Уфимский мантийный горст – основные тектонические, геологические и минерагенические следствия

Александр Николаевич САВИЧЕВ^{1,2*}

Виталий Николаевич ОГОРОДНИКОВ^{3**}

¹Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия

²Ильменский государственный заповедник Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия

³Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Данные о строении и свойствах недр, полученные на основе геофизических исследований, позволяют в значительной мере пересмотреть представления о строении и закономерностях формирования месторождений полезных ископаемых в пределах Уфимского горста и зоны его влияния (55°–56° с. ш. на Урале).

Цель работы: построение модели формирования Уфимского мантийного горста и выделение его минерагенических особенностей на примере месторождений железистых кварцитов, кианитов и редкоземельной минерализации.

Методология проведения исследований. В качестве фактологической основы исследований использованы опубликованные базы данных и обобщающие их материалы по глубинному сейсмическому зондированию Урала с выделением минерагенической нагрузки, характерной для Уфимского мантийного горста и зоны его влияния.

Результаты исследований. Уфимский горст представляет собой структуру, образованную подъемом верхней мантии, возникшем, предположительно, в месте пересечения внутримантийных разломов сдвиговой природы. Поперечная асимметрия мантийного горста и проявленные позднее рифтогенно-коллизийные процессы отражаются в вышележащих комплексах и приводят к искажению линий выхода глубинных разломов на уровне современного эрозионного среза. Горстообразование осложнялось рифтогенно-коллизийными тектоническими событиями с сопутствующими им магматическими, метаморфическими, метасоматическими и дислокационными процессами, сопровождавшимися различными типами многочисленных проявлений и месторождений полезных ископаемых, вскрытых эрозионными процессами. В качестве примеров, подтверждающих приуроченность различных видов полезных ископаемых к структуре Уфимского мантийного горста, приведены схемы размещения месторождений и проявлений железистых кварцитов, кианита и редкоземельной минерализации в более эродированной его части.

Выводы. Выход на поверхность месторождений и проявлений железистых кварцитов, кианита, редкоземельной минерализации и других полезных ископаемых тесно связан с развитием Уфимского мантийного горста.

Ключевые слова: Урал, Уфимский мантийный горст, внутримантийные глубинные разломы, геологические и минерагенические следствия, железистые кварциты, кианиты, редкие земли.

Введение

Начиная с А. П. Карпинского, значительное количество исследователей геологии Урала, используя в качестве доказательной базы результаты прямых наблюдений тектонических структур на современном эрозионном срезе, выделяли в районе 55°–56° северной широты поперечную «уральской» складчатости положительную структуру земной коры – Уфимский горст (другие предложенные этими авторами собственные географические названия этой структуры оставим за скобками) [1–6]. Причины образования этой структуры, обуславливающие тесное сближение в пределах 55–56° северной широты трех региональных положительных структур Урала (Башкирского,

Центрально-Уральского и Восточно-Уральского поднятий) и резкое изменение простирания уральских структур с юго-западного направления на северо-западное, раскрыты не до конца. Существующие точки зрения сведены, по сути, к тому, что Уфимский горст и смежные территории зоны его влияния:

- расположены в пределах наиболее выдвинутой и приподнятой части Восточно-Европейской платформы, формирующей поперечное к Уралу поднятие [1–3];

- представляют главный западный упор для коллизийных процессов, происходивших начиная со среднего рифея до мезозоя в структурах, находящихся восточнее

✉ ansavichev@mineralogy.ru; ansavichev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1948-0270>

**Fgg.gl@m.ursmu.ru

горста [4–6]; изучение глубинного строения территории Уфимского горста с применением геофизических технологий позволило в периферической части зоны влияния Уфимского горста выделить структуру купольно-кольцевого типа [7].

Геофизическая информация о глубинном строении земной коры Урала, основанная на разломно-блоковой, слоистой модели с пространственным расположением геофизических неоднородностей, детально разработана коллективом Института геофизики УрО РАН [8]. Данные о строении и свойствах недр, полученные на основе этих исследований, позволяют нам в значительной мере пересмотреть представления о строении региона и закономерностях формирования месторождений полезных ископаемых в пределах Уфимского горста и зоны его влияния.

Считаем образование геологических структур Уфимского горста следствием глубинных тектонических процессов, происходивших на границе земной коры и верхней мантии. Изучение такого рода тектонических процессов невозможно без привлечения данных по глубинному сейсмическому зондированию.

Большое количество геофизической информации по глубинным сейсмическим исследованиям, полученной на Урале, опубликовано в последнее время коллективом Института геофизики УрО РАН, на ее базе построена фактологическая основа наших исследований.

Методология проведения исследований

Проведена большая работа по анализу и обобщению многочисленной сейсмической информации о строении земной коры по профилям и геотраверсам глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) Уральского региона. В настоящей работе в качестве фактологической основы мы используем опубликованную В. С. Дружининым и др. монографию [8], в которой сведены и приведены к «общему знаменателю» результаты исследований строения верхней части литосферы Уральского региона.

В работах приняли участие следующие организации: ОАО «Баженовская геофизическая экспедиция», Институт геофизики УрО РАН, Центр региональных геофизических исследований «ГЕОН», частично Институт геологии Коми научного центра УрО РАН, научно-производственные организации Казахстана. Полученный сейсмический материал являлся разнородным по качеству, полноте и содержанию, что препятствовало его обобщению и созданию объемной модели верхней части литосферы (интервал глубин до 80 км). Для анализа и обобщения разнородного по качеству, полноте и содержанию материала В. С. Дружининым и др. [8] были разработаны и внедрены методика сейсмогеокартирования земной коры, а затем технология сейсмогеоплотностного 2D-моделирования. В результате исследований составлены сейсмогеологические, а на их основе плотностные разрезы верхней части литосферы до глубины 80 км (первый региональный уровень изостатической компенсации) масштаба 1:1000 000.

