

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.424.6

ФОНОВЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ТЕРРИТОРИИ  
ЭЛЬКОНСКОГО УРАНОВОРУДНОГО РАЙОНА

© 2023 г. М. О. Миронова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»,  
ул. Маршала Тухачевского, 32, корп. «А», Москва, 123154 Россия

\*E-mail: [tomirono@yandex.ru](mailto:tomirono@yandex.ru)

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Эльконский урановорудный район, расположенный в южной части Якутии, обладает богатейшими запасами урановой руды. Руды отличаются сложным комплексным составом, основным компонентом является браннерит. Несмотря на длительную историю изучения, до недавнего времени месторождения не разрабатывались. Представленное исследование базируется на данных, полученных непосредственно перед началом активного освоения, и призвано зафиксировать исходное состояние природной среды. Изучено содержание основных элементов и важнейших радионуклидов в почвах (рыхлых поверхностных отложениях), растительности и поверхностных водах, выявлены местные особенности их распределения по ландшафтам, зафиксированы превышения содержания, связанные с природными процессами (формирование вторичных ореолов выветривания) и техногенными нарушениями вследствие проведения геологоразведочных работ.

**Ключевые слова:** геоэкология, геохимия, Эльконский урановорудный район, фоновые исследования

**DOI:** 10.31857/S0869780923040069, **EDN:** PPGVBZ

ВВЕДЕНИЕ

С 1990-х годов потребление урана устойчиво опережает добычу, и на производство идут накопленные ранее запасы. Для России в 2005 г. природный уран удовлетворял только пятую часть потребностей российских реакторов и экспорта тепловыделяющих сборок и низкообогащенного урана. Когда в 2007 г. на мировом рынке резко выросли спотовые цены на уран, было принято решение начать разрабатывать урановые месторождения, ранее отнесенные к резервным. К их числу относятся месторождения Эльконского урановорудного района (ЭУР) в Южной Якутии. В районе исследованы крупнейшие запасы урана (разведанные 345 тыс. т, прогнозные до 300 тыс. т [8]), добыча которых в свое время была признана нерентабельной из-за бедности руд, их сложного состава и большой глубины залегания.

В современных условиях любая хозяйственная деятельность должна вестись на принципах сохранения природной среды. Знание начальных условий позволяет оценивать антропогенные изменения, их направление и величину и помогает при ведении мониторинга.

Цель представляемой работы — охарактеризовать исходные геоэкологические условия Эльконского урановорудного района на основе полевых

исследований, проведенных до начала освоения месторождений.

ХАРАКТЕРИСТИКА  
ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

ЭУР локализован в пределах Эльконского горста Алданского плоскогорья — части Алдано-Станового щита Сибирской платформы. Несмотря на то что Алданский горнопромышленный район привлекал внимание геологов с начала XX в., в хозяйственном отношении территория освоена слабо — до г. Томмот, ближайшего населенного пункта, расстояние больше 20 км.

Местность представляет собой среднегорье с абсолютными высотами до 1449 м и относительными превышениями до 500–700 м. Современный рельеф сформирован длительной денудацией в условиях умеренного вздымания территории и имеет высокую степень расчлененности. Водоразделы узкие, участками гребневидные; склоны речных долин характеризуются высокой крутизной (до 35–45°). На рис. 1 показана гипсометрическая карта местности и три месторождения, с которых планировалось начинать освоение ЭУР: Дружное, Курунг, Эльконское плато — которые и стали объектами изучения.

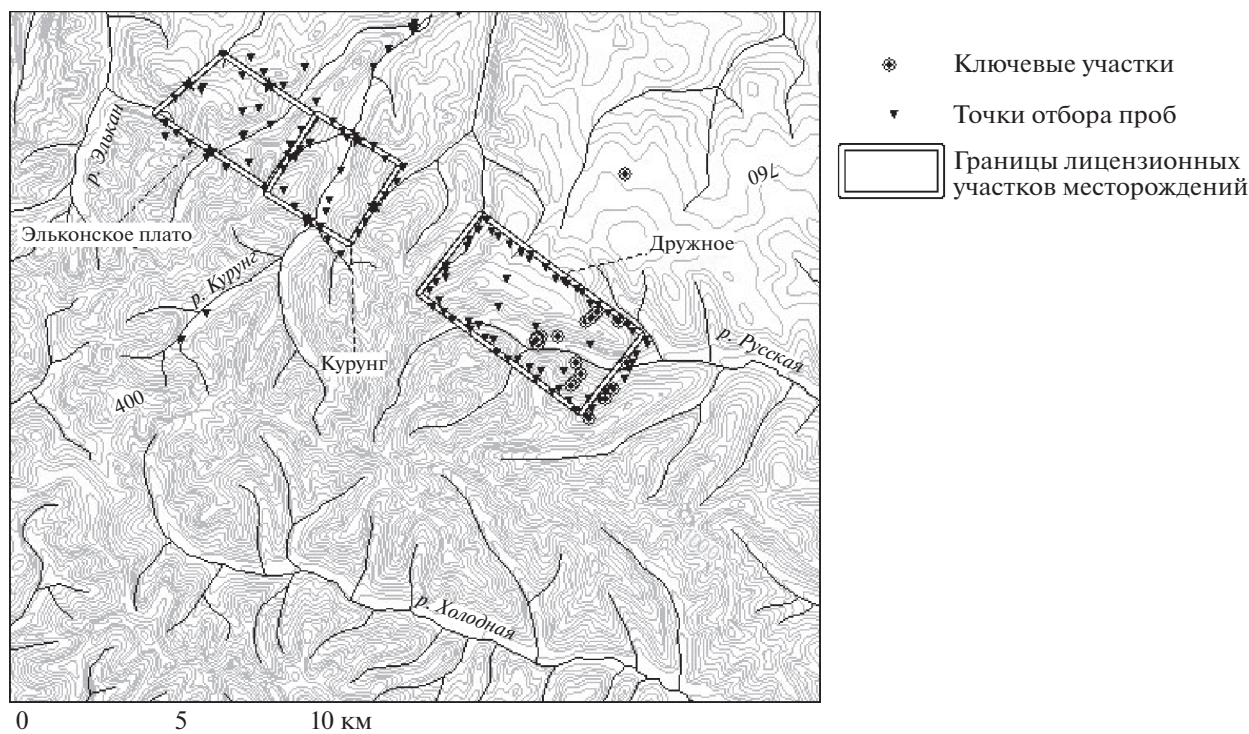


Рис. 1. Карта фактического материала.

