраста. Северный фланг кратона тектонически нарушен протерозойскими магматическими интрузиями и ударным воздействием метеорита Вредефорт. Здесь зафиксирован ряд сбросов, образующих структуру грабена, что видно на сейсмическом профиле Rz-256.

Петрографическая характеристика марганценосных отложений

Петрографический состав рудных горизонтов изучался в 16 образцах, взятых из различных интервалов стратиграфического разреза. В соответствии с классификациями осадочных пород В. Д. Шутова [Шутов, 1972] все исследуемые образцы относятся к кварцевой группе песчаников представлены кремнекластитокварцевыми, полево-шпат-кварцевыми и мезомиктовыми кварцевыми песчаниками. Отложения региона Хайфельд представлены терригенным обломочным материалом с хорошо отсортированными округлыми до менее округленными (80%) и угловатыми детритовыми зёрнами (20%) в песчаниках (рис. 6). Размер детритовых зёрен в этих отложениях изменяется от 0,1-0,3 до 1,0 мм. Для них характерна массивная текстура. Цемент пленочный, регенерационный и поровый, представлен оксидами марганца и железа. В составе обломочного материала песчаников преобладают кварц (70-90%) и калиевые полевые шпаты (2-15%). Второстепенные минералы – магнетит, слюда, сидерит, мусковит и оксиды марганца. Зёрна кварца, полевого шпата, а также обломки пород покрыты коркой оксидов железа и марганца и заключены в цемент того же состава. Диагенетические изменения представлены распадом детритовых зёрен (кварца, обломков пород) и формированием оксидов марганца и железа. Распад полевого шпата с образованием глинистых минералов также распространен (рис. 6).

В более грубозернистых осадках преобладают обломочные зёрна размером от 0,25 до 0,50 мм, реже – от 1 до 1,5 мм. Цемент обычно оксидно-марганцовистый, глинистый, железистый и карбонатный. В составе обломков в основном кварц

Эраема / Erathem	Система / System	Отдел / Series	Индекс / Index	Стратиграфическая колонка / Stratigraphic column	Глубина от поверхности (m) / Depth from surface (m)	Характеристика пород / Characteristics of rocks
KZ	Четвертичная / Quaternary	Голоцен / Holocene	Q		0	Гуминовый верхний слой почвы с корнями растений / Humic topsoil with plant roots
		Эоплейстоцен / Eopleistocene			3	Красноцветная почва / Red soil
KZ	Неогеновая / Neogene	Миоцен / Miocene	N1		4	Аллювиальные отложения с марганцевыми конкрециями / Alluvial deposits with manganese nodules
					5	
					6	
					7	
					8	
					9	
					10	
					11	
MZ	Меловая / Cretaceous	Верхний / Upper	K2??		11	Порошкообразный марганцевый вад / Powdered Manganese Wad
AR			AR2		12	Марганцевоносный доломит / Manganese-bearing dolomite

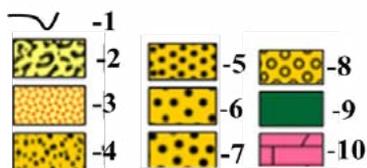


Рис. 4. Стратиграфическая колонка Северо-Западного рудопроявления марганца: 1 – несогласие, 2 – гуминовый верхний слой почвы, 3 – красная почва, 4 – мелкоконкреционные марганцевые руды, 5 – мелко-среднеконкреционные марганцевые руды, 6 – среднеконкреционные марганцевые руды, 7 – крупноконкреционные марганцевые руды, 8 – крупноконкреционные марганцевые руды с фрагментами калькрета, 9 – марганцевый вад, 10 – марганецсодержащий доломит.

Fig. 4. Stratigraphic sequence of the North West Mn deposit: 1 – erosional surface/unconformity, 2 – organic rich soil cover, 3 – red massive lateritic soil, 4 – fine fraction of manganese nodules, 5 – fine-medium fraction of manganese nodules, 6 – medium fraction of manganese nodules with coarser rock fragments, 7 – coarse fraction of manganese nodules, 8 – very coarse fraction of manganese nodules with coarser manganese and iron coated fragments, 9 – manganese wad, 10 – manganese-bearing dolomite.

(70-90%) и полевые шпаты (плагиоклаз и калиевый полевой шпат; 16-20%), то есть песчаник кварцевый и олигомиктовый. Акцессорные минералы: мусковит, каолинит, андалузит, циркон и ильменит. Обломки пород (5-15%) представлены поликристаллическими зернами кварца с волнистым угасанием, включениями ильменита и циркона и фрагментами кварцитов. Вторичные изменения выражены слабой пелитизацией калиевых полевых шпатов (рис. 6г).

Распределение фигуративных точек составов аллювиальных пород рудопроявления марганца Северо-Западное на диаграмме Qt-F-L (кварц, полевой шпат и обломки пород) [Шутов, 1972] свидетельствует о том, что они соответствуют полю составов кремнекласитокварцевых, полевошпатовкварцевых и мезомиктовых кварцевых песчаников (рис. 5).