В монографии [8] в виде альбома приведены сейсмогеоплотностные и сейсмогеологические разрезы верхней части литосферы с сопутствующими условными обозначениями. На представленных рисунках расчетные плотностные модели совмещены с сейсмогеологическими разрезами; показано тектоническое районирование верхней

части литосферы с выделением мегаблоков и мегазон как структур первого порядка; блоков и зон – как структур второго порядка, разделенных разномасштабными элементами дизъюнктивной тектоники; разрезы увязаны между собой на участках пересечения профилей. Все эти данные использовались нами в качестве фактологической основы.

Разрезы верхней части литосферы выполнены в соответствии с разработанной В. С. Дружининым и др. методикой сейсмогеокартирования земной коры, основной особенностью которой является разделение верхней части литосферы на три крупных подразделения – сейсмогеологических этажа (СГЭ) с обоснованием наличия в континентальной коре двух СГЭ, регионально выдержанных поверхностей раздела – древнего (нижнеархейского) кристаллического фундамента (K_{01}) и поверхности основного раздела М между породами земной коры, включая переходный мегакомплекс в ее нижней части и комплексами верхней мантии (рис. 1).

Краткое описание разрезов с выделением поверхностей раздела, необходимых для первичного чтения сейсмогеоплотностных разрезов, приведено в табл. 1.

Необходимо подчеркнуть, что разработанные В. С. Дружининым и др. приемы сейсмогеокартирования земной коры становились основой для приведения глубинных разрезов к «общему знаменателю» и созданию совместно с плотностным 2D- и 3D-моделированием объемных геолого-геофизических моделей масштаба 1:1 000 000 и 1:2 500 000 верхней части литосферы Уральского региона (за исключением южной его части). Более подробное описание использованных технологий изложено в монографии [8].

Результаты исследований

Обоснование выделения структуры Уфимского мантийного горста. В монографии [8] приведены однотипные сейсмогеоплотностные разрезы по 15 профилям ГСЗ в масштабе 1:1 000 000 протяженностью более 10 000 км, расположенным на Полярном, Северном, Среднем и Южном Урале. Схема расположения профилей ГСЗ, МОВЗ, совмещенная с фрагментом карты аномального гравитационного поля Δg , приведена на рис. 2.

В сферу наших интересов попали широтный Тарашский профиль и сопряженная с ним часть меридионального профиля Вижай–Орск. Точка пересечения этих профилей совпадает с местом расположения мантийной аномалии основного сейсмогеологического раздела Мохо, выделенной В. С. Дружининым и др. [8] на схематической карте рельефа основного сейсмогеологического раздела Мохо на широте 55°–56° с. ш. В оригинале эта аномалия **отрицательная (?)** (рис. 1, а). Она имеет форму неправильного эллипса, а глубина залегания внешнего контура основного сейсмогеологического раздела Мохо находится на отметке 54 км с максимумом на глубине 55–56 км.

Стоит отметить, что на приведенной схематической карте аномалий такой интенсивности (любого знака) всего две: одна на уровне 55°–56° с. ш., вторая на уровне 66° с. ш., т. е. в структуре Урала такие изменения в рельефе основного сейсмогеологического раздела Мохо можно отнести к редким явлениям. Это, с нашей точки зрения, заслуживает особого внимания при их интерпретации.

Профиль Вихай-Орск (ВЖО)

г

д

Рисунок 1. Выделение структуры Уфимского мантийного горста при дешифрировании сейсмогеоплотностных разрезов Тараташского и Вижай-Орского профилей: а – фрагмент оригинальной схематической карты рельефа основного сейсмогеологического раздела М [8] с отрицательной мантийной аномалией. Изогипсы глубины залегания основного сейсмогеологического раздела Мохо обозначены линиями с цифрами (в км); б – фрагмент схематической карты рельефа основного сейсмогеологического раздела М, в опубликованный вариант которой нами внесены изменения, основанные на дешифрировании сейсмогеоплотностных разрезов по профилям Тараташский (широтный) и Вижай–Орск (субмеридиональный). Выделенная положительная мантийная аномалия (Уфимский мантийный горст) выделена красным цветом; в – сейсмогеоплотностной разрез по профилю Вижай–Орск [8] с выделенными нами границами Уфимского мантийного горста (даны красным цветом); 1 – линия профиля с градусной привязкой; 2 – скорости продольных (в числителе) и поперечных (в знаменателе) волн, км/с; 3 – поверхность нижнего мегакомплекса I СГЭ; 4 – поверхность комплексов древнего кристаллического фундамента II СГЭ; 5 – поверхность комплексов нижней коры, так называемый «базальтовый слой»; 6 – поверхность комплексов переходного мегакомплекса (зоны) в низах коры; 7 – поверхность в пределах переходной зоны промежуточных комплексов с относительно пониженными скоростными параметрами; 8 – поверхность основного сейсмогеологического раздела Мохо между породами земной коры и относительно слабоизмененными породами верхней мантии (перидотит), без индекса приведены промежуточные границы; 9 – основные зоны глубинных разломов; 10 – глубинные разломы и разломы в земной коре; 11 – секущие отражающие элементы; 12 – наблюдаемая (а) и расчетная (б) кривые аномального гравитационного поля Δg ; 13 – участки, где неоднозначно положение границы между глубинными структурами; г – фрагмент сейсмогеоплотностного разреза по профилю Тараташский [8] с выделенными нами границами Уфимского мантийного горста (даны красным цветом). Синими линиями выделены: М – поверхность Мохо; К2 – поверхность комплексов нижней коры; К01 – поверхность комплексов древнего кристаллического фундамента II СГЭ; д – структурно-геологическое дешифрирование внутреннего строения Уфимского мантийного горста с элементами геологической интерпретации, составленное автором на основе материалов [8]. Двухуровневая поверхность тектонического срыва (детамента) внутрикоревой природы: Д1 – поверхность тектонического срыва, сопряженная с поверхностью комплекса нижней коры (с «базальтовым» слоем); Д2 – поверхность тектонического срыва, сопряженная с поверхностью древнего кристаллического фундамента.