На поверхность здесь выходят древние породы фундамента, существенно меньшую площадь составляют отпрепарированные выходы интрузивов – даек и пластовых тел протерозойского, юрского и мелового возраста, юрских силлов и лакколитов. Более молодые породы представлены только четвертичными образованиями – аллювием рек Русская и Холодная – и обнаруживаются сильно восточнее и южнее изучаемого участка ЭУР. Щит разбит древними же разломами, омоложенными во время мезозойской активизации. К мезозойскому времени, когда сформировался Эльконский горст, относятся проявления щелочного магматизма, с ним связано формирование руд урана и золота [2, 8, 9].

Важнейшими особенностями рудных тел являются форма нахождения урана в виде браннерита (титаната урана) и уникальные приразломные предрудные золотосодержащие пирит-карбонат-калиевошпатовые метасоматиты. Помимо урана, планируется извлечение золота; прорабатываются планы добычи других металлов, в первую очередь, молибдена и серебра. Бедность руд, сложный состав, большая глубина залегания и геологическое строение определяют в качестве наиболее подходящего метода отработки подземное кислотное выщелачивание.

Для региона характерен резко континентальный климат, с длительной холодной зимой и коротким жарким летом. При значительных суточных и годовых амплитудах среднегодовая темпе-

ратура воздуха составляет от  $-3.5$  до  $-6.2^{\circ}\text{C}$ , что обуславливает широкое развитие многолетне-мерзлых пород (ММП). Их мощность доходит до 200–400 м, летнее оттаивание – от 0.5 до 3 м. Поверхностные воды гидрокарбонатные кальциево-магниевого, ультрапресные. Типичные ландшафты – среднегорная лиственничная тайга на слабо-развитых почвах мерзлотного ряда [4, 5, 15, 16].

Постепенное разрушение рудных тел и миграция элементов обуславливают формирование геохимических и, в данном случае, радиохимических аномалий. По литературным данным, в пределах изучаемой территории контрастных геохимических аномалий не наблюдается, однако есть радиоактивные точечные аномалии, отнесенные к природным [6].

Исследования последних лет, появившиеся после принятия принципиального решения о начале разработки месторождений ЭУР [6, 7, 14], указывают на обнаружение локально сильно загрязненных участков. Отмечают существование нерекультивированных скважин [14], отвалов (в том числе без гидроизоляции), шурфов, шахт, штолен, пройденных в ходе геологоразведочных работ 1960–1980-х гг. [11].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состояние природной среды в целом описывается как совокупность состояний ее компонентов. В представляемое исследование включены

компоненты геологической среды из зоны гипергенеза: почвы (почвообразующие, подстилающие породы), поверхностные воды и растительность.

Для характеристики территории использовался метод ландшафтного картографирования. Полевые исследования позволили описать и оконтурить типичные виды ландшафтов ЭУР. Также были проведены дешифрирование космических снимков и анализ гипсометрических и геологических карт. Поскольку все результаты имели географическую привязку, их хранение и обработка проходили с использованием геоинформационных технологий.

Полевые исследования проводились в 2007–2008 гг. (сразу после принятия принципиального решения о начале освоения месторождений, но до начала проведения технических работ) совместными экспедициями специалистов ФГУП “Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии” (ФГУП “ВНИИХТ”) и Якутского государственного университета им. М.К. Амосова (ЯГУ). Изучаемыми компонентами природной среды были: геологическое строение, рельеф, почвы, поверхностные воды, растительный, животный мир, атмосферный воздух. В ходе работ были выделены и описаны ключевые участки (элементарные ландшафты ЭУР), определены их расположение и распространенность; проведены непосредственные радиоэкологические измерения (мощность дозы, концентрация радона в воздухе) и отбор проб для лабораторных анализов.

Ключевые участки выбирались сравнительно-географическим методом (по состоянию растительных сообществ, почв, с учетом рельефа, экспозиции склона, абсолютной высоты, антропогенных изменений) по профилю через долину р. Русская на территории месторождения “Дружное”. На ключевых участках были сделаны лесоводственно-геоботанические описания с закладкой пробных площадей. Определялись проективное покрытие ярусов растительности, возраст компонентов сообществ, видовой состав, обилие, встречаемость и характер размещения растений.

Пробы почв и растительности отбирались по периметру лицензионных участков месторождений на расстоянии 300–500 м (в зависимости от степени расчленения рельефа), в их центрах (на удалении 1–1.5 км от других точек опробования) и на ключевых участках. Отбор почвенных проб проводился в местах с отсутствием признаков смыва или намыва поверхностного слоя, предпочтительно в местах с протяженностью задернения не менее 5 м. Для верхнего слоя почв подсчитывалась и площадь взятия образца для определения поверхностного загрязнения местности долгоживущими искусственными радионуклидами (в единицах Бк/м<sup>2</sup>). Оказалось, что в местных усло-

виях на большей части территории в качестве проб почвы можно отобрать только верхний 10-сантиметровый слой растительности и гумуса, поскольку ниже залегает каменисто-песчаная смесь без глинистой фракции.

Пробы поверхностных вод отбирались у истоков ручьев, в местах слияния, в местах выхода на границу лицензионных участков месторождений.

Координаты ключевых участков и точек пробоотбора определялись по gps-приемникам. В результате было выделено 15 ключевых участков, проведен отбор и анализ проб в 97 точках.

