

## ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

И.С. Соболев

Томский политехнический университет, Томск, Россия, geolsob@yandex.ru

## GAMMA-RAY SPECTROMETRY SURVEY FOR MINERAL RESOURCES EXPLORATION

I.S. Sobolev

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

В докладе дана информация о применении гамма-спектрометрической съемки при поисках флюидогенных месторождений полезных ископаемых. Сделан обзор основных способов обработки гамма-спектрометрических данных.

The report is giving information on the gamma-spectrometric survey for exploration of flyuidogenic mineral deposits used. A review of the main methods of gamma-spectrometric data processing are giving.

Интерес к полю радиоактивности, как к полезной информации при решении геологических задач, возник сразу с появлением методик и аппаратуры, позволяющих фиксировать радиоактивное излучение горных пород в полевых условиях. Первые предпосылки для использования радиоактивных методов при поисках месторождений полезных ископаемых были получены на объектах, где значительную роль в мобилизации и миграции ценного компонента играли флюидогенные системы [2, 26, 27]. Появление гамма-спектрометрической аппаратуры, делающей возможным полевое изучение радиоактивных калия, урана и тория в природных объектах, определило широкое применение гамма-спектрометрии при проведении геологических работ различного назначения. Особую привлекательность данному методу придают относительно невысокие временные и материальные затраты на съемку больших территорий в аэрогеофизическом варианте работ.

Однако, гамма-спектрометрические исследования имеют ограничения по природным условиям проведения работ, что обусловлено значительным ослаблением интенсивности гамма-активности с расстоянием от его источника и наличием ландшафтов, являющихся естественными экранами для гамма-излучения. По этим причинам поиски рудных месторождений на территориях с большой мощностью рыхлых отложений или широким развитием аллохтонных осадков для гамма-спектрометрии являются проблемными. Отрицательно на информативности метода сказываются заболоченность и интенсивное развитие травяно-мохового слоя.

Аэрогамма-спектрометрические съемки широко применялись и применяются при геологическом картировании крупных малоизученных территорий, поисках рудного сырья, нефти и газа, картировании почв, радиоэкологическом мониторинге. Данная публикация затрагивает некоторые аспекты гамма-спектрометрических поисков месторождений полезных ископаемых.

Гамма-спектрометрия, как поисковый метод, не обходя радиактивные руды, наиболее широко признана получила при поисках флюидогенных месторождений ряда металлов, а также углеводородных скоплений. Опосредованно гамма-спектрометрическое картирование применяется для выделения интрузивных массивов,

с которыми связаны руды магматического происхождения.

Касательно гидротермальной рудной минерализации, объектом поисков являются окolorудные изменения пород. При этом установлено, что продукты калиевого метасоматоза в основном ассоциируют с месторождениями халькофильных элементов. В то время как для ряда месторождений литофильных металлов характерны гидротермальные минералы, преимущественно концентрирующие торий [8–12, 19, 21, 23 и др.].

Трансформацию полей концентрации радиоактивных элементов в областях эпигенетического влияния нефтегазовых скоплений связывают с формированием иллитов и перераспределением соединений урана [1, 4, 18, 33, 36 и др.].

В настоящее время поисковые работы все в большей мере направлены на выявление объектов, слабо проявленных в геохимических полях. Время контрастных аномалий, по всей видимости, прошло. Отклонения от фоновых значений концентраций естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) на участках наложенных изменений зачастую находятся на уровне погрешности измерений и случайной ошибки. К тому же, за исключением радиоактивных руд, гамма-спектрометрия дает косвенные прогнозно-поисковые признаки, а для фиксируемых аномальных радиогеохимических отклонений часто характерна полигенность. Как следствие возникает необходимость введения дополнительных критериев для определения связи радиогеохимических неоднородностей с тем или иным геологическим процессом. Следует отметить, что проблема выделения слабо проявленных радиогеохимических аномалий и их генетической идентификации не нова.

