

ГЛУБИННЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНЫХ U-V-TR-Sc МЕСТОРОЖДЕНИЙ В МЕТАСОМАТИТАХ НА УКРАИНСКОМ ЩИТЕ

А. А. Калашник

КЛАНУ, Кировоград, Украина

Поступила в редакцию 05 января 2015 г.

Аннотация: рассмотрены результаты изучения закономерностей формирования и размещения крупных U-V-TR-Sc месторождений в карбонатно-натриевых метасоматитах в Криворожском урановорудном районе с учетом особенностей глубинного строения литосферы Украинского щита (УЩ). Представлены принципиально новые глубинные факторы формирования крупных месторождений этого типа на УЩ.

Ключевые слова: крупные U-V-TR-Sc месторождения, глубинные факторы оруденения, мантийные рудогенные компоненты

DEEP FACTORS OF FORMING OF MAJOR U-V-TR-Sc DEPOSITS IN MATASOMATITES WITHIN THE UKRAINIAN SHIELD

Abstract: the results of the study of regularities of formation and placement of major U-V-TR-Sc deposits in carbonate-sodium metasomatites in Krivorozhsky uranium ore district, taking into account the features of deep structure of lithosphere of the Ukrainian shield (UkrSh) were considered. Principally new deep factors of forming of major deposits of this type within the Ukrainian shield are presented in the article.

Keywords: major U-V-TR-Sc deposits, deep mineralization factors, ore-forming mantle components

Наиболее важным этапом уранового оруденения для Украинского щита (УЩ) был период 1800–1750 млн лет с характерным формированием крупных промышленных месторождений урана в среднетемпературных карбонатно-натриевых метасоматитах в Кировоградском и Криворожском урановорудных районах.

В урановых рудах месторождений в карбонатно-натриевых метасоматитах Кировоградского рудного района отмечаются повышенные содержания многих элементов: Pb, Zn, Be, V, Zr, TR, P, Au. Однако концентрации сопутствующих элементов не достигают промышленных уровней и урановые руды характеризуются как монометалльные. Состав рудных альбититов месторождений Криворожского урановорудного района существенным образом отличается от альбититов Кировоградского рудного района того же возраста и генезиса, широчайшим спектром элементов-примесей, достигающих промышленных содержаний – Sc, V, Zr, TR, P, повышенным содержанием Ge, Cu, Au, Ag.

Природа рудных ассоциаций обсуждается во многих работах [1, 2, 3, 4 и др.], однако факторы, оказавшие решающее влияние на возникновение различных типов урановых рудных парагенезисов, являются дискуссионными. В такой ситуации логичным является проведение анализа особенностей формирования и закономерностей пространственного размещения крупных по запасам U-V-TR-Sc месторождений в Криворожском рудном районе (рис. 1). Это позволит установить доминирующие факторы их формирования и разработать принципиально новые подходы к

оценке перспектив выявления новых крупных уран-полиметалльных месторождений в пределах Украинского щита (УЩ).

Выявление причин формирования комплексных уран-полиметалльных руд необходимо начать с анализа свойств химических элементов, входящих в сформированный парагенезис.

Уран по сочетанию большого заряда, координационного числа и размеру иона не похож ни на один из компонентов сформированного парагенезиса Первомайского и Желтореченского комплексных (Fe-U-V-TR-Sc) месторождений (табл.1). Однако ассоциация этих элементов в рудах обусловлена их физико-химическими общностями. Скандий и ванадий вместе с железом относятся к так называемым переходным элементам по электронной конфигурации, у которых в валентном слое N находится два электрона и достраивается слой M (табл.1). Подобная специфика строения атомов указанных переходных элементов приводит к большому сходству физических и химических свойств V, Sc, Fe что способствует их совместному нахождению во многих природных соединениях. Эти элементы (V, Sc, Fe) очень близки по величине атомной массы, атомных объемов, плотностей и других свойств (табл. 1), что определяет их чрезвычайно важную особенность – геохимическое сродство. Общим для V, Fe, U является их переменная валентность.

