



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ VIS-NIR-SWIR-СПЕКТРОСКОПИИ С ЦЕЛЬЮ КАРТИРОВАНИЯ И ТИПИЗАЦИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНО- МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ФЛАНГАХ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СТОЛБОВОЕ (ВОСТОЧНОЕ ПРИСАЯНЬЕ)

Е.Н. КАРМАНОВ^{1,2,*}, Н.В. ЛЕДЕНЕВА¹, В.А. РАССУЛОВ¹, А.В. ТОМАШЕВ¹

¹ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского»
31, стр. 1, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Месторождение Столбовое расположено в северной части Восточного Саяна, находится в Нижнеудинском районе Иркутской области, в пределах листа N-47-IX. Опоискование территории началось с 60-х гг. прошлого века. В результате проведенных работ по прямым признакам (радиоактивность) было найдено месторождение Столбовое. В то же время поиски не были нацелены на выявление месторождений скрытого типа под рифейским чехлом, поэтому большая часть территории осталась непоискованной.

Цель исследования. Детальное картирование и типизация проявленных околорудных гидротермально-метасоматических изменений на флангах уранового месторождения Столбовое.

Материалы и методы. В период 2018—2020 гг. сотрудниками ФГБУ «ВИМС» в рамках поисковых работ проводилось картирование околорудных изменений, в том числе с применением инновационного метода ИК-спектроскопии. Диагностика минерализации проводилась с использованием портативного спектрометра TerraSpec 4 Hi-Res. С помощью прибора было проведено измерение спектров диффузного отражения в Ultraviolet-Visible-Short-wave infrared (UV-Vis-SWIR) диапазонах и определен состав различных минеральных фаз с использованием базы данных и программного обеспечения TSGVersion 7.

Результаты. Показана эффективность применения метода для диагностики всех разновидностей глинистых (каолинит, монтмориллонит), тонкослюдистых (фенгит, серицит, парagonит и их иллитовые разновидности) минералов, карбонатов (доломит, анкерит, сидерит) и хлоритов в породе *in situ* или в образцах без предварительной пробоподготовки.

Заключение. Исследования, проведенные данным методом по керну и образцам уранового месторождения Столбовое (Восточное Присянье), позволили оперативно типизировать эпигенетические изменения пород и откартировать гидротермально-метасоматические ореолы, в том числе околорудные, образованные минерализацией, не поддающейся диагностике визуальными и оптическими методами.

Ключевые слова: уран, месторождения несогласия, UV-Vis-SWIR-спектроскопия, околорудные изменения, гидротермально-метасоматические изменения, диагностика глинистых минералов, картирование метасоматитов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: авторы благодарны Генеральному директору ЗАО «НПП GeoТестСервис» А.М. Ольховскому за предоставление для исследований спектрометра TerraSpec 4Hi-Res и программу для идентификации слюдисто-глинистой минерализации TSG ver. 7.

Для цитирования: Карманов Е.Н., Леденева Н.В., Рассулов В.А., Томашев А.В. Опыт применения VIS-NIR-SWIR-спектроскопии с целью картирования и типизации гидротермально-

метасоматических изменений на флангах уранового месторождения Столбовое (Восточное Прибайкалье). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2020;63(6):46—57. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-46-57>

Статья поступила в редакцию 27.05.2021

Принята к публикации 31.01.2022

Опубликована 21.02.2022

* Автор, ответственный за переписку

VIS-NIR-SWIR SPECTROSCOPIC MAPPING FOR CLASSIFICATION OF HYDROTHERMAL-METASOMATIC ALTERATIONS ON THE FLANKS OF THE STOLBOVOE URANIUM DEPOSIT (EASTERN CIS-SAYAN)

EGOR N. KARMANOV^{1,2,*}, NADEZHDA V. LEDENEVA¹, VIKTOR A. RASSULOV¹, ALEXANDER V. TOMASHEV¹

¹ All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky
31/1, Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

ABSTRACT

Background. The Stolbovov deposit is located in the northern part of the Eastern Sayan, in the Nizhneudinsky district of the Irkutsk region, within the N-47-IX map sheet. The surveying of the territory began in the sixties of the last century. The Stolbovov deposit was discovered based on direct search signs (radioactivity). At the same time, the search was not aimed at revealing new deposits hidden under the Riphean cover; therefore, most of the territory remained unexplored.

Aim. To map and classify the near-ore hydrothermal-metasomatic alterations manifested on the flanks of the Stolbovov uranium deposit.

Materials and methods. During the 2018–2020 period, within the framework of prospecting work, the employees of the All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky (VIMS) carried out the mapping of ore alterations using an innovative method of Infrared (IR) spectroscopy. The diagnostics of mineralization was carried out using a portable TerraSpec 4 Hi-Res spectrometer. The instrument was used to measure diffuse reflectance spectra in the Ultraviolet-Visible-Short-Wave Infrared (UV-Vis-SWIR) ranges; the composition of various mineral phases was determined using the TSGVersion 7 database and software.

Results. This study confirmed the efficiency of the method applied for the diagnostics of all varieties of clayey (kaolinite, montmorillonite) and fine micaceous (phengite, sericite, paragonite and their illite varieties) minerals, as well as carbonates (dolomite, ankerite, siderite) and chlorites in the rock in situ or in samples without preliminary sample preparation.

Conclusions. The use of the described method for investigating cores and samples of the Stolbovov uranium deposit (East Sayan region) made it possible to classify the epigenetic changes in rocks and to map hydrothermal-metasomatic halos, including those near-ore, formed by mineralization that could not be identified by conventional visual and optical methods.

Keywords: uranium, unconformity deposits, UV-Vis-SWIR spectroscopy, rock alteration, hydrothermal-metasomatic alteration, diagnostics of clay minerals, mapping of metasomatites

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Acknowledgements: the authors would like to express their thanks to the General Director of JSC NPP GeoTestService A.M. Olkhovsky for providing the TerraSpec 4hi-Res spectrometer and the program for identification of mica-clay mineralization TSG ver. 7 for research.