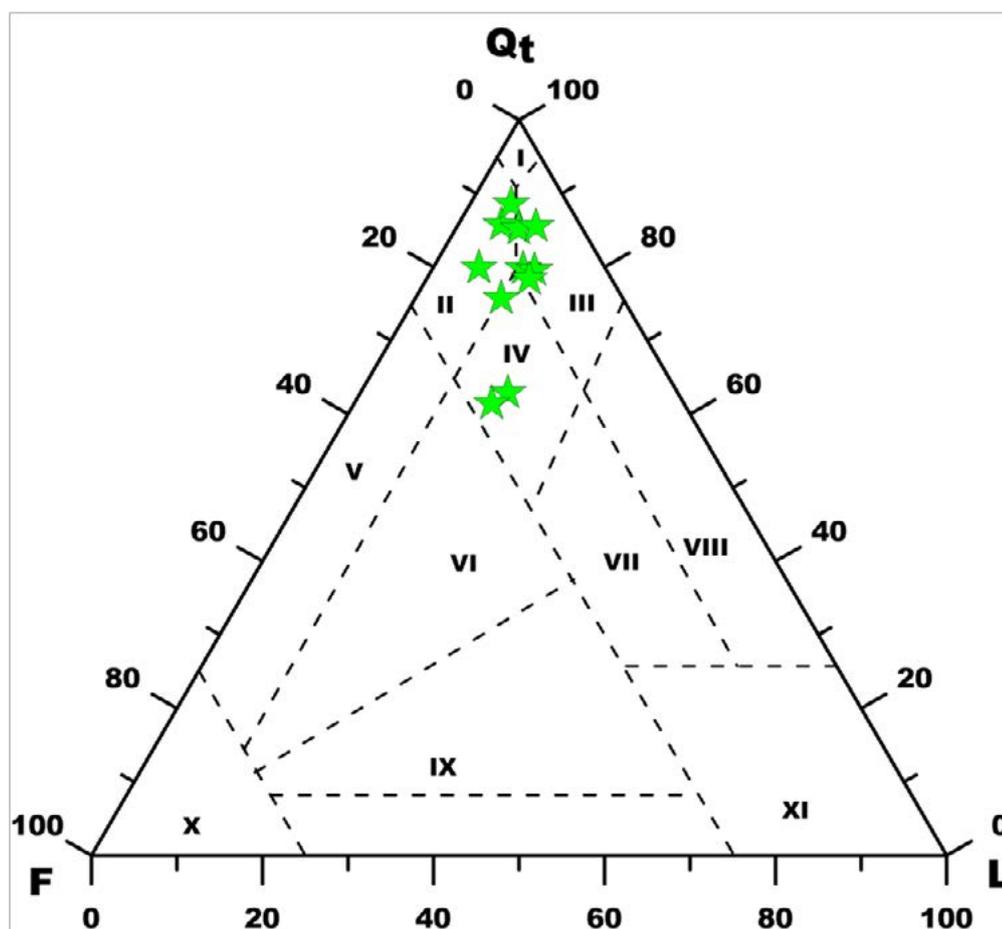


Рис. 5. Классификация терригенных отложений на основе схемы, предложенной [Шутов, 1972]; где кварцевая группа песчаников представлена следующими фациями: I – мономиктовые кварцевые, II – кремнекласитокварцевые, III – полево-шпат-кварцевые, IV – мезомиктовые кварцевые. Граукковая группа: V – кварцевые, VI – полевошпат-кварцевые, IX – кварц-полевошпатовые, X – собственно граувакки, XI – поле песчаников не чисто терригенного происхождения. Аркозоя группа: VII – граувакковые аркозы, VIII – собственно аркозы. / Fig. 5. Classification of the terrigenous grains based on the schemes proposed by [Shutov, 1972]; where: quartz-arenite group of sandstones are represented by the following facies: I – monomictic quartzose sandstones, II – siliciclastic quartzose sandstones, III – feldspathic-quartzose sandstones, IV – mesomictic-quartzose sandstones. Greywacke group: V – quartzitic sandstones, VI – feldspathic-quartzose sandstones, IX – quartz-feldspathic sandstones, X – greywacke, XI – sandstone field which is not of purely terrigenous in origin. Arkoses group: VII – greywacke arkose, VIII – arkoses. The classification is based on the modal composition (volumetric percentage) of framework grains.

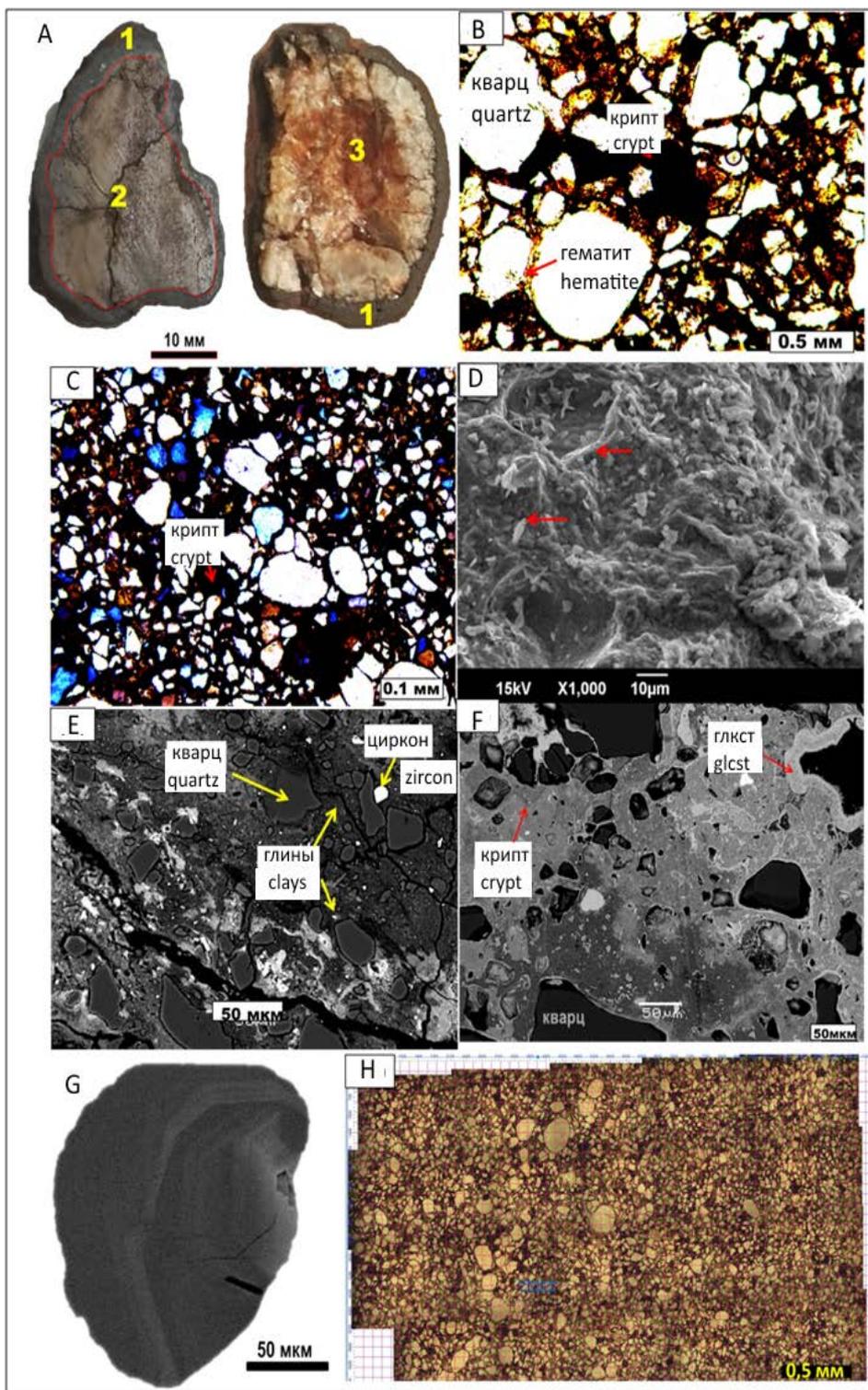


Рис. 6. Микрофотографии шлифов и анишлифов, полученные в сканирующем электронном микроскопе и с помощью поляризационного микроскопа. Они показывают наличие в исследуемых образцах аутигенных глинистых минералов и оксидов марганца и железа. (а) образцы изучаемого объекта: 1 – аккреционные оболочки оксидов марганца и железа, 2 – ядро песчаника, 3 – ядро кварцита; (б) гематит (Fe_2O_3) встречается в виде цементных покрытий вокруг зерен каркаса в терригенных обломках и в виде чередующихся пластинок с фазами марганцевых оксидов; (в) диагенетическое замещение детритовых зерен и ранних цементных минералов оксидом марганца-криptomеланом (крипт); (д) иллитовые гранулы, растущие из основной массы каолинита во время иллитизации; (е) зона изменения детритовых зерен полевого шпата, приводящая к образованию

глин; (f) белый фон представляет диагенетическое происхождение аутигенных фаз оксида марганца (криптомелан-крипт), замещающих детритовые зерна, и позднее осаждение галаксита (глкст) по краям порового пространства; (g) детритовое зерно циркона, как указано в д; (h) образец каркаса для подсчета детритовых зерен. /

Fig. 6. Photomicrographs of thin sections and polished sections studied by scanning electron microscopy and polarized microscope. They show the presence of authigenic clays and oxides of manganese and iron in the studied samples. (a) Samples of the studied object: 1-coalescence of manganese and iron oxides, 2-the core of sandstone, 3 – the core of quartzite; (b) hematite (Fe_2O_3) occurs as cement coatings around the framework grains in terrigenous sediments and as an alternating thin coating films with phases of manganese oxides; (c) diagenetic replacement of detrital grains and early-formed cement minerals with manganese oxide-cryptomelane (crypt); (d) illite granules growing from the main mass of kaolinite during illitization; (e) alteration of detrital feldspar grains, leading to the formation of clays; (f) the white background represents the diagenetic origin of authigenic phases of manganese oxide (cryptomelane-crypt), replacing detrital grains, and a late stage diagenetic mineral formation of galaxite (glcst) around the edges of the pore spaces; (g) detrital grain of zircon, as specified in d; (h) sample of point counted framework grains.