Определение содержания металлов в твердых и жидких пробах проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; части металлов и полуметаллов (Be, V, As, Tl, Bi, Th, U и др.) – методом масс-спектрографии; анионов ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) в пробах почв в водорастворимой форме – методом ионной хроматографии. Для урановых месторождений ко всему комплексу воздействий, которые характерны для объектов добычи полезных ископаемых, прибавляется радиационное воздействие. В пробах при радиохимической пробоподготовке определялись: методом бета-радиометрии –  $^{90}\text{Sr}$ , методом альфаспектрометрии –  $^{239}\text{Pu}$ . Для гамма-спектрометрического анализа  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{238}\text{U}$  использовались автоматизированный спектрометр СЭГ-1П (НПЦ “Аспект”), спектрометр Гамма-1П № 040 и альфа-спектрометр СЭА-13П или альфа-бета радиометр УМФ-2000.

Полученный в результате полевых и лабораторных исследований массив информации характеризует состояние поверхностных вод, почв, растительности до начала освоения месторождений.

Геохимические аномалии определялись сравнительно-оценочным методом. В качестве точки отсчета использованы кларки (К) – средние содержания элементов в литосфере, по А.П. Виноградову в весовых процентах [3]. Отношение определенного содержания элемента к его кларку (кларк концентрации, Кк) характеризует распределение элемента, его накопление и миграционную способность в местных условиях.

Отдельным объектом изучения стали геохимические особенности древних пород щита в пределах ЭУР. Их элювий и делювий являются и почвообразующими, и подстилающими породами. По геологической карте [4, 5, 15, 16] их всего четыре (в порядке распространенности на изучаемой территории):

1.  $\gamma\text{PR}_1$ ,  $\gamma\text{-gnPR}_1$  Ранний протерозой. Каменно-плутонический комплекс лейкогранитовый. Граниты нерасчлененные. Мигматит-плуто-

**Таблица 1.** Формулы геохимической специализации

Исходные породы	По результатам полевых исследований	По данным геохимического картирования листа О–52 [6]
$\gamma PR_1, \gamma\text{-gn}PR_1$	$\frac{L_{25}C_{35}X_{40}}{C_9X_{15}L_{76}}$	$\frac{X_{50}C_{50}}{X_{25}C_{50}}$
$AR_{2?}lg$	$\frac{L_{19}C_{30}X_{51}}{X_7C_{15}L_{78}}$	$\frac{X_{100}}{C_{17}X_{29}L_{54}}$
$AR_{2?}md$	$\frac{L_{25}C_{37}X_{38}}{X_7C_{14}L_{79}}$	
$AR_1?vs$	$\frac{L_{15}C_{34}X_{51}}{X_8C_{14}L_{78}}$	

ны гранитов (амфиболовых, биотитовых, биотит-гранатовых) гнейсовидных, гранито-гнейсов.

2.  $AR_{2?}lg$ . Поздний архей. Федоровская серия. Леглиерская свита. Плаггиосланцы и плаггиогнейсы диопсид-роговообманковые, двупироксен-роговообманковые, прослой плаггиосланцев биотит-роговообманковых, биотит-гиперстеновых и роговообманковых, линзы кристаллосланцев флогопит-диопсидовых, скаполит-диопсидовых и кальцифиров.

3.  $AR_{2?}md$ . Поздний архей. Федоровская серия. Медведовская свита. Плаггиосланцы биотит-роговообманковые и двупироксен-роговообманковые, плаггиосланцы и плаггиогнейсы диопсид-роговообманковые, двупироксеновые, биотит-гиперстеновые, биотит-гиперстеновые, роговообманковые и роговообманково-диопсидовые, линзы диопсидовых кристаллосланцев и магнетит-флогопит-диопсидовых пород.

4.  $AR_1?vs$ . Ранний архей. Верхнеалданская серия. Васильевская свита. Плаггиогнейсы и плаггиосланцы биотитовые, гиперстеновые, иногда двупироксеновые и (или) амфиболсодержащие, прослой гнейсов и кристаллосланцев гранат-силламанит-кордиеритовых, линзы кварцитов и двупироксеновых плаггиогнейсов.

Для определения значимости вклада геологической составляющей в различие ландшафтов использована формула геохимической специализации. Ассоциация для группы накопления ( $K_k > 1.5$ ) определяется как взвешенная сумма трех геохимических типов элементов по классификации В.М. Гольдшмита (литофильной (Л), халькофильной (Х) и сидерофильной (С)) в процентном выражении: сумма  $K_k$  всех химических элементов принималась за 100%. В формуле указывается вклад групп элементов, в процентах, по степени убывания. Для группы дефицита ( $K_k < 0.7$ ) суммируются обратные величины  $K_k$  (кларки рассе-

яния). Индекс геохимических типов представлен в виде дроби: в числителе группы накопления, в знаменателе группы дефицита, например,

$$\frac{L_{25}C_{35}X_{40}}{C_9X_{15}L_{76}}$$

Проведение корреляционного анализа содержаний элементов и выявление ассоциаций сонахождения были затруднены из-за небольшого количества проб: проверка рядов значений элементов определений критерием хи-квадрат Пирсона показала, что они не являются выборками из нормального распределения. Поэтому использовался коэффициент корреляции Пирсона (коэффициент линейной корреляции) – отношение ковариации к произведению среднеквадратических отклонений.