Figure 1. Determination of the structure of the Ufa mantle ridge fault when interpreting the seismic and geological density sections of the Taratash and Vizhay-Orsk profiles: а – fragment of the original schematic relief map of the main seismic-geological section M [8] with a negative mantle anomaly. Structural contours of depth of occurrence of the main seismic-geological section of the Moho are indicated by lines with numbers (in km); б – fragment of a schematic relief map of the main seismic-geological section M; we have made changes in the published version based on interpretation of seismic-geological density sections along the Taratashsky (latitudinal) and Vizhay–Orsk (submeridional) profiles. Highlighted positive mantle anomaly (Ufa mantle ridge fault) is highlighted in red; в – seismic and geological density section along the Vizhay-Orsk profile [8] with the boundaries of the Ufa mantle horst we have identified (shown in red); 1 – profile line with degree reference; 2 – velocities of longitudinal (in the numerator) and transverse (in the denominator) waves, km/s; 3 – surface of the lower megacomplex I of the SGE; 4 – surface of complexes of the ancient crystalline basement II SGE; 5 – surface of complexes of the lower crust, the so-called “basalt layer”; 6 – surface of complexes of the transitional megacomplex (zone) in the lower crust; 7 – surface within the transition zone of intermediate complexes with relatively low velocity parameters; 8 – surface of the main seismicogeological division of the Moho between the rocks of the earth's crust and relatively weakly altered rocks of the upper mantle (peridotite); intermediate boundaries are shown without an index; 9 – main zones of deep faults; 10 – deep faults and faults in the earth's crust; 11 – secant reflective elements; 12 – observed (a) and calculated (b) curves of the anomalous gravitational field Δg ; 13 – areas where the position of the boundary between deep structures is ambiguous; (d) a fragment of a seismic-geo-density section along the Taratashsky profile [8] with the boundaries of the Ufa mantle ridge fault that we identified (shown in red). Blue lines are: М – Moho surface; К2 – surface of complexes of the lower crust; К01 – surface of complexes of the ancient crystalline basement II SGE; e – structural-geological interpretation of the internal structure of the Ufa mantle ridge fault with elements of geological interpretation, compiled by the author on the basis of materials [8]. A two-level surface of a tectonic breakdown (detament) of an intracrustal nature: D1 – surface of a tectonic breakdown, conjugated with the surface of the lower crust complex (with a “basalt” layer); D2 – surface of tectonic breakdown, coupled with the surface of the ancient crystalline basement.

При рассмотрении сейсмогеоплотностных разрезов Тараташского и Вижай-Орского профилей (рис. 1, в, г) стало понятно, что кровля данной мантийной аномалии хорошо фиксируется по границе Мохо на глубине 49–55 км в меридиональном направлении и на глубине 49–52 км в широтном и представляет собой отчетливо выраженную *положительную мантийную структуру (аномалию)* на фоне общего увеличения мощности земной коры в этой части Урала до 55–60 км. Область положительной мантийной структуры на сейсмогеоплотностных разрезах ограничена глубинными разломами – крутыми взбросами, что позволяет классифицировать данный мантийный выступ по морфологическим признакам как горст. Положительный характер выделенной структуры становится более явным в слое М*–М, все более обособляясь от смежных участков литосферы (рис. 1, в, г). По глубинным разломам все слои в этом месте, лежащие выше поверхности основного сейсмогеологического раздела Мохо (выше пород верхней мантии), в результате вертикальных движений приподняты до 10–14 км вверх.

Данная структура имеет в плане форму трапеции, если ограничивать ее контуры по точкам выхода глубинных разломов на соответствующие поверхности разделов (поверхность М, поверхность K_{01} , условная поверхность земной коры 0 м) с простираением глубинных разломов к

перпендикулярным линиям сейсмогеоплотностных разрезов (рис. 3, б). На горизонтальной плоскости размеры проекции поверхности М (по средней линии трапеции) выделенного основания горста составляет 115 км, ширина (по высоте трапеции) – 110 км, площадь – 12 650 км²; размеры горста по линии поверхности раздела K_{01} : длина горста составляет 147 км, ширина – 96 км, площадь – 14 112 км²; по линии условной поверхности земной коры длина горста составляет 180 км, ширина 92 км, площадь – 16 560 км². Центр горста географически находится в северо-восточной части Аргазинского водохранилища. Основания трапеции горста имеют простираение 0° по магнитному азимуту.

Совокупность данных по морфологии этой положительной мантийной структуры стимулировала введение собственного географического названия – *Уфимский мантийный горст*. Это название сохраняет преемственность в терминологии географически совпадающих выделенных ранее тектонических структур [1], находящихся к тому же в тесной причинно-следственной связи с мантийными процессами.

