

УДК 553.411:550.42:631.4(571.56)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЬЮН (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Мишанькин Андрей Юрьевич¹,
aym13@tpu.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Филимоненко Екатерина
Анатольевна², e.a.filimonenko@utmn.ru

Собянин Юрий Петрович³,
yugi_sob63@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

³ ООО «Богуславец»,
Россия, 677027, г. Якутск, ул. Кирова, 18.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения данных о фоновом состоянии почв территории золоторудного объекта, а также целесообразностью поиска взаимосвязей между минеральными и геохимическими особенностями почвенного покрова месторождения.

Цель: выявление минералого-геохимических особенностей почвенного покрова территории золоторудного месторождения Вьюн на доэксплуатационной стадии его освоения.

Объект: почвы территории золоторудного месторождения Вьюн.

Фактические материалы и методы исследования. Фактический материал получен сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета в 2017 г. в ходе выполнения научно-исследовательских работ. В данной статье обсуждаются результаты исследований территории золоторудного месторождения Вьюн по данным изучения 19 проб почв. Работы проводились по стандартным методикам в соответствии с нормативными документами. Элементный состав почв устанавливался методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на содержание 55 химических элементов в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск). Минеральный состав почв определялся с помощью методов оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии на базе Международного научно-образовательного центра «Урановая геология». Результаты обрабатывались с помощью современного программного обеспечения (Microsoft Excel, Statistica, Corel Draw и т. д.).

Результаты. Выявлены минералого-геохимические особенности почв территории золоторудного месторождения Вьюн. Установлена взаимосвязь между минеральным составом рудной зоны и геохимической спецификой почв. Получены данные по повышенным содержаниям золота и элементов-спутников малосульфидного золотокварцевого оруденения, а именно мышьяка, серебра, сурьмы, определены их контрастные ореолы рассеяния, что может использоваться в практике дальнейших поисковых работ.

Ключевые слова:

Золоторудное месторождение Вьюн, почвенный покров, химический состав, минеральный состав, минералого-геохимические особенности.

Введение

Российская Федерация располагает значительными запасами золота, однако не теряет актуальности работы, направленные на расширение минерально-сырьевой базы этого ценного благородного металла, которое происходит по большей части путём проведения поисковых работ в районах золоторудных провинций Сибири и Дальнего Востока, где расположены регионы с наибольшими ресурсами золота (Забайкальский край, Республика Саха (Якутия), Магаданская область и др.). Золотоносность в этих регионах связана с терригенными комплексами Верхояно-Колымской складчатой области, примерно 90 % запасов и прогнозных ресурсов золота которой сосредото-

чены в границах Яно-Колымского золотоносного пояса [1, 2], расположенного в Магаданской области и Республике Саха (Якутия). Яно-Колымский пояс включает в себя Адыча-Тарынскую золотоносную зону с Эльгенджинским рудно-россыпным узлом, в пределах которого и находится исследуемая территория – золоторудное месторождение Вьюн, открытое в 1974 г.

На данный момент ведутся детальные поисковые работы на территории месторождения Вьюн и решается вопрос об его дальнейшей отработке. Проведение горнодобычных работ на месторождении неизбежно приведёт к изменению состояния окружающей среды и отразится на эколого-геохимическом состоя-

нии компонентов природной среды на территории объекта.

В настоящее время известно большое количество материалов, посвящённых экогеохимии территорий рудных объектов [3–7]. Однако зачастую в практике подобных работ уделяется недостаточное внимание фоновой эколого-геохимической оценке, благодаря которой представляется возможным получать данные об исходных параметрах состояния территории месторождений полезных ископаемых (элементном составе природных компонентов, характере геохимических аномалий и пр.).

Работа направлена на оценку фоновой эколого-геохимического состояния почвенного покрова территории золоторудного месторождения Вьюн на предэксплуатационной стадии освоения месторождения.

Характеристика исследуемой территории

Золоторудное месторождение Вьюн расположено в центральной части Республики Саха (Якутия), северо-восточнее столицы региона, г. Якутска, в 550 км от него (рис. 1).

В орографическом отношении район месторождения имеет среднегорный рельеф, местами до высокогорного, с абсолютными отметками до 900–1000 м.

Месторождение расположено в субарктическом природном географическом поясе с суровым резко-континентальным климатом [8].

Для исследуемой территории характерно сплошное развитие многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность их в пределах месторождения не изучена, но с учётом закономерной связи с абсолютными отметками, лежащими в диапазоне 700–1000 м, ориентировочно она равна 400–500 м. Такая закономерность (между мощностью ММП и абсолютными высотами местности) подтверждается и специализированными работами, проведенными в этой области в различных районах Якутии [9, 10]. Согласно данным работам, минимальные мощности (200–300 м) обычно характерны для долин крупных рек. В пределах зон предгорий и небольших водораздельных поверхностей с абсолютными отметками, не превышающими 500 м, мощность ММП увеличивается до 400 м, ближе к водоразделам с абсолютными высотами 500–900 м она достигает значений 500 м, а за пределами этих высот – более 500 м.

Глубина сезонного протаивания в зависимости от экспозиции склонов, характера растительного покрова, высотного положения рельефа и литолого-генетических типов рыхлых отложений в период максимальной оттайки (конец июля – август) изменяется от 0,2 до 0,8 м. Причем минимальные ее значения (0,2–0,3 м) отмечаются на склонах северной экспозиции и залесённых участках, максимальные (0,3–0,8 м) – на открытых поверхностях, лишённых растительного покрова, и склонах южной экспозиции. Тип протаивания по классификации В.А. Кудрявцева [11] – мелкий до среднего, устойчивый до арктического, от умеренно и повышено континентального до резко континентального.

Согласно почвенно-географическому районированию исследуемая площадь принадлежит к Верхоянской провинции очень холодных мерзлотных почв подзоны глеевых мерзлотных таёжных почв северной тайги, а в более широком смысле относится к Восточносибирской мерзлотно-таёжной области борельного пояса [8]. Таежные глее-мерзлотные почвы формируются под предтундровыми редколесьями на суглинистых и щебнистосуглинистых отложениях различного состава в условиях холодного резко континентального климата [12]. Центральные районы Республики Саха (Якутия) отличаются весьма специфическими условиями образования почвенного покрова, характеристиками строения почвенно-растительного слоя, а также различными особенностями состава и свойств зональных типов почв, что отмечено в некоторых работах [13, 14].