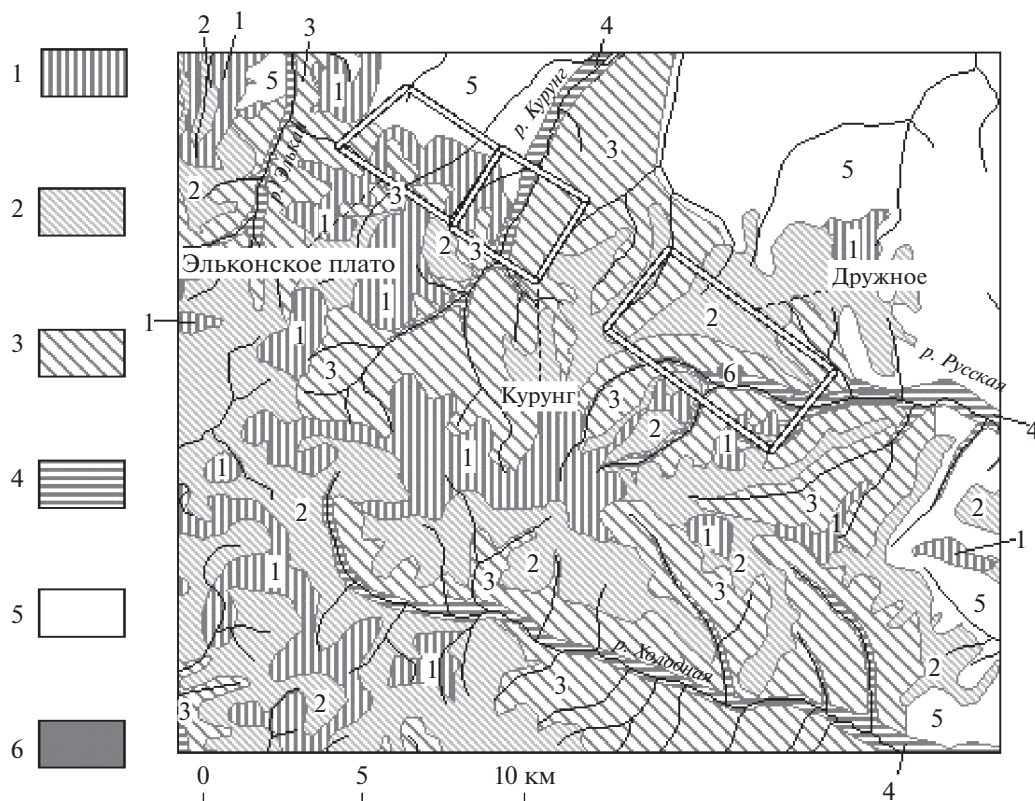
Для оценки существующего загрязнения точкой отсчета выбраны предельно допустимые концентрации (ПДК). Для почв: ПДК<sub>п</sub> – предельно допустимая концентрация химического вещества в пахотном слое почвы, значения взяты из [1]. Для вод: ПДК<sub>в</sub> – предельно допустимая концентрация химического вещества в воде водоемов хозяйственно-питьевого водопользования [1] и СанПиН 2.1.4.1074-01. Для оценки уровня химического загрязнения почв использован показатель природной (или потенциальной) экологической опасности (ПЭО) – аналог суммарного показателя загрязнения  $Z_c$  для природных ландшафтов: сумма  $K_k$  элементов элементов I, II, III классов опасности, минус число элементов, участвующих в расчете без одного. Шкала для ПЭО используется та же, что и для  $Z_c$ : менее 16 – допустимые, 16–32 – умеренные, 32–128 – высокие, более 128 – очень высокие значения [10].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения изменчивости, связанной с миграцией и накоплением элементов в почвообразующих породах, необходимо понять, насколько сильно различаются исходные подстилающие породы. Для этого была подсчитана формула геохимической специализации по пробам, соотношенным с четырьмя типами выделенных пород (табл. 1).

Полученные значения не имеют существенных различий между собой в группах накопления, только в группе дефицита отличаются мигматит-плутоны гранитов. Формула существенно отличается от информации, приводимой в литературных источниках, – что, вероятно, связано с различиями в масштабе исследования и охватом большей территории.

Для дальнейших же исследований сделан вывод, что геохимические различия между разными вариантами исходных пород значения не имеют.



**Рис. 2.** Ландшафтная карта: 1 – вершинные денудационные ландшафты; 2 – крутые денудационные склоны; 3 – аккумулятивно-денудационные ландшафты нижних частей склонов; 4 – долинные ландшафты; 5 – зональные таежные ландшафты; 6 – техногенно-измененные ландшафты.

Геохимическое единообразие пород особенно важно и потому что почвенный покров территории характеризуется незначительной мощностью почвенного профиля. По сути для большинства проб, отобранных как “почвенные”, правильнее было бы указывать пробы “рыхлых поверхностных отложений, в разной степени затронутых почвообразующими процессами”.

Изучение ключевых участков дало представление о том, что в растительности территории четко проявлена высотная поясность, биологические сообщества сменяются в зависимости от высоты на уровне моря и экспозиции склонов. По группам ландшафты могут быть разделены на (рис. 2):

– **денудационные** – с преобладанием криогенных и склоновых процессов:

– **вершины** (пологие склоны гор крутизной  $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$  на высотах 1300–1498 м), крутые склоны и осыпи: повсеместное распространение ММП мощностью до сотен метров; горные тундры, голыцы на примитивных неразвитых почвах, криоземах (знак 1 на рис. 2);

– **верхняя часть склонов** (на высотах 1200–1300 м; склоны средней крутизны ( $15^{\circ}$ – $20^{\circ}$ , до  $40^{\circ}$ ), нагорные террасы); повсеместное развитие ММП, встречаются термокарстовые воронки; чередова-

ние горных тундр и криволесья (преимущественно с кедровым стлаником *Pinus pumila*) на криоземах, маломощных мерзлотно-подзолисто-глеевых, тундровых подбурях (знак 2 на рис. 2);

– **аккумулятивно-денудационные** (знак 3 на рис. 2) – залесенные нижние части склонов (склоны средней крутизны, нагорные террасы на высотах ниже 1200 м) с неглубоким и повсеместным залеганием ММП; лиственничные леса из лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*) с участками темнохвойных лесов на маломощных мерзлотно-подзолисто-глеевых, подзолистых иллювиально-гумусовых, горных подбурях; сосновые леса (*Pinus sylvestris*) на грубоскелетных подзолистых почвах (<5% территории); локально на коллювиальных террасах – глубокое залегание мерзлоты;

– **аккумулятивные** (знак 4 на рис. 2) – плоские поверхности межгорных понижений, днища речных долин на высотах до 1200 м, с глубоким залеганием ММП и сплошными таликами; пестрое чередование сообществ, увязанное с элементами рельефа; лиственные леса (береза, рябина, осина, ольха, черемуха) с кустарниковым подлеском, разнотравно-злаковые, пионерные сообщества,

болота – на соответствующих маломощных подзолистых, аллювиальных, болотных почвах.

