ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ПОРОД ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ (НА ПРИМЕРЕ БОЛЬШЕТРОИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД, БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Калашников А.О.¹, Никулин И.И.²

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

² Воронежский государственный университет, Воронеж, iinikulin@gmail.com

Теория и практика пространственного анализа в науках о Земле и ГИС-технологии быстро развиваются с конца 20 века. Однако геологические карты, разрезы (2D) и трехмерные геологические модели по-прежнему строятся преимущественно вручную. Как следствие, они сильно зависят от человеческого фактора. В последнее время предпринимаются попытки автоматизировать процесс построения геологических карт и 3D моделей. Однако зачастую и в этих методах требуется задавать некие априорные геологические правила (например, возрастные отношения различных типов пород), отрисовывать опорные разрезы вручную и т.п. Эти методы обычно применяются к относительно простым (полого залегающим, слабодислоцированным) осадочным толщам или магматическим телам.

Одними из самых сложных пород для картирования являются породы кор выветривания. Породы коры выветривания весьма тонкозернисты (средний размер породообразующих минералов – десятки микронов), зачастую рыхлые, с разнообразными вторичными изменениями, к тому же осложнены брекчиями и включениями реликтов материнских пород. В связи со всем вышесказанным, классифицировать такие породы весьма трудно – не только визуально, но и при изучении с помощью оптического и даже электронного микроскопа. Для вулканических пород, имеющих такие же проблемы, задача решена в общем виде – классификация по химическому составу TAS с использованием пересчета CIPW [1], а для продуктов выветривания (да и вообще осадочных пород) такого единого стандартного решения нет. По аналогии с классификацией вулканических пород, представляется, что классификация пород кор выветривания на основе их химического состава может быть более релевантна, чем по визуальному описанию. Ранее мы разработали метод автоматического картирования месторождения с обучающей выборкой – количественно определенным содержанием породообразующих минералов по результатам оптической и электронной микроскопии [2]. Но зачастую такой эталонной выборки нет, поскольку керн обычно описывается визуально. В качестве объекта для разработки подхода к классификации пород без эталонной выборки, и последующего автоматического 3D геологического моделирования мы выбрали Большетроицкое железорудное месторождение в коре выветривания железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (Белгородская область, рис. 1).

Большетроицкое месторождение является частью Белгородского рудного района. Богатые железные руды в Белгородском районе КМА, имеющие промышленное значение, представлены остаточными корами выветривания. Коры выветривания являются продуктами континентального выветривания железистых кварцитов и залегающих среди них прослоев железистых силикатных сланцев. Породы коры выветривания, как правило, наследуют текстурные признаки и частично минеральный состав исходных материнских пород. Основные рудообразующие минералы – гематит (часто в виде псевдоморфоз по магнетиту, мартит), гётит–гидрогётит, магнетит, сидерит, железистые слюды и гидрослюды, кварц, глинистые минералы, бокситы.

Большетроицкое железорудное месторождение в коре выветривания расположено в юго-западной части Белгородского рудного района и приурочено к крутому изгибу Корочанско-Большетроицкой или Корочанско-Мухинской магнитной аномалии. В структурном отношении месторождение рассматривается как одноименная синклиналь в составе Корочанско-Большетроицкой грабен-синклинали, а последняя является частью Белгородского грабен-синклинория. В ядре Большетроицкой синклинали фиксируются рудоносные породы курской серии нижнего протерозоя; крылья сложены метаморфическими и магматическими образованиями архея. Железные руды сформировались в довизейской (ранняя эпоха каменноугольного периода) коре выветривания, раз-

витой на железистых кварцитах коробковской свиты курской серии (PR_1^{1kr}) [3]. Запасы железных руд (джеспилитов и палеокоры выветривания) на Большетроицком месторождении оценены по категории С2 в количестве 2150 млн. т при среднем содержании 62.4 % $Fe_{общ}$, среди которых рыхлые и слабосцементированные богатые железные руды палеокоры выветривания – по категории С1 в количестве 410 млн. т при среднем содержании 61.5 % $Fe_{общ}$.

Мы использовали результаты разведочного опробования месторождения. Опробование проводилось по трем буровым профилям по 28 скважинам средней глубиной 580 м. Бурение осадочно-

Рис. 1. Геологическая схема Белгородского рудного района [3].

1 – коры выветривания железистых кварцитов и сланцев; 2 – проявления богатых железных руд ($Fe > 52\%$); 3 – выходы железистых кварцитов на поверхность докембрия с маломощной (до 10 м) корой выветривания; 4 – образования оскольской серии; 5 – внутрирудные сланцы коробковской свиты курской серии; 6 – образования стойленской свиты курской серии; 7 – породы архея; 8 – сиениты шебекинского комплекса; 9 – граниты субщелочного атаманского комплекса; 10 – плагиограниты салтыковского комплекса; 11 – тектонические нарушения; 12 – геологические границы. Рамкой показано Большетроицкое месторождение.

