



UDK: 550.84:553.08(575.14)

Zafarjon ERGASHOV,  
O'zbekiston Milliy universiteti tayanch doktoranti  
E-mail: zafarjonergashov@gmail.com

O'zMU dotsenti I.Ganiev taqrizi asosida

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED DEVELOPMENT OF GEOCHEMICAL PROSPECTING CRITERIA FOR RARE EARTH ELEMENT MINERALIZATION IN BLACK SHALES

Annotation

This article presents the latest research results on the geochemical features of rare earth element (REE) mineralization in black shales of the Ustuk area, Northern Nuratau, and the development of prospecting criteria. The study involved more than 6,000 samples collected from drill cores and surface trenches during geological exploration works. Artificial intelligence techniques were applied to evaluate geochemical anomalous zones of REEs. As a result, geochemical prospecting criteria for REE mineralization in black shales were developed, exemplified by the Ustuk area.

**Keywords:** Artificial intelligence, machine learning models, black shales, rare earth elements (REE), geochemical prospecting criteria, geochemical modeling.

## РАЗРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПОИСКОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЧЁРНЫХ СЛАНЦАХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация

В статье приведены результаты исследований геохимических особенностей минерализации редкоземельных элементов (REE) в чёрных сланцах Устукской площади Северного Нуратау и разработка критериев их поисков. В исследовании использовано более 6000 проб, отобранных из буровых скважин и поверхностных траншей в ходе геологоразведочных работ. С применением методов искусственного интеллекта проведена оценка геохимически аномальных зон REE. В результате на примере Устукской площади разработаны геохимические критерии поисков минерализации REE в чёрных сланцах.

**Ключевые слова:** Искусственный интеллект, модели машинного обучения, чёрные сланцы, редкоземельные элементы (REE), геохимические критерии поисков, геохимическое моделирование.

## SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA QORA SLANESLARDAGI KAMYOB YER ELEMENTLARI MINERALLASHUVINING GEOKIMYOVIIY IZLASH MEZONLARINI ISHLAB CHIQUISH

Annotatsiya

Ushbu maqolada Shimoliy Nurotaning Ustuk maydonidagi qora slaneslarda kamyob yer elementlari (REE) minerallashuvining geokimyoviy xususiyatlari o'rganish va ularni izlash mezonlari ishlab chiqish uchun olib borilgan tadqiqotlar oxirgi natijalari bayon qilinadi. Tadqiqotga maydonda geologik-qidiruv ishlari olib borishda burg'i quduqlari va yer usti lahmlaridan olingan 6000 tadan oshiq namunalarning ICP-MS analitik-tahlillari va geologik ma'lumotlari jalb qilindi. Sun'iy intellekt yordamida REE geokimyoviy anomal sohalari bahoratlandi. Natijada Ustuk maydoni misolida qora slaneslarda REE ma'danlashuvini izlashning geokimyoviy izlash mezonlari ishlab chiqildi.

**Kalit so'zlar:** Sun'iy intellekt, mashinaviy o'rganish modellari, qora slanes; kamyob yer elementlari, geokimyoviy izlash mezonlari, geokimyoviy modellar.

**Kirish.** So'nggi yillardagi fan-texnika rivoji natijasida nodir metallar va REE ga bo'lgan talab ortib bormoqda, bu esa yangi xomashyo manbalarini izlashni dolzarbligini oshishiga olib kelmoqda. O'zbekiston Respublikasi Tog'-kon va geologiya vazirligi tashabbusi bilan qora slaneslardagi REE sanoatbop minerallashuviga istiqbolli maydonlarda qidiruv ishlari olib borilmoqda. Jumladan, Shimoliy Nurota tog' tizmasidagi Ustuk maydoni REE bo'yicha geologik o'rganilgan asosiy maydonlardan biridir.