Месторождение Вьюн входит в состав Эльгенджинского рудно-россыпного узла Адычанской золотоносной зоны, которая занимает междуречье Адыча-Джолакаг-Эльдгенджа-Бурдганджа, имея размеры 300×50 км. Границы золотоносной зоны контролируются системой глубинных разломов северо-западного простирания, включая зону Чаркы-Индибирского надвига. В строении Адычанской золотоносной зоны основное место занимают терригенные отложения верхнетриасового возраста (в основном аргиллиты и алевролиты). Рудоносность месторождения Вьюн связана с кварцево-жильной зоной, которая контролируется экзоконтактами дайки риодацитов (гранодиорит-порфиров) мощностью 2–10 м [8, 15]. Руды месторождения характеризуются как малосульфидные золото-кварцевые, залегание рудного тела вертикальное, до крутого. Основными рудными минералами являются арсенопирит, пирит, халькопирит, пирротин, ковеллин, гидрооксиды железа и др. Среди породообразующих минералов выделяются кварц (массовая доля в минеральном составе месторождения составляет 85,9 %), полевые шпаты (4,0 %), слюдисто-гидрослюдистые минералы (2,0 %), карбонаты (1,5 %). Акцессорные минералы представлены в основном гранатом, сфеном и рутилом. Главным минералом выполнения руд является жильный кварц с брекчиевыми включениями прожилково-окварцованных алевролитов и аргиллитов. Из других жильных минералов в небольшом количестве отмечается карбонат. Главным компонентом руд является кремнезем (массовая доля составляет 87,4 %). Массовая доля рудообразующих компонентов, таких как Fe и As, составляет 1,42 и 0,26 % соответственно. Золото и сульфидные минералы в рудных телах имеют неравномерный характер распределения и в количественном отношении не превышают 1–3 % [15].

Методика проведения работ

Отбор проб почвенного покрова на территории золоторудного месторождения Вьюн проводился сотрудниками университета в летний период 2017 г. Литогеохимические работы (опробование почвенного покрова) были организованы в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01, ГОСТ 17.4.4.02, ГОСТ 28168 и актуальными методическими рекомендациями.

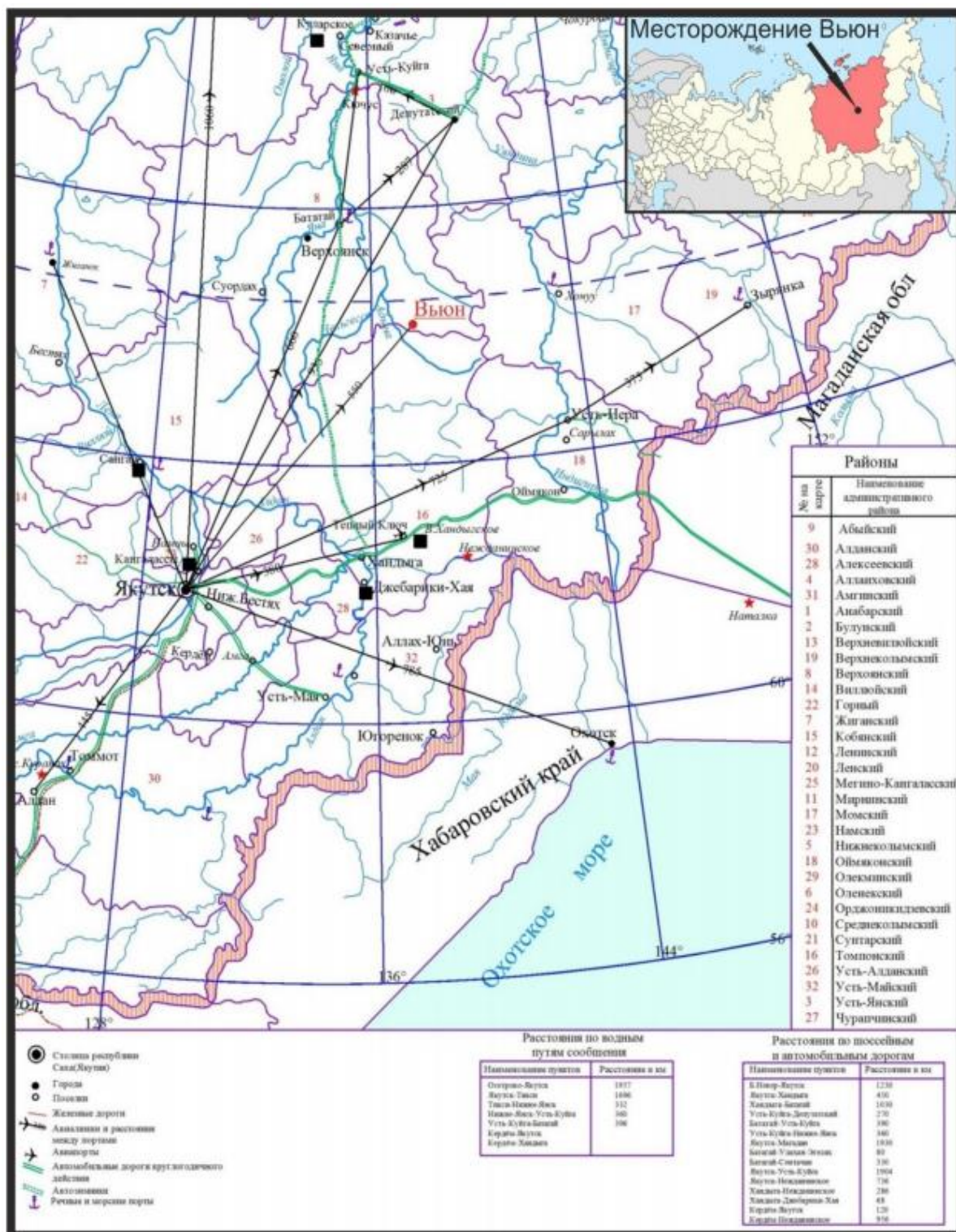


Рис. 1. Золоторудное месторождение Вьюн на карте Республики Саха (Якутия) [8]

Fig. 1. Vyun gold deposit on the map of the Republic of Sakha (Yakutia) [8]

Пробоотбор производился с одного горизонта на глубину до 10 см «методом конверта» (4 пробы отбирались из углов площадки опробования, и одна из центра, затем объединялись в единую индивидуальную пробу).

Предварительно в местах отбора каждой пробы почвы поверхность очищалась от растительного покрова. Пробоотбор производился при помощи лопатки

из нержавеющей стали из прикопок. Почва упаковывалась в полиэтиленовые пакеты, маркированные записками с шифром пробы, датой и местом отбора. Масса объединенной пробы почвы составляла не менее 1 кг.

Всего на территории золоторудного месторождения Вьюн было отобрано 19 индивидуальных проб почвенного покрова. Расположение пунктов отбора проб приведено на рис. 2.