Измеренная на сейсмогеоплотностных разрезах амплитуда вертикального смещения поверхности основного сейсмогеологического раздела Мохо, выделенная по разрывам, ограничивающим горст, неодинакова, и это придает горсту поперечную асимметрию. Рельеф остальных

Рисунок 2. Схема расположения профилей ГСЗ, МОБЗ, совмещенная с фрагментом карты аномального гравитационного поля Δg : а – результаты моделирования формирования разрывов в «осадочном чехле» (в литосфере) над узлом пересечения разломов в «фундаменте» (в мантии) [9]; 1 – схема расположения штампов экспериментальной установки; 2 – фрагмент разломного узла в модели; положительная структура в центре модели – образование сводового поднятия под действием Уфимского мантийного диапира; 3 – структурная схема разломного узла; б – схема предполагаемых активных разломов зоны сочленения Южного и Среднего Урала [10] с наложением структурной схемы разломного узла (рис. 2, а, 3); 1 – геологические контуры тараташского, уфалейского и сысертско-ильменогорского комплексов; 2 – линии профилей глубинного сейсмического зондирования; 3 – направления действия максимальных сжимающих и растягивающих напряжений; 4 – основные ортогональные глубинные разломы: а – «активные», б – «пассивные»; 5 – эпицентры землетрясений; горизонтальные проекции Уфимского мантийного горста: М – поверхность Мохо; K_2 – поверхность комплексов нижней коры; П – поверхность Земли (условная поверхность 0 м).

Figure 2. Diagram of DSS, earthquake converted-wave method profiles, combined with a fragment of the map of the anomalous gravitational field Δg : а – results of modeling the formation of ruptures in the “sedimentary cover” (in the lithosphere) above the node of the intersection of faults in the “basement” (in the mantle) [9]; 1 – diagram of the location of the stamps of the experimental setup; 2 – fragment of a fault node in the model; positive structure in the center of the model is the formation of a vaulted uplift under the influence of the Ufa mantle diapir; 3 – structural diagram of a fault node; б – diagram of the supposed active faults of the junction zone of the Southern and Middle Urals [10] with the superposition of the structural diagram of the fault node (Fig. 2, а, 3); 1 – geological contours of the Taratash, Ufa and Sysert-Ilymenogorsk complexes; 2 – lines of profiles of deep seismic sounding; 3 – directions of action of maximum compressive and tensile stresses; 4 – main orthogonal deep faults: а – “active”, б – “passive”; 5 – epicenters of earthquakes; horizontal projections of the Ufa mantle horst: М – Moho surface; K_2 – surface of complexes of the lower crust; P – the surface of the Earth (conditional surface 0 m).

Таблица 1. Характеристика модели сейсмогеоплотностного разреза верхней части литосферы в районе Уфимского мантийного выступа (широта г. Кыштыма) по профилям Вижай–Орск и Тараташский. Составлена автором по материалам [8].
Table 1. Characteristics of the model of the seismic and geological density section of the upper part of the lithosphere in the region of the Ufa mantle uplift (latitude of Kyshtym city) along the Vizhay–Orsk and Taratashsky profiles. Compiled by the author based on the materials [8].

Наименование поверхности раздела	Обозначение поверхности раздела, скорость сейсмических волн v , км/с	Краткое описание сейсмогеоплотностного разреза; скорость сейсмических волн v , км/с
Поверхность нижнего мегакомплекса I СГЭ	K_{01}^* $v = 5,7-6,5$	I сейсмогеологический этаж (I СГЭ), в состав которого входят комплексы от PR ₁ до KZ включительно, разного состава, возраста и генезиса; $v = 6,2-6,6$
Поверхность комплексов древнего кристаллического фундамента II СГЭ	K_{01} $v = 6,0-6,6$	II сейсмогеологический этаж (II СГЭ) – нижеархейский кристаллический фундамент AR ₁ ; $v = 6,0-6,3$
Поверхность комплексов нижней коры	K_2 $v = 6,4-6,5$	III сейсмогеологический этаж (III СГЭ) – нижняя кора, так называемый «базальтовый слой» преимущественно гранулит-метабазитового состава; $v = 6,6-7,2$
Поверхность комплексов переходного мегакомплекса (зоны) в низах коры	K–M	Нарушенный слой нижней коры на контакте с мантией – присутствие в первом приближении сложноустроенной слоистой среды в зоне перехода от земной коры к относительно слабоизмененным породам верхней мантии; $v = 7,7 \pm 0,3$
Поверхность нижнего комплекса переходной зоны предположительно с пониженными значениями скорости относительно пород верхней мантии	M*	Предположительно, нарушенный слой верхней мантии на контакте с нижней корой; отмечается инверсия значений скорости в $v = 0,5-0,8$ км/с
Поверхность основного сейсмогеологического раздела Мохоровичича между породами земной коры и относительно слабоизмененными породами верхней мантии	M $v = 7,5-8,6$ $v_p = 7,9-8,4$	Породы слабоизмененной верхней мантии; $v = 8,15 \pm 0,25$

Таблица 2. Амплитуда относительного поднятия поверхностей раздела в пределах Уфимского мантийного горста.
Table 2. Amplitude of the relative uplift of interfaces within the Ufa mantle ridge fault.

Поверхность раздела комплексов	Амплитуда относительного поднятия поверхностей раздела в краевых точках горста и в аномальном максимуме (max–min) горста, км (по результатам замеров на сейсмогеоплотностных разрезах)				
	Запад	Восток	Аномальный максимум	Юг	Север
M	14	3	10 – 8	3	3
K_2	5	6	4 – 9	1	0
K_{01}	5	10	10 – 12	– 4	– 2

поверхностей раздела, залегающих выше поверхности М, также меняется (табл. 2).

Почему произошел подъем верхней мантии в этой части Урала, остается неясным, так как сейсмогеоплотностные разрезы [8] ограничены глубиной 80 км, что явно недостаточно для дешифрирования динамики мантийных структур. Однако становится очевидным, почему в пределах Уфимского мантийного горста и зоны его влияния на поверхность выведены глубинные коровые геологические структуры с амплитудами колебания до 12 км.