Один из наиболее старых и трудоемких способов снижения влияния природных условий на флуктуацию радиогеохимического поля – это переход от измеренных содержаний ЕРЭ к их коэффициентам концентрации с использованием информации по геологическому и ландшафтному строению территорий. Основным недостатком этого подхода является субъективизм при оконтуривании областей различных классификационных уровней ландшафтов. По причине условной точности проведения границ на схемах ландшафтно-геохимичес-

кого районирования в процессе обработки результатов съемки при переходах из одной ландшафтной области в другую часто происходит “ошибочное” причисление точек измерений к тому или иному ландшафту. Поэтому после нормирования гамма-спектрометрических данных на картографических границах ландшафтов, характеризующихся существенными различиями в уровнях накопления радиоактивных элементов, в значениях коэффициентов концентраций могут возникать ложные аномальные эффекты. В значительной мере эта проблема устраняется созданием геоморфологических и эрозионных моделей территорий с привлечением данных дистанционного зондирования [22].

Оценка совокупного влияния приповерхностных факторов часто осуществляется посредством фильтрации в скользящих математических окнах. Это давно известная и сравнительно простая процедура установления трендов, содержащихся в геохимических данных [20]. Главная сложность заключается в выборе способа и параметров аппроксимации поверхностей. Несмотря на то, что в современных прикладных программах обработки геофизической и геохимической информации реализованы автоматизированные процедуры тренд-анализа, интерпретатору приходится делать перебор множества вариантов. При этом правильность в дальнейшем используемой фильтрации невозможно оценить без знания основных черт геологического и ландшафтного строения изучаемой территории.

Традиционно для картирования гидротермально-метасоматических изменений привлекают отношения между концентрациями радиоактивных элементов. Однако, значения индикаторных отношений зависят и от других геологических факторов, не связанных с гидротермальными изменениями. К ним относятся тип пород и их возраст, уровень эрозионного среза магматических комплексов, удаленность и петрографический состав областей питания осадочных пород и др. [3, 12, 13, 16, 17, 25]. Как следствие, диапазоны изменения значений отношений концентраций радиоактивных элементов в продуктах гидротермальной деятельности и в неизмененных горных породах нередко совпадают.

Известны показатели, объединяющие в расчете все три естественных радиоактивных элемента. Но их применение должно учитывать радиогеохимическую специфику искомым наложенных процессов. Например, так называемый F-параметр ( $K/(Th*U)$ ) больше направлен на выявление продуктов калиевого метасоматоза [5]. Показатель DRAD, как разность отклонений концентраций калия и урана от их фоновых значений, предварительно нормированных по содержанию тория, ориентирован на изменения, приводящие к перераспределению калия и урана [35]. Более универсальной является методика фильтрации гамма-спектрометрических данных с последующим определением доминант участия радиоактивных элементов в аномальном распределении [8]. Большое признание получил способ оптического синтеза информации, осуществляемого по значениям содержания ЕРЭ в виде смеси красного – зеленого – синего цветов [28, 30].

Незаслуженно редко используемую, но весьма по-

лезную информацию, несет дисперсия радиоактивных элементов. Отмечено, что в пределах территорий однородного радиогеохимического распределения компонентов трудно рассчитывать на выявление эндогенных скоплений полезных компонентов в достаточных количествах для их освоения [11].

Весьма информативны при поисках флюидогенных месторождений характеристики корреляционных связей между ЕРЭ [6, 7, 10, 14]. Корреляционный анализ имеет слабую зависимость от абсолютных значений исходных значений и низкую чувствительность к погрешностям их увязки. Кроме того, при корреляционном анализе по площади или по профилям путем варьирования размерами статистического окна возможно минимизировать влияние ландшафтно-геоморфологических и других природных факторов.

Таким образом, помимо получаемых в результате гамма-спектрометрических измерений значений концентраций трех радионуклидов для выделения участков наложенных гидротермально-метасоматических изменений возможно использование целой группы показателей, характеризующих особенности радиогеохимического поля. Возникает необходимость объединения, классификации и выбора информативного сочетания поисковых признаков. Для этого рассчитываются многофакторные модели поля радиоактивности, осуществляется дифференциация изучаемых территорий на основе кластерного и дискриминантного анализа. Следует отметить, что гамма-спектрометрия как моно метод при поисках полезных ископаемых практически не используется, а входит в комплекс геофизических и геохимических съемок. Поэтому часто в многомерную статистическую обработку данных включается весь массив имеющейся геолого-геофизической информации, включая данные о концентрациях и индикаторных показателях ЕРЭ [15, 24, 29, 32, 34].