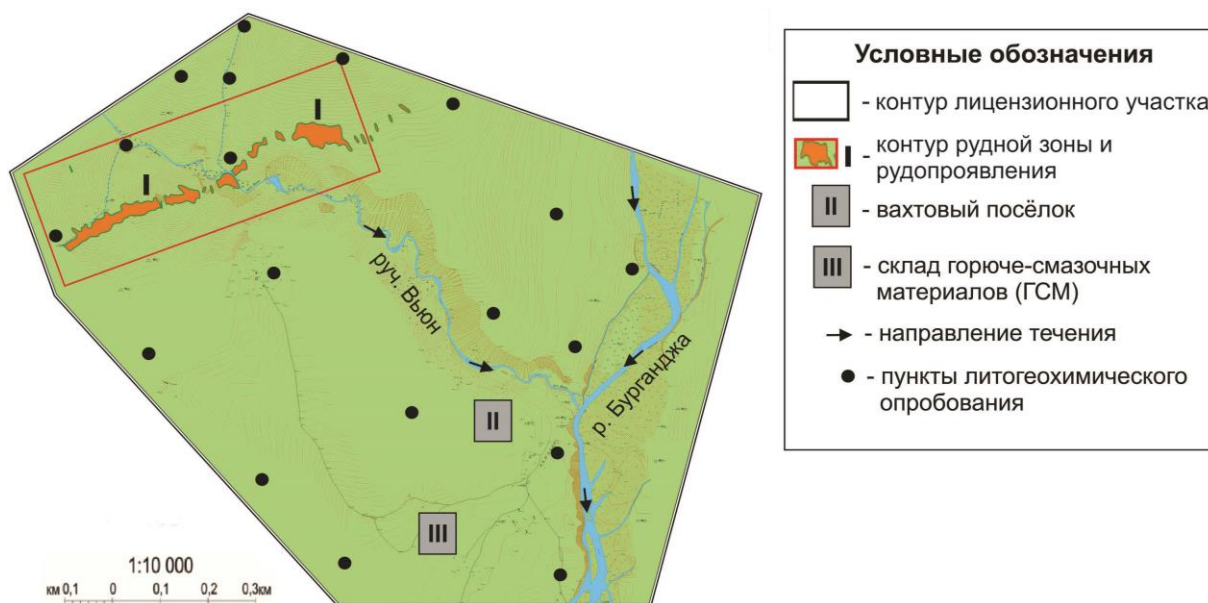


Рис. 2. Схема пунктов литогеохимического опробования территории золоторудного месторождения Вьюн
Fig. 2. Schematic-type map of lithochemical sampling points in the territory of Vyun gold deposit

Предварительная пробоподготовка образцов почв производилась на участке работ и включала в себя следующие стадии: высушивание, ручное измельчение, просеивание, перемешивание и квартование. После этого почва подвергалась измельчению на микровиброистрателе ИВ-МИКРО в лаборатории Отделения геологии Томского политехнического университета (ТПУ), а затем истертое вещество сокращалось квартованием до требуемой массы основной навески для проведения дальнейших лабораторно-аналитических исследований и получения дубликата, который упаковывался в пакеты из крафт-бумаги для хранения.

Количественный химический анализ проб почвы на 55 химических элементов осуществлялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП МС) в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск).

Исследования минерального состава проб почвенного покрова проводились на базе Международного инновационного научно-образовательного центра ТПУ «Урановая геология» им. Л.П. Рихванова методами оптической микроскопии (бинокулярный оптический микроскоп Leica EZ4D с видеопроставкой), рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр D2 PHASER) и сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с функцией микроанализа).

Результаты и их обсуждение

Средние величины концентраций химических элементов в пробах почвенного покрова приведены в табл. 1.

Большинство рассматриваемых химических элементов в пробах почв характеризуются однородным распределением содержаний (74 % элементов). При этом в данную группу входят в основном литофильные элементы, в том числе и редкоземельные.

Наиболее неоднородное распределение установлено для содержаний халькофильных элементов (Sb, Hg, As, Ag,) и Au (табл. 2).

По итогам расчёта коэффициентов парной корреляции в почвенном покрове выявлена значимая положительная связь между Ag и Au, а также группа редкоземельных элементов (РЗЭ), положительно значимо коррелирующих между собой. Взаимосвязь значимо коррелирующих между собой химических элементов иллюстрирует граф-ассоциация, приведённая на рис. 3.

По некоторым химическим элементам проведено сравнение концентраций в почвенном покрове исследуемой территории с опубликованными данными по Центральной Якутии.

Согласно данным Л.С. Волковой и В.Н. Макарова [17], в почвах Вилуйского района Якутии фоновые содержания Pb, Mn и Cd достигают величин 32,4, 215 и 0,1 мг/кг соответственно, тогда как в почвах месторождения Вьюн средние концентрации этих элементов составляют 18,2, 757 и 0,3 мг/кг. В целом данные элементы не играют основной роли в процессах рудообразования на месторождении Вьюн, в отличие от As, Cu, Ag и др., которые входят в состав основных рудных минералов и распространены в почвенном покрове. В контексте величин концентраций этих элементов почвы месторождения Вьюн характеризуются более высокими значениями в сравнении с некоторыми районами естественных геохимических аномалий, например, Каракульского месторождения полиметаллов [4].

По средним концентрациям элементов в почвенном покрове рассчитывались кларки концентрации химических элементов.

Расчёт производился относительно кларка химических элементов в почвах континентов по А.А. Ярошевскому [18] и кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву [16].

Таблица 1. Средние содержания химических элементов в пробах почвенного покрова территории золоторудного месторождения Вьюн

Table 1. Average contents of chemical elements in soil samples of Vyun gold deposit territory

Химический элемент Chemical element	Содержание Content	Химический элемент Chemical element	Содержание Content	Химический элемент Chemical element	Содержание Content	Химический элемент Chemical element	Содержание Content
Be	2,47±0,12	Se	5,67±0,85	Ba	428±23	Lu	0,27±0,01
Mg	0,59±0,06	Rb	73,8±4,66	La	28,8±1,4	Hf	2,44±0,14
P	0,07±0,01	Sr	116±8	Ce	60,0±2,7	Ta	0,92±0,06
Ti	0,45±0,03	Y	15,4±0,8	Pr	7,16±0,29	W	1,83±0,38
Cr	125±10	Zr	112±8	Nd	25,3±0,8	Au	0,02±0,01
Mn	643±100	Nb	14,4±0,9	Sm	4,76±0,34	Hg	0,03±0,01
Fe	4,37±0,27	Mo	1,77±0,11	Eu	1,03±0,1	Tl	0,44±0,03
Co	16,8±2,0	Ag	0,6±0,1	Gd	4,55±0,39	Pb	18,2±1,3
Ni	37,9±4,6	Cd	0,34±0,02	Tb	0,61±0,05	Bi	0,21±0,01
Cu	41,5±3,1	In	0,11±0,01	Dy	3,05±0,21	Th	6,65±0,4
Zn	103±9	Sn	2,64±0,18	Ho	0,6±0,04	U	1,82±0,08
Ga	19,1±1,0	Sb	2,04±0,41	Er	1,8±0,09	Ru	<0,00001
Ge	1,54±0,11	Te	0,2±0,04	Tm	0,28±0,01	Re	<0,000001
As	31,9±20,1	Cs	6,87±0,73	Yb	1,76±0,08	–	–
Количество проб/Number of samples							19

Примечания. Содержания всех химических элементов приведены в мг/кг, кроме содержаний Mg, P, Ti, Fe (%). Среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в почвенном покрове, превышающие значения кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву [16].