For citation: Karmanov E.N., Ledeneva N.V., Rassulov V.A., Tomashev A.V. VIS-NIR-SWIR spectroscopic mapping for classification of hydrothermal-metasomatic alterations on the flanks of the Stolbovoe uranium deposit (Eastern Cis-Sayan). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(6):46—57. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-46-57>

Manuscript received 27 May 2021

Accepted 31 January 2022

Published 21 February 2022

* Corresponding author

Месторождение Столбовое тяготеет к ядру Бирюсинского горст-антиклинального внутреннего поднятия в пределах Восточного Саяна [2, 3]. В его геологическом строении выделяются два структурных этажа — нижнепротерозойский гранито-гнейсовый фундамент и перекрывающий его субплатформенный осадочный средне-верхнерифейский чехол.

Фундамент образован нижнепротерозойскими гранито-гнейсами саянского комплекса с ксенолитами интенсивно дислоцированных амфибол-биотитовых, кварц-серицитовых сланцев и гнейсов часовенской толщи нижнего протерозоя. Отложения чехла сложены красноцветными терригенно-осадочными породами карагасской серии (шангулежской, тагульской и ипситской свит). Они полого, с резким угловым и стратиграфическим несогласием, залегают на поверхности цоколя. Также в геологическом строении площади принимают участие силлы нерсинского комплекса, залегающие среди песчаников среднего рифея, и более ранние дайки предположительно ангаульского комплекса раннерифейского возраста, относящиеся к породам основного состава. Последние прорывают гранитоиды саянского комплекса и перекрываются отложениями среднего рифея.

Становление гранито-гнейсов саянского комплекса завершилось формированием кремне-калиевых метасоматитов со шлировыми выделениями, обогащенными биотитом и акцессорными ториевыми, редкоземельными, урансодержащими и урановыми минералами: цирконом, монацитом, Th-монацитом, торитом, фергусонитом и уранинитом.

Гидротермальное урановое оруденение локализовано в измененных гнейсо-гранитах и приурочено к линейным крутопадающим прожилково-метасоматическим зонам. Метасоматические изменения карбонат-тонкослюдистого состава, развитые по массе породы со слабой и средней интенсивностью, придают околорудным ореолам характерную светло-желтовато-зеленую

(оливковую) окраску. Мелкопятнистое распределение окраски в метасоматитах обусловлено избирательным замещением тонкими светлыми слюдами породообразующего плагиоклаза и биотита. Кварц и калиевый полевой шпат остаются неизменными. По мере приближения к оруденелым прожилково-метасоматическим зонам окварцевания интенсивность слюдизации возрастает, придавая породе пятнистую темно-зеленую окраску.

Слюдисто-глинистая минерализация играет ведущую роль в составе трех формационно-генетических типов ураноносных метасоматитов, связанных со средне-низкотемпературными процессами кислотного выщелачивания, — березитов, гидрослюдизитов и аргиллизитов. Им соответствует ряд диоктаэдрических слоистых алюмосиликатов (серициты — гидрослюды — смешаннослойные слюда-сметиты — сметиты), обусловленный долей разбухающих межслоев в слюдах, меняющейся от 0 до 100% от серицитов к сметитам, и отражающий понижение температурных условий минералообразования [1, 4]. Ранее диагностика слюдисто-глинистых минералов была возможна только с помощью прецизионных методов, требующих трудоемкой пробоподготовки и тщательного исследования.

Методика

Созданные в последнее время малогабаритные спектрометры UV-Vis-SWIR-диапазона, оснащенные персональными компьютерами, а также разработанные алгоритмы и реализующие их программы, которые позволяют оперативно проводить диагностику минерализации околорудных изменений в полевых условиях, привели к широкому внедрению спектроскопии диффузного отражения при проведении поисково-разведочных работ. Применение этого метода является особенно эффективным при поисках скрытых и слабо проявленных месторождений, на которых широкие ореолы изменений глинисто-слюдистого состава (березитов, аргиллизитов) могут выходить

на дневную поверхность. Высокая сходимость результатов идентификации слюисто-глинистой минерализации, диагностированной рентгенофазовым методом (РФА) и UV-Vis-SWIR-спектроскопией, доказана и продемонстрирована в некоторых зарубежных и отечественных публикациях [5]. Результаты применения UV-Vis-SWIR-спектроскопии продемонстрированы по месторождению урана Столбовое и его флангам.

Диагностика минерализации проводилась с использованием портативного спектрометра TerraSpec 4 Hi-Res (ASD Inc. Panalytical NIR Center, США) (рис. 1) без предварительного отбора материала, непосредственно на образцах керна. С помощью прибора было проведено измерение спектров диффузного отражения в Ultraviolet-Visible-Short-wave infrared (UV-Vis-SWIR) и определен состав глинисто-слюистых, карбонатных фаз и хлоритов с использованием базы данных и программного обеспечения TSGVersion 7 (CSIRO, Australia).

Замеры проводились по керну скважин через 10 см. Образцы отбирались при документации скважин и характеризуют выделенный интервал, а в пределах интервала — конкретный тип изменений. По каждому образцу прибором проводилось несколько (2—6) замеров.

Результаты и обсуждение

Поисковые скважины пробурены в пределах сохранившегося осадочного чехла. Верхние части разреза представлены терригенными осадками шангулежской свиты среднерифейского возраста, в значительной степени выдержанными по своему

литологическому составу. Среди осадочных пород преобладают слоистые песчаники, имеющие общую тенденцию к увеличению зернистости и возрастанию доли гравийно-галечного материала с глубиной. Цемент пород сложен бесцветными тонкими слюдами. Алевриты образуют немногочисленные прослои, согласные с общим направлением слоистости. Основные различия в разрезах осадочных пород заключаются в степени их проработки поздней карбонатизацией и гипергенными процессами. Нижние горизонты пород чехла в разных скважинах также различны по степени насыщенности обломками пород фундамента — от почти полного отсутствия до формирования четко выраженного горизонта базальных конгломератов.