Обобщая, можно констатировать, что гамма-спектрометрическая съемка продолжает быть актуальным методом для решения целого ряда геологических задач. В настоящее время возможности полевой аппаратуры на основе сцинтилляторов, по всей видимости, достигли своих пределов. Развитие гамма-спектрометрических исследований в основном происходит за счет совершенствования способов обработки данных и приемов выделения слабовыраженного “полезного” сигнала.

#### Литература

1. Алексеев Ф.А. Радиометрический метод поисков нефти и газа (о природе радиометрических и радиогеохимических аномалий в районе нефтяных и газовых месторождений) // Сб. ст. по использованию радиоактивных излучений и изотопов в геологии нефти. – М. : Гостоптехиздат, 1959. – С. 3–26.
2. Богоявленский Л.Н. Радиометрическая разведка нефти // Известия Института прикладной геофизики ВСНХ СССР. – 1927. – Вып. 3. – С. 113–123.
3. Гавшин В.М. Радиогеохимическая специфика крупных осадочных бассейнов Западной и Средней Сибири // Геология и радиогеохимия Средней Сибири. – Новосибирск : Наука, 1985. – С. 173–192.

4. Германов А.И. Геохимические и гидродинамические условия возникновения эпигенетической минерализации в нефтеводоносных горизонтах // *Геохимия*. – 1961. – № 2. – С. 99–109.
5. Ефимов А.В. Мультипликативный показатель для выделения эндогенных руд по аэрогамма-спектрометрическим данным // *Методы рудной геофизики. Гамма-спектрометрия при поисках рудных месторождений*. – Л. : Геофизика, 1978. – С. 40–43.
6. Лященко Н.Г. Урановые рудообразующие системы // *Разведка и охрана недр*. – 2010. – № 1. – С. 25–31.
7. Результаты интерпретации материалов аэрогамма-спектрометрической съемки в южной части Сибирской платформы / Н.Г. Лященко, Е.Н. Махнач, Г.М. Тригубович и др. // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2010. – № 2. – С. 39–48.
8. Островский Э.Я. Радиоактивные аномалии как индикаторы рудного процесса // *Докл. АН СССР*. – 1975. – Т. 221, № 1. – С. 201–204.
9. Портнов А.М., Островский Э.Я. Антагонизм калия и тория в зонах адуляризации // *Докл. АН СССР* – 1972. – Т. 204, № 6. – С. 1463–1465.
10. Портнов А.М. Радиогеохимический поиск руды // *Природа*. – 1984. – № 5. – С. 99–105.
11. Радиогеохимические ореолы в золоторудных полях Западного Узбекистана (по данным гамма-спектрометрии) / под ред. Ф.П. Кренделева. – Новосибирск : Недра, 1976. – 52 с.
12. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск : Гео, 2002. – 536 с.
13. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л. : Недра, 1974. – 231 с.
14. Прогнозирование и поиски месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами / И.С. Соболев, Л.П. Рихванов, Н.Г. Лященко и др. // *Геология нефти и газа*. – 1999. – № 7–8. – С. 19–24.
15. Abedi M., Norouzi G.-H. A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2016. – [Vol.] 46. – P. 31–44.
16. Adams J.A.S., Weaver C.E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes – an example of geochemical facies // *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*. – 1958. – [Vol.] 42. – P. 387–430.
17. Adams J.A.S., Osmond J.K., Rogers J.J.W. The geochemistry of thorium and uranium // *Physics and Chemistry of the Earth*. – New York : Pergamon Press, 1959. – Vol. 3. – P. 398–448.
18. Al-Shaieb Z. Uranium potential of Permian and Pennsylvanian sandstones in Oklahoma // *AAPG Bulletin*. – 1977. – [Vol.] 61. – P. 360–375.
19. Bennett R. Exploration for hydrothermal mineralization with airborne gamma-ray spectrometry // *Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. – 1971. – Special Vol. 11. – P. 475–478.
20. Davic J.C. *Statistics and data analysis in geology*. – 3rd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2002. – 638 p.