Notes. The contents of all chemical elements are given in mg/kg, except for the contents of Mg, P, Ti, Fe (%). Mean value ± standard error, abnormal values of concentrations for which the calculated criterion for rejecting extreme values exceeds the critical value of this criterion are replaced by the maximum allowable for the sample. The average contents of chemical elements in the soil cover, exceeding the clark values of the upper part of the continental earth's crust according to N.A. Grigoriev [16].

Таблица 2. Характеристика распределения химических элементов по коэффициенту вариации для проб почвенного покрова золоторудного месторождения Вьюн

Table 2. Characteristics of chemical elements distributions according to the variation factor for soil samples of Vyun gold deposit

Коэффициент вариации Variation coefficient	Характер распределения Distribution character	Химические элементы Chemical elements
<39	Однородный Homogeneous	Be, Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Bi, Th, U
40–79	Неоднородный Heterogeneous	Mg, P, Mn, Co, Ni, Se, Te, Cs, W
80–119	Сильно неоднородный Strongly heterogeneous	Sb, Hg
>120	Крайне неоднородный Extremely heterogeneous	As, Ag, Au

Полученные кларки концентрации являлись основой для построения геохимических рядов химических элементов, т. е. групп элементов, чьи содержания в изучаемом компоненте природной среды отличаются от кларкового уровня в большую сторону [19].

Геохимические ряды химических элементов в почве исследуемой территории относительно вышеуказанных кларковых уровней приведены в табл. 3.

Таблица 3. Геохимические ряды химических элементов в почвенном покрове месторождения Вьюн

Table 3. Geochemical series of chemical elements in Vyun deposit soil cover

Критериальный уровень Criterion level	Автор Author	Геохимический ряд химических элементов Geochemical series of chemical elements
Кларк химических элементов в почвах континентов Clarke of chemical elements in soils of continents	А.А. Ярошевский A.A. Yaroshevsky [18]	Au _{17,4} -Se _{14,2} -Ag _{6,0} -As _{5,3} -Sn _{2,4} -Cs _{2,3} -Sb _{2,3} -Cd _{2,1} -Cr _{2,1} -Ni _{1,9} -Co _{1,9} -W _{1,8} -Cu _{1,8} -Zn _{1,7} -Be _{1,6}
Кларк химических элементов верхней части континентальной земной коры Clarke of chemical elements of the upper continental crust	Н.А. Григорьев N.A. Grigoriev [16]	Te _{69,3} -Se _{37,8} -As _{5,7} -Ag _{5,5} -Au _{4,0} -Sb _{2,5} -Zn _{1,4} -Cr _{1,4}

Почвенный покров месторождения Вьюн характеризуется высокими кларками концентрации Te, Se, As, Au, Ag, Sb. Данные химические элементы формируют основу геохимической специализации почвенного покрова. Кроме того, содержания, превышающие кларковые, зафиксированы для ряда тяжёлых металлов (Cr, Zn и др.).

Максимальные концентрации специфических для месторождения элементов, как правило, приурочены к зоне локализации рудного тела, что наглядно показывают схемы распределения концентраций As, Se, Ag, Sb, Te, Au (рис. 4, а–е). Следует также отметить факт выявления повышенных концентраций данных

элементов и вне рудной зоны, что потенциально может свидетельствовать о развитии ореолов рассеяния скрытого оруденения.

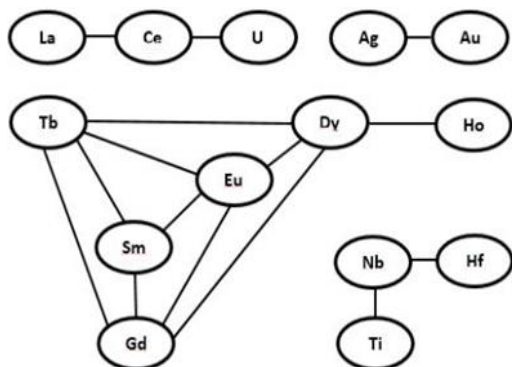


Рис. 3. Граф-ассоциация химических элементов в почвенном покрове золоторудного месторождения Вьюн (показаны положительные значимые связи между элементами)

Fig. 3. Graph-association for chemical elements in Vyun gold deposit soil cover (positive significant relationships between the elements are shown)

Согласно С.В. Григоряну [20], для различных месторождений полезных ископаемых с рудными тела-

ми крутого падения, к числу которых относится исследуемый объект, наблюдается четко выраженная осевая зональность элементов-индикаторов оруденения, проявляющаяся в смене надрудных элементов подрудными в ореолах рудных тел. Для золоторудных месторождений в качестве надрудных явно выделяются такие химические элементы, как Sb, As и Ag, что показано в данной работе.

Селен и теллур являются родственными в геохимическом плане элементами [21]. Среднее содержание селена в земной коре составляет 0,15 мг/кг [16], тогда как оценки содержания селена в почвах мира составляют около 0,33 мг/кг по А. Kabata-Pendias [21] и 0,4 мг/кг по Ф. Фордусе [22]. При этом в почвах Европы средняя концентрация данного элемента достигает 0,03 мг/кг [21]. Концентрации теллура в земной коре ощутимо ниже и имеют значения около 0,002 мг/кг [23]. Селен и теллур имеют химическое сходство с серой (халькофильные элементы) [23] за счёт близости ионных радиусов, и оба связаны с этим элементом в сульфидных рудных минералах, изоморфно входя в их кристаллические решётки. Из-за процессов выветривания на сульфидных рудных объектах селен и теллур могут поступать в природные объекты, например в почвы [24].