Tarixan bu hududda XX asr o'rtalaridan boshlab qora slaneslardagi uran va boshqa metallarning minerallashuvi o'rganib kelingan. 2011–2020-yillardagi geologik qidiruv ishlari doirasida esa Ustuk-Fozilmon maydonida uran konlari bilan birga molibden, vanadiy kabi yo'ldosh elementlar va kamyob yer elementlari birgalikda uchrashi aniqlandi. Biroq, qora slaneslardagi REE minerallashuvining geokimyoviy xususiyatlari, ularning boshqa minerallashuvlar bilan bog'liqligi hamda geokimyoviy izlash mezonlari to'liq o'rganilmagan. Shu nuqtayi nazardan, REE minerallashuvi geokimyoviy jihatlarni chuqur tahlil qilish va ularni izlash mezonlarini ishlab chiqish zarurati mavjud.

**Ustuk maydonining geologik tuzilishi.** Ustuk maydoni shimoliy-g'arbiy yo'nalish bo'ylab 100 kmdan oshiqroq cho'zilgan va kengligi 7-40 kmni tashkil etadigan Shimoliy Nurota tizmasining markaziy qismida joylashgan, hamda ma'muriy jihatdan Samarqand viloyati, Qo'shrabot tumaniga qarashlidir.

Maydon Zarafshon-Turkiston strukturaviy formatsion zona (SFZ) sida, Uchmola-Ustuk urandor strukturaviy tugunidagi Ustuk-Fozilmon (95 km<sup>2</sup>) uran ma'dan hududida, mutlaq balandligi 1600-2114 m bo'lgan suvayirg'ich qismida joylashgan.

Shimoliy Nurota tog' tizmasining markaziy va g'arbiy qismlari tokembriy, paleozoy va kaynosoy hosilalaridan tashkil topgan. O'rganilayotgan maydon asosan tokembriy (quyi suvliqsoy subsvitasi – R<sub>3</sub> sv<sub>1</sub>), paleozoy (konsoy svitasi - O<sub>1-2</sub> kn) va

ularni yorib chiqqan Sho'rak subkompleksi intruziv hosilalari, hamda nurashi mahsuli hisoblangan elyuvial-delyuvial to'rtlamchi davr yotqiziqlaridan iboratdir.

REE minerallashuvi bog'liq hisoblangan quyi suvliqsoy subsvitasi qora slaneslari suvayirg'ich bo'ylab, maydonning markaziy pozitsiyasida asosiy suvayirg'ichi bo'ylab janubiy-sharqdan shimoliy-g'arbga tomon tarqalgan va antiklinalining yadrosini tashkil etadi. Subsvita tog' jinslari asosan to'q kulrang va qora rangda bo'lganligi, metamorfizm natijasida kremnilashish evaziga jiohlanmagan ko'z bilan qaraganda farqlash qiyinligi, asosiy qismini uglerod-kremniyli slaneslar tashkil etganligi sababli umumiy qilib "qora slanes" qo'llanilsada, uning tarkibi turli tog' jinslaridan tashkil topgan. Subsvitaning quyi qismi kulrang, to'q kulrang, yo'l-yo'l afanitli kvarsit, to'q kulrang massiv, turli donador dolomit va dolomitlashgan ohaktoshlardan, hamda to'q kulrang ba'zi joylarida yashil-kulrang yo'l-yo'l slyudali kvarsitlar va uglerodli slaneslardan iborat. Dolomit va dolomitlashgan ohaktoshlar kesimda linza va linzasimon qatlamchalar ko'rinishida uchraydi va uzunligi 1,5 kmgacha va qalinligi 0,5 mdan 9-11 mgacha yetadi. Kvarsitlar va dolomitlar qatlamchalari orasida slyuda-kvarsli, slyuda-kvars-dala shpatli va kremniyli slaneslar linzasimon qatlamlar ko'rinishida uchraydi va ularning uzunligi 2,5-3,0 km qalinligi 0,1 mdan 3-4 mgacha bo'ladi. Subsvita qalinligi 900 mgacha. O'rganilayotgan maydonda va uning atrofiga Sho'rak kechki karbon adamellit-granidioritli submajmuasi hosilalari tarqalgan. Ular Ustuk, Sentob intruziv massivlari va daykali hosilardir.