Основные геохимические черты элементов в значительной степени определяются их способностью образовывать соединения с кислородом, фтором, серой. Уран, согласно исследованиям Летникова Ф. А.,

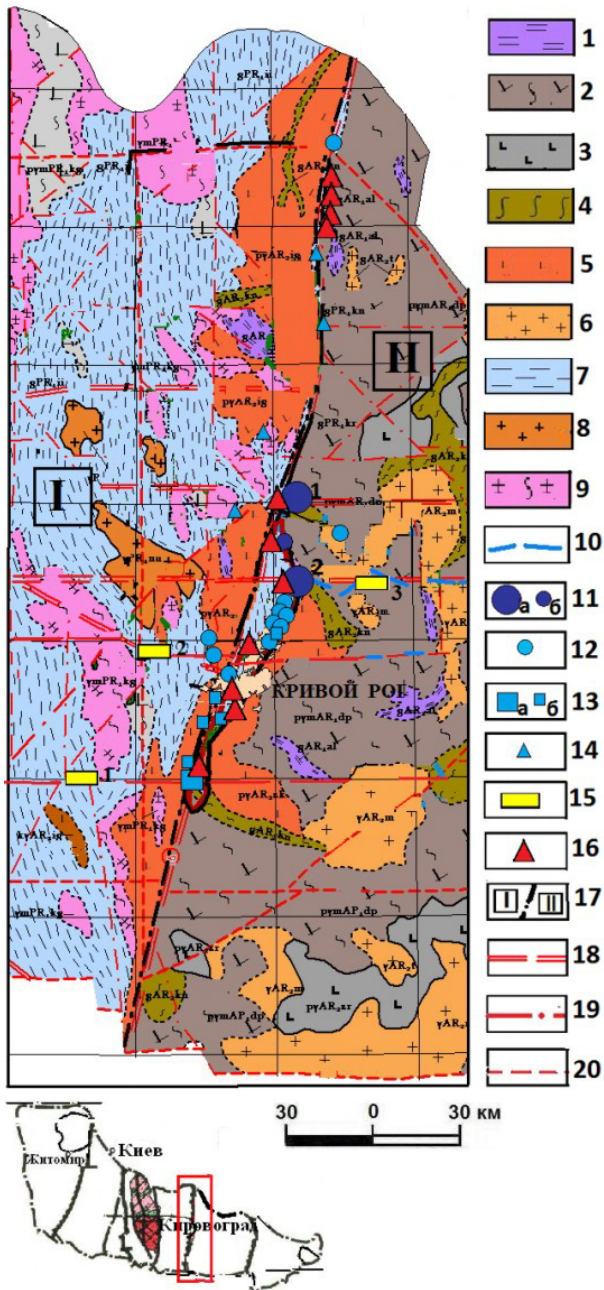


Рис. 1. Схема размещения эндогенных месторождений урана Криворожского рудного района, совмещенная с геолого-структурной основой докембрийских образований (с использованием материалов КП «Кировгеология»). Условные обозначения: 1 – метаморфизованные вулканогенно-осадочные формации (AR₁); 2 – формация ультраметаморфических тоналитов (AR₁); гранит-зеленокаменная ассоциация: 3 – формация интрузивных диоритов и плагиигранитов (AR₂), 4 – зеленокаменная толща (AR₂); 5 – формация ремобилизованных ультраметаморфических плагиигранитов (AR₂); 6 – формация регрессивных ультраметаморфических гранитов (AR₂); 7 – метаморфизованные осадочные и вулканогенно-осадочные формации (PR₁); 8 – формация интрузивных чарнокитоидов и трахитоидных гранитов (PR₁), 9 – формация ультраметаморфических гранитов (PR₁), 10 – девладовский комплекс (перидотиты, габбро-перидотиты) (AR₃); эндогенные урановые объекты: 11 – комплексные U-V-TR-Sc гидротермального типа в карбонатно-натриевых метасоматитах ((PR₁)² 1800-1750 млн лет): а – месторождения: 1 – Желтореченское, 2 – Первомайское; б – Анновское рудопроявление; 12 – рудопроявления урана гидротермального типа в минерализованных зонах дробления в породах кристаллического фундамента; 13 – урановорудные объекты

метаморфогенного типа в конгломератах и песчаниках ((PR₁) ~2400 млн лет): а – Николо-Козельское месторождение, б – рудопроявления; 14 – рудопроявления гидротермально-метасоматические TR-Th-U формации в кремний-калиевых метасоматитах и пегматоидных гранитах (PR₁); 15 – месторождения урана экзогенно-инфильтрационного типа: 1 – Сафоновское, 2 – Христофоровское, 3 – Девладовское; 16 – месторождения железистых кварцитов; 17 – границы мегаблоков: I – Ингульский, II – Среднеприднепровский; 18 – глубинные мантийные разломы, 19 – региональные коровые разломы, 20 – крупные локальные разломы.