го чехла проводилось без отбора керн, опробование начиналось с глубин 420-500 м. Итого взято 1029 проб керн средней длиной 4 м. Для разделения пород на типы мы использовали одну из разновидностей искусственных нейронных сетей (ИНС) – самоорганизующиеся карты Кохонена. Обработывались содержания пяти породообразующих оксидов: Fe_2O_3 , FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO . Совокупность данных случайным образом делилась на три выборки: обучающую (70% от всех проб), тестовую (15%) и проверочную (15%). Топологическая высота карты Кохонена 2, ширина 6. Мера сравнения кластеров – евклидово расстояние. Было выполнено 1000 обучающих циклов с нормальной рандомизацией сети. Проблема оптимального количества кластеров (т.е. типов пород) не решалась – количество кластеров было принято за 12, по аналогии с количеством типов пород, выделенных при визуальном описании керн. Среднее содержание породообразующих элементов в выделенных типах пород и название типов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Среднее содержание породообразующих элементов в типах пород Большетроицкого месторождения, выделенных с помощью искусственной нейронной сети.

	Тип пород											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Богатые руды	Закисные средние руды	Бедные–средние карбонатизированные руды	Бедные руды	Железистые кварциты	Si-Fe-Al породы	Средние кремнистые руды	Средние–богатые руды	Бедные–средние кремнистые руды	Ферриаллиты	Si-Al-Fe породы	Al-Si породы
Кол-во образцов	241	143	48	39	89	25	42	220	93	18	31	40
Fe_2O_3	91.65	81.97	65.72	54.80	48.55	12.22	75.07	87.23	68.90	43.50	20.40	10.88
FeO	2.50	10.02	7.39	21.21	5.47	11.00	3.89	5.45	14.50	8.08	20.99	3.62
SiO_2	1.95	2.39	3.80	3.25	40.33	19.72	15.36	2.37	4.26	8.24	20.23	47.96
Al_2O_3	0.69	1.31	1.16	2.87	1.10	39.06	1.25	0.96	3.42	23.02	21.79	22.98
CaO	0.96	0.75	10.23	3.51	1.08	1.06	1.30	1.09	1.48	4.25	1.69	0.65

Рис. 2. Субмеридиональный разрез автоматической трехмерной модели Большетроицкого месторождения.

Автоматическое построение трехмерной геологической модели месторождения заключалось в следующем.

1. Интерполяция содержания требуемых для классификации химических элементов (Fe_2O_3 , FeO , Al_2O_3 , SiO_2 и CaO) в объем месторождения и объединение получившихся пяти блочных моделей в один файл (таблицу).

2. Обработка объединенной таблицы с помощью ранее обученной ИНС – присваивание каждому блоку индекса типа пород.
3. Визуализация блочной модели в требуемом сечении. Это и есть конечный результат (рис. 2).

Предлагаемый подход к автоматическому геологическому картированию, представляется достаточно универсальным и при этом довольно простым. Самый сложный этап здесь – это нахождение алгоритма пересчета имеющихся переменных в типы пород. Но и это не такая большая проблема, если при разведке месторождения использовать «сплошное» определение минерального (модального) состава пород с помощью автоматизированных систем типа QEMSCAN [4], т.е. создавать представительную обучающую выборку. Кроме того, тот факт, что месторождения зачастую (если не всегда) являются внутренне скоррелированными системами, позволяет надеяться, что сильные связи между химическим и минеральным составом можно будет выявить для любого месторождения.

Опробование выполнялось Белгородской ГДК в рамках разведочных работ в 2006-2010 гг. Исследование было поддержано Российским научным фондом, грант 16-17-10173.

Литература

1. Le Bas M.J., Maitre R.W.L., Streckeisen A., Zanettin B. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram // *Journal of Petrology*. 1986. V. 27. № 3. P. 745-750.
2. Kalashnikov A.O., Ivanyuk G.Y., Mikhailova J.A., Sokharev V.A. Approach of automatic 3D geological mapping: the case of the Kovdor phoscorite-carbonatite complex, NW Russia // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 6893.
3. Никулин И.И., Савко А.Д., Меркушова М.Ю. Типы гипергенных богатых железных руд Белгородского района Курской магнитной аномалии // *Вестник ВГУ. Серия Геология*. 2015. V. 3. P. 71-82.
4. Mackay D.A.R., Simandl G.J., Ma W., Redfearn M., Gravel J. Indicator mineral-based exploration for carbonatites and related specialty metal deposits — A QEMSCAN® orientation survey, British Columbia, Canada // *Journal of Geochemical Exploration*. 2016. V. 165. P. 159-173.