Характеристика химического состава пород

В валовых пробах изученного района содержания кремнезема изменяются в интервале от 50 до 79 мас.%. Количество Al_2O_3 варьирует в количествах – от 6 до 11 мас.%, а содержание MnO составляет от 0,7 до 19 мас.%. Содержания породообразующих оксидов и микроэлементов в проанализированных образцах приведены в таблице 1. Породы представляют собой смесь алюмосиликатного и силикатного материала с Fe-Mn конкрециями или микроконкрециями, либо силикокластические породы с железомарганцевым цементом. Химический состав проб ТС-02, ТС-07 и ТС-15 соответствует составу кремнисто-глинистых пород, ТС-08 и ТС-14 – глинистым кремням, а ТС-16 – высококремниевому силициту, с высоким содержанием железа и марганца.

Очевидно, что поступление марганца и железа тесно связано с повышенными содержаниями кобальта, хрома, никеля и ванадия в пробах изученных пород (табл. 1), которые обычно ассоциируют с основными и ультраосновными породами. По-видимому, концентрация этих элементов обусловлена длительным выветриванием коренных пород и последующим отложением их в бассейне, в котором сформировались в позднем архее доломиты Мальмани.

Так, на классификационной диаграмме $\log (Na_2O/K_2O) - \log (SiO_2/Al_2O_3)$, модифицированной [Pettijohn et al., 1975; Varga et al., 2007] (рис. 7) точки составов пород из «Северо-Западного» рудопроявления соответствуют полям составов аркозов, субаркозов и лититов.

Поскольку содержания породообразующих оксидов отражают состав, как детритового компонента терригенных пород, так и их цемента, то более объективные выводы о сходстве и различии исследуемых объектов можно сделать с учетом наиболее информативных соотношений между оксидами и их суммами (нефтехимические модули) и диаграммами модулей (рис. 8) предложенные Юдовичом и Кетрисом [Юдович, Кетрис, 2000].

Гидролизатный модуль (ГМ) $= [(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2]$ предназначен для количественной оценки двух наиболее важных гипергенных процессов выщелачивания и гидролиза. При инфильтрации метеорных вод из горных пород удаляются подвижные компоненты, в том числе не только щелочи и щелочноземельные породы, но и частично кремнезем. В результате гидролиза гидроли-

затные элементы накапливаются, образуя труднорастворимые гидроксиды (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2). Поэтому этот модуль используется для количественной оценки химического выветривания горных пород, то есть «зрелости». Его величина зависит от количества детритового кварца или обогащенных Si фрагментов породы, с одной стороны, и от состава полевых шпатов, а также глинистых компонентов в цементе, с другой.

Значения ГМ изучаемых образцов варьируются от 0,07 до 1,34 со средним значением 0,62. Это указывает на то, что терригенные породы наименее зрелы, и это может быть результатом вторично-гипергенных процессов, проводивших к образованию большего количества глинистых фракций в результате выветривания детритового материала (полевых шпатов; слюд и др.).

Фемический модуль (ФМ) = $[(Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO)/SiO_2]$ – больше подходит для идентификации граувакк и аркозов. Он отражает интенсивность и темпы выветривания и захоронения: чем больше фемических элементов переходит в раствор во время выветривания, тем больше разница между песчаниками и типичными граувакками [Malinovsky, Tuchkova, 2010]. Слегка повышенные значения (0,07-1,02 со средн. 0,44) ФМ указывают на наличие вулканокластических граувакк и, вероятно, метавулканических обломков. Величина этого модуля указывает на вероятный источник сноса терригенных материалов из мафических и ультрамафических пород (Вентерсдорп лавы) Каапваальского Кратон.

Нормализованный модуль щелочности (НКМ) = $[Na_2O+K_2O/Al_2O_3]$ позволяет диагностировать примесь вулканического материала в осадочных породах. Этот показатель обычно выше в аркозах за счет широкого развития слюд и полевых шпатов, в том числе калийных сортов, и ниже в граувакках из-за преобладания глинистого цемента, фрагментов вулканов и глинисто-илистой матрицы [Юдович, Кетрис, 2000; Malinovsky, Tuchkova, 2010].

По словам Юдовича и Кетриса [Юдович, Кетрис, 2000], НКМ содержит информацию о соотношении двух основных типов щелочных алюмосиликатов: полевого шпата и слюды. Поскольку слюды являются минералами, гораздо более богатыми глиноземом, чем полевой шпат, низкие значения НКМ указывают на преобладание слюды, а высокие – на преобладание полевого шпата. Например, если НКМ породы больше 0,31, то она должна содержать калиевый полевой шпат (или какой-либо другой минерал с высоким содержанием калия), а если значение НКМ меньше 0,31, то присутствие калиевого полевого шпата, хотя и возможно, больше не является необходимым.

По отношению к этому модулю исследуемый объект показывает среднее значение, превышающее 0.31. Это указывает на преобладание полевого шпата над слюдой.

Титановый модуль (ТМ) = $[TiO_2/Al_2O_3]$. Величина титанового модуля (ТМ) является важной геохимической константой гипергенных процессов и была представлена в работах А. А. Мигдисова в 60-е годы, посвященных изучению осадочного чехла Русской плиты [Мигдисов, 1960]. Мигдисов также указал, что значения модуля титана зависят от климатических и фациальных условий формирования горных пород. Этот модуль используется для оценки состава горных пород (включая их содержание Ti) в исходных районах и для динамики осадконакопления, то есть отражает интенсивность сортировки титаносодержащих минералов и глинистого вещества.

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав терригенных отложений северо-западного района. /
Chemical composition of the North West terrigenous sediments.**

Компоненты (масс.%) / Components (wt%)	№ образцов / Sample No,															
	ТС_01	ТС_02	ТС_03	ТС_04	ТС_05	ТС_06	ТС_07	ТС_08	ТС_09	ТС_10	ТС_11	ТС_12	ТС_13	ТС_14	ТС_15	ТС_16
SiO ₂	61,64	76,40	54,79	43,00	61,11	58,73	76,49	81,61	50,58	46,82	62,37	64,70	69,71	79,50	76,94	93,91
TiO ₂	0,60	0,60	0,62	0,48	0,64	0,61	0,56	0,48	0,65	0,54	0,69	0,71	0,71	0,51	0,07	<0,01
Al ₂ O ₃	11,09	9,68	12,67	13,43	13,18	12,28	8,48	6,91	14,82	12,97	13,87	13,73	11,76	7,69	6,40	0,27
Fe ₂ O ₃	11,76	8,22	10,59	13,05	13,16	19,90	9,32	6,43	11,83	12,20	10,93	12,04	10,5	7,06	3,13	2,25
MnO	6,38	1,00	12,73	19,03	4,83	1,39	1,00	0,85	13,30	17,50	4,62	2,12	1,59	0,79	8,10	2,27
MgO	0,23	0,03	0,12	0,09	0,07	0,05	0,02	<0,01	0,08	0,10	0,09	0,05	0,05	<0,01	<0,01	<0,01
CaO	0,28	0,05	0,13	0,07	0,03	0,06	0,05	0,03	0,07	0,08	0,05	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02
Na ₂ O	0,05	0,03	0,07	0,09	0,05	0,06	0,02	0,02	0,06	0,09	0,12	0,06	0,03	0,02	0,03	<0,01
K ₂ O	0,93	0,46	0,71	0,79	0,71	0,72	0,39	0,32	0,77	0,89	0,80	0,68	0,53	0,37	0,32	0,16
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,06	0,08	0,06	0,09	0,05	0,08	0,06	0,09	0,05	0,05	0,05	0,08	0,01	0,01
Cr ₂ O ₃	0,05	0,06	0,06	0,05	0,12	0,28	0,08	0,05	0,05	0,04	0,07	0,12	0,09	0,06	0,01	0,01
LOI	6,25	3,65	7,31	9,06	5,89	5,87	3,65	3,28	7,08	7,97	5,71	5,48	4,67	3,60	4,01	0,75
Сумма / Sum	99,29	100,22	99,86	99,22	99,85	100,05	100,10	100,06	99,36	99,28	99,37	99,77	99,54	99,71	99,08	99,65
Микроэлементы (г/т) / Trace elements (g/t)																
As	12	13	16	34	21	44	26	11	17	44	11	21	14	13	5,3	<4
Ba	1155	903	8386	20110	5490	1551	952	720	8390	14698	4358	3146	1677	637	6210	178
Bi	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Br	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Ce	81	72	442	907	291	148	73	64	242	563	238	262	157	62	347	<10
Co	36	27	103	204	63	77	29	19	56	99	48	72	70	20	66	1,8
Cr	263	375	468	480	847	2048	555	342	371	329	472	847	590	372	48	26