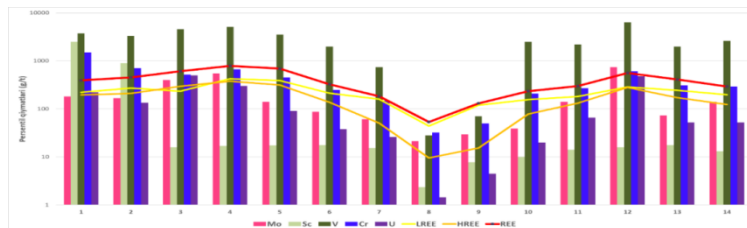
**Statistik tadqiqotlar metodologiyasi va natijalari.** Ustuk maydonida rivojlangan kamyob yer elementlari ma'danlashuvini geologik-geokimyoviy o'rganish ishlari olib borilgan geologik qidiruv ishlari doirasida olingan 6 000 tadan oshiq turli namunalar geologik va ICP-ms laborator-analitik tahlil ma'lumotlarini tadqiq qilishga asoslanadi va quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

Statistik qayta ishlashning dastlabki bosqichida kimyoviy elementlar tarkibining taqsimlanish xususiyatlari o'rganilgach, asosiy to'plam sifatida normal taqsimot gistogrammasi bo'yicha 6  $\sigma$  oraliq qiymatlar to'plami qabul qilindi. Asosiy to'plam sifatida qabul qilingan 6  $\sigma$  oraliq mediana (Me) qiymatidan 3 standart ogishga kichik va katta bo'lgan oraliq tushiniladi ( $Me \pm 3 \sigma$ ). Me – to'plamning medianasi.  $\sigma$  – standart og'ishi. Tibco Statistika 14 dasturida avtomatlashtirilagan holda barcha namunalar, hamda har bir tog' jinsi guruhi uchun tavsifli statistik parametrlar (na'munlar soni, kimyoviy elementlar miqdori bo'yicha arifmetik o'rtacha miqdori, madiana, moda, modaning chastotasi, minimum va maksimum miqdorlari, yuqori quyi chorak va prosentel miqdorlari, standart og'ishi) aniqlandi, buning natijasida har bir kimyoviy element uchun mahalliy fon, minimal anomal miqdorlar hisoblab topildi. Kimyoviy elementlarning, xususan kamyob yer elementlarining statistik xususiyatlarini o'rganish orqali, ularning asosiy ma'danlashuv asotsiatsiyalarini, yo'nalishlarini, fazoda joylashuvi bo'yicha xulosa qilish, ularning geokimyoviy izlash mezonlarini ishlab chiqish maqsadida geokimyoviy ma'lumotlarni geostatistik tahlil amalga oshirildi.

Ustuk maydonida turli tog' jinslari guruhlarida kimyoviy elementlarning taqsimlanish qonuniyatlarini tushinish maqsadida olib borilgan statistik tahlil natijalari bo'yicha quyidagi xulosalar qilindi:

**Kamyob yer elementlari (REE).** REE va ular bilan aloqadorlik namoyin qiladigan U, V, Mo elementlarining yuqori konsentratsiyalari quyi suvliqsoy subsvitasi dolomitlashgan ohaktoshlari, ohaktoshlari, kvarsitlari va terrigen jinslarida shakllangan metasomatit hosilalarda qayd etiladi. Yengil kamyob yer elementlar (LREE) guruhchasi umumiy miqdori aksariyat hollarda og'ir kamyob yer elementlar (HREE) guruhchasinikidan yuqori va bu tafovut - intruziv hosilalarida eng katta, faqatgina suvliqsoy subsvitasi kvarsit va mikrokvarsitlarida HREE umumiy miqdori LREE nikidan biroz yuqoriligi namoyon bo'ladi (1-rasm).

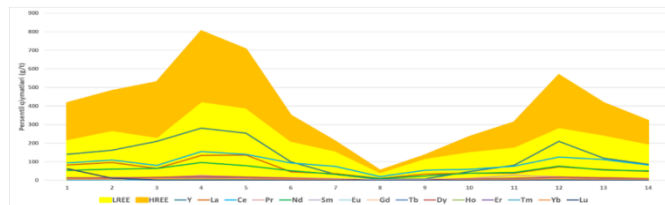
1-rasm



REE va ular ularning asosiy yo'ldoshlari persentel qiymatlarining turli tog' jinslarida solishtirma grafigi