Основные следствия сводового поднятия Уфимского мантийного горста в закономерностях разломообразования литосферы. Опираясь на опубликованные и приведенные данные, можно предположить

следующее: на Тараташском сейсмогеоплотностном разрезе хорошо наблюдается общий рисунок отражающих элементов, который позволяет частично отследить структурные особенности вещественных комплексов верхней части мантии в районе Уфимского мантийного горста (рис. 1–3). По нашему мнению, Уфимский горст представляет собой структуру, образованную подъемом верхней мантии, предположительно возникшую в результате пересечения внутримантийных разломов сдвиговой природы. При этом над узлом пересечения разломов в верхней мантии и выше, в литосфере, возникает область сводового поднятия. Образование сводового поднятия обусловлено горизонтальной неоднородностью верхней части мантии, когда менее плотные

Рисунок 3. Схема размещения месторождений и проявлений железистых кварцитов, кианита и редких земель. Основана на схеме структурно-формационного районирования Урала: I – Предуральский прогиб; II–VII – мегазоны (II – Западно-Уральская, III – Центрально-Уральская, IV – Магнитогорская, V – Тагильская, VI – Восточно-Уральская, VII – Зауральская); крупнейшие гранитоидные комплексы: 1 – тараташский; 2 – уфалейский; 3 – сысертско-ильменогорский; 4 – кочкарский; 5 – мурзинско-адуйский; 6 – салдинский; 7 – александровский.

Железистые кварциты – Fe-кварцит. Схема локализации железистых кварцитов [11; 17].

Кианит. Схема локализации месторождений и проявлений кианита [12] (номер красных звездочек на карте – наименование месторождения, проявления; минерал): 1 – Ожакское, андалузит; 2 – Нижне-Исетское, силлиманит; 3 – Малообрусанское, кианит; 4 – Сысертское, кианит; 5 – Сосновское, кианит; 6 – Абрамовское, кианит; 7 – Шумихинское, кианит; 8 – Иткульское, кианит; 9 – Тюбукское, кианит; 10 – Аллакское, кианит; 11 – Кисегачское, кианит; 12 – Каслинское, кианит; 13 – Иртышское, кианит; 14 – Слюдяногорское, кианит; 15 – Увильдинское, кианит; 16 – Егустинское, кианит; 17 – Тараташское, кианит; 18 – Карабашское, кианит; 19 – Аргазинское, силлиманит; 20 – Таганайское, кианит; 21 – Орловский рудник, кианит; 22 – Златоустовское, кианит; 23 – Уренгинское, кианит; 24 – Миасское, кианит; 25 – Кундровинское, кианит; 26 – Чукинское, кианит; 27 – Михайловское, кианит; 28 – Светлинское, кианит, силлиманит, андалузит; 29 – Борисовское, кианит; 30 – Санарское, кианит; 31 – Черноборское, кианит; 32 – Тогузакское, кианит; 33 – Карталинское, кианит.

Редкоземельная минерализация – TR. Схема размещения щелочно-карбонатитовых и щелочных комплексов, месторождений и проявлений Ta, Nb, Zr и TR на Среднем и Южном Урале [3]: 1 – тахтинская группа (Nb, Zr); 2 – слюдяногорский (Nb, Y); 3 – силачский (P, Ti, TR); Сугомакский (3а), Маукский (3б), Силачский (3в), Большого камня (3г), горы Фоминой (3д); 4 – каганский; 5 – ильменский (Ta, Nb); 6 – вишневогорский (Nb, Ta, Zr); Потанинское (6а), Светлинское (6б), зоны 140, 147 Вишневогорского месторождения, Булдымское и Спирихинское месторождения (6в), Ерёминское (6г); 7 – Тенякское (Y, TR), 8 – Верхнемакаровское (Y, TR); 9 – Хомутовское ((Zr, TR, Nb, Ta); 10 – Липовый лог (Ta, Nb, Be); 11 – участки 2 и 7 (Ta, Nb); 12 – Малышевское (Be); 13 – Боёвское (Be, флюорит); 14 – Качкарская группа проявлений Ta, Nb и Be – Синарский участок (14а), Светлинский участок (14б), Ерёмкинский участок (14в), Демаринский участок (14г), Стрелецкий участок (14е); 15 – Анненский участок (Be, Ta); 16 – Сибирка (Ta, Nb, Zr, TR, Mo).

Figure 3. Layout of deposits and occurrences of ferruginous quartzites, kyanite and rare earths. It is based on the scheme of structural and formation zoning of the Urals: I-pre – Ural trough; II–VII – megazones (II – West Ural, III – Central Ural, IV – Magnitogorsk, V – Tagil, VI – East Ural, VII – trans-Uralian); the largest granitogneiss complexes: 1 – taratash; 2 – ufalety; 3 – sysert-Ilymenogorsky; 4 – kochkarsky; 5 – murzinsky-adyusky; 6 – saldinsky; 7 – alexandrovsky.

Ferruginous quartzites – Fe-quartzite. Localization scheme for ferruginous quartzites [11; 17].