в группе элементов Zr, Ta, Nb, TR, V, U, Th, Y, F, V характеризуется высокой степенью сродства к кислороду и фтору [6]. Степень сродства V к кислороду и степень его халькофильности возрастают по мере увеличения его валентности. Однако чрезвычайно близкое значение его атомного объема к железу указывает на тенденцию к появлению у ванадия сидерофильных свойств и предпочтительная геохимическая связь у этого элемента с железом проявлена вполне отчетливо. Переменная валентность Fe, V способствует образованию комплексных соединений. V проявляет высокую степень сродства к галогенам, образуя целый ряд галогенидов и оксогалогенидов. Склонность V к образованию галогенидов способствует его высокой миграции в мантии, чем, вероятно, объясняется его тесная связь с U, характеризующимся высоко проявленными окси- и фторофильными свойствами и также с TR. В отличие от U, V и TR, менее подвижны в мантии Sc и Fe [7]. Однако Sc, Y, La и лантаноиды близки по химическим и физическим свойствам. В связи с тем, что по свойствам скандий близок к Fe²⁺, TR, Hf, Th, U, Zr, основная его масса рассеивается в минералах, содержащих эти элементы. Имеет место изовалентное замещение скандием элементов группы TR, особенно в существенно иттриевых минералах. Для V, Sc в эндогенных процессах характерны галогенные комплексы, которые характерны и для U. Вероятно, эти обстоятельства играют немаловажную роль в парагенетических ассоциациях указанных элементов в эндогенных образованиях.

Таким образом, одной из предпосылок формирования комплексных крупных по запасам U-V-TR-Sc руд в карбонатно-натриевых метасоматитах Криворожского рудного района является общность физико-химических свойств указанных элементов, переменная валентность, склонность к образованию комплексных соединений, в том числе оксигалоидных, способность к инверсии форм миграции.

Урановое и ванадий-скандиевое оруденение в Криворожском урановорудном районе изучено рядом исследователей (Белевцев Я. Н. [8], Борисенко Л. Ф. [7], Тарханов А. В. [9], Солодов Н. А. [10] и др.). Редкометалльные (ванадий-скандиевые) метасоматиты развиты в зонах карбонатно-щелочного метасоматоза на Желтореченском комплексном железорудном и урановорудном месторождении, в меньшей мере на Первомайском месторождении и Анновском рудопроявлении и очень незначительно проявлены за пределами этих объектов [3]. Наиболее значительные количества ванадия установлены в зонах натриевого

Физические и химические постоянные некоторых элементов парагенезиса комплексных руд Желтореченского и Первомайского месторождений (по [5]).

| Атомный номер | Элемент | Атомная масса (молярная масса) а. е. м. (г/моль) | Радиус атома, пм | Электронная конфигурация | Степени окисления | Энергия ионизации кДж/моль (эВ) | Плотность (при н. у.) г/см ³ | Температура плавления К | Молярный объём см ³ /моль | Радиус иона пм |
|---------------|---------|--|------------------|--|-------------------|---------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 21 | скандий | 44,955 (6) | 162 | [Ar] 3d ¹ 4s ² | 3 | 630,8 (6,54) | 2,99 | 1814 | 15,0 | (+3e) 72,3 |
| 23 | ванадий | 50,941 (1) | 134 | [Ar] 3d ³ 4s ² | 5, 4, 3, 2, 0 | 650,1 (6,74) | 6,11 | 2160 | 8,35 | (+5e)59 (+3e)74 |
| 26 | железо | 55,847 (2) | 126 | [Ar] 3d ⁶ 4s ² | 6, 3, 2, 0 | 759,1 (7,87) | 7,874 | 1812 | 7,1 | (+3e) 64 (+2e) 74 |
| 92 | уран | 238,02891 (3) | 138 | [Rn] 5f ³ 6d ¹ 7s ² | 6, 5, 4, 3 | 686,4 (7,11) | 19,05 | 1405,5 | 12,5 | (+6e) 80 (+4e) 97 |

метасоматоза, развитых по породам криворожской серии и залегающих между Желтореченским комплексным месторождением и Анновским карьером СевГОКа Криворожско-Кременчугской зоны разломов (рис. 1).