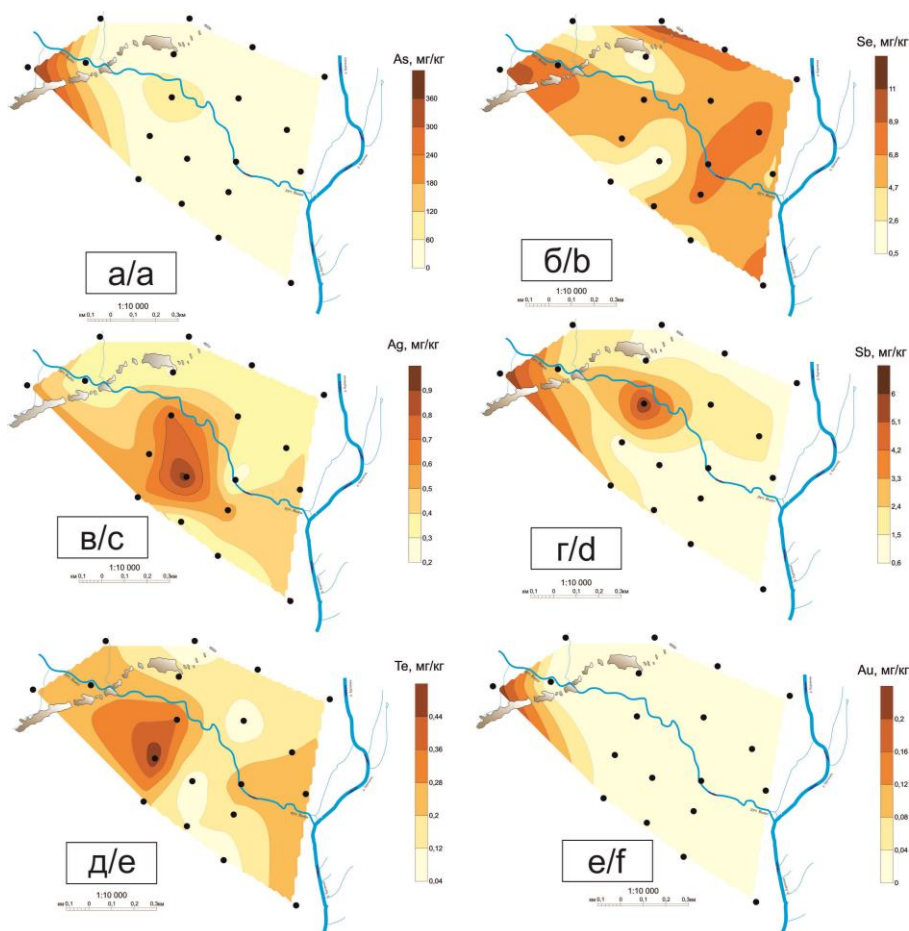


Рис. 4. Схемы распределения концентраций мышьяка (а), селена (б), серебра (в), сурьмы (г), теллура (д), золота (е) на территории золоторудного месторождения Вьюн

Fig. 4. Contour-maps of the concentration distributions of arsenic (a), selenium (b), silver (c), antimony (d), tellurium (e), gold (f) in Vyun gold deposit territory

Среднее содержание мышьяка в горных породах достигает 5,6 мг/кг [16]. Особенностью As является высокая подвижность и активная миграция в природных обстановках. При разрушении коренных пород As мигрирует вверх по разрезу в виде анионных комплексов $H_2AsO_4^-$ или $HAsO_4^{2-}$. Подвижность и биодоступность As контролируется адсорбцией и десорбцией [25].

Содержание золота в земной коре составляет 0,0044 мг/кг [16]. В почвах, как правило, преобладает прочно закреплённая форма золота, связанная с гумусовой органической составляющей [26, 27]. Подвижность данного элемента в приповерхностных условиях определяется взаимодействием с органическими лигандами (молекулами или атомами, связанными с комплексобразователями), а в миграции золота ведущую роль играют органические соединения гумусовой природы и фульвокислоты, которые, взаимодействуя с золотом и осаждая его, могут формировать с ним стабильные коллоиды [21, 28]. Также встречаются формы нахождения золота, ассоциированные с оксидами и гидроксидами железа и марганца, которые выступают в качестве сорбентов [28, 29].

Содержание серебра в земной коре достигает 0,11 мг/кг [16]. В почвенном покрове наиболее часты концентрации в диапазоне от 0,006 до 0,04 мг/кг [30]. Серебро – наиболее активный из благородных металлов, образует три ионных модификации (Ag^+ , Ag^{2+} и Ag^{3+}) [31]. В результате химического выветривания горных пород, процессов перераспределения и реконцентрации, серебро может формировать аномалии в пределах зоны гипергенеза [32]. Среди процессов химического выветривания, обуславливающих поступление серебра в почву, можно выделить следующие: окислительное растворение первичных сульфидов и сульфосолей материнской породы, высвобождение Ag в виде водорастворимых ионов (Ag^+), иммобилизация Ag^+ в почве путём сложной комбинации механизмов связывания, наиболее эффективным из которых является захват в кристаллической решётке. По причине накопления серебра в зоне гипергенеза расположенные над рудными площадями почвы, где оруденению сопутствует серебро, часто бывают обогащены данным элементом [33]. В адсорбции серебра в почвах приоритетную роль играет органическая составляющая, главным образом гуминовые вещества, которые участвуют в механизмах комплексобразования или обмена [33, 34].

Стоит отметить, что, попадая в почвенный раствор, серебро становится высокоподвижным и склонным к ремобилизации [35], но в то же время Ag^+ имеет тенденцию со временем восстанавливаться до металлического серебра и связываться с оксидами железа и оксигидроксидами, что снижает его подвижность [34].

Сурьма в земной коре находится главным образом в форме сульфидных руд за счёт своего сродства к сере (халькофильный элемент) [23]. Вокруг рудных тел в почвенном покрове данный элемент может фиксироваться в минеральной форме в ореолах рассеяния [36]. Обычно предполагается, что геохимическое поведение и токсичность сурьмы в почвах аналогичны

мышьяку [37] и прямо зависят от степени окисления [38]. В природе сурьма имеет четыре степени окисления: -3 , 0 , $+3$, $+5$, в почвах наиболее часто встречаются степени окисления $+3$ и $+5$. В данном аспекте сурьма также имеет схожесть с мышьяком. Пятивалентная сурьма преобладает в верхнем слое почвенного покрова [39]. Примеси сурьмы в почвенной матрице иногда характерны для оксидов и гидроксидов железа, марганца и алюминия [40].

С целью установления закономерностей между минеральным составом рудной зоны и геохимией почвенного покрова были проведены комплексные исследования минерального вещества пробами методами оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии.

Под оптическим микроскопом от предварительно промытого минерального вещества почвенного покрова отделялись минеральные фазы, представляющие интерес с точки зрения особенностей минерализации рудной зоны и геохимии почв.

Известно, что приповерхностные части рудных тел претерпевают изменения и последующее развитие вторичных процессов, главным из которых является окисление [41]. Не является исключением и исследуемое месторождение.

Согласно опубликованным данным [42], в почвах Центральной Якутии происходит синтез и образование вторичных глинистых минералов. Данный процесс наблюдается и в почве на исследуемой территории.

Также методом оптической микроскопии установлено присутствие в пробах сульфидных минеральных фаз, а именно жёлтых колчеданов, что впоследствии подтверждено изучением сканирующей электронной микроскопией.

По данным рентгеновской дифрактометрии, в минеральном составе почвенного покрова преобладают кварц и различные алюмосиликаты, с наибольшим преобладанием такого глинистого минерала, как иллит (рис. 5).



Рис. 5. Содержание минералов в общей массе минерального вещества почв месторождения Вьюн (по данным рентгеновской дифрактометрии), %

Fig. 5. Content of minerals in the total mass of the mineral matter of the soils of the Vyun deposit (according to X-ray diffractometry data), %

В составе минерального вещества почвы на золоторудном месторождении Вьюн своей большой долей выделяется первичный минерал кварц, что является

характерной особенностью минерального состава почвенного покрова Центральной Якутии. В почвы кварц попадает в ходе процессов мерзлотного почвообразования, благодаря синтезу и разрушению минералов почвообразующих пород [42]. Также в результате исследований в почве обнаружен породообразующий минерал карбонат.