Kyanite. Scheme of localization of deposits and manifestations of kyanite [12] (number of red stars on the map is the name of the deposit, occurrence; mineral): 1 – Yuzhakovskoe, andalusite; 2 – Nizhne-Isetskoe, sillimanite; 3 – Malobrusianskoe, kyanite; 4 – Sysertskiy, kyanite; 5 – Sosnovskoe, kyanite; 6 – Abramovskoe, kyanite; 7 – Shumikhinskoe, kyanite; 8 – Itkul'skoe, kyanite; 9 – Tyubuk'skoe, kyanite; 10 – Allak'skoe, kyanite; 11 – Kisegachskoe, kyanite; 12 – Kaslinskoe, kyanite; 13 – Irtyashskoe, kyanite; 14 – Slyudyanogorskoe, kyanite; 15 – Uvildinskoe, kyanite; 16 – Egustinskoe, kyanite; 17 – Taratashskoe, kyanite; 18 – Karabashskoe, kyanite; 19 – Argazinskoe, sillimanite; 20 – Taganayskoe, kyanite; 21 – Orlovsky mine, kyanite; 22 – Zlatoustovskoe, kyanite; 23 – Urenginskoe, kyanite; 24 – Miasskoye, kyanite; 25 – Kundravinskoe, kyanite; 26 – Chuksinskoe, kyanite; 27 – Mikhailovskoe, kyanite; 28 – Svetlinskoe, kyanite, sillimanite, andalusite; 29 – Borisovskoe, kyanite; 30 – Sanarskoe, kyanite; 31 – Chernoborskoe, kyanite; 32 – Toguzak'skoe, kyanite; 33 – Kartalinskoe, kyanite.

Rare earth mineralization-TR. The scheme of alkali-carbonatite and alkaline complexes of deposits and occurrences of Ta, Nb, Zr and TR in the middle and southern Urals [3]: 1 – takhtinsky group (Nb, Zr); 2 – slyudyanogorsky (Nb, Y); 3 – silachskiy (P, Ti, TR): Sugomak'sky (3a), Mauksky (3b), Bol'shogo kamnya (3d), Fomina mountains (3e); 4 – kagansky; 5 – ilmensky (Ta, Nb); 6 – vishnevogorsky (Nb, Ta, Zr): Potaninskoe (6a), Svetlinskoe (6b), zone 140, 147 Vishnevogorsky field, Buldymskoe and Spirikhinskoe (6c), Ereminskoe (6d); 7 – Tenyak'skoe (Y, TR), 8 – Verkhnemakarovskoe (Y, TR); 9 – Khomutovskoe ((Zr, TR, Nb, Ta); 10 – Lipovyy log (Ta, Nb, Be); 11 – areas 2 and 7 (Ta, Nb); 12 – Malyshevskoe (Be); 13 – Bojovskoe (Be, fluorite); 14 – Kackarsky group occurrences of Ta, Nb and Be – Sinarsky section (14a), Svetlinsky area (14b), Eryomkinskiy plot (14c), Demarinsky plot (14d), Streletsky plot (14e); 15 – Annenskiy plot (Be, Ta); 16 – Sibirka (Ta, Nb, Zr, TR, Mo).

слои в результате сдвиговых тектонических движений в верхней мантии горизонтально перемещены в восточном направлении под более плотные слои. Это привело к эффекту декомпрессии на участке внедрения и подъему (всплытию) вышележащих слоев вверх с образованием области сводового поднятия.

Такой механизм образования и развития Уфимского мантийного горста находит свое подтверждение в результатах тектонофизических исследований, проведенных С. А. Борняковым с коллегами [9]. Этими исследователями для лабораторного моделирования тектонофизических процессов использовалась конструкция из четырех штампов, одновременно перемещающихся относительно друг друга и имитирующих одновременную активизацию двух ортогональных разломов фундамента (в нашем случае верхней мантии) (рис. 2, а, 1). Приведенная фотография модели, деформированной в два этапа с реверсом движений штампов, иллюстрирует сложнопостроенный разломный узел в виде сводового поднятия (рис. 2, а, 2). Простые горизонтальные смещения по линейным ветвям сдвиговых зон трансформируются в сложную систему разнонаправленных движений в местах их пересечений (рис. 2, а, 3). Приведенные структурные схемы отражают состояние разрывной сети в модели при разных направлениях смещений штампов в первый этап деформирования. На первом этапе движение штампов осуществлялось в соответствии с направлением стрелок на рис. 2, а, 2. В модели сформировалась хорошо выраженная сеть разрывов (рис. 2, а, 3).

Полученная в результате моделирования разрывная сеть в целом подобна разрывной сети современных геологических структур [10], а сформировавшаяся в модели структура локального раскрытия по своему строению подобна структуре Уфимского мантийного горста (рис. 2, б).

Необходимо подчеркнуть, что осевые части ортогональных разломов верхней мантии прослеживаются и в верхней части литосферы и являются основными структурообразующими разломами, формирующими современный облик структуры Уфимского мантийного горста и его минерагению. Поперечная асимметрия мантийного горста и проявленные позднее рифтогенно-коллизийные процессы отражаются в вышележащих комплексах и приводят к искажению линий выхода ортогональных разломов на уровне современного эрозионного среза.

«Активные» ортогональные глубинные разломы, рассекая границы различных структурно-формационных комплексов Урала, достаточно хорошо фиксируются при геологической съемке по фрагментам этих разломов на современном эрозионном срезе, линиям обрыва геологической корреляции дорифейских породных комплексов и выходам трассирующих их гранитных массивов (рис. 2, б).

«Пассивные» ортогональные глубинные разломы на большей части территории перекрыты платформенными отложениями Восточно-Европейского континента и фиксируются эпицентрами современных землетрясений (рис. 2, б).

Разделение ортогональных разломов на «активные» и «пассивные» чисто условное и зависит от степени обнаженности осевых частей разломов на современной поверхности.

Минерагенические следствия Уфимского мантийного горста. В месте сопряжения ортогональных глубинных мантийных разломов воздымание верхней мантии привело к образованию структуры Уфимского мантийного горста. Горстообразование осложнялось рифтогенно-коллизийными тектоническими событиями с сопутствующими им магматическими, метаморфическими, метасоматическими и дислокационными процессами, сопровождавшимися различными типами многочисленных проявлений и месторождений полезных ископаемых, выведенных на современную поверхность эрозионными процессами.