Диагностика показала, что в составе цемента терригенных пород чехла из тонкослюистой минерализации присутствует только фенгит (рис. 2). В кристаллических породах фундамента фенгит фиксируется спорадически, обычно в интервалах неизмененных и слабо измененных пород, и не характерен для зон интенсивной метасоматической проработки.

Использование полевой спектроскопии позволило также установить, что в ряде скважин кора выветривания в гранитах либо отсутствует полностью, либо проявлена весьма незначительно.

Для иллюстрации полученных результатов нами выбраны колонки скважин № 4102, 4113 и 4109. Скважина № 4102 представлена интервалами с рудными пересечениями; №. 4109 пройдена по наименее измененным породам фундамента; №. 4113 имеет дифференцированный разрез,



Рис. 1. Портативный спектрометр TerraSpec 4 Hi-Res (ASD Inc. Panalytical NIR Center, США)
Fig. 1. Portable spectrometer TerraSpec 4 Hi-Res (ASD Inc. Panalytical NIR Center, USA)

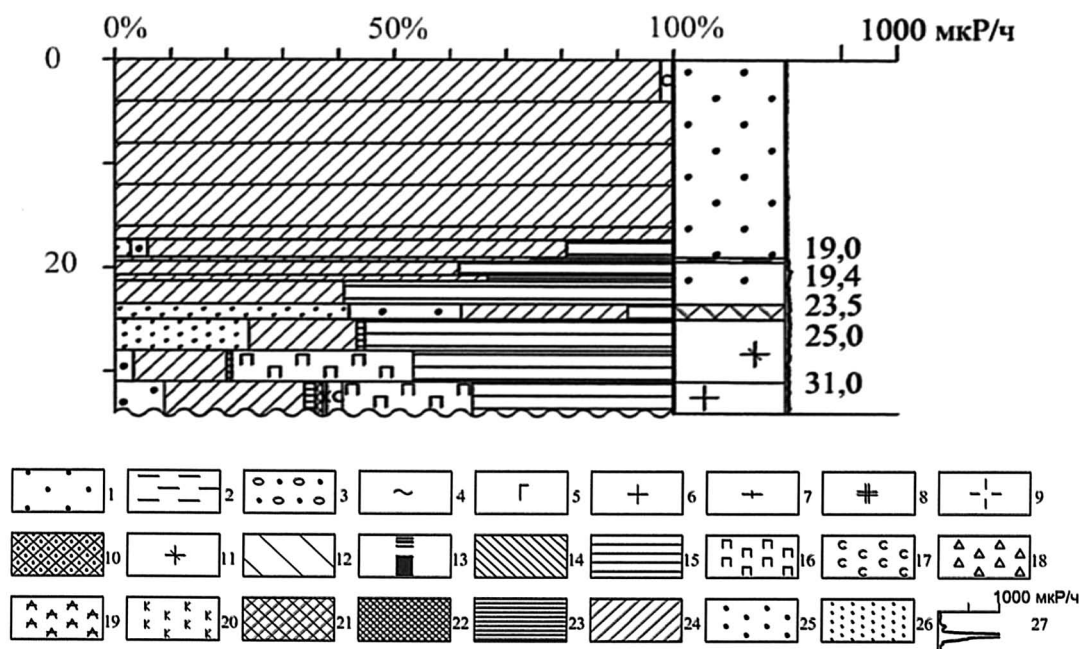


Рис. 2. В осадочных породах чехла (интервал 0—23,5 м) диагностирован фенгит, являющийся основным компонентом цемента. В гранитах фундамента в интервале 23,5—25,0 м встречены каолинит и монтмориллонит, связанные с процессами корообразования. Скв. 4102, интервал 0—34

Условные обозначения к рисункам 2—6. 1—3 — отложения шангулежской свиты ($RF_{2-3}shn$): 1 — песчаники мелко- до крупнозернистых с прослоями алевролитов и гравелитов; 2 — алевролиты; 3 — песчаники гравелистые. 4 — часовенская толща (KR_2cs_2). Сланцы биотитовые и амфибол-биотитовые. 5 — рифейские интрузивные образования. Долериты RF_{1-3} . 6—9 — раннепротерозойские интрузивные образования. Саянский комплекс гранодиорит-гранитовый (γKR_2s): 6 — граниты лейкократовые, среднекристаллические, массивные; 7 — гнейсы мелкокристаллические; 8 — граниты пегматитовые; 9 — граниты мезо- и меланократовые, крупнокристаллические, гнейсовидные, «очковой» текстуры. 10 — кора выветривания гранитов. 11 — граниты слабовыветрелые. 12 — зоны метасоматически измененных пород. 13 — зоны дробления керна. 14—26 — диаграммы результатов измерения спектров диффузного отражения: 14 — недиагностируемая часть спектра; 15 — фенгит-иллит; 16 — парагонит-иллит; 17 — сидерит; 18 — доломит; 19 — анкерит; 20 — кальцит; 21 — Fe-Mg-хлорит; 22 — Fe-хлорит; 23 — монтмориллонит; 24 — фенгит; 25 — мусковит; 26 — каолинит. 27 — кривые гамма-каротаж.