Рудовмещающими являются различные типы метасоматитов: альбититы, микроклинит-альбититы, эгириниты, натриево-карбонатные и др. С ними связаны разнообразные руды: железистые, урановые, ванадий-скандиевые, циркониевые, редкоземельные, апатитовые и др. [3]. Фаціальное разнообразие метасоматитов определялось вариациями исходного состава вмещающих пород, температуры и щелочности растворов. В Криворожско-Кременчугской зоне выделяются следующие последовательные стадии метасоматоза: 1) магнезиально-железистый (железородный), 2) щелочной (натриевый), 3) карбонатный, 4) окварцевание (материалы КП «Кировгеология»). На этапе раннего щелочного метасоматоза выделено две сблизженные самостоятельные фазы: 1) ошелачивание куммингтонита с переотложением железа и образованием новой генерации магнетита; 2) малакон-апатитовая с выделением эгирина 1 по рибекиту и куммингтониту, а в микросланцах альбита 1 в парагенезисе с малаконом и апатитом. Далее проходил этап карбонатного метасоматоза, в котором выделено две стадии: 1) образование ферро-доломита и доломита, замещающих выделенные минералы (безрудная), 2) доломитовая рудная с образованием рудных тел, с уранинитовой минерализацией. Более поздняя стадия карбонатизации проходила с развитием ванадиевого, в том числе скандиевоносного акмита [3]. Абсолютный возраст уранинита, настурана и малакона Желтореченского месторождения (U-Pb метод), составляет 1770 млн. лет [9].

Метасоматиты в комплексных Желтореченском и Первомайском месторождениях в том числе рудоносные, зональны (рис. 2).

Комплексные скандий-ванадий-редкометалльные руды в Криворожском урановорудном районе преимущественно и генетически связаны с зональными телами натриевых метасоматитов [9]. Рудолокализирующей скандиевой формацией являются карбонатно-(Mg, Ca)-щелочные (Na) метасоматиты, которые являясь полиминеральными породами, вмещают разности, обогащенные богатой ассоциацией химических

элементов и потому являются комплексными рудами с промышленными концентрациями Sc, V, Zr, TR, P, U [3]. Формирование урановорудных альбититов и ванадий-редкометалльно-скандиевых руд представляет звенья единого метасоматического процесса, который практически синхронно проявился в тех или иных местах Криворожско-Кременчугского разлома в зависимости от физико-химических и вещественных обстановок.

Вопрос об источнике натриевых растворов, сохранивших скандий и ванадий является дискуссионным. По основным гипотезам это: 1) растворы скрытых глубинных гранитных интрузий (Казанский В. И. [2]), 2) метаморфогенные растворы (Смирнов В. И. [4]).

Рассматривая мантию как основной источник рудоносных компонентов, нами выявлен ряд глубинных факторов формирования крупных месторождений урана УЩ [11]: 1) высокая степень зрелости литосферы мощностью более 160-180 км, является главным фактором возможности создания петрологических условий для масштабной мантийной генерации ураноносных флюидов; 2) верхнекоровыми индикаторами зрелости литосферы вследствие масштабного энергопереноса из флюидизированной мантии являются: а) гранито-гнейсовый слой высокой или повышенной мощности; б) аномально выраженная калиевая радиогеохимическая специализация метаморфического субстрата верхней части земной коры; 3) наличие разломов транслитосферного проникновения, способных достигать гипсометрического уровня астеносферных областей масштабной генерации мантийных ураноносных флюидов является определяющим структурным фактором для реализации процесса формирования промышленных месторождений урана УЩ из мантийных рудоносных компонентов на верхних структурных этажах земной коры в аномальных сегментах литосферы высокой степени зрелости.

Подобно монометалльным месторождениям урана Кировоградского рудного района, U-V-TR-Sc месторождения Криворожского рудного района имеют наложенный эпигенетический характер по отношению к структурно-формационным комплексам земной коры, проявляют выраженную связь с особенностями строения глубинных оболочек Земли (рис. 3).