REE guruhini tashkil etuvchi barcha elementlar yuqori persentil qiymatlari 53-790 g/t gacha o'zgaradi va eng katta umumiy miqdori quyi suvliqsoy subsvitasi dolomitlashgan ohaktoshlariga, keyingi o'rinlarda subsvitaning ohaktoshlariga, kvarsitlariga va terrigen jinslarida shakllangan metasomatit hosilalariga subsvitani tahsil etuvchi qolgan tog' jinslari guruhlariga, eng kichik miqdori Sho'rak submajmuasi adamellit va granitoidlarining birinchi fazasi ( $\gamma\delta_1C_3$  s) ga mos keladi. 2-rasmni tahlil qilib, REE tashkil qiluvchi asosiy elementlar Y, Ce, La va Nd ekanligiga yana bir bor ishonch hosil qilish mumkin.

2-rasm



REE persentel qiymatlarining turli tog' jinslarida solishtirma grafigi

Maydonda rivojlangan tog' jinslarida kimyoviy elementlarning tarqalish tushinish maqsadida tavsifli statistik tahlil orqali topilgan elementlarning klark konsentratsiyalarini kamayish tartibida joylashtirib har bir tog' jinslari guruhlari to'planish qatorlari ishlab chiqildi va quyidagicha talqin qilindi:

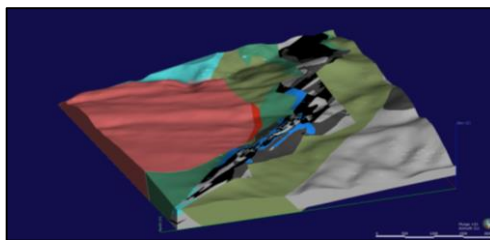
**Uglerod-kremniyli slaneslar.** Quyi suvliqsoy subsvitasi ( $R_{3sv1}$ ) uglerod-kremniyli slaneslari Te (2889), Sb (741), Se (79), In (48) kabi xalkofillarga, Pt (1300), Au (350), Co (75), Re (65) kabi siderofillarga, Lu (185), Eu (15), Tb (14), Ho (9), Tm (6) kabi HREE guruhchasi elementlariga ixtisoslashuvini qora slaneslarning murakkab hosil bo'lish sahroiti bilan bog'lash mumkin.

Lu, Eu, Tb kabi HREE guruhchasi elementlari yetarli harorat sharoiti bo'lganda organik uglerod tarkibida to'planishi bir qator ilmiy ishlar orqali ta'kidlangan, misol uchun: "...Our results show that heavier REE (HREE) have a positive correlation with

TOC in our Appalachian core samples. However, data from the global oil shales display an opposite trend. We propose that although TOC controls REE enrichment, thermal maturation likely plays a critical role in HREE partitioning into refractory organic phases, such as pyrobitumen. ...” (Bhattacharya va b., 2024).

**Geostatistik tadqiqotlar va sun'iy intellekt texnologiyalari yordamida olingan natijalar.** Geologik ma'lumotlar (geologik xaritalar, burg'i quduqlari va yer usti lahimlari ma'lumotlari) dan foydalanib “Datamine Studio RM” va “Leapfrog Geo” dasturiy ta'minotlari yordamida tadqiqot maydonining raqamli 3D geologik modeli qurildi (3-rasm).

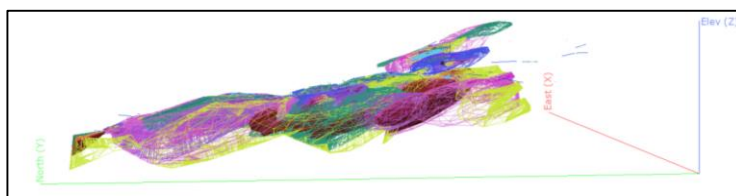
3-rasm



Ustuk maydonining raqamli 3D geologik modeli

Kamyob yer elementlari va ular bilan aloqadorlik kasb qiladigan elementlarning fazoda o'zaro bog'liqligi tadqiq qilish maqsadida REE guruhi elementlari (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, REE) va statistik tahlillar asosida yo'ldosh deb baholangan U, Cr kabi elementlari ma'lumotlari “Leapfrog Geo” dasturiy uch o'lchamli fazoda interpolatsiya qilindi va Ustuk maydonining raqamli 3D-geokimyoviy modeli yaratildi (4-rasm).