Fig. 2. In the sedimentary rocks of the cover (interval 0—23.5 m) was diagnoses phengite, which is the main component of cement. Kaolinite and montmorillonite associated with the processes of crust formation were found in the basement granites in the range of 23.5—25.0 m. Well №4102, int. 0—34

Symbols for Figures 2—6. 1—3 — deposits of the Shangulezh formation ($RF_{2-3}shn$): 1 — fine- to coarse-grained sandstones with layers of siltstones and gravelites; 2 — siltstones; 3 — gravelly sandstones. 4 — chasovenskaya strata (KR_2cs_2). Biotite and amphibole-biotite shales. 5 — Riphean intrusive formations. Dolerites RF_{1-3} . 6—9 — early Proterozoic intrusive formations. Sayan granodiorite-granite complex (γKR_2s): 6 — leucocratic, medium-crystalline, massive granites; 7 — fine-crystalline gneiss; 8 — pegmatite granites; 9 — meso- and melanocratic granites, large-crystalline, gneiss-like, "spectacled" textures. 10 — granite's weathering crust. 11 — slightly weathered granites. 12 — zones of metasomatically altered rocks. 13 — crushing zones in drill samples. 14—26 — diagrams of diffuse reflection spectra measurement results: 14 — undiagnosed part of the spectrum; 15 — phengite-illite; 16 — paragonite-illite; 17 — siderite; 18 — dolomite; 19 — ankerite; 20 — calcite; 21 — Fe-Mg-chlorite; 22 — Fe-chlorite; 23 — montmorillonite; 24 — phengite; 25 — muscovite; 26 — kaolinite. 27 — gamma ray logging curves.

в пределах которого гранитоиды чередуются с измененными сланцами и дайками долеритов.

По результатам исследования разреза породы фундамента в скважине № 4102 характеризуются преобладанием биотитовых среднезернистых гранитов с нечетко выраженной гнейсоватостью.

В верхней части разреза, до глубины 100 м, отмечаются реликты мелкозернистых гнейсов мощностью от 2 до 20 м. Изредка встречаются маломощные (до 2 м) тела крупноблоковых кварц-полевошпатовых пород пегматоидной текстуры. Контакты между перечисленными разновидностями, как правило,

постепенные. Дайки основного состава имеют разнонаправленную ориентировку — угол пересечения с осью керна составляет от 10° до 75° .

Все породы фундамента в разрезе в разной степени изменены. К числу наиболее характерных изменений относятся: окварцевание, турмалинизация, тонкая слюдизация, карбонатизация и гематитизация. В локальных местах наиболее интенсивных изменений, часто с признаками тектонической проработки, текстурно-структурный облик породы почти полностью затушевывается. По данным гамма-каротажа в скважине установлена серия рудных пересечений мощностью 0,2—1,6 м, в том числе с содержанием урана 0,132%, приуроченное к дайке долерита, и в метасоматически измененных гранитах содержания урана не превышают 0,034%.

Фенгит в породах фундамента развит спорадически, но по всему стволу скважины. Присутствие каолинита, монтмориллонита, гетита обнаружено не только на границе с осадочным чехлом, но и во внутренних зонах среди гранитоидов, где установлены признаки гипергенных процессов в виде линейных кор выветривания, развитых по тектоническим нарушениям. Рудная зона, трассирующая дайку долерита, характеризуется резким увеличением доли сидерита в составе эпигенетической минерализации (рис. 3). При этом

хлорит Fe-Mg состава тяготеет к безрудной дайке. Ниже оруденелой дайки, в измененных гранитоидах, среди слюдистой минерализации преобладает калиевая слюда — серицит, наряду с которым в локальном интервале между дайками и вблизи них, диагностировано значительное количество парагонитовой составляющей, указывающей на повышенную натровость состава тонких слюд.

В разрезе скважины № 4109 под базальным горизонтом песчаников находятся практически неизмененные лейкократовые граниты. При этом присутствие каолинита, монтмориллонита и гетита иногда фиксируется прибором в крутопадающих зонах дробления, по-видимому, являющихся линейными корами выветривания.

Породы фундамента представлены лейкократовыми биотитсодержащими крупно-среднекристаллическими гранитами, сменяющимися с отметки 205 м мезократовыми гранитами с гнейсовидной и порфиroidной «очковой» текстурой. Значительную часть среди них составляют крупноблоковые кварц-полевошпатовые породы пегматоидной текстуры и дайки долеритов, имеющие ориентировку, субперпендикулярную к оси керна.

Наложенная минерализация отличается от таковой в скважине № 4102 меньшим количеством минеральных фаз и незначительной интенсивностью развития. Фенгит отмечается в породах