Cs	13	<5	26	44	21	13	9,8	5,2	22	36	16	12	12	7,1	11	<5
Cu	38	38	147	225	93	87	41	27	81	127	81	86	75	30	125	8,2
Ga	14	12	21	23	22	22	13	9,7	24	23	21	22	18	11	7	1,1
Ge	1,8	1,1	<1	<1	1,3	1,7	2,3	1,4	1,8	<1	1,4	2	1,4	1,3	<1	1
Hf	5,2	8,2	7,7	<3	11	10	10	6,6	5,3	7,7	8,5	12	10	7,9	3,9	4,3
La	41	36	203	278	79	36	29	28	109	242	70	48	34	27	102	18
Mo	<2	<2	8,1	19	4,8	4,8	2,6	<2	5,8	12	4,6	5,2	4,1	<2	7,9	<2
Nb	11	12	12	9,4	13	13	11	9,3	13	10	14	14	13	10	4	2,5
Nd	34	20	164	243	60	21	18	17	102	219	58	41	22	20	83	<10
Ni	118	62	247	404	111	123	65	46	71	129	102	140	149	48	156	5,7
Pb	28	33	74	147	107	97	39	28	122	96	71	104	77	30	27	<2
Rb	55	40	46	39	54	54	36	30	49	46	57	55	46	33	10	<2
Sc	16	14	42	67	27	24	12	9,5	31	44	26	22	18	11	21	<3
Se	<1	<1	1,2	1	1,4	<1	<1	<1	1,1	1,1	<1	1,6	<1	<1	<1	<1
Sm	<10	<10	16	11	<10	<10	<10	<10	<10	14	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	28	18	196	286	54	28	18	16	150	294	61	22	21	14	151	28
Ta	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2,1
Th	10	10	18	26	17	15	9,9	7,3	21	21	14	14	13	7,3	4,9	<3
Tl	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
U	<2	2,2	3,7	5,3	4,3	7,2	2,3	<2	3,2	5,1	2,6	4,3	2,9	<2	<2	<2
V	141	131	321	521	261	269	136	104	321	514	226	201	163	109	157	24
W	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3,5	<3	<3	3,7	3,9	<3	<3	<3
Y	27	16	57	48	24	18	14	12	32	43	24	21	17	13	20	1,8
Yb	<3	<3	5,4	11	<3	3,5	3,4	3,7	<3	8,7	3,1	<3	<3	3,1	7,7	<3
Zn	24	22	35	30	35	45	27	30	36	61	37	35	30	29	6,3	<3
Zr	231	248	224	174	245	246	263	222	215	192	239	278	301	227	27	3,9

Образцы из исследуемого объекта характеризуются относительно низкими значениями ТМ в диапазоне от 0,04 до 0,07. Такое распределение значений ТМ, вероятно, объясняется возникновением обломочного материала в результате эрозии переработанных кратонных пород.

Тенденции в изменении среднего химического состава исследуемого объекта, а также их сходства и различия лучше всего иллюстрируются модульными диаграммами Юдовича и Кетриса [Юдович, Кетрис, 2000]: ГМ – НКМ, ГМ – ТМ, ФМ – ТМ и ФМ – НКМ (рис. 8). Наблюдаемые отрицательные корреляции между парами ФМ – ТМ и ТМ – ТМ указывают на петрогенное (Гранитное, вулканическое) происхождение пород и их принадлежность к сублитаренитам. Таким образом, литохимический состав терригенных пород исследуемых объектов свидетельствует об их низкой химической зрелости, гидродинамической переработке и высоких темпах физического выветривания. Основными источниками обломочного материала являлись мафические и ультрамафические породы внутреннего кратона с переменным привнесением примесей сиалического материала из эродированных блоков континентальной коры.

Таблица 2 / Table 2

**Литохимические модули терригенных отложений Северо-Западного региона. /
Lithochemical modulus of the terrigenous deposits of North West region.**

Образец / Sample	ГМ / NM	ФМ / FM	НКМ / NMA	ТМ / TM
ТС_01	0,66	0,47	0,09	0,05
ТС_02	0,35	0,22	0,05	0,06
ТС_03	0,84	0,60	0,06	0,05
ТС_04	1,34	1,02	0,07	0,04
ТС_05	0,1	0,49	0,06	0,05
ТС_06	0,89	0,67	0,06	0,05
ТС_07	0,36	0,24	0,05	0,07
ТС_08	0,25	0,16	0,05	0,07
ТС_09	1,01	0,71	0,06	0,04
ТС_10	1,16	0,87	0,08	0,04
ТС_11	0,64	0,41	0,07	0,05
ТС_12	0,61	0,39	0,05	0,05
ТС_13	0,48	0,31	0,05	0,06
ТС_14	0,28	0,18	0,05	0,07
ТС_15	0,27	0,18	0,05	0,01
ТС_16	0,07	0,07	0,60	<0,01
Минимум / Minimum	0,07	0,07	0,05	0,004
Максимум / Maximum	1,34	1,02	0,60	0,069
Среднее значение / Average	0,62	0,44	0,09	0,05

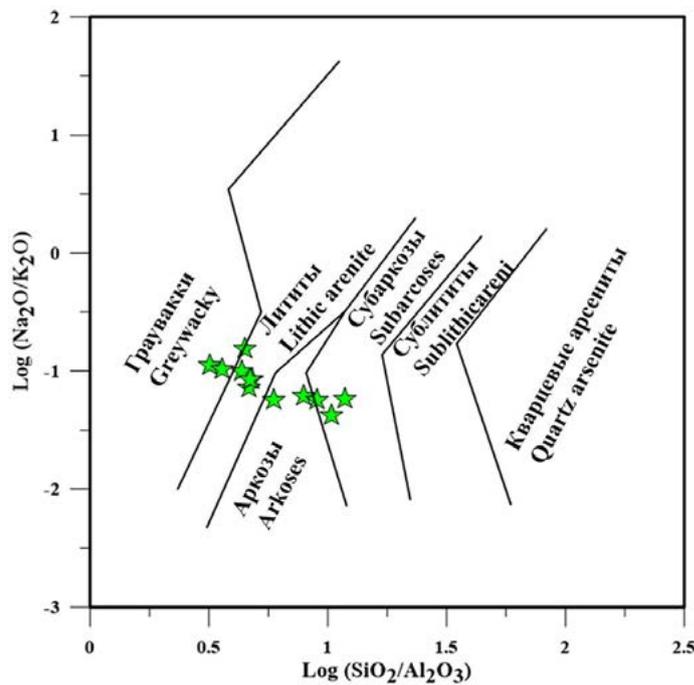


Рис. 7. Положение песчаников Северо-Западного рудопроявления на классификационной диаграмме [Varga et al., 2007], модифицированной Ф. Дж. Петтиджоном [Pettijohn, 1975]. / Fig. 7. The position of sandstones of the North-West Deposit on the classification diagram of [Varga et al., 2007], modified by [Pettijohn, 1975].