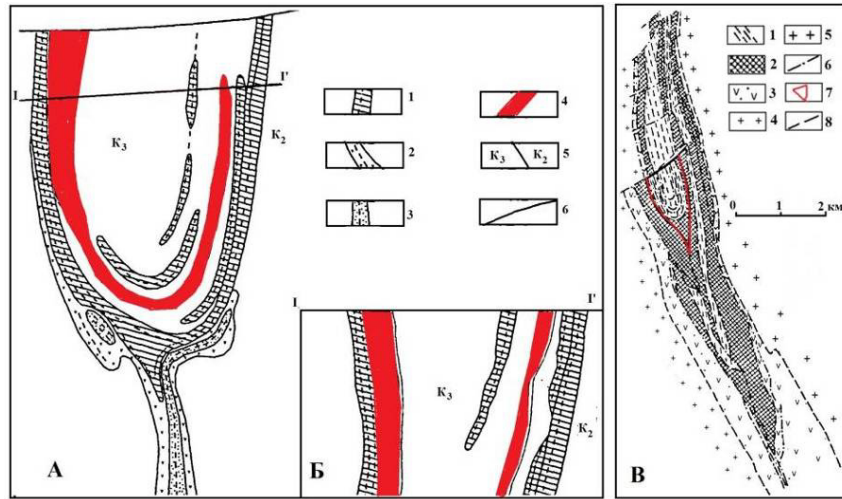


Рис. 2. Схематический план месторождения (А), разрез по линии I–I' (Б) участка развития скандиеносных метасоматов на Желтореченском урановом месторождении и схематическая геологическая карта Желтореченской структуры (В) (по Белевцеву Я.Н. [8]). Условные обозначения: к плану (А) и разрезу (Б): 1 – ураноносные альбититы, 2 – ураноносные щелочно-амфибол-эгириновые метасоматиты, 3 – ураноносные железисто-карбонатные метасоматиты, 4 – уран-скандий-ванадиевые карбонат-щелочно-амфибол-акмитовые и актинолит-тремолит-талк-карбонатные метасоматиты, 5 – границы саксаганской и гданцевской свит криворожской серии, 6 – разрывные нарушения; к схеме (В): 1 – гданцевская свита, 2 – саксаганская свита, 3 – скелеватская и новокриворожская свиты, вмещающие архейские гранитоиды: 4 – двуполовошпатовые, 5 – плагиоклазовые, 6 – тектонические нарушения, 7 – контур участков развития рудоносных метасоматитов; 8 – литологические границы.