21. Davis J.D., Guilbert J.M. Distribution of the radioelements potassium, uranium and thorium selected porphyry copper deposits // *Economic Geology*. – 1973. – [Vol.] 68 (2). – P. 145–160.
22. Dickson B.L., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A. Interpretation aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1996. – [Vol.] 57. – P. 75–88.
23. Dickson B.L., Scott K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors // *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*. – 1997. – [Vol.] 17(2). – P. 187–200.
24. Eberle D.G., Paasche H. Integrated data analysis for mineral exploration: A case study of clustering satellite imagery, airborne gamma-ray, and regional geochemical data suites // *Geophysics*. – 2012. – [Vol.] 77 (4). – P. B167–B176.
25. Galbraith J.H., Saunders D.F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements // *Journal of Geochemistry Exploration*. – 1983. – [Vol.] 18. – P. 49–73.
26. Gangadharam E.V., Kameswara Rao K., Aswathanarayana U. Distribution of radioactivity in the Mosaboni Cooper Mine, Bihar, India // *Economic Geology*. – 1963. – [Vol.] 58 (4). – P. 506–514.
27. Gross W.H. Radioactivity as a guide to ore // *Economic Geology*. – 1952. – [Vol.] 47 (7). – P. 722–742.
28. Irvine R.J., Robertson I. Interpretation of airborne geophysical data over Ok Tedi porphyry copper – gold ore body using image processing techniques // *Ext. abstr. 5th A.S.E.G. Conference Exploration Geophysics*. – 1987. – [Vol.] 8. – P. 103–107.
29. Classifying airborne radiometry data with agglomerative hierarchical clustering: A tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana) / G. Martelet, C. Truffert, B. Tourliére et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2006. – [Vol.] 8. – P. 208–223.
30. Milligan P.R., Gunn P.J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. AGSO // *Journal of Australian Geology and Geophysics*. – 1997. – [Vol.] 17(2). – P. 63–75.
31. Moxham R.M., Foote R.S., Bunker C.M. Gamma – ray spectrometer studies of hydrothermal altered rocks // *Economic Geology*. – 1965. – [Vol.] 60 (4). – P. 653–671.
32. Pires A.C.B., Harthill N. Statistical analysis of airborne gamma ray data for geologic mapping purposes: Crixas Itapaci area, Goias, Brazil // *Geophysics*. – 1989. – [Vol.] 54 (10). – P. 1326–1332.
33. Pirson S.J. Geological, geophysical, and geochemical modification of sediments in the environments of oil fields. – Dallas, Texas : Southern Methodist University Press, 1969. – P. 159–186.
34. Ranjbar H., Masoumi F., Carranza E.J.M. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – [Vol.] 32. – P. 3309–3327.
35. Relation of thorium – normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations / D.F. Saunders, K.R. Burson, J.F. Branch et al. // *Radiometric surveys in petroleum exploration: Association of Petroleum*

*Geochemical Explorationists. Special Publication. – 1995. – [Vol.] 3. – P. 96–110.*

36. Sikka D.B., Shives R.B.K. *Radiometric surveys of the Redwater oil field, Alberta: Early surface exploration case history suggest mechanism for the development of*

*hydrocarbon – related geochemical anomalies // Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. AAPG Studies in Geology. – 2002. – No. 11. – P. 243–297.*

## **ФАЗА “X” $Ca_2UO_5 \cdot 2-3H_2O$ – УСТОЙЧИВАЯ ФОРМА СВЯЗЫВАНИЯ УРАНА В ЗОНЕ ГИПЕРГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИОРДАНИИ)**

Э.В. Сокол<sup>1</sup>, С.А. Новикова<sup>1</sup>, С.Н. Кох<sup>1</sup>, Х.Н. Хори<sup>2</sup>, Ю.В. Сереткин<sup>1,3</sup>, И.А. Сокол<sup>3</sup>,  
Е.Н. Нигматулина<sup>1</sup>, С.В. Горяйнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, sokol\_ag@mail.ru, sokol@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Университет Иордании, Амман, Иордания, khouryhn@ju.edu.jo