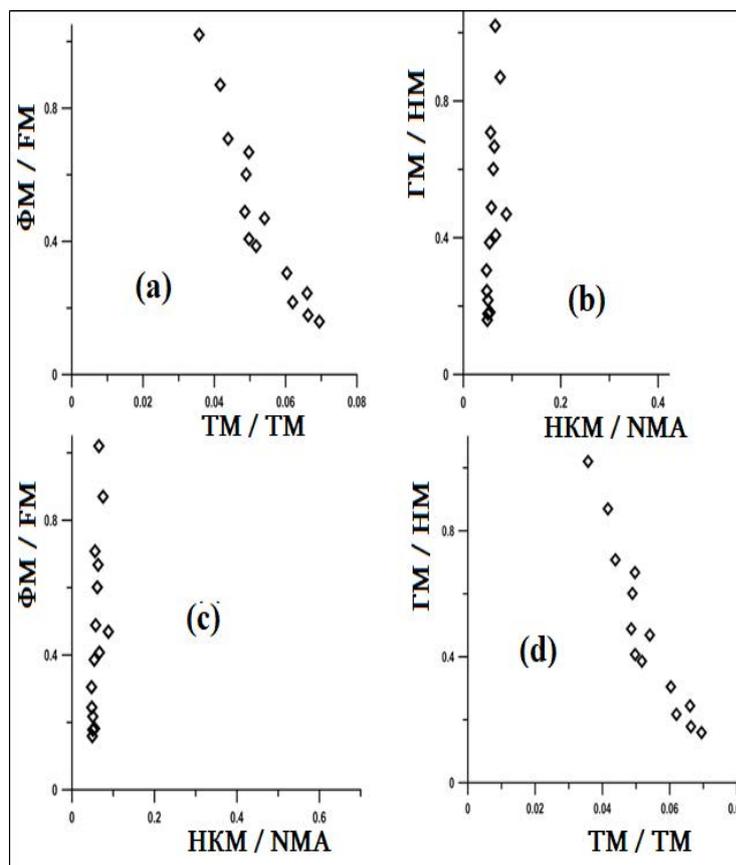


Рис. 8. Модульные диаграммы для терригенных пород исследуемого объекта [Юдович, Керпус, 2000; Malinovsky, Tuckova, 2010]. / Fig. 8. Module diagrams for the studied terrigenous rock [Юдович, Керпус, 2000; Malinovsky, Tuckova, 2010].

Характеристика процессов палеовыветривания

Степень химического изменения терригенных пород обычно определяется с помощью индекса химического выветривания CIA [Nesbitt, Young, 1982], который рассчитывается по формуле (молекулярные массы): $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, где CaO^* рассчитывается как доля CaO без учета кальция, входящего в состав карбоната. Для графического выражения степени химического изменения терригенных пород используется диаграмма $(Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O)$ [Nesbitt, Young, 1989; Sklyarov, 2001], с помощью которой можно определить направленность выветривания пород питающей провинции в процессе седиментогенеза, а также допустимость применения индекса CIA для определения степени химического выветривания [McLennan et al., 1993]. На диаграмме $(Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O)$ (рис. 9) точки составов терригенных пород, имеющие значения K_2O/Na_2O от 5 до 20 образуют тренд, слегка параллельный линии $Al_2O_3 - K_2O$. Такой тренд может свидетельствовать о том, что эти породы были подвержены эпигенетическим преобразованиям [Yapaskurt, 1994; Yudovich, Ketris, 2008], в процессе которых произошел вынос Na_2O [McLennan, 2001; Varga, Szakmány, 2004; Varga et al., 2007], а также распад детритовых обломков, и последующее образование марганцевых и глинистых минералов в поровых пространствах.

Однако, полученные значения индекса химического выветривания пород северо-западного района не позволяют в полной мере их использовать, так как индекс CIA [Nesbitt, Young, 1989] учитывает содержания Na_2O , количество которого в этих отложениях незначительно.

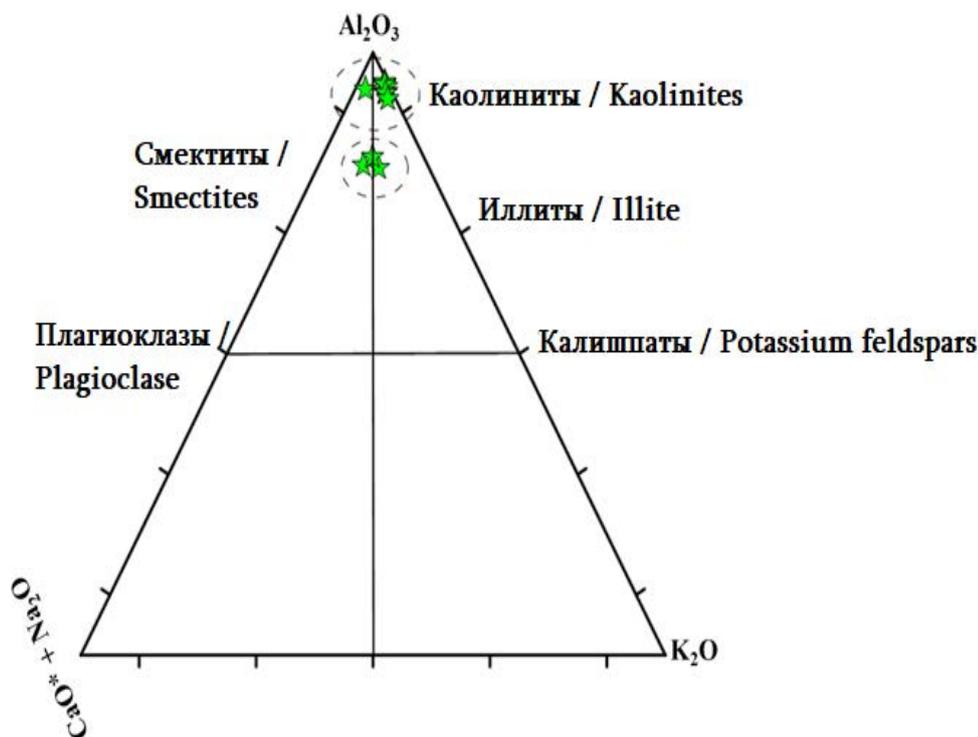


Рис. 9. Диаграмма $Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$ [Nesbitt, Young, 1989] для терригенных пород северо-западного региона. /

Fig. 9. A - CN - K ($Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$) diagram [Nesbitt, Young, 1989] for Highveld terrigenous deposits.

Обсуждение результатов

Проанализированные марганецсодержащие породы в основном сложены хорошо отсортированным и окатанным материалом (см. рис. ба – в), что может указывать на удаленность от областей питания бассейна пород источника седиментации.

Расположение фигуративных точек пород северо-западного региона на диаграмме F – Qt – L (полевые шпаты – кварц – обломки пород) (рис. 10) [Dickinson et al., 1983] свидетельствует о том, что они образовались в основном за счет разрушения пород слагающих кратоны.