В дальнейшем три выделенные группы будут указываться как вершинные, склоновые и долин-ные ландшафты.

Знания о расположении ландшафтов дают возможность изучить миграцию элементов. Она определялась сравнительно-оценочным методом: отличием средних значений для выделенной по какому-либо признаку группы проб от среднего по всем пробам территории.

При сравнении в рядах опробования “**все почвы – все растения**” обнаружено:

- относительное накопление в растительности Ca, Sr, Cu, Mo, Ba, <sup>239</sup>Pu;
- относительное накопление в почвах Bi, Al, V, Fe, Cd, Ni, изотопов Ra, <sup>238</sup>U;
- относительно пониженное содержание в растительности Bi, As, Pb, изотопов Ra;
- относительно пониженное содержание в почвах Zn, <sup>239</sup>Pu.

Такие результаты означают, что для местных растений характерно накопление биофильных, а для почв – литофильных и сидерофильных элементов, что является ожидаемым и косвенно подтверждает отсутствие в результатах полевых исследований серьезных ошибок.

Изучение проб, разделенных по принадлежности к группе ландшафтов, позволяет изучить **миграцию по ландшафтному профилю**. Геохимическая специализация не показала значимых отличий в типах коренных пород, а значит, все горные ландшафты изучаемой территории можно разделить всего на три ранее названные группы и под-считать характерные для них значения.

Общее распределение элементов по ландшафтному профилю от вершин к долинам показывает в почвенных пробах снижение содержания V, Ca, Zn, Zr, Ni, As, рост содержания Si, изотопов Ra.

Распределение элементов в пробах растительности по ландшафтному профилю от вершин к долинам показывает падение содержания <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs, Mo, As, рост содержания Mg, Mn, Be, изотопов Ra.

Рассматривая более детально каждый элемент, следует отметить следующие особенности в их миграции и накоплении. Некоторые элементы (Al, Ba, Ca, Mg, Mn, Fe, V, Ni, Cr, Cd, Co, Hg, Cu, Zn, Zr, U) ведут себя согласно известным геохимическим правилам. Так, уран (U) – выщелоченный элемент, должен концентрироваться в депрессиях, в болотах на глеевом и сорбционном барьере (по [12]). Наблюдаемое содержание урана и его изотопов постепенно и растет от вершин к долинам как в почвенных, так и в растительных

пробах. Малоподвижный в местных условиях Al равномерно распределен по ландшафтам и не накапливается в растениях. Также равномерно распределенные Pb, Ba, Ca, Mg, Sr, Cu, но подвижные и дефицитные в местных условиях ведут себя как биофильные элементы. Самые высокие коэффициенты концентрации отмечены для Cu: в растительных пробах ее содержание почти в 2.5 раза выше, чем в усредненном значении.

Важно, что в поведении некоторых элементов проявились особенности, которые противоречили ожиданиям. Отметим, что выявленные несоответствия необходимо учитывать при дальнейшем изучении ЭУР:

- Стронций (Sr), по результатам химических анализов, ведет себя ожидаемо: обнаруживается его вынос в верхней части профиля, накопление в склоновых почвах и в растительности. Однако изучение активности радионуклида <sup>90</sup>Sr (привнесенного техногенного элемента) показывает преимущественное накопление именно в почвах, а не растительности – при аналогичной миграции в выделенных ландшафтах. Возможно, это связано со спецификой отбора растительных проб – различные части растений по-разному накапливают этот элемент.

- Мышьяк (As), который содержится в значительном количестве в рудных телах, однако его поведение противоречит описанному в литературных источниках. Он характеризуется как подвижный биофильный в местных условиях, однако в ходе исследований самые высокие его относительные концентрации были зафиксированы в почвах верхней части склонов. Можно предположить, что изначальное поступление его из горных пород (в слаборастворимых сульфидных формах) превышает возможности местных условий по окислению до подвижных форм (арсенатов).

- Поведение в ландшафтах сурьмы (Sb), которое, по некоторым литературным источникам [12], должно соответствовать As, на деле заметно отличается. Sb практически нет на водоразделах, значительная ее концентрация наблюдается в склоновых ландшафтах. Отмечается, что соединения сурьмы хорошо растворимы и активно мигрируют; вероятно, этим объясняется как вынос элемента с междуречий, так и из долинных ландшафтов.

- С торием (Th) ситуация обратная; из-за слабой миграционной способности следовало бы предположить его равномерное распределение, но по химическим анализам определено его относительное накопление в долинных ландшафтах. Вероятно, это связано с миграцией Th в составе органических комплексов с последующим накоплением в долинных (богатых гумусом) почвах. Изотопы <sup>228</sup>Th и <sup>230</sup>Th, являющиеся промежуточными членами рядов распада <sup>232</sup>Th и <sup>238</sup>U соответ-

**Таблица 2.** Значение коэффициента линейной корреляции для некоторых пар элементов, определенное в группе проб. Пропущены вычисления, где содержание элемента оказывалось ниже порога обнаружения

	Pb-Sr	Ca-Sr	Ti-Fe	Fe-V	Ni-U	As-Cr	Cu-Ba
Все пробы	-0.12	0.95	0.72	0.82	0.79	0.65	-0.12
Почвенные пробы	0.06	0.84	0.58	0.4	0.67	0.13	-0.72
Пробы растительности	0.3	0.98	0.93	1	0.92		0.58
Пробы кедрового стланика	0.26	0.67	0.96	0.99			0.56

ственно, тоже по-разному распределяются. Вероятно, их распределение определяется миграцией элементов, из которых сформировались данные изотопы. Однако эта версия требует дополнительного глубокого изучения и выходит за рамки данной работы.