Описанию геологии и минерагении многочисленных проявлений и месторождений разных видов полезных ископаемых, локализованных в пределах структуры Уфимского мантийного горста, посвящено значительное количество геологической литературы. В качестве примеров, подтверждающих приуроченность определенных видов полезных ископаемых к структуре Уфимского мантийного горста, приводим схемы размещения месторождений и проявлений железистых кварцитов, кианита и редкоземельной минерализации в более эродированной, глубинной его части, приуроченной к восточному сектору ортогональных мантийных разломов (рис. 2, б, 3).

Длительность геологического развития структуры Уфимского мантийного горста привела к большому развитию полигенных и полихронных рудообразующих процессов, тесно связанных с мантийными и мантийно-коровыми источниками и детально описанными многими геологами, часть из которых приводим в качестве примеров: [3, 4, 11–14]. Есть все основания считать, что сопряженные со структурой Уфимского мантийного горста участки земной коры – «плечи горста» – выводят на поверхность проявления и месторождения Дегтярско-Карабашской колчеданоносной зоны [15], позднепалеозойское золотое оруденение в северной части Магнитогорской зоны [16] и другие типы полезных ископаемых, пространственно совмещенные с зоной влияния горста.

Выводы

В результате проведенных исследований стало понятно, почему отдельные виды полезных ископаемых, в частности железистые кварциты, кианит и редкие земли, локализованы в пределах выведенных на поверхность структур Уфимского мантийного горста, прежде всего докембрийских. Процессы горстообразования осложнялись рифтогенно-коллизийными тектоническими событиями с сопутствующими им магматическими, метаморфическими, метасоматическими, дислокационными процессами и сопровождались образованием различных типов многочисленных проявлений и месторождений полезных ископаемых, выведенных на современную поверхность эрозионными процессами.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания НИОКТР Института минералогии УрО РАН (номер гос. регистрации АААА-А-19-119072390050-9) и Института геологии и геохимии УрО РАН (№ АААА-А18-118052590028-9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Е. А. Тектоника Среднего Урала. Изд-во АН СССР, 1941. 152 с.
2. Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
3. Золотов К. К., Левин В. Я., Мормиль С. И., Шардакова Г. Ю. Минералогия и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург: МПР РФ, ГУПР по Свердловской области, ИГГ УрО РАН, ОАО УГЭС, 2004. 336 с.
4. Баженов А. Г., Белогуб Е. В., Ленных В. И., Рассказова А. Д. Уфимская широтная структура Урала: путеводитель экскурсий. Миасс, 1992. 89 с.
5. Тевелев Ал. В., Тевелев Арк. В., Федорчук В. А., Хотылев А. О., Кошелева И. А. Тараташский индентор и его роль в строении Урала // Вестник Московского ун-та. Сер. 4 «Геология». 2017. № 1. С. 3–13. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-1-3-12>
6. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа, 2010. 280 с.
7. Берлянд Н. Г. Глубинное строение литосферы Урала. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 256 с.
8. Дружинин В. С., Мартышко П. С., Начапкин Н. И., Осипов В. Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. 226 с.
9. Борняков С. А., Семинский К. Ж., Буддо В. Ю., Мирошниченко А. И., Черемных А. В., Черемных А. С., Тарасова А. А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 823–861. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159>
10. Рассказов А. А., Васильева Е. Ю., Горбатов Е. С. Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 2. С. 71–82.
11. Глушкова Г. А., Кейльман Г. А. О генезисе железистых кварцитов Урала // Метасоматические железистые кварциты: труды Ин-та геологии и геохимии УНЦ АН СССР. 1979. Вып. 142. С. 21–31.
12. Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л., Щипцов В. В., Поленов Ю. А., Нерадовский Ю. Н., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Савичев А. Н., Коротеев Д. В. Кианитовые руды России. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. 334 с.
13. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Недосекова И. Л., Савичев А. Н. Гранитные пегматиты, карбонатиты и гидротермалиты Уфалейского метаморфического комплекса. Екатеринбург: ИГГ РАН; УГГУ, 2016. 273 с.
14. Левин В. Я., Роненсон, Б. М., Самков В. С., Левина И. А., Сергеев Н. С., Киселёв А. П. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 224 с.
15. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Минералогия шовных зон Урала. Ч. 2. Дегтярско-Карабашская колчедановая зона (Средний Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 68 с.
16. Знаменский С. Е., Знаменская Н. М. Роль сдвиговых дуплексов в региональном структурном контроле позднепалеозойского золотого оруденения Магнитогорской мегазоны (Южный Урал) // Литосфера. 2009. № 4. С. 83–92.
17. Коротеев В. А., Сазонов В. Н. Геодинамика, рудогенез, прогноз (на примере Урала). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 259 с.

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2019 года

Ufa mantle ridge fault – main tectonic, geological and minerogenic consequences

Aleksandr Nikolaevich SAVICHEV^{1,2*}

Vitaliy Nikolaevich OGORODNIKOV^{3**}

¹Institute of Mineralogy of the South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia

²Ilmeny State Reserve of the South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia

³The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance of the work. The data on the structure and properties of the subsoil, obtained on the basis of geophysical studies, make it possible to significantly revise the ideas about the structure and patterns of formation of mineral deposits within the Ufimsky ridge fault and its zone of influence (55°–56° north latitude in the Urals).

Purpose of the work: constructing a model of the formation of the Ufa mantle ridge fault and identifying its mineragenic features using the example of deposits of ferruginous quartzite, kyanites and rare earth mineralization.

The methodology of the research. The published databases and their summarizing materials on deep seismic sounding of the Urals with the allocation of a mineragenic load characteristic of the Ufa mantle ridge fault and its influence zone were used as a factual basis for the research.