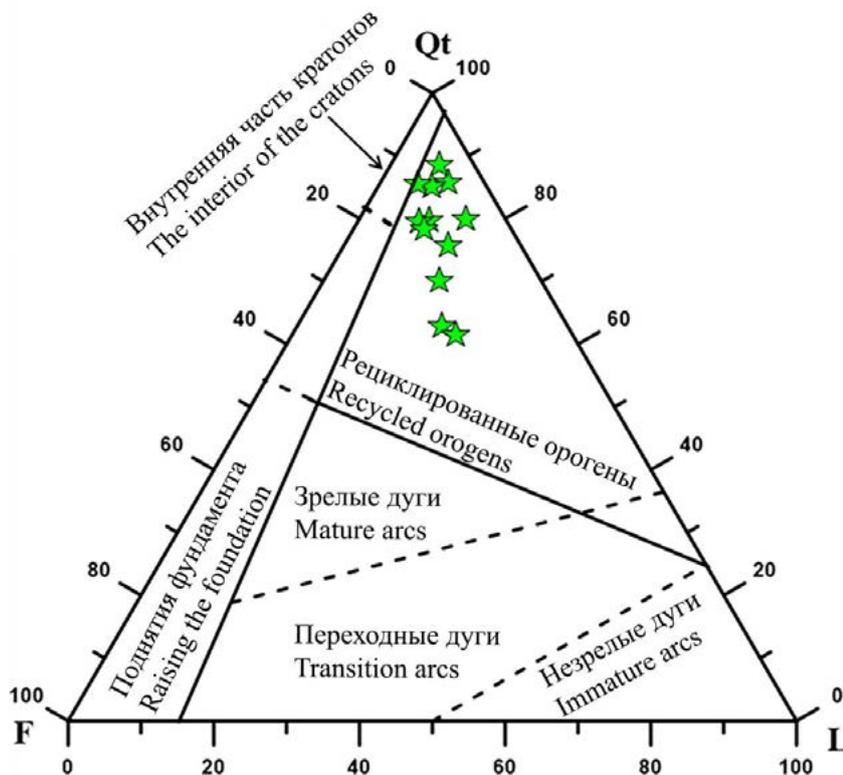
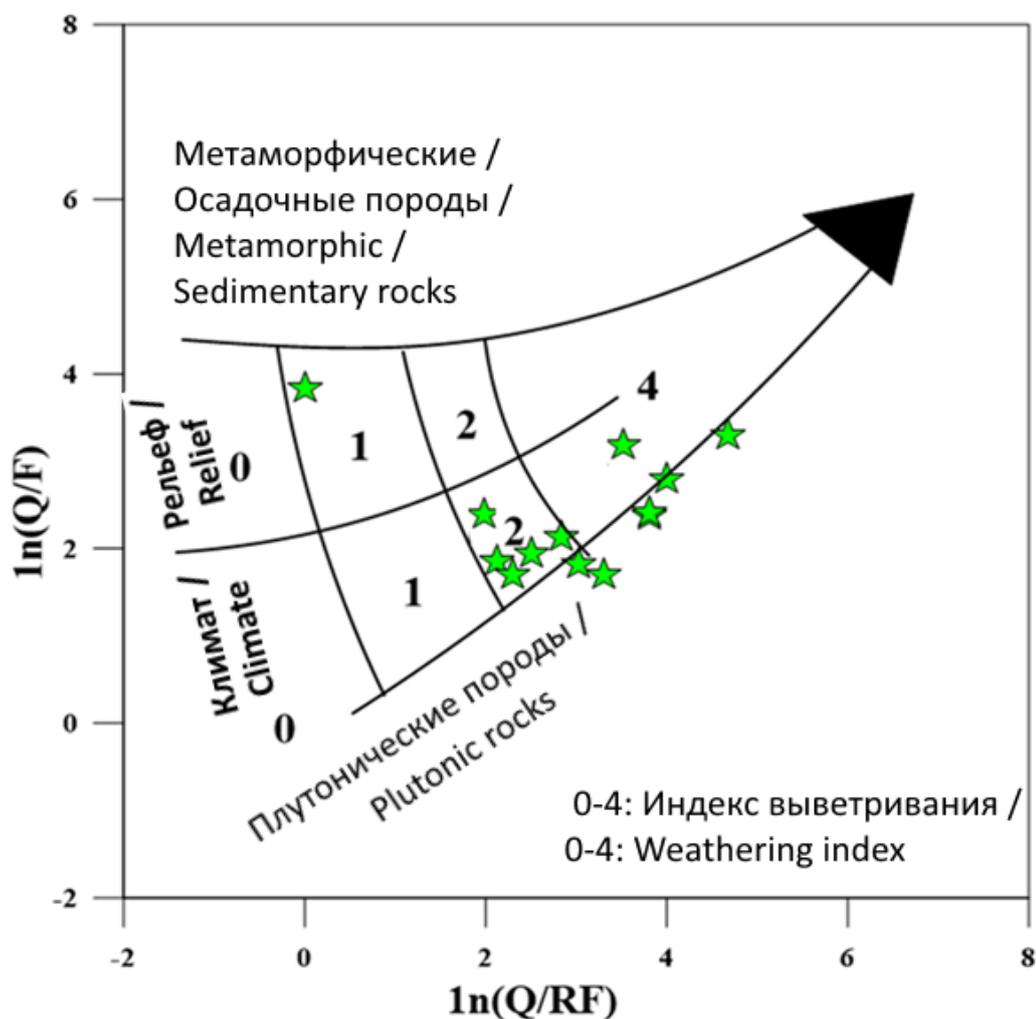


Рис. 10. Диаграмма F – Qt – L (полевые шпаты – кварц – обломки пород) для терригенных пород северо-западного региона [Dickinson et al., 1983]. /

Fig. 10. F – Qt – L classification diagrams (feldspars – quartz (total quartz and monocrystalline quartz content – rock fragments) for the North West terrigenous gravelites [Dickinson et al., 1983].

Weltje и др. [Weltje et al., 1998] предложили использование логарифмического отношения между количествами детритовых обломков кварца, лититовых фрагментов пород и полевых шпатов. Основываясь на нем, можно видеть, что наши образцы попадают в поле № 2 и располагаются в близости от поля № 4. Это свидетельствует о том, что осаждение детритового материала происходило либо на низких равнинах с умеренным и субгумидным климатом, или в тропических влажных условиях в пределах областей умеренного и низкого рельефов соответственно (рис. 11). Транспортировка и перемещение осадков на большие расстояния способствует смещению аналитических данных в сторону поля распространения фигуративных точек составов пород, характерных для более влажного климата, а не засушливых регионов [Zaid, 2012].

Обилие монокристаллического кварца в песчанике объясняется процессами истирания поликристаллических зерен при транспортировке осадка из районов рас-



Полуколичественный индекс выветривания / Semi-quantitative weathering index		Рельеф / Relief		
		Высокие горы / High mountains 0	Умеренные холмы / Moderate hills 1	Равнины / Plains 2
Климатические осадки / Climatic precipitation	Полузасушливые и средиземный / Semi-arid and Mediterranean 0	0	0	0
	Умеренный субгумидный / Moderate sub-humid 1	0	1	2
	Тропический влажный / Tropical wet 2	0	2	4

Рис. 11. Логарифмы соотношений на диаграмме по [Weltje et al., 1998]. Q – кварц, F – полевой шпат, RF- фрагменты породы. /

Fig. 11. Log-ratio diagram from [Weltje et al., 1998]. Q: quartz, F: feldspar, RF: fragments of rock. Fields 1-4 refer to semi-quantitative weathering indices, determined on the basis of relief and climate, as indicated on the table.