- Непонятно преобладающее накопление хрома (Cr) в склоновых ландшафтах по сравнению с долинными, учитывая, что в местных условиях элемент мигрирует слабо и должен бы оседать в иллювиальных горизонтах — а значит, накапливаться не только в нижних частях склонов, но и в долинах. Возможно, это связано с тем, что в подавляющем большинстве точек пробоотбора из-за малой мощности профиля невозможно было разделить почвенные горизонты, и отбиралась только одна усредненная проба. В двух случаях, когда были отобраны пробы из разных горизонтов, подтверждается высокая концентрация Cr в гумусовом горизонте.

- Молибден (Mo), вопреки тому, что в гумидных ландшафтах описывается как слабо мигрирующий элемент, не создающий контрастной латеральной и радиальной дифференциации, показывает значительные отличия в содержании по ландшафтному профилю; вниз по склону его содержание уменьшается. Вероятной причиной можно назвать высокое содержание молибдена в местных горных породах, достигающее до промышленно значимых концентраций [2, 9], что вместе со слабой миграционной способностью и создает видимый эффект накопления (как и в случае с As). Исследование показало увеличение содержания в почвенных пробах тех месторождений, для которых характерно повышенное содержание Mo в рудах.

- Поступление из почвообразующих пород и закрепление в органическом веществе объясняет повышенное содержание в почвах вершин  $^{40}\text{K}$ , хотя, как активный водный мигрант, он должен бы вымываться.

- Титан (Ti) — важный элемент в местных условиях: он образует браннерит, основное сырье для извлечения урана. В местных условиях он должен вести себя инертно [12], что в целом подтверждается и отсутствием накопления в растениях, и равномерным содержанием в склоновых и вершинных ландшафтах. Однако наблюдается

его накопление в долинных ландшафтах, на что следует обратить внимание.

- Количества проб со значимыми определениями висмута (Bi) оказалось недостаточно, чтобы делать выводы о распределении этого элемента — если не считать подтверждения его характеристики как редкого, рассеянного и небифильного.

- Невозможно проанализировать поведение олова (Sn), поскольку по результатам разных видов анализов видны противоположно направленные тенденции к его выносу и накоплению. К сожалению, в этом случае, в первую очередь, следует перепроверить исходные данные.

Рассмотрев в деталях поведение каждого отдельного элемента и сравнив их между собой, можно сделать предварительный вывод, что сформировать явные ассоциации сонахождения затруднительно. Чтобы подтвердить, действительно ли поведение схожих элементов сильно различается, для рядов значений содержаний каждой пары элементов было подсчитано значение коэффициента линейной корреляции: высокое положительное значение этого параметра указывает на совместное концентрирование элементов, обусловленное одним процессом; высокое отрицательное указывает на противоположное направление процессов. Примеры некоторых подсчитанных значений даны в табл. 2.

Даже без разбиения проб на группы высокие значения коэффициента (больше 0.9 по модулю) обнаруживаются у нескольких десятков пар элементопределений. Для почвенных проб их число возрастает до 89. Среди них есть и легко объяснимые (положительные для  $^{230}\text{Th}-\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}-\text{U}$ , Hg-Pb, отрицательные As-Ba), и на первый взгляд неочевидные (положительная Ni-U). Еще большее пространство для детального изучения представляют результаты сравнения растительных проб. Например, в паре Cu-Ba значения для почв отрицательные, а для растительных проб — положительные. В совокупности обнаружено меньшее количество пар с высокими значениями коэффициента линейной корреляции, но при отборе в качестве исходных данных более сходных проб (например, группы проб только кедрового стланика, только травы, только листьев) количество и состав сходных пар существенно изменяются (например, в пробах стланика уменьшается сродство

пары Ca-Sr; для всех отборов растительных проб фиксируются пары Fe-V, As-Cr – причем первая фиксируется и для почвенных проб, а вторая – только в растительных). Известно, что растения разных видов и даже части растений по-разному накапливают отдельные элементы, и здесь видно подтверждение этого. Однако детальный разбор всех процессов биогенного накопления элементов выходит за пределы представляемой работы.

При сравнении выявленных корреляций для разных групп проб (растительность и почвы) можно отметить следующее:

- одинаковые процессы накопления: As-V, Be-Th (положительная);
- противоположно направленные: Pb-Sr (отрицательная для почв, положительная для растительности);
- не обнаруживают сходства либо не хватает данных (по имеющимся данным для растительности): Ca-Sr, Sr-Ba, Ba-Pb, Cr-Bi, Cr-As, Mn-Mo, As-Fe, As-Mo, Al-Ti, As-Ti, Bi-Ni, Be-U, Bi-Sn, U-Th, Fe-V.

### ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

От выявления закономерностей миграции элементов следует перейти к рассмотрению аномалий, которые они формируют. При разработке месторождений новые техногенные геохимические ореолы будут накладываться на уже существующие. Поэтому необходимо определить, насколько значительно существующее загрязнение.

Его наличие легко заметно по анализам водных проб [13]. **Воды поверхностных водотоков** изучаемой местности должны быть пресными и ультрапресными, но отдельные пробы по мелким ручьям на территории месторождений показали существенное повышение минерализации. Самые большие значения минерализации характерны для вод самоизливающихся скважин, оставшихся нерекультивированными после проведения геологоразведочных работ. Для оценки загрязнения важно отметить, что сейчас воды в пределах территории лицензионных участков месторождений разбавляются до нормальных (т.е. характерных для региона ультрапресных).

**Почвенные пробы** ЭУР отличаются повышенными содержаниями Vi (Кк до 59); Co, Cd, Hg (до Кк > 20), As, Pb (до Кк > 10). Наблюдается локальное повышение содержания Mo в юго-восточной части изучаемой территории: обнаруженное увеличение значений в отобранных пробах соответствует повышению содержания этого элемента в рудах [2, 8, 9]. В некоторых случаях содержания Sb, Cl, Cu, U, Mn и Ni также значительно превышают кларковые значения. По кларкам концентраций видно, что основные превышения наблю-

даются для элементов, сложные сульфидные минералы которых сопутствуют браннериту (As, Pb, Hg, Cd).