Research results. The Ufa ridge fault is a structure formed by the uplift of the upper mantle, presumably at the intersection of intramantle shear faults. The transverse asymmetry of the mantle ridge fault and the later rift-collisional processes are reflected in the overlying complexes and lead to a distortion of the lines of the outcropping of deep faults at the level of the modern erosional section. Horst formation was complicated by rifting-collisional tectonic events with accompanying magmatic, metamorphic, metasomatic, and dislocation processes, accompanied by various types of numerous manifestations and mineral deposits exposed by erosional processes. Schemes of the location of deposits and manifestations of ferruginous quartzites, kyanites and rare earth mineralization in its more eroded part are given as examples confirming the confinement of various types of minerals to the structure of the Ufa mantle ridge fault.

Conclusions. The cropping of deposits and occurrences of ferruginous quartzites, kyanite, rare earth mineralization and other minerals is closely related to the development of the Ufa mantle ridge fault.

Keywords: Ural, Ufa mantle ridge fault, intra-mantle deep faults, geological and mineragenic consequences, ferruginous quartzites, kyanites, rare earths.

The work was carried out within the framework of the state assignment of R&D of the Institute of Mineralogy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration number AAAA-A-19-119072390050-9) and the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No. AAAA-A18-118052590028-9).

REFERENCES

1. Kuznetsov E. A. 1941, *Tektonika Srednego Urala* [Tectonics of the Middle Urals], 152 p.
2. Pystin A. M. 1994, *Polimetamorficheskiye komplekсы zapadnogo sklona Urala* [Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals]. Saint Petersburg, 208 p.
3. Zoloev K. K., Levin V. Ya., Mormil S. I., Shardakova G. Yu. 2004, *Minerageniya i mestorozhdeniya redkikh metallov, molibdena, vol'frama Urala* [Minerageny and deposits of rare metals, molybdenum, tungsten of the Urals]. Ekaterinburg, 336 p.
4. Bazhenov A. G., Belogub E. V. Lennykh V. I., Rasskazova A. D. 1992, *Ufinskaya shirotnaya struktura Urala* [Ufa latitudinal structure of the Urals], guide for excursions. Miass, 89 p.
5. Tevelev A. V., Tevelev Ark. V., Fedorchuk V. A., Khotylev A. O., Kosheleva I. A. 2017, Taratash indenter and its role in the structure of the Urals. *Vestnik Moskovskogo universiteta* [Moscow University Geology Bulletin], Ser. 4 "Geology", no. 1, pp. 3–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-1-3-12>
6. Puchkov V. N. 2010, *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and Transurals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, 280 p.
7. Berlyand N. G. 2007, *Glubinnoye stroyeniye litosfery Urala* [The deep structure of the Ural lithosphere]. Saint Petersburg, 256 p.
8. Druzhinin V. S., Martyshko P. S., Nachapkin N. I., Osipov V. Yu. 2014, *Stroyeniye verkhney chasti litosfery i neftegazonosnost' nedr Ural'skogo regiona* [Structure of the upper part of the lithosphere and oil and gas potential of the Ural region]. Ekaterinburg, 226 p.
9. Bornyakov S. A., Seminsky K. J., Buddo V. Yu., Miroshnichenko A. I., Cheremnykh A. V., Cheremnykh A. S., Tarasova A. A. 2014, Basic laws of

*ansavichev@mineralogy.ru; ansavichev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1948-0270>

**Fgg.gl@m.ursmu.ru

- faulting in the lithosphere and their applied consequences (based on the results of physical modelling). *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and tectonophysics], vol. 5, no. 4, pp. 823–861. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159>
10. Rasskazov A. A., Vasilyeva E. Yu., Gorbatov E. S. 2013, *Geofizicheskiye issledovaniya* [Geophysical research], vol. 14, no. 2, pp. 71–82.
11. Glushkova G. A., Keilman G. A. 1979, About the genesis of ferruginous quartzites of the Urals. Metasomatic ferruginous quartzites. *Trudy Instituta geologii i geokhimii im. akad. A.N. Zavaritskogo* [Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry named after A.N. Zavaritsky], issue 142, pp. 21–31. (In Russ.)
12. Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voitekhovskiy Yu. L., Shchiptsov V. V., Polenov Yu. A., Neradovsky Yu. N., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Savichev A. N., Koroteev D. V. 2012, *Kianitovyie rudy Rossii* [Kyanite ores of Russia]. Ekaterinburg, 334 p.
13. Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Nedosekova I. P., Savichev A. N. 2016, *Granitnyie pegmatity, karbonatity i gidrotermalite Ufaleyskogo metamorficheskogo kompleksa* [Granite pegmatites, carbonatites and hydrothermalites of the Ufaley metamorphic complex]. Ekaterinburg, 273 p.
14. Levin V. Ya., Ronenson B. M., Samkov V. S., Levina I. A., Sergeev N. S., Kiselev A. P. 1997, *Shchelochno-karbonatitovyie komplekсы Urala* [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Ekaterinburg, 224 p.
15. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A. 2003, *Minerageniya shovnykh zon Urala* [Minerageny of the suture zones of the Urals]. P. 2. Degtyar-Karabash pyrite zone (Middle Urals). Ekaterinburg, 68 p.
16. Znamenskiy S. E., Znamenskaya N. M. 2009, Role of shear duplexes in regional structural control of the late Paleozoic gold occurrence of the Magnitogorsk megazone (southern Urals). *Litosfera* [Lithosphere], no. 4, pp. 83–92. (In Russ.)
17. Koroteev V. A., Sazonov V. N. 2005, *Geodinamika, rudogenez, prognoz (na primere Urala)* [Geodynamics, ore genesis, forecast (using the Urals as an example). Ekaterinburg, 259 p.

The article was received on Desember 19, 2019