пространения метаморфических пород. Низкий процент полевых шпатов и обломков горных пород и их отсутствие в некоторых образцах подразумевают источник терригенного материала из районов обнажения кратонов, которые сложены гнейсами и кварцитами.

Значения 0, 1 и 2 представляют собой осадки из полусасушливых и средиземноморских, умеренных субгумидных и тропических влажных климатических условий и высокогорного (0), умеренных холмов (1) и низких равнин (2) рельефов. В полуколичественных значениях индекса выветривания в диапазоне 0-4 представлены незрелые, слегка выветрившиеся, умеренно выветрившиеся и интенсивно выветрившиеся отложения, соответственно, с минимумами, характерными для районов с низким рельефом или климатическим порогом, и максимумами, характерными для низменностей с тропическим влажным климатом.

Заключение

Результаты петрографического, минералогического и геохимического изучения каменного материала района Хайфельд, северо-западной провинции ЮАР дали возможность обосновать следующие выводы:

1. Макроскопически определенные марганцевые конкреции в районе исследования в основном состоят из силикатных и алюмосиликатных минералов и их сростаний, обрамленных по периферии оксидами марганца и железа. В качестве минеральной основы послужили литические аркозы, кремнекластитокварцевые, полевошпат-кварцевые с подчиненным количеством мезомиктовых кварцевых песчаников.

2. Фигуративные точки изученных проб на диаграмме «Qt – F-L» [Dickinson et al., 1983] соответствуют составам терригенного материала привнесенного из районов выходов на поверхности внутренних кратонов и рециклированных орогенов.

3. Седиментация происходила в пределах низких равнин вдоль тропического района, характеризующегося умеренными субгумидными и тропическими влажными климатическими условиями. Такие климатические условия благоприятствовали формированию латеритных кор выветривания на большей части африканского континента.

4. Обилие кварцевых зерен, составляющих в среднем до 80% и небольшой процент полевых шпатов в образцах дает основание утверждать, что изучаемый терригенный материал прошел вторичные изменения, приводивших к разложению полевых шпатов и темноцветных минералов при промывном гидролизе, что происходит при формировании каолиновых и латеритных кор выветривания.

5. За отложением осадков последовали две продолжительные стадии диагенеза. К ним относятся ранняя стадия, характеризующаяся уплотнением отложений и частичным растворением с изменением морфологии детритовых зерен. Вторая стадия минералообразования сопровождалась интенсивным растворением и замещением первичных цементов и минералов оксидами марганца и железа и каолинитом в результате изменения редокс-потенциала «окислительно-восстановительного потенциала» (Eh) и pH окружающей геологической среды, характерных для зоны окисления. Ритмичность и тонкозернистость отложений, тонкозернистые ламинарно-слоистые алеврито-глинистые осадки свидетельствуют об их формировании в прибрежно-мелководной озерной среде или в тиховодных условиях при отсутствии сильных течений.

6. Вышеизложенные результаты исследований позволяют предположить, что источниками терригенного материала, содержащего марганцевые руды, подвергшегося марганцевому оруденению в Северо-Западном районе ЮАР являлись архейские граниты и кварциты Каапваальского Кратона и Ранд-антиклинального хребта серии Черного рифа, которые выходят на поверхность вдоль северного обрамления района на более высоких отметках рельефа. По-видимому концентрация главных рудных элементов: марганца и железа, а также сопутствующих: кобальта, хрома, никеля и ванадия определена длительным корообразованием по доломитам серии Мальмани.

На основании этих результатов можно сделать вывод, что источник Mn в большей степени связан с выветриванием подстилающих доломитов, чем с возможным переносом металла из других коренных источников, расположенных на значительном удалении от зоны рудонакопления. В отличие от доломитов, которые содержат относительно повышенное содержание MnO (в среднем 4,5 мас.% по данным DeVilliers, 1960) ранее не было задокументировано, что коренные источники марганецсодержащих терригенных материалов содержат содержание марганца, превышающее среднее обилие земной коры.

Литература

1. Мигдисов А. А. О соотношении титана и алюминия в осадочных породах. // *Геохимия*. – 1960. – № 2. – С. 149-163.
2. Шутов В. Д. Граувакки. Труды ГИН АН СССР. Вып. 238. – М.: Наука, 1972. – С. 375.
3. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – С. 479.
4. Beukes N. J., Van Niekerk H. S., Gutzmer J. Post-Gondwana African land surfaces and pedogenic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits gold mine. // *South Afr. Journ. of Geology*. – 1999. – Vol. 102. – pp. 65-82.
5. Burke K., Gunnell Y. The African erosion surface: A continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. // *Geol. Soc. Of Amer. Memr.* – 2008. – Vol. 201. – 66p.
6. De Villiers J. The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria. // *Geologic. Surv. of S. Afr Handbook*. – 1960. – No. 2. – 263 pp.
7. Dickinson W. R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. // In: Zuffa G. G. (Eds) *Provenance of Arenites*. Springer, Dordrecht. – 1985. – Vol. 148. – 112 p.
8. Dickinson W. R., Beard L. S., Brackenridge G. R., Evjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Linberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of Northern American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. // *Geo. Soc. of Amer. Bulletin*. – 1983. – Vol. 94. – pp. 222-235.
9. Frimmel H. E. A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. // In: Kelley K, Golden, HC (Eds) *Building exploration capability for the 21st Century*. Society of Econ. Geologists. – 2014. – Vol. 18. – pp. 209-234.
10. Jafarzadeh M., Hosseini-Barzi M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting. // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. – 2008. – Vol. 25 (2). – pp. 247-260.
11. Malinovsky A. I., Tuchkova M. I. Lithochemistry of the Paleo-island-Arc Complexes in the Orogenic Belts of the Russian Far East. // *Russian Journ. Pacif. Geology*. – 2010. – No. 4. – pp. 363-378.
12. McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. // *Geochem., Geophys., Geosystems*. – 2001. – No. 2 (4). – pp. 1021.
13. McLennan S. M., Taylor S. R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. // *Journ. of Geol.* – 1991. – Vol. 99. – pp. 1-21.