Геохимические ассоциации элементов, которые составлены для всех точек измерения с Кк > 2, в основном представлены группировкой Vi, Hg, Pb, As в разных сочетаниях. В северо-западной части изучаемой территории добавляется Cd, Co, а южной – Mo.

Повышенные относительно кларковых чисел содержания элементов в некоторых случаях приводят к превышению установленных нормативов. Часто наблюдаются превышения ПДК<sub>п</sub> по мышьяку и свинцу, в единичных случаях – марганца и ртути.

**Суммарная оценка** существующего загрязнения проводилась с использованием показателя природной (или потенциальной) опасности. Подсчитанные значения для каждой из точек измерений характеризуют уровень загрязненности почв как допустимый, в 7 случаях – умеренный (рис. 3).

Превышения значений в большинстве случаев нельзя объяснить влиянием антропогенных объектов (шахт, штолен, отвалов, дорог, жилых зон), поскольку точки опробования выбирались вне зоны видимой миграции поллютантов. Повышенные концентрации элементов в почвах и водах являются проявлением естественной геохимической аномалии – вторичного ореола рассеяния месторождений ЭУР. Важно, что аномальные участки выявлены во всех выделенных типах ландшафтов, и поэтому на имеющемся материале невозможно построить карту “природного загрязнения”.

### ВЫВОДЫ

До начала активного освоения месторождений Эльконского урановорудного района были проведены исследования, целью которых стало изучение исходных геоэкологических условий.

Уточнены закономерности распределения химических элементов и отдельных радионуклидов по компонентам ландшафта; из несоответствия между фактическими и литературными данными описаны местные особенности для распределения по ландшафтам Sr, As, Th, Cr, Mo, Ti, <sup>40</sup>K.

Выявлено, что повышенное содержание в рудных телах As, Hg, Pb, Cu, Mo, U приводит к формированию литохимических аномалий этих элементов в почвах с превышением кларков; для Mn, As, Hg, Pb повышенные содержания иногда означают превышения ПДК в почвах. Существуют водные аномалии, возможно, техногенного происхождения, но они не выходят за пределы лицензионных участков месторождений. Существу-



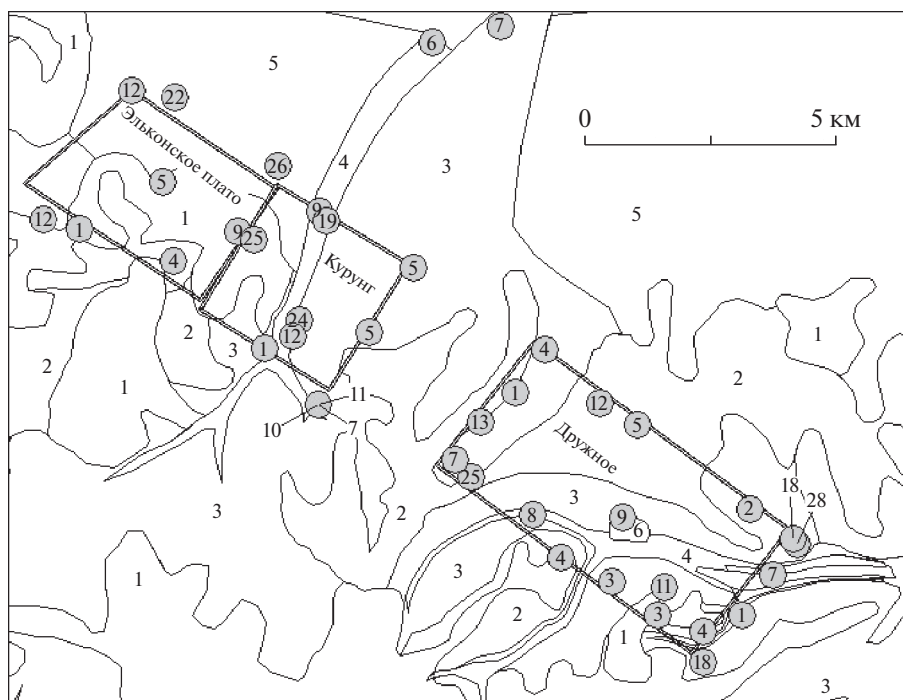


Рис. 3. Значения показателя природной (потенциальной) опасности (цифра в кружке); цифрами показаны индексы ландшафтов (см. рис. 2).

ющий общий уровень загрязнения территории по ПЭО – умеренный и допустимый.

Автор выражает благодарность сотрудникам ФГУП «ВНИИХТ» и Якутского государственного университета им. М.К. Амосова (ЯГУ) за предоставленные материалы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспмятнон Г.П., Кротов Ю.А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. Л.: Химия, 1985. 528 с.
2. Бирка Г.И., Тарханов А.В., Меньшиков Ю.А., Никольский А.Л. и др. Природные типы руд месторождений Эльконского урановорудного района (Республика Саха-Якутия, Российская Федерация) // Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление. М.: ВИМС МПР, 2002. С. 226–236.
3. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
4. Воробьев К.А., Курбатов А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-51-ХП (Ниж. Куранах). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
5. Воробьев К.А., Шумбасова Г.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-51-ХVIII (Алдан). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
6. Геохимическая основа государственной геологической карты Российской Федерации М 1 : 1000000, лист О-52. М.: ИМГРЭ, 2007.
7. Голева Р.В. Об экологическом сопровождении проекта строительство Эльконского ГМК // Рациональное освоение недр. 2011. № 1. С. 61–65.
8. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
9. Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 129–151.
10. Морозова И.А. Геохимические ландшафты и экологическая опасность // Сб. статей «Прикладная геохимия. Вып. 1. Геохимическое картирование». М.: ИМГРЭ, 2000. С. 122–134.
11. Павлова И.В., Домаренко В.А., Галактионов В.А., Журавлев В.Г. Прогнозирование природно-техногенных рисков в зоне влияния будущего Эльконского горнометаллургического комбината (Алданский щит, Республика Саха (Якутия)) // Разведка и охрана недр. 2019. № 12. С. 41–48.
12. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768с.
13. Салова Т.А., Николаева Н.А. Гидрохимические и гидробиологические исследования воды рек Южной Якутии в зоне разработки Эльконского урано-

- во-рудного месторождения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 664.
14. Самсонов Б.Г. Основы объектного мониторинга геологической среды на предприятиях по разведке, добыче и использованию атомного сырья. М.: Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли, 2010. 120 с.
  15. Утробин Д.В., Шевченко В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-52-VII (Томмот). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
  16. Утробин Д.В., Воробьев К.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Изд. второе. Серия Алданская, лист О-52-XIII (Бллымах). М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.