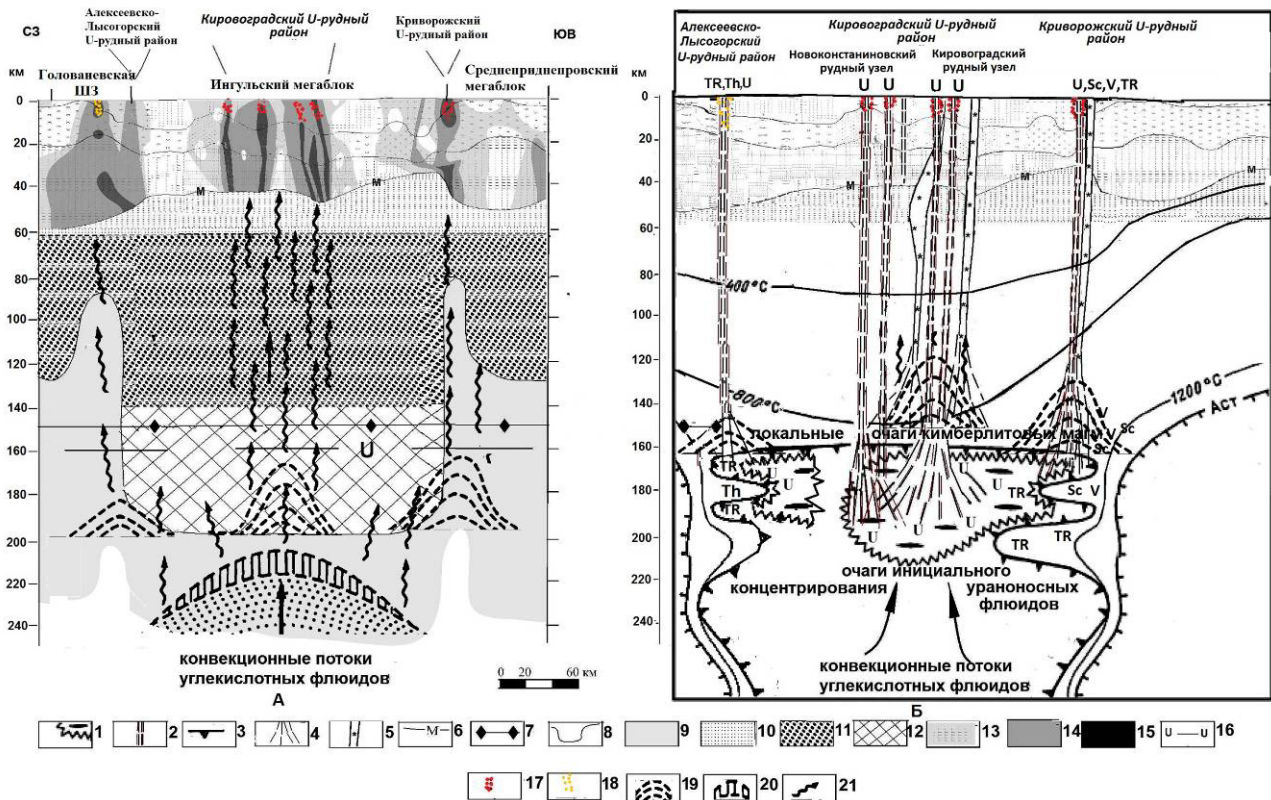


Рис. 3. Общая схема развития эндогенного уранового рудообразования основных уранопродуктивных эпох на УЩ 2000–1950 и 1800–1750 млн лет (с использованием материалов [12]). Условные обозначения: 1 – очаги инициального концентрирования ураноносных флюидов, 2 – приразломные потоки щелочных ураноносных флюидов, 3 – граница аномальной верхней мантии; Аст – граница астеносферы, 4 – предполагаемые пути подъема протокимберлитовой магмы; 5 – каналы внедрения кимберлитов дайковой фации, 6 – граница Мохо; 7 – граница стабильности графит-алмаз; 8 – граница литосфера-астеносфера; 9 – астеносфера; 10 – железистые ультрабазиты; 11 – амфиболовые и пироксеновые глиммериты, гранатые лерцолиты; 12 – хромшпинелевые гарцбургит-лерцолитовая и дунит-перидотитовая серии с реликтами деформированных структур; зоны дислокаций с различной степенью проницаемости; 13 – низкой, 14 – средней, 15 – высокой, 16 – уровень формирования очаговых потоков ураноносных трансмагматических флюидов, 17 – карбонатно-натриевые метасоматиты, 18 – кремний-кальциевые метасоматиты, 19 – локальные астеносферные ловушки, 20 – термобароградный фронт глобальной астеносферной ловушки, 21 – астеносферные флюидопотоки.

Предпосылки к образованию комплексных U-V-TR-Sc месторождений вдоль Криворожско-Кременчугского разлома, по нашему мнению, связаны: 1) с эволюцией системы разноглубинных мантийных очагов первичной сепарации рудогенных компонентов различной металлогенической специализации в краевой части аномального сегмента литосферы высокой степени зрелости Ингульского мегаблока УЩ, 2) с общностью физико-химических условий концентрирования комплекса рудогенных компонентов (U-V-TR-Sc) и 3) обусловлены единими транспортными путями миграции рудоносных флюидов с астеносферных уровней первичной генерации до осаждения на геохимических барьерах верхних горизонтов земной коры в периоды рудообразования. Возникновение максимальных градиентов РТ-условий в краевой части аномального сегмента литосферы высокой степени зрелости Ингульского мегаблока на границе со Среднеприднепровским мегаблоком обеспечивало масштабное перераспределение рудных компонентов в астеносфере, а сходство реакции на создававшиеся градиенты давления и температур U, V, TR, Sc привело к их наиболее значительной комплексной концентрации в сформировавшейся глубинной астеносферной ловушке (рис. 3).

Выявленные нами принципиально новые закономерности позволили составить общую схему развития U-V-TR-Sc промышленного рудообразования в метасоматитах на УЩ (рис. 3). При периодической активизации импульсной дегазации ядра и мантии в условиях сверхвысоких давлений и температур возникало формирование термобароградиентного фронта, который привел к формированию глобальной астеносферной неоднородности в центральной части УЩ и формированию локальных астеносферных ловушек в виде термозрозийных вздутий на границе подошвы литосферы и кровли астеносферы Ингульского мегаблока высокой степени зрелости. В краевых частях основного термобароградиентного фронта вследствие снижения влияния сверхлитостатического давления и возникновения компенсационных РТ-эффектов в условиях высоких латеральных градиентах РТ-условий в бортах подошвы Ингульского литосферного сегмента образовались локальные ловушки, сформировавшие впоследствии рудные объекты Алексеевско-Лысогорского рудного района в эпоху рудообразования 2000–1950 млн лет и Криворожского рудного района с проявленным уран-полиметалльным оруденением с образованием крупных рудных объектов в эпоху 1800–1750 млн лет.