Как видно из диаграммы (рис. 5), в состав минерального вещества входит мусковит. Мелкочешуйчатая разновидность данного минерала (серицит) входит в состав околорудных метасоматитов (березитов), которые являются поисковым признаком золоторудных жильных месторождений [43].

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии показали наличие в минеральном составе почвенного покрова фосфатов РЗЭ (рис. 6, а, б).

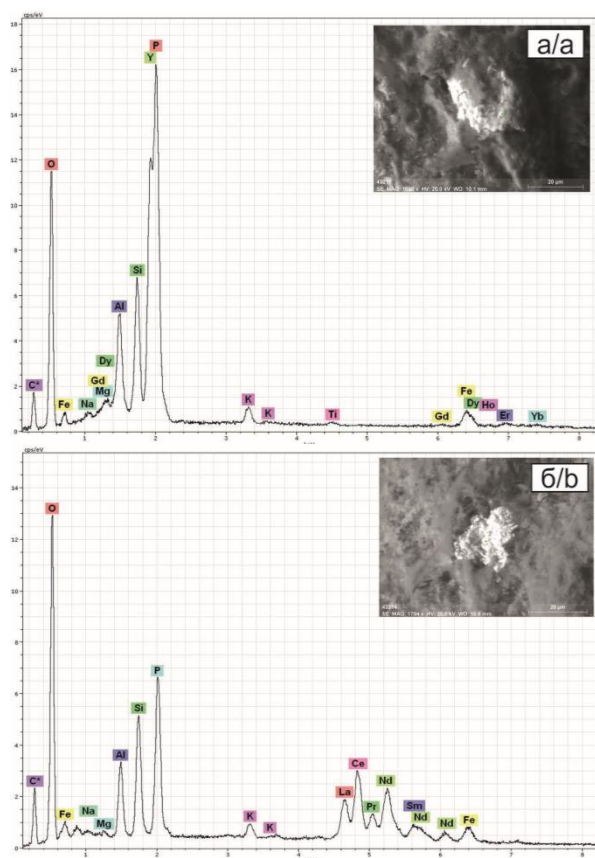


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки и рентгеновские спектры минеральных фаз фосфатов РЗЭ: а) ксенотим YPO_4 ; б) монацит (Ce, La, Nd, Th) $[PO_4]$

Fig. 6. Electron microscope images and X-ray spectra of the REE phosphates mineral phases: а) xenotime YPO_4 ; б) monazite (Ce, La, Nd, Th) $[PO_4]$

Кроме того, найдены специфичные для месторождения минералы: пирит (рис. 7, а), ковеллин (рис. 7, б), антимонит (рис. 7, в), а также аксессуарный минерал циркон (рис. 7, г).

Месторождение Вьюн расположено в границах Бургандинского гранитоидного массива, что влечёт за собой проявленность в почвенном покрове редкоземельной минерализации в виде ксенотима и мона-

цита, которые попадают в почвы в результате процессов разрушения горных пород.

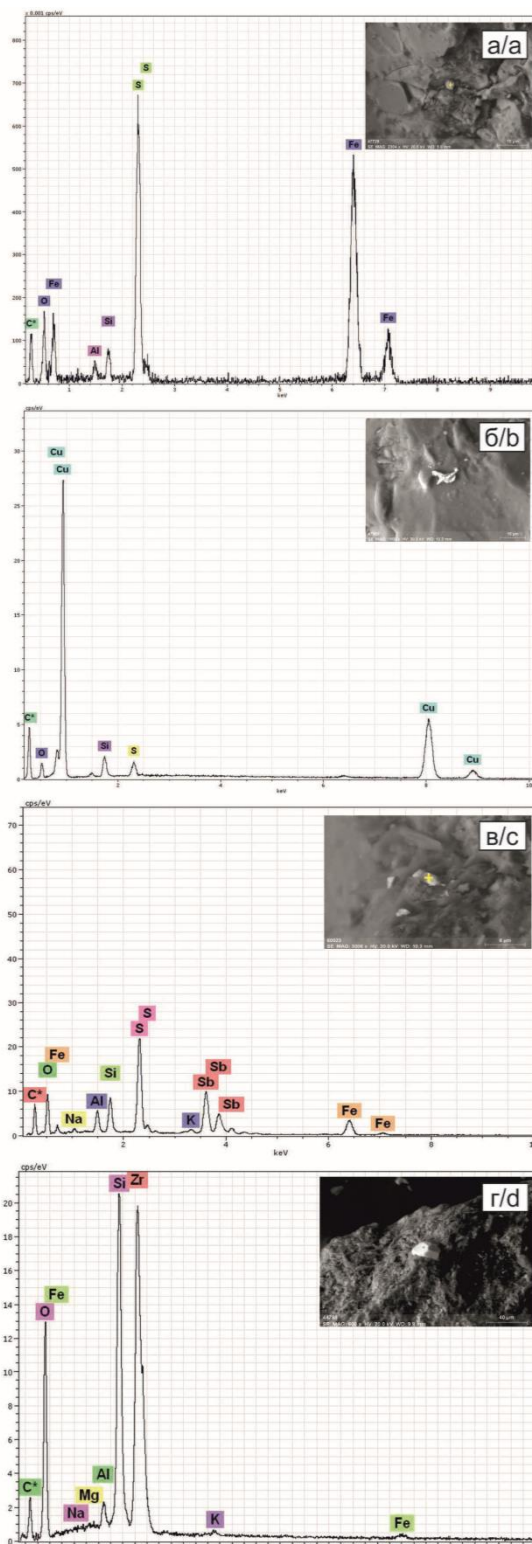


Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки и рентгеновские спектры минеральных фаз пирита (FeS_2) (а), ковеллина (CuS) (б), антимонита (Sb_2S_3) (в) и циркона ($ZrSiO_4$) (г)

Fig. 7. Electron microscope images and X-ray spectra of mineral phases of pyrite (FeS_2) (а), covellite (CuS) (б), antimonite (Sb_2S_3) (в) and zircon ($ZrSiO_4$) (д)

Теллур и селен, чьи концентрации существенно выше кларковых, наряду с Ag, Bi, Sb, Cu, As, Hg определяют геохимию Au [44]. Основные концентрации данных химических элементов в природе связаны с сульфидными рудами тяжёлых цветных металлов [45]. В ходе исследований минерального состава почвенного покрова данные элементы не найдены в минеральном виде, что может быть обусловлено их нахождением в преимущественно рассеянной форме и, как отмечалось ранее, изоморфным включением в решётки сульфидных минералов [46]. Основным минералом-носителем селена в рудах является пирит. Высокие содержания селена присущи также галениту, халькопириту и некоторым другим сульфидам [47].