4-rasm



Ustuk maydonining 3D-geokimyoviy modeli

Sun'iy intellekt texnologiyalarida ma'lumotlarni tadqiq qilishda “training data” va “test data” mos atributlar bo'lishi va ularning o'zaro munosabatlari o'xshash qonuniyatlarga asoslanishi bashoratlash aniqligini ta'minlashda muhim hisoblanadi. Shu sababli yuqorida aloqadorlik munosabatlari o'xshash bo'lgan kimyoviy elementlar miqdorlari, koordinatalar va tog' jinslarining tavsiflari kabi atributlarni o'z ichiga olgan ma'lumotlar bazalari yaratildi. Tayyorlangan ma'lumotlardagi atributlarning o'zaro aloqadorlik qonuniyatlaridagi o'ziga xosligiga mos keluvchi sun'iy intellekt modelini tanlab olish uchun “test data” ma'lumotlari bir nechta modellarda ma'lumotlar bazasini tasodifiy 60% i (modelni o'rgatishga) va 40% i (bashoratlashga) bo'lib, dastlabgi baholash ishlarini amalga oshirildi.

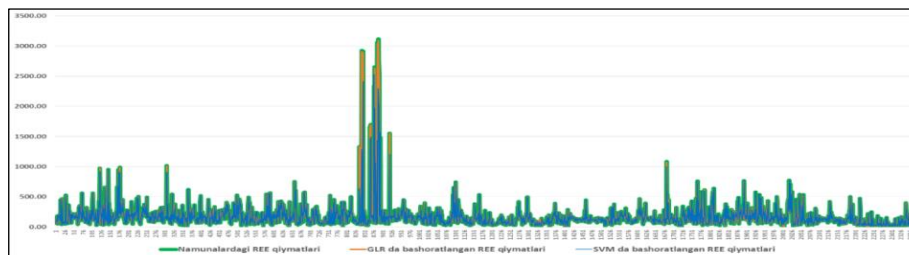
1-jadval

Sun'iy intellekt modellarini dastlabgi baholash natijalarini ifodalovchi jadval

| Mashinali o'rganish modeli nomi | Model nomining qisqartmasi | Kvadrat xatoliklarning ildiz osti o'rtachasi (RMSE) | Mutlaq xatolik (Absolute error) | Nisbiy xatolik (Relative error) | Kvadrat xatolik (Squared error) | Umumiy vaqt, sekunda |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Generalized Linear Model        | GLM                        | 3,14                                                | 1,89                            | 2,1%                            | 14,40                           | 2                    |
| Deep learning                   | DL                         | 14,13                                               | 7,63                            | 6,2%                            | 202,22                          | 7                    |
| Decision Tree                   | DT                         | 61,07                                               | 16,41                           | 7,4%                            | 4 017,99                        | 4                    |
| Random Forest                   | RF                         | 61,19                                               | 18,61                           | 9,6%                            | 3 852,35                        | 13                   |
| Support Vector Machine          | SVM                        | 53,63                                               | 5,70                            | 1,4%                            | 3 598,73                        | 105                  |

Nisbiy xatolikdan tashqari barcha xatoliklar toifasi bo'yicha, bashoratlashga ketgan umumiy vaqt sarfi bo'yicha eng kam qiymatlar bilan ustunlikka “Umumlashtirilgan chiziqli model” (Generalized Linear Model), nisbiy xatoliklar kichiligi bo'yicha “Tayanch vektor mashinasi” (Support Vector Machine) ustunlikka ega bo'ldi (1-jadval). Shu bilan birga SVM bashoratlash uchun eng ko'p vaqt sarflagan model bo'ldi. Quyidagi grafikda REE qiymatlari va ustunlikka ega ikkita modellardan olingan bashoratlangan qiymatlar solishtirildi.

5-rasm



“Test data” ma'lumotlarini sun'iy intellekt yordamida bashoratlangan qiymatlarining namunalardagi REE miqdorlari bilan solishtirma grafigi

Ikkita ustunlikka ega modellarning “Test data” ma'lumotlarini sun'iy intellekt yordamida bashoratlangan qiymatlarining namunalardagi REE miqdorlari bilan solishtirma grafigi (5-rasm) shuni ko'rsatadiki, SVM modeli REE miqdorining kata

qiymatlari (900 g/t va undan ortiq) da bashoratlashni xatoliklar bilan va GLR modeli barcha REE ning barcha qiymatlari uchun deyarli aniq bashoratlashni amalga oshirgan.