## BACKGROUND GEOECOLOGICAL CONDITIONS OF ELKON GOLD-URANIUM ORE REGION

M. O. Mironova<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Karpinsky All-Russia Geological Research Institute,  
Moscow branch, ul. Marshala Tukhachevskogo 31a, Moscow, 123154 Russia

<sup>#</sup>E-mail: momirono@yandex.ru

The Elkon ore region is located in the southern part of Sakha Republic (the largest federal subject of the Russian Federation). Elkon gold-uranium fields have the richest deposits of uranium ore, but they have not been developed. Although the natural landscapes of mountain taiga are already changed due to about-century-long geological exploration, we have the last chance to fix the environmental conditions before the start of developing. The paper deals with the characteristics of distribution of radionuclides and element in soils, plants and water of El'kon region and is based on field works performed in 2007–2008 (immediately after the decision on exploration). The Elkon horst is the part of Aldan Shield, an exposed basement of the Siberian craton not covered by the latest sediments. The uranium mineralization is confined to igneous Mesozoic complexes. Weathering and erosion cause dispersion halo of elements and radionuclides which may become probable pollutants. The studied area is divided into four geological formations, but soil probes reveal no distinction in geochemistry specialization. So landscapes were divided into three groups by level, slope exposition and vegetation condition. Each group was measured by couple of samples. The main migration features were assessed by the distribution of elements and radionuclides (some local peaks were found for <sup>90</sup>Sr, As, Th, and Mo). The As, Pb (rarely Mn, Hg) contamination of soils is proved. The main co-locations were computed for soils. The total contamination was estimated acceptable to moderate rates, therefore, there were found local high-polluted areas in dump zones. The combined database could be used as a reference point for further environmental research.

**Keywords:** *geochemistry, geoecology, Elkon ore region, uranium mines*

### REFERENCES

1. Bespamyatnov, G.P., Krotov, Yu.A. [Maximum permissible concentration values of chemicals in the environment]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985, 528 p. (in Russian)
2. Birka, G.I., Tarkhanov, A.V, Men'shikov, Yu.A., Nikol'skii, A.L., et al. [Ore types of El'kon uranium ore field (Sakha-Yakutia, Russia)]. In: [Uranium at the turn of the century: natural resources, production and consuming]. Moscow, VIMS MPR, 2002, pp. 226–236. (in Russian)
3. Vinogradov, A.P. [Average content of elements in the main rock types]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
4. Vorob'ev, K.A., Kurbatov, A.V. [State geological map of Russia, scale 1: 200 000. 2nd edition, Aldan series, sheet O-51-XII (Lower Kuranakh)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015, (in Russian)
5. Vorob'ev, K.A., Shumbasova, G.A. [State geological map of Russia, scale 1:200 000. 2nd edition, Aldan series, sheet O-51-XVIII]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013. (in Russian)
6. [Geochemical data for the State geological map of Russia, scale 1: 1000 000, sheet O–52]. Moscow, IMGRE Publ., 2007. (in Russian)
7. Goleva, R.V. [About ecological support to E'lkon mining and smelting plant project]. *Ratsional'noe osvoenie nedr*, 2011, no. 1, pp. 61–65. (in Russian)
8. Mashkovtsev, G.A., Konstantinov, A.K., Miguta, A.K., et al. [Uranium in the Russia's bowels]. Moscow, VIMS Publ., 2010, 850 p. (In Russian)
9. Miguta, A.K. [Uranium fields of El'kon ore region (Aldan shield)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, vol. 43, no. 2, 2001, pp. 129–151. (in Russian)
10. Morozova, I.A. [Geochemical landscapes and environmental hazard]. In: [Engineering geochemistry, issue 1. Geochemical mapping]. Moscow, IMGRE Publ., 2000, pp. 122–134. (in Russian)
11. Pavlova, I.V., Domarenko, V.A., Galaktionov, V.A., Zhuravlev, V.G. [Forecasting of natural and human-in-

- duced risks in the area affected by the future E'lkon mining metallurgical works (Aldan shield, Republic of Saha-Yakutia)]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2019, no. 12, pp. 41–48. (in Russian)
12. Perel'man, A.I., Kasimov, N.S. [Landscape geochemistry]. Moscow, Astrea-2000 Publ., 1999. (in Russian)
  13. Salova, T.A., Nikolaeva, N.A. [Hydrochemical and hydrobiological studies of water in the South Yakutia rivers in the area of E'lkon uranium ore exploration]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, no. 5, p. 664. (in Russian)
  14. Samsonov, B.G. [The basics of geological environment monitoring for nuclear raw material exploration, development and operation facilities]. Moscow, Gidrospeitsgeologiya Publ., 2010. (in Russian)
  15. Utrobin, D.V., Shevchenko, V.I., et al. [State geological map of Russia, scale 1 : 200 000. 2nd edition, sheet O-52-VII (Tommot)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013. (in Russian)
  16. Utrobin, D.V., Vorob'ev, K.A., et al. [State geological map of Russia, scale 1 : 200 000. 2nd edition, sheet O-52-XIII (Yllymakh)]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015. (in Russian)