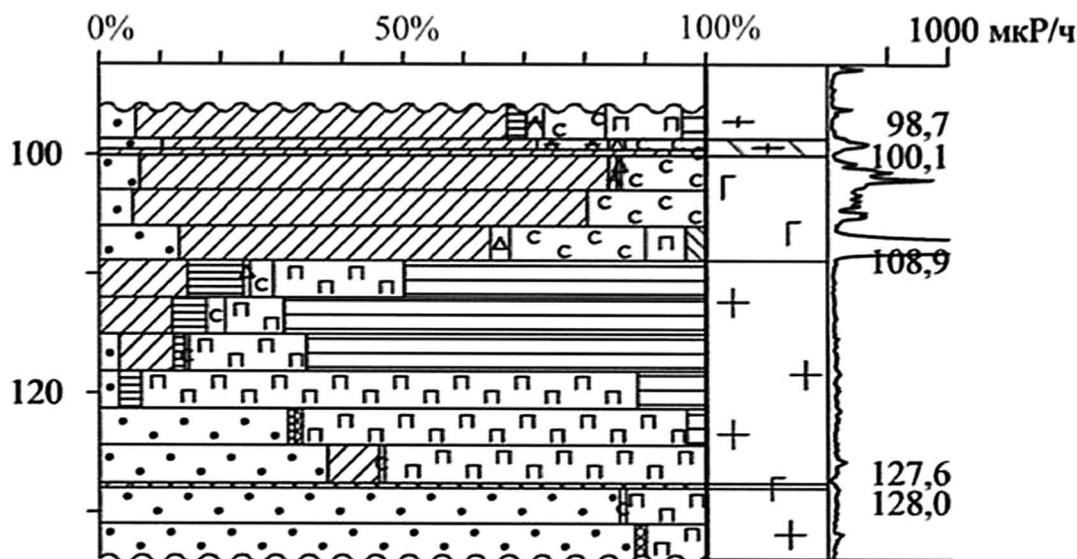


Рис. 3. Резкое увеличение доли Fe-Mg-хлорита в дайке долерита (127,6—128,0 м) и отсутствие его в оруденелой дайке в пределах интервала 100,1—108,9 м. Смена с глубиной доминирующей фенгитовой минеральной фазы на парагонит-иллитовую и далее на мусковитовую (серицитовую). Сква. 4102, интервал 96,1—134,0 м
Рис. 3. A sharp increase of Fe-Mg chlorite in the dolerite dike (127.6—128.0 m) and its absence in the ore dike within the range of 100.1—108.9 m. The change from the depth of the dominant phengite mineral phase to paragonite-illite and then to muscovite (sericite). Well No. 4102, int. 96.1—134.0 m

по всему стволу скважины, но, как и повсюду, является лучшим репером для установления границы между чехлом и фундаментом. Развитие фенгита отмечается до глубины 150 м (до 99,7 м в чехле, далее незначительно в фундаменте). Ниже этой отметки фиксируется присутствие в основном мусковита (серицит). Карбонаты появляются в базальном горизонте песчаников и равномерно присутствуют в породах по всему разрезу скважины (рис. 4). Появление хлоритов в разрезе связано с наличием дайки долерита. При этом до отметки 190 м, где изменения выражены лишь хлоритизацией по породообразующему биотиту, диагностирован Fe-хлорит. Ниже по разрезу установлено развитие Fe-Mg хлорита, который является типовым минералом гидротермально-метасоматического преобразования пород. Он, как отмечалось выше, пространственно ассоциирует с дайками и силлами основного состава, сформировавшимися на позднерифейском этапе активизации.

Повышенные содержания урана, встреченные в единичных интервалах скважины, не превышают 0,035%. Метасоматическая проработка пород весьма слабая. Четкой связи зон повышенных значений радиоактивности с какой-либо разновидностью пород или изменений в них не отмечено.

В скважине № 4113 с песчаниками чехла контактируют гранитоиды со слабыми признаками поверхностных изменений (лимонитизации), сохранившие текстурно-структурный облик и целостность.

Ниже по разрезу присутствуют каолинит, монтмориллонит, гетит в дезинтегрированных участках пород линейной коры выветривания (рис. 5).

В разрезе отмечается частое чередование крупноблоковых кварц-полевошпатовых пород пегматоидной текстуры, гранитов разного текстурно-структурного облика, в том числе мезократовых «очковых» гранито-гнейсов, и сланцев. Дайки основных пород встречены в нижней части разреза. Визуально слюдистые изменения темно-зеленого и светлого желтовато-зеленого цвета проявлены незначительно и составляют не больше 5—10% объема породы. Породообразующий биотит в гранито-гнейсах большей частью хлоритизирован. По всему стволу скважины в породах встречаются участки тонкодисперсной гематитизации.

По результатам гамма-каротажа выделены единичные интервалы мощностью до 0,3 м с аномальными содержаниями урана не более 0,018%.

Визуально породы в этой скважине проработаны сильнее, чем в предыдущей.

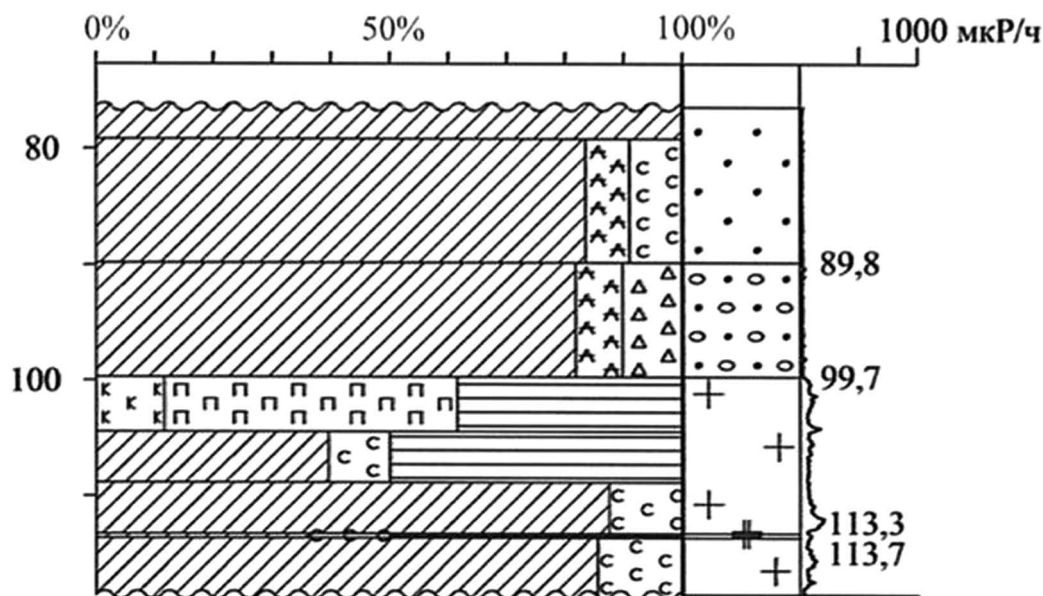


Рис. 4. В нижних горизонтах осадочного чехла в интервале 79,2—99,7 м наблюдается присутствие различных по составу карбонатов. Контакт гранитов фундамента и пород чехла (глубина 99,7 м) четкий. В гранитах отсутствуют признаки дезинтеграции и минеральные фазы, присущие процессам корообразования. Сква. 4109, интервал 76,4—118,6 м

Рис. 4. In the lower level of the sedimentary sheath in the range of 79.2—99.7 m, the presence of different composition carbonates is observed. The contact of the basement granite and the sedimentary rocks (depth 99.7 m) is clear. In granites there are no signs of disruption and mineral phases inherent in the processes of encrustation. Well №4109, int. 76.4—118.6 m