14. McLennan S. M., Hemming S., McDaniel D. K., Hanson G. N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. // In: M. J. Johnsson, A. Basu (Eds.), Processes controlling the composition of clastic sediments. Geo. Soc. of Amer. Spec. Paper. – 1993. – Vol. 284. – pp. 21-40.
15. Motova Z. L., Donskaya T. V., Gladkochub D. P. The composition and reconstruction of the source area for the late Precambrian terrigenous rocks of the Oselkovaya series (Biryusa Prisayanie). // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2016. – No. 7 (4). – pp. 25-649.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. // *Nature*. – 1982. – Vol. 299. – pp. 715-717.
17. Nesbitt H. W., Young G. M. Formation and diagenesis of weathering profiles. // *The Journal of Geology*. – 1989. – Vol. 97 (2). – pp. 129-147.
18. Pack A., Gutzmer J., Beukes N., Van Niekerk H. Supergene ferromanganese wad deposits derived from Permian Karoo Strata along the late Cretaceous-mid-Tertiary African land surface, Ryedale, South Africa. // *Econ. Geol. B.* – 2000. – Vol. 95. – pp. 203-220.
19. Pettijohn F. J. *Sedimentary Rocks* (Third edition). – New York: Harper & Row, 1975. – 628 p.
20. Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. *Sand and Sand-stones*. – New York: Springer, 1972. – 158 p.
21. Pharoe B. K., Liu K. Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine. // *Journ. of Afr Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 143. – pp. 79-101.
22. Pharoe B. K., Evdokimov A. N., Gembitskaya I. M., Bushuev Y. Y. Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa. // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 120. – 103-372 p.
23. Sklyarov E. V. (ed.). *Interpretation of geochemical data*. // Internet Engineering. Moscow. – 2001. – 288 p.
24. Suttner L. J., Basu A., Mack G. M. Climate and the origin of quartz arenites. // *Journ. of Sedim. Petrology*. – 1981. – Vol. 51. – pp. 1235-1246.
25. Tinker J., de Wit M., Grotzinger J. Seismic Stratigraphic Constraints on Neoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. *South Afr. // Journ. of Geology*. – 2002. – Vol. 105. – pp. 107-134.
26. Van Niekerk H. S., Beukes, N. J., Gutzmer J. Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiles, African land surfaces and palaeoclimate change on the Highveld of South Africa. // *Journ. of Afr. Earth Sciences*. – 1999. – Vol. 29. – pp. 761-781.
27. Varga A. R., Szakmány G. Geochemistry and provenance of the upper carboniferous sandstones from Borehole Diószvizlő-3 (Téseny Sandstone Formation, SW Hungary). // *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged*. – 2004. – Vol. 45 (2). – pp. 7-14.
28. Varga A., Szakmány G., Árgyelán T., Józsa S., Raucsik B., Máthé Z. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study. In: J. Arribas, M. J. Johnsson, S. Critelli (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. *Geologic. // Soc. of Amer. Spec. Papers*. – 2007. – Vol. 420. – pp. 221-240.
29. Weltje G. J., Meijer X. D., De Boer P. L. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing. // *Basin Research*. – 1998. – No. 10. – pp. 129-153.
30. Yapaskurt, O. V. *Stage analysis of lithogenesis*. – M.: MSU, 1994. – 142 p.
31. Yudovich Y. E., Ketris M. P. *Mineral indicators of lithogenesis*. – Syktyvkar: Geoprint, 2008. – 564 p.
32. Zaid S. M. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. // *Journ. of Afr. Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 66. – pp. 56-71.

References

1. Migdisov A. A. About the ratio of titanium and aluminum in sedimentary rocks. *Geochemistry*, 1960. No. 2. pp. 149-163. (In Russ.)
2. Shutov V. D. Grauvakki. In: *Proceedings of the GIN of the USSR Academy of Sciences*. Issue 238. Moscow. Nauka, 1972. pp. 375. (In Russ.)
3. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Fundamentals of lithochemistry*. Saint Petersburg. Nauka, 2000. 479 p. (In Russ.)
4. Beukes N. J., Van Niekerk H. S., Gutzmer J. Post-Gondwana African land surfaces and pedogenic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits gold mine. *South Afr. Journ. of Geology*, 1999. Vol. 102. pp. 65-82.
5. Burke K., Gunnell Y. The African erosion surface: A continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. *Geol. Soc. Of Amer. Memr.*, 2008. Vol. 201. 66p.
6. De Villiers J. The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria. *Geologic. Surv. of S. Afr Handbook*, 1960. No. 2. 263 pp.
7. Dickinson W. R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa G. G. (Eds) *Provenance of Arenites*. Springer, Dordrecht, 1985. Vol. 148. 112p.
8. Dickinson W. R., Beard L. S., Brackenridge G. R., Evjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Linberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of Northern American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geo. Soc. of Amer. Bulletin*, 1983. Vol. 94. pp. 222-235.
9. Frimmel H. E. A giant Mesoarchean crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. In: Kelley K, Golden, HC (Eds) *Building exploration capability for the 21st Century*. Society of Econ. Geologists, 2014. Vol. 18. pp. 209-234.
10. Jafarzadeh M., Hosseini-Barzi M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2008. Vol. 25 (2). pp. 247-260.
11. Malinovsky A. I., Tuchkova M. I. Lithochemistry of the Paleo-island-Arc Complexes in the Orogenic Belts of the Russian Far East. *Russian Journ. Pacif. Geology*, 2010. No. 4. pp. 363-378.
12. McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem., Geophys., Geosystems*, 2001. No. 2 (4). pp. 1021.
13. McLennan S. M., Taylor S. R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journ. of Geol.*, 1991. Vol. 99. pp. 1-21.
14. McLennan S. M., Hemming S., McDaniel D. K., Hanson G. N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: M. J. Johnsson, A. Basu (Eds.), *Processes controlling the composition of clastic sediments*. *Geo. Soc. Of Amer. Spec. Paper*, 1993. Vol. 284. pp. 21-40.
15. Motova Z. L., Donskaya T. V., Gladkochub D. P. The composition and reconstruction of the source area for the late Precambrian terrigenous rocks of the Oselkovaya series (Biryusa Prisyayanie). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2016. No. 7 (4). pp. 25-649.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982. Vol. 299. pp. 715-717.
17. Nesbitt H. W., Young G. M. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journ. Of Geology*, 1989. Vol. 97 (2). pp. 129-147.
18. Pack A., Gutzmer J., Beukes N., Van Niekerk H. Supergene ferromanganese wad deposits derived from Permian Karoo Strata along the late Cretaceous-mid-Tertiary African land surface, Ryedale, South Africa. *Econ. Geol. B.*, 2000. Vol. 95. pp. 203-220.
19. Pettijohn F. J. *Sedimentary Rocks* (Third edition). New York. Harper & Row, 1975. 628 p.

20. Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. Sand and Sand-stones. New York. Springer, 1972. 158 p.
21. Pharoe B. K., Liu K. Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine. *Journ. of Afr Earth Sciences*, 2018. Vol. 143. pp. 79-101.
22. Pharoe B. K., Evdokimov A. N., Gembitskaya I. M., Bushuev Y. Y. Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2020. Vol. 120. 103-372 p.
23. Sklyarov E. V. (ed.). Interpretation of geochemical data. Intermet Engineering. Moscow, 2001. 288 p.
24. Suttner L. J., Basu A., Mack G. M. Climate and the origin of quartz arenites. *Journ. of Sedim. Petrology*, 1981. Vol. 51. pp. 1235-1246.
25. Tinker J., de Wit M., Grotzinger J. Seismic Stratigraphic Constraints on Neoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. *South Afr. Journ. of Geology*, 2002. Vol. 105. pp. 107-134.
26. Van Niekerk H. S., Beukes N. J., Gutzmer J. Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiles, African land surfaces and palaeoclimate change on the Highveld of South Africa. *Journ. of Afr. Earth Sciences*, 1999. Vol. 29. pp. 761-781.
27. Varga A. R., Szakmány G. Geochemistry and provenance of the upper carboniferous sandstones from Borehole Diósvizsló-3 (Tésény Sandstone Formation, SW Hungary). *Acta Mineralogica-Petrographica*, Szeged, 2004. Vol. 45 (2). pp. 7-14.
28. Varga A., Szakmány G., Árgyelán T., Józsa S., Raucsik B., Máthé Z. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study. In: J. Arribas, M. J. Johnsson, S. Critelli (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. *Geologic. Soc. of Amer. Spec. Papers*, 2007. Vol. 420. pp. 221-240.
29. Weltje G. J., Meijer X. D., De Boer P. L. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing. *BasinResearch*, 1998. No. 10. pp. 129-153.
30. Yapaskurt O. V. Stage analysis of lithogenesis. Moscow. MSU, 1994. 142 p.
31. Yudovich Y. E., Ketris M. P. Mineral indicators of lithogenesis. *Syktyvkar. Geoprint*, 2008. 564 p.
32. Zaid S. M. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. *Journ. of Afr. Earth Sciences*, 2012. Vol. 66. pp. 56-71.