Стоит отметить, что селен в почве может находиться в виде органических соединений (метилселениды, ионы триметилселенония или селеноаминокислоты) [25].

Золото также не обнаружено в минеральной форме, но в то же время его концентрации в почве превышают кларковые уровни. Данный факт приводит к вопросу о формах нахождения золота. Ведущая роль в процессах миграции и концентрирования золота в зоне гипергенеза принадлежит явлению комплексообразования с органическими веществами [28]. В почвах, как правило, преобладает форма нахождения золота, связанная с гумусовой органической составляющей [48].

Мышьяк не найден в составе минералов, но в то же время с рудами месторождения связан минерал мышьяка арсенопирит. По данным экспериментальных работ, для почв месторождений золота наиболее характерна анионообменная форма нахождения мышьяка, а также оксидная и гидроксидная с Fe и Mn [44].

Повышенные относительно кларковых значений концентрации серебра, сурьмы, ртути, по-видимому, обусловлены развитием ореолов рассеяния рудных тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году / под ред. Е.А. Киселёва. – М.: Изд-во ФГБУ «ВИМС», 2020. – 494 с.
2. Концепция новых центров экономического роста в современных условиях на примере Яно-Кольмской золоторудной провинции / Б.К. Михайлов, А.И. Некрасов, О.В. Петров, С.А. Киммельман, С.Б. Михайлов // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 42. – С. 58–65.
3. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П. Геоэкологическая обстановка в районе Калгутинского рудника (Республика Алтай) // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26. – № 1. – С. 34–43.
4. Архипов И.А., Робертус Ю.В. Распределение микроэлементов в почвах районов естественных геохимических аномалий (на примере Каракульского месторождения полиметаллов) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2. – С. 53–58.
5. Гололобова А.Г. Подвижные формы тяжёлых металлов и микроэлементов в почвах криолитозоны в условиях техногенеза // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 12. – С. 49–54.
6. Evidence for the formation of bog iron ore in soils of the Podravina region, NE Croatia: Geochemical and mineralogical

Заключение

Таким образом, в ходе работ установлены фоновые данные по содержаниям химических элементов в почвенном покрове золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха (Якутия)).

Анализируя полученные результаты, можно предполагать о ведущей роли ореолов рассеяния элементов рудных тел в формировании особенностей химического состава почвенного покрова на исследуемой территории. При этом минеральный состав руд месторождения оказывает основное влияние на геохимическую специализацию почвенного покрова за счет присутствия сульфидных минералов (ковеллин, пирит, антимонит и др.), для которых характерны специфические элементы в виде Cu и Sb. Также изучаемая территория характеризуется высокими содержаниями Au и Ag. Почвенный покров месторождения наследует особенности минерального и химического состава рудной зоны.

Повышенные концентрации Te, Se, As, Ag, Au, а также Sb, Zn, Ti, Mo, Be, Pb отражают общую тенденцию, характерную для почв зоны гипергенеза Верхнеиндигирского золотоносного района, и несут черты природной геохимической специализации исследуемой территории [49].

В минеральный состав почв входят такие минералы, как иллит, кварц, мусковит, хлорит, клинохлор. Кроме того, в почвенном покрове установлено присутствие циркона, фосфатов РЗЭ, что обусловлено проявленностью Бургандинского гранитоидного массива.

Таким образом, литогеохимические исследования территории месторождения Вьюн на доэксплуатационной стадии освоения позволили получить не только фоновые данные о концентрациях химических элементов в почвенном покрове, но также дали возможность зафиксировать зоны с повышенными содержаниями специфических для месторождения элементов, т. е. выявить геохимические аномалии, которые потенциально могут быть связаны с оруденением, что несёт дополнительную информацию недропользователям в ходе поисковых геологоразведочных работ.

- study / T. Brenko, S. Borojević Sostarić, S. Ružičić, T. Sekelj Ivančan // Quaternary International. – 2020. – V. 536. – P. 12–29.
7. Johnsen A.R., Thomsen T.B., Thaarup S.M. Test of vegetation-based surface exploration for detection of Arctic mineralizations: the deep buried Kangerluarsuk Zn-Pb-Ag anomaly // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – V. 220. – P. 1–8.
8. Протопопов Р.И., Сулейманов А.М., Пичугин Е.П. Подсчет запасов золоторудного месторождения Вьюн в Верхоянском улусе Республики Саха (Якутия) по состоянию на 01.01.2009 г. – Якутск, 2009. – 175 с.
9. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 336 с.
10. Некрасов И.А., Девяткин В.Н. Морфология криолитозоны бассейна реки Яны и сопредельных районов. – Новосибирск: Наука, 1974. – 72 с.
11. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 403 с.
12. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель, 2011. – 632 с.
13. Оконешникова М.В. Гумусное состояние мерзлотных палевых осолоделых почв Центральной Якутии разного гранулометрического состава // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. – 2019. – № 4. – С. 34–45.
14. Якутин М.В., Андриевский В.С., Пучнин А.Н. Почвенно-биологические методы в экологическом мониторинге палевых