Bashoratlash natijalari "Leapfrog Geo" dasturiy ta'minotiga integratsiya etilib, bashoratlangan REE qiymatlari interpolyatsiya qilindi.

Natijasida REE ning minimal anomal miqdorlari bo'yicha hosil qilingan izohajmlari o'lgangan namunalar (burg'i quduqlari va b. olingan namunalar) ning anomal miqdorlari joylashgan fazo qismlarining aksariyatini qamrab olishiga erishildi.

Bashoratlangan REE miqdorlarining izohajmlari asosiy sharnir bo'yicha izchil trend hosil qilib joylashishi yana bir bor ma'danlashuvdagi strukturaviy-tektonik omillarning, maydonning markaziy qismida intruzivga yaqin joyda izohajmlarning intensivligi oshishi magmatik omillarning muhim o'rnini tasdiqlaydi.

**Xulosa.** REE anomal miqdorlari joylashuvi quyi suvliqsoy subsvitasi karbonat-terrigen jinslari bilan bog'liq bo'lib, intruzivdan uzoqroqda asosan uglrrod-kremnili slaneslarga, hamda yaqinroq sohalarida esa dolomitlashgan ohaktoshlar va subsvita terrigen jinslarida shakllangan metasomatit hosilalarga to'g'ri keladi. Intruzivga yaqin sohalarida dolomitlashgan ohaktoshlar va subsvita terrigen jinslarida shakllangan metasomatit hosilalardagi REE anomal miqdorlari yuqoriroqligi, ma'danlashuvda metasomatizm va skarnlashuv jarayonlarini vujudga keltirgan magmatik jarayonlar muhim rol o'ynaganidan dalolat beradi;

- maydon markazidan o'tib, Ustuk antikalinali yadrosini tashkil etuvchi quyi suvliqsoy subsvitasini ikkita blokka ajratgan sharnir yer yorig'i va yaqin joylarda bo'ylab REE birlamchi oreollari anomal sohalarini joylashishi ma'danlashuvda tektonik omillar o'rnini muhimligini tasdiqlaydi;

- mazkur ilmiy ish doirasida geologik va geokimyoviy ma'lumotlarni tadqiq qilish natijasida Sentob intruzivi ta'sirida quyi suvliqsoy subsvitasi qora slaneslarini yotiq burchak ostida kesuvchi (yotish azimuti – 45-55° va yotish burchagi 30-35°) sharnir yer yorig'i bo'ylab rivojlangan metasomatoz va skarnlashuv jarayonlari ma'danlashuvning asosiy omillari sifatida xulosa qilindi.

#### ADABIYOTLAR

1. Bhattacharya S., Sharma S., Agrawal V., Dix M. C., Zanon G., Birdwell J. E., Wylie A. S., Wagner Jr. W., Wagner T. (2024). *Influence of Organic Matter Thermal Maturity on Rare Earth Element Distribution: A Study of Middle Devonian Black Shales from the Appalachian Basin, USA*. *Energies*, 17(9), 2107. <https://doi.org/10.3390/en17092107>.
2. McManus J., Berelson W. M., Severmann S., Poulson R. L., Hammond D. E., Klinkhammer G. P., Holm C. (2006). *Molybdenum and uranium geochemistry in continental margin sediments: Paleoproxy potential*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), 4643–4662. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1564>.
3. Cheng Li, Bingli Liu, Ke Guo, Binbin Li, Yunhui Kong (2021). *Regional Geochemical Anomaly Identification Based on Multiple-Point Geostatistical Simulation and Local Singularity Analysis – A Case Study in Mila Mountain Region, Southern Tibet*. *Minerals*, 11(10), 1037.
4. А.И. Рустамов, З.Й. Эргашов. «*Опережающие специализированные поисковые работы на выявление промышленного урана оденения скарнового типа в пределах Устук-Фазильманской перспективной площади в горах Северный Нурау*» отчет Северо-Нураутинской поисковой партии за 2011-2016 гг.