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия, yuvs@igm.nsc.ru, ihatealc@gmail.com

## **X-PHASE $Ca_2UO_5 \cdot 2-3H_2O$ AS A LONG-TERM RESISTANT NATURAL COMPOUND FROM SUPERGENE ZONE: CASE STUDIES FROM THE CENTRAL JORDAN**

E.V. Sokol<sup>1</sup>, S.N. Novikova<sup>1</sup>, S.N. Kokh<sup>1</sup>, H.N. Khoury<sup>2</sup>, Yu.V. Seryotkin<sup>1,3</sup>, I.A. Sokol<sup>3</sup>,  
E.N. Nigmatulina<sup>1</sup>, S.V. Goryainov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Department of Geology, The University of Jordan, Amman, Jordan

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Novosibirsk, Russia

A set of primary calcium uranium (VI) oxides or calcium uranates with CaO-to- $UO_3$  ratio from 1:1 to 6:1 ( $CaUO_4$ ,  $Ca_2UO_5$ ,  $Ca_3UO_6$ ,  $Ca_4UO_7$ ,  $Ca_5UO_8$ ,  $Ca_6UO_9$ ) as well as their supergene alteration products were found as accessories in the combustion-metamorphic marbles of Tulul Al Hammam area in central Jordan. The main secondary phase after of anhydrous Ca uranates is  $Ca_2UO_5 \cdot 2-3H_2O$  phase, which has low crystallinity and may be considered as higher-water analogue of well-known X-Phase of Atkinson ( $Ca_2UO_5 \cdot 1,3-1,7H_2O$ ). Water-bearing and fluorine-substituted Ca-U(VI) oxides are the next important secondary products after primary minerals. The exact evidences for the long-term stability of  $Ca_2UO_5 \cdot 2-3H_2O$  phase was obtained for the first time from the natural rocks and environments.

Развитие ядерной энергетики привело к прогрессивному росту объемов ядерных отходов, одной из составляющих которых являются двойные оксиды урана. Уранаты щелочноземельных элементов играют важную роль как непосредственно в составе отработанного ядерного топлива, так и в местах захоронения ядерных отходов. Соединения, синтезируемые в системах  $UO_3$  ( $U_3O_8$ ,  $UO_2$ ) – оксиды щелочноземельных элементов (MgO, CaO, SrO, BaO) рассматривают как наиболее перспективные/устойчивые для долгосрочного связывания (иммобилизации) урана в цементных/бетонных матрицах и саркофагах. Поэтому синтез и прогноз долгосрочного поведения соответствующих двойных оксидов и/или уранатов в условиях их захоронения в различных средах остаются неизменно актуальной проблематикой исследований уже 50 лет [1, 2, 5, 7, 9, 12–14, 16]. В зоне гипергенеза поведение урана и подвижность его соединений главным образом определяет  $U^{+6}$  через посредство химических реакций растворения-осаждения твердых фаз (кристаллических и аморфных), а также сорбции  $U^{+6}$  на различных минеральных (главным образом силикатных) матрицах [8].

В мировой практике цементы и бетоны самые часто употребляемые материалы для изоляции токсичных и радиоактивных отходов, поскольку их отличает дешевизна производства, простота использования, высокая прочность, низкая проницаемость, устойчивость к различным видам коррозии на протяжении, как минимум, 100 лет (реальный срок тестирования бетонных конструкций). Транспорт радионуклидов в окружающую среду из бетонных/цементных матриц блокируется не только посредством их механической изоляции, но и путем химического связывания в малорастворимые соединения, главным образом, Ca-содержащие, а также посредством сорбции на отдельных фазах матрицы [5, 8].

Цементы и бетоны, вплоть до момента их полного химического разрушения и карбонатизации, обладают высоким потенциалом  $Ca^{2+}$  и способны длительно поддерживать высокие величины pH поровых растворов (от pH=13,4 – на начальном этапе гидратации портландцемента до pH=12–10,5 – на протяжении всего срока эксплуатации сооружений, лишенных значительных механических повреждений). Это обеспечивает условия для длительного связывания в цементных/бетонных матри-