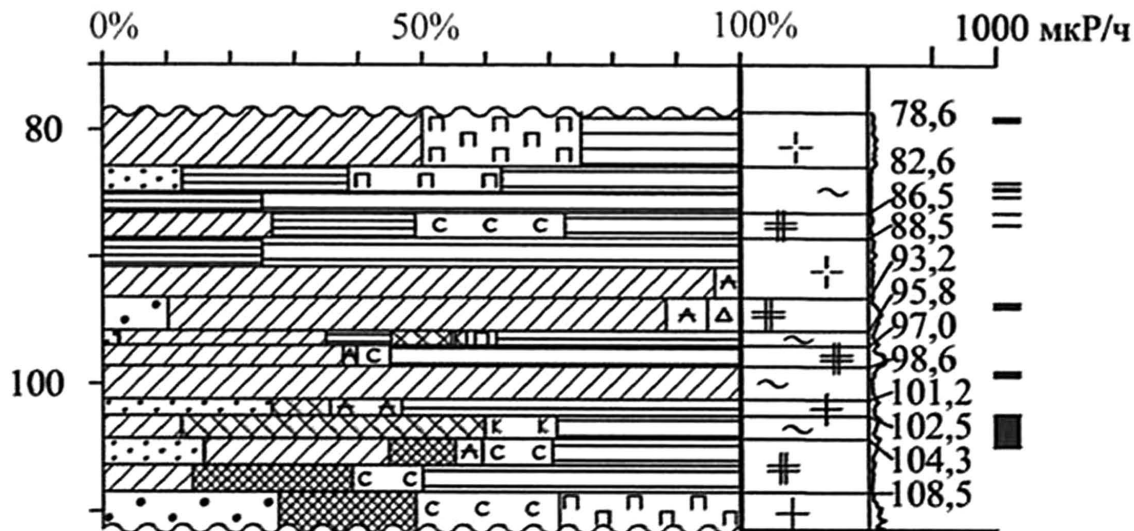


Рис. 5. Развитие каолинита и монтмориллонита маркирует серию швов зоны дробления, проявленной в интервале 84,1—104,9 м в гранитах и сланцах фундамента. Скв. 4113, интервал 78,6—111,4 м
Fig. 5. The habit of kaolinite and montmorillonite marks a series of seams of the crushed zone, expose in the range of 84.1—104.9 m in granites and slates of the basement. Well №4113, int. 78.6—111.4 m

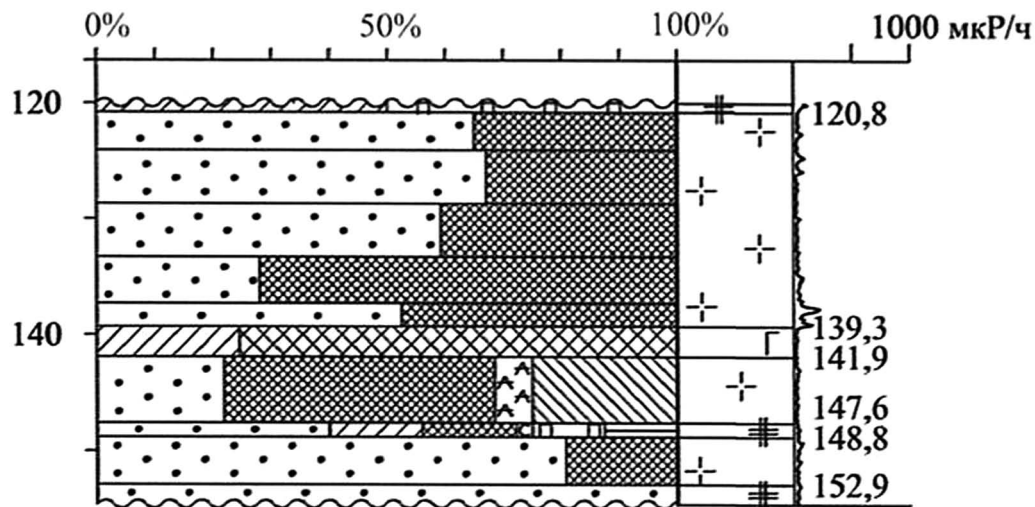


Рис. 6. Резкое увеличение доли Fe-Mg-хлоритов характерно для дайки основного состава (гл. 139,3—141,9 м). В околодайковом пространстве, в мезократовой породе «очковой» текстуры диагностирован хлорит существенно железистого состава, замещающий породообразующий биотит. Скв. 4113, интервал 120,0—154,6 м
Fig. 6. A sharp increase in the proportion of Fe-Mg chlorites is a typical for basic dikes (139.3—141.9 m). In the near-dike space, chlorite of a substantially ferruginous composition was diagnosed in the mesocratic “spectacled” texture rock, replacing the rock-forming biotite. Well №4113, int. 120.0—154.6 m

По результатам гиперспектропии состав минерализации, выявленной в скважине № 4113, аналогичен составу в других скважинах.

В интервалах, сложенных мезократовыми гранито-гнейсами, помимо серицита наблюдается заметное увеличение доли хлорита, обусловленное повышенным содержанием в них биотита (рис. 6).

Хлоритизация максимально выражена вблизи дайки долерита и постепенно затухает на удалении от нее. Следует отметить, что в составе интенсивно измененной дайки главным является хлорит Fe-Mg состава.

Минералого-петрографическими исследованиями установлено, что оруденение представлено

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

настураном и коффинитом. Как показали гиперспектроскопические исследования, оксидно-урановое оруденение пространственно приурочено к участкам развития серицита и Fe-хлорита, а присутствие в рудных зонах коффинита обычно сопровождается появлением парагонита и Fe-Mg-хлорита (табл. 1).