Выводы

Важнейшими глубинными факторами формирования крупных U-V-TR-Sc месторождений в метасоматитах УЩ являются: 1) петрологические условия масштабной мантийной сепарации различных по металлогенической специализации рудогенных компонентов, которые создавались в краевой части лито-

сферного сегмента высокой степени зрелости Ингульского мегаблока на границе со Среднеприднепровским; 2) сходство геохимической реакции U, V, TR, Sc на создававшиеся в астеносфере градиенты давления и температур, что привело к их наиболее значительной комплексной концентрации в сформировавшейся глубинной астеносферной ловушке и обеспечило совместный перенос в составе мантийных флюидов к верхним горизонтам земной коры по Криворожско-Кременчугскому разлому транслитосферного проникновения 3) сходство геохимической реакции U, V, TR, Sc, необходимой для осаждения на геохимических барьерах верхних структурных горизонтов земной коры, что обеспечило их совместное массовое рудоотложение вследствие эксплозивного гидрогазоразрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович, И. И.* Металлогения / И. И. Абрамович. – М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2010. – 328 с.
2. *Казанский, В. И.* Источники рудного вещества эндогенных урановых месторождений / В. И. Казанский, Н. П. Лавров, А. И. Тугаринов // Геол. рудн. мест. – 1975. – Вып. 17 – № 4. – С. 53–61.
3. *Гурский, Д. С.* Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины: в 2 т. – Т.1. / Д.С.Гурский, К. Е. Есипчук, В. И. Калинин [и др.]. – К.-Львов: Центр Европы, 2005. – 785 с.
4. *Смирнов, В. И.* Геология полезных ископаемых / В. И. Смирнов. – М.: Недра, 1965. – 590 с.
5. *Химическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. И. Л. Кнунянц, Н. С. Зефирова.* – М.: Сов. энциклопедия, 1990. – Т. 1–5.
6. *Летников, Ф. А.* Зрелость литосферных блоков и проблемы эндогенного рудообразования / Ф. А. Летников // Глубинные условия эндогенного рудообразования. – М.: Наука. – 1986. – С. 16–24.
7. *Борисенко, Л. Ф.* Ванадий (минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений) / Л. Ф. Борисенко. – М.: Недра, 1973. – 192 с.
8. *Белевцев, Я. Н.* Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины / Я. Н. Белевцев, В. Б. Коваль, А.Х.Бакаржиев [и др.]. – К.: Наук. думка, 1995. – 376 с.
9. *Тарханов, А. В.* Желтореченское ванадий-скандиевое месторождение / А. В. Тарханов, А. Р. Кудлаев, А. В. Петрин [и др.] // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 6. – С.50–56.
10. *Солодов, Н. А.* Методические рекомендации по прогнозированию, поискам и перспективной оценке собственных месторождений скандия / Н. А. Солодов, М. В. Скосырева, В. Д. Радионов [и др.] – М.: ИМГРЭ. – 1991. – 65 с.
11. *Калашиник, А. А.* Новые прогнозно-оценочные критерии в технологии прогнозирования формирования промышленных эндогенных месторождений урана Украинского щита / А. А. Калашиник // 36. наукових праць УкрДГРІ. – 2014. – № 2. – С.27–54.
12. *Федоришин, Ю. І.* Просторова модель глибинної будови літосфери Українського щита у зв'язку з перспективами промислової алмазоносності / Ю. І. Федоришин, О. В. Фесенко, О. Б. Денег // Мін. ресурси України. – 2006. – № 3. – С. 8–12.

КЛАНУА, Кировоград, Украина

Калашиник А. А., профессор кафедры информационных технологий, доктор геологических наук
E-mail: kalashnik_anna1@mail.ru; Тел. +380955639884

KFANAU, Kirovograd, Ukraine

Kalashnyk G. A., Professor of Department of Information Technology, Doctor of Geological Sciences
E-mail: kalashnik_anna1@mail.ru; Tel. +380955639884