- почв Центральной Якутии // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – № 1. – С. 39–46.
15. Анисимова Г.С., Протопопов Р.И. Геологическое строение и состав руд золото-кварцевого месторождения Вьюн, Восточная Якутия // Руды и металлы. – 2009. – № 5. – С. 59–69.
16. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
17. Волкова Л.С., Макаров В.Н. Экологический мониторинг в районах падения отделяющихся частей ракетносителя «Союз-2» на территории Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 38–48.
18. Ярошевский А.А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – С. 7–14.
19. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагет, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, А.И. Ачкасов, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, С.Ш. Саркисян, Р.С. Смирнова, Н.Я. Трефилова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
20. Григорян С.В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1974. – 216 с.
21. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – FL, USA: CRC Press Publ., 2010. – 548 p.
22. Fordyce F. Selenium deficiency and toxicity in the environment // Essentials of medical geology. – 2005. – V. 1. – P. 373–415.
23. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the elements. – Oxford: Pergamon Press. Publ., 1984. – 1542 p.
24. Ryzynska K. Determination of selenium species in environmental samples // Microchimica Acta. – 2002. – V. 140. – P. 55–62.
25. Fendorf S., La Force M.J., Li G. Temporal changes in soil partitioning and bioaccessibility of arsenic, chromium, and lead // Journal of Environmental Quality. – 2004. – V. 33. – P. 2049–2055.
26. Bowel R.W. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: implications for the supergene behavior of gold // Mineralogical Magazine. – 1992. – V. 56. – P. 545–560.
27. Gray D.J., Lintern M.J., Longman G.D. Chemistry of gold-humic interaction. – London: CSIRO division of exploration geoscience report, 1990. – 32 p.
28. Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: a review / T. Wang-Wang, Z. Guang-Ming, G. Ji-Lai, X. Piao, Z. Chang, H. Bin-Bin // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 1. – P. 1014–1027.
29. Pandey A.K., Pandey S.D., Misra V. Stability constants of metal-humic acid complexes and its role in environmental detoxification // Ecotoxicology and Environmental Safety. Environmental Research. – 2000. – V. 47. – P. 195–200.
30. Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. Trace elements from soils to humans. – Berlin: Springer Publ., 2007. – 449 p.
31. Ratte H.T. Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: a review // Environmental Toxicology and Chemistry. – 1999. – V. 18. – P. 89–108.
32. Biogeochemical cycling of silver in acidic, weathering environments / J. Shuster, F. Reith, M.R.M. Izawa, R.L. Flemming, N.R. Banerjee, G. Southam // Minerals. – 2017. – V. 7. – P. 218.
33. Fernández-Caliania J.C., Giráldez M.I., Riveraa M.B. Source and geochemical partitioning of silver in a naturally-enriched soil // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 103. – P. 85–96.
34. Complexation of silver and dissolved organic matter in soil water extracts / L. Settimio, M.J. McLaughlin, J.K. Kirby, K.A. Langdon, L. Janik // Environmental Pollutants. – 2015. – V. 199. – P. 174–184.
35. The desorption of silver and thallium from soils in the presence of a chelating resin with thiol functional groups / A.R. Jacobson, M.B. McBride, P. Baveye, T.S. Steenhuis // Water, Air and Soil Pollutants. – 2005. – V. 160. – P. 41–54.
36. Biogeochemistry of antimony in soil-plant system: Ecotoxicology and human health / M. Shahida, S. Khalida, C. Dumat, A. Pierarte, N. Khan Niazi // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 106. – P. 45–49.
37. Bioaccessibility of antimony and arsenic in highly polluted soils of the mine area and health risk assessment associated with oral ingestion exposure / J. Li, Y. Wei, L. Zhao, J. Zhang, Y. Shanguan, F. Li, H. Hou // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2014. – V. 110. – P. 308–315.
38. The chemistry and behavior of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: a critical review / S.C. Wilson, P.V. Lockwood, P.M. Ashley, M. Tighe // Environmental Pollutants. – 2010. – V. 158. – P. 1169–1181.
39. Okkenhaug G., Mulder J. Antimony (Sb) and arsenic (As) in Sb mining impacted paddy soil from Xikuangshan, China: differences in mechanisms controlling soil sequestration and uptake in rice // Environmental Science and Technology. – 2012. – V. 46. – P. 3155–3162.
40. Oxalate-based remediation of arsenic bound to amorphous Fe and Al hydrous oxides in soil / J.C. Lee, E.J. Kim, H.W. Kim, K. Baek // Geoderma. – 2016. – V. 270. – P. 76–82.
41. Черепнин В.К., Бернатонис В.К. Вторичные процессы в сульфидных и золоторудных месторождениях. – Томск: Изд-во ТПИ, 1981. – 90 с.
42. Васильева Т.И. Особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии // Наука и образование. – 2016. – № 1. – С. 30–39.
43. Петров О.В. Геологический словарь. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 430 с.
44. Сергеев А.В., Коршунова В.А., Семёнова В.В. Формы нахождения As и Au во вторичных ореолах рассеяния золоторудного провинциала в Восточной Финляндии // Записки российского минералогического общества. – 2015. – № 6. – С. 61–74.
45. Синдеева Н.Д. Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 257 с.
46. Коваленкер В.А. Минералогия и геохимия селена и теллура в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла. – М.: Наука, 1977. – 136 с.
47. Кирезиди С.В. Геохимия селена и теллура в рудах месторождения Кочбулак // Геология, полезные ископаемые и проблемы геозологии Башкортостана: XII Межрегиональная научно-практическая конференция. – Уфа: Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 2018. – С. 249–255.
48. Vlassopoulos D., Wood S.A., Mucci A. Gold speciation in natural waters. II. The importance of organic complexing – experiments with some simple model ligands // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – V. 54. – P. 1575–1586.
49. Макаров В.Н. Геохимия окружающей среды Верхнеиндигирского золоторудного района // Наука и образование. – 2008. – № 4. – С. 45–48.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Мишанькин А.Ю., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филимоненко Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, эксперт Института экологической и сельскохозяйственной биологии Тюменского государственного университета.

Собянин Ю.П., директор ООО «Богуславец».

UDC 553.411:550.42:631.4(571.56)

MINERAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THE SOIL COVER OF THE VYUN GOLD ORE DEPOSIT (THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

Andrey Yu. Mishankin¹,
aym13@tpu.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Ekaterina A. Filimonenko²,
e.a.filimonenko@utmn.ru

Yuri P. Sobyenin³,
yuri_sob63@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² University of Tyumen,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

³ LLC Boguslavets,
18, Kirov street, Yakutsk, 677027, Russia.

The relevance of the study is caused by the need in data on the soil background states in the territory of the gold ore facility as well as in knowledge of relationships between the mineral and geochemical features of the deposit soil cover.

The purpose of the research is to detect mineralogical and geochemical features of the soil cover of Vyun gold deposit territory at the pre-operational period of its development.

Object of the study is soils of the territory of Vyun gold deposit.

Factual materials and research methods. The factual material was obtained by employees of the Department of Geoecology and Geochemistry of the National Research Tomsk Polytechnic University in 2017 in the course of research work. The paper presents results of the study of the Vyun gold deposit territory based on 19 soil samples obtained at that time. The work was carried out by standard methods in accordance with the regulation documents. The elemental composition of the soils including 55 chemical elements was determined by the mass spectrometry method with inductively coupled plasma at the analytical chemical certified center «Plasma» (Tomsk). Mineral composition of soils was determined using optical microscopy, X-ray diffractometry and scanning electron microscopy on the basis of the International Scientific and Educational Center «Uranium Geology». The results were processed using modern software (Microsoft Excel, Statistica, Corel Draw, etc.).

Results. The mineralogical and geochemical features of the soils in Vyun gold deposit territory have been determined. The relationship between the mineral composition of the ore zone and the soil geochemical characteristics was established. The data were obtained on the increased contents of gold and elements-satellites of low-sulfide gold-quartz mineralization, namely arsenic, silver, antimony, their contrasting scattering halos were determined, which can be used in the practice of further prospecting work.

Key words:

Vyun gold ore deposit, soil cover, elemental composition, chemical composition, mineralogical and geochemical feature.

REFERENCES

1. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syryevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu» [The state report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019»]. Ed. by E.A. Kiselev. Moscow, FGBU «VIMS» Publ., 2020. 494 p.
2. Mikhailov B.K., Nekrasov A.I., Petrov O.V., Kimmelman S.A., Mikhailov S.B. The concept of new centers of economic growth in modern conditions on the example of the Yano-Kolyma gold ore province. *Regional Geology and Metallogeny*, 2010, no. 42, pp. 58–65. In Rus.
3. Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P. Geoecological situation in the Kalgutinsky mine area