Определение абсолютного возраста урановых минералов показало, что настуран образовался в период 1313 ± 23 млн лет (U-Pb-метод термоионизационной масс-спектрометрии и изотопного разбавления, аналитик В.Н. Голубев, ИГЕМ). Наиболее близкими по времени образования являются дайки долеритов предположительно ангаульского комплекса, прорывающие породы фундамента, но перекрывающиеся породами осадочного чехла. Коффинит имеет более молодой возраст ≈ 700 млн лет

(Pb-Pb-термоизохронный метод, аналитик Л.В. Сумин, ВИМС), отвечающий времени внедрения базитов нерсинского комплекса (743 ± 47 млн лет Sm-Nd по Е.В. Складову и 758 ± 4 млн лет Ar-Ar по Д.П. Гладкочубу) [6, 7].

На основании данных, полученных в результате разностороннего изучения вещества с использованием новейшего диагностического метода UV-Vis-SWIR-спектроскопии, можно заключить, что на границе раннего и среднего рифея были образованы околорудные метасоматиты, основным компонентом которых являются тонкие калиевые слюды — серицит и фенгит. Близ одновременно с ними отлагались сидерит, Fe-хлорит, халцедоновидный кварц, пирит. В этих метасоматитах локально проявлена оксидно-урановая минерализация, приуроченная к пиритизированным прожилково-метасоматическим криптокварцевым зонкам.

Таблица 1. Этапы уранового рудообразования: главные минералы урана, синрудные интрузии, околорудные минералы, в том числе диагностированные методом NIR-Vis-SWIR-спектроскопии

Рудообразующие этапы Минеральные ассоциации и синрудные магматиты	Раннерифейский (RF ₁)	Средне-позднерифейский (RF ₂₋₃)
Урановая минерализация и ее абсолютный возраст (млн лет)	Настуран ($1350, 1313 \pm 23$)	Коффинит (≈ 700)
Околорудные минералы, диагностированные методом UV-VIS-NIR-спектроскопии	Серицит, фенгит, сидерит, Fe-хлорит	Парагонит, парагонит-иллит, серицит-иллит, Mg-хлорит, высокожелезистый и Mn-карбонат, кальцит
Околорудные минералы, диагностированные визуально и оптическими методами	Халцедоновидный кварц, пирит, радиогенный галенит	Марказит, халькопирит, галенит, сфалерит и флюорит
Синрудные интрузии и их абсолютный возраст (млн лет)	Дайки ангаульского комплекса (RF ₁ ?)	Силлы нерсинского комплекса ($743 \pm 47, 758 \pm 4$)

Table 1. Stages of uranium ore formation: main uranium minerals, syn-ore intrusions, near-ore minerals, including those diagnosed by NIR-Vis-SWIR spectrometry

Ore-forming stages Mineral associations and syn-ore magmatic rocks	Early Riphean (RF ₁)	Middle-Late Riphean (RF ₂₋₃)
Uranium mineralization, absolute age (million years)	Nasturan ($1350, 1313 \pm 23$)	Coffinite (≈ 700)
Near-ore minerals diagnosed by UV-VIS-NIR spectrometry	Sericite, phengite, siderite, Fe-chlorite	Paragonite, paragonite-illite, sericite-illite, Mg-chlorite, high-iron and Mn-carbonate, calcite
Near-ore minerals diagnosed by visual and optical methods	Chalcedonous quartz, pyrite, radiogenic galena	Marcasite, copper pyrite, galena, sphalerite and fluorite
Syn-ore intrusions, absolute age (million years)	Angaulsky complex dykes (RF ₁ ?)	Nersinsky complex sills ($743 \pm 47, 758 \pm 4$)

На позднерифейском этапе активизации в тектонически нарушенных зонах с силикатноурановым оруденением телескопированно происходило образование гидрослюдистых изменений со значительной примесью натровой составляющей, в которых и спектроскопически, и рентгенофазовым анализом диагностированы парагонит, парагонит-иллит. С ними ассоциируют Fe-Mg-, Mg-хлориты и высокожелезистые и Mn-карбонаты. С их отложением в рудных зонах связано частичное разрушение настурана, перераспределение урана и переотложение его в виде коффинита, с которым обычно еще ассоциируют кальцит, халькопирит, сфалерит. На позднерифейский возраст этой минерализации с парагонитовой (Na) составляющей указывает не только ее тесная пространственная связь с коффинитом, но и тот факт, что она на 50—100% замещает долеритовый силл нерсинского комплекса, локализованный в средне-верхнерифейских песчаниках, вскрытый скважиной № 23 на месторождении Столбовое. Внедрение силла сопровождается образованием специфического контактово-метасоматического адинола между двумя близлежащими силлами и в экзоконтакте одного из них. В результате контактового воздействия вмещающие кварцевые песчаники превращены в тонкозернистый альбитит или хлорит (Mg)-альбитовый метасоматит с содержанием Na_2O 5—11%. Это, вероятно, является

свидетельством того, что долериты нерсинского комплекса характеризуются щелочно-натриевой специализацией.

Заключение

Метод измерения спектров в UV-Vis-SWIR-диапазоне позволяет:

- оперативно выполнять диагностику всех глинисто-слюдистых минеральных разновидностей, карбонатных фаз и хлоритов;
- в совокупности с геологическими наблюдениями и минерало-петрографическими исследованиями осуществлять детальное минералогическое картирование околорудных ореолов и их зонального строения;
- достоверно выделять минеральные ассоциации и последовательность их образования, а также проводить необходимую типизацию эпигенетических изменений по признакам, характерным для региональных (метаморфических), постмагматических, метасоматических (приразломных) и других образований;
- фиксировать признаки площадных и глубоко проникающих линейных кор выветривания, с которыми связаны процессы окисления гипогенного оруденения;
- косвенно судить о глубине эрозионного среза выявленных образований на основе вещественной зональности метасоматических ореолов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева О.В., Русинова О.В., Воловикова И.М. Типоморфные особенности диоктаэдрических слюд и смешанослойных образований из гидротермальных околорудных метасоматитов // Минералогический журнал. 1989. № 4. С. 21—32.
2. Машковцев Г.А., Гребенкин Н.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. Перспективы ураноносности южного обрамления Восточно-Сибирской плиты. Разведка и охрана недр. 2015. № 4. С. 3—15.
3. Машковцев Г.А., Мигута А.К., Тарханов А.В., Щеточкин В.Н. Урановорудный потенциал России 2015—2035. Минеральное сырье, № 33. М., 2017. С. 65—69.
4. Омеляненко Б.И., Андреева О.В., Воловикова И.М. Тонкошелушчатые диоктаэдрические калиевые слоистые силикаты ураноносных околорудных метасоматитов // Изв. АН СССР. Серия Геология. 1988. № 8. С. 79—91.
5. Рассулов В.А., Леденева Н.В., Иоспа А.В. Оперативная диагностика глинисто-слюдистой минерализации на основе спектроскопии в диапазоне UV-VIS-NIR // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 69—73.
6. Склярёв Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М. и др. Дайковые рои южного фланга Сибирского кратона — индикаторы распада суперконтинента Родиния // Геотектоника. 2000. № 6. С. 59—75.
7. Гладкочуб Д.П. и др. Базитовый магматизм Сибирского кратона в протерозое: обзор основных этапов и их геодинамическая интерпретация // Геотектоника. 2012. № 4. С. 28—41.

REFERENCES

1. Andreeva O.V., Rusinova O.V., Volovikova I.M. Typomorphic features of dioctahedral micas and mixed-layer formations from hydrothermal near-ore metasomatites // Mineralogicheskij zhurnal. 1989. Issue 4. Pages: 21—32.
2. Mashkovcev G.A., Grebenkin N.A., Miguta A.K., Shhetochkin V.N. Uranonosnost's prospects of the southern frame east siberian plate. Razvedka i ohrana neдр. 2015. Issue 4. Pages: 3—15.
3. Mashkovcev G.A., Miguta A.K., Tarhanov A.V.,

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

- Shhetochkin V.N. Uranium ore potential of Russia 2015—2035. Mineral'noe syr'e. Issue 33. Moscow, 2017. Pages: 65—69.
4. Omel'janenko B.I., Andreeva O.V., Volovikova I.M. Thin-scaled dioctahedral potassium layered silicates of uranium-bearing near-ore metasomatites // Izv. AN SSSR. Ser. geol. 1988. Issue 8. Pages: 79—91.
5. Rassulov V.A., Ledeneva N.V., Iospa A.V. Rapid diagnosis clay-hydrologist mineralization based on spectrometry in the range UV-VIS-NIR // Razvedka i ohrana nedr. 2018. Issue 10. Pages: 69—73.
6. Skljarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M. et al. Dike swarms of the southern flank of the Siberian craton are indicators of the decay of the supercontinent Rodinia // GEOTECTONICS. 2000. Issue 6. Pages: 59—75.
7. Gladkochub D.P. et al. Proterozoic basic magmatism of the Siberian Craton: Main stages and their geodynamic interpretation // GEOTECTONICS, 2012, Volume: 46 Issue: 4 Pages: 273-284

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Карманов Е.Н. — собрал полевой каменный материал для статьи, разработал концепцию статьи, внес вклад в обработку и анализ минералогических данных и в создание графической информации, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Леднева Н.В. — внесла вклад в разработку концепции статьи, внесла вклад в обработку и анализ минералогических и спектроскопических данных, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Рассулов В.А. — производил измерения и внес вклад в обработку и анализ спектроскопических исследований минералов и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Томашев А.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Karmanov E.N. — during geology mapping combined rocks material for investigations, developed the article concept, contributed to the processing and analysis of geological and geochemical data and to the creation of graphical information, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Ledeneva N.V. — contributed to the development of the concept of the article, contributed to the processing and analysis of geological and geochemical data, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Rassulov V.A. — made measurements and contributed to the processing and analysis of spectroscopy studies of minerals and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Tomashev A.V. — contributed to the development of the concept of the article, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Карманов Егор Николаевич* — ассистент кафедры геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»; младший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
31, стр. 1, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: karmanoven@mgri.ru

тел.: +7 (985) 848-77-98

SPIN-код: 1644-5430

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-0238>

Egor N. Karmanov* — assistant of the Department of Geology of Mineral Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, junior researcher of All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
31/1, Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: karmanoven@mgri.ru

tel.: +7 (985) 848-77-98

SPIN-code: 1644-5430

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-0238>

Леденева Надежда Викторовна — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского».

31, стр. 1, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: ledeneva@vims-geo.ru

тел.: +7 (916) 324-68-04

SPIN-код: 2770-7314

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5390-1772>

Рассулов Виктор Асафович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского».

31, стр. 1, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: rassulov@mail.ru

тел.: +7 (905) 778-45-16

SPIN-код: 8736-5002

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6235-0936>

Томашев Александр Вячеславович — ведущий специалист ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского».

31, стр. 1, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: tomashev@vims-geo.ru

тел.: +7 (905) 584-63-12

SPIN-код: 1318-1393

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7300-7172>

Nadezhda V. Ledeneva — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), senior researcher of All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky

31/1, Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: ledeneva@vims-geo.ru

tel.: +7 (916) 324-68-04

SPIN-code: 2770-7314

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5390-1772>

Viktor A. Rassulov — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), senior researcher of All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky

31/1, Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: rassulov@mail.ru

tel.: +7 (905) 778-45-16

SPIN-code: 8736-5002

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6235-0936>

Alexander V. Tomashev — senior specialist of All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky

31/1, Staromonetnyi lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: tomashev@vims-geo.ru

tel.: +7 (905) 584-63-12

SPIN-code: 1318-1393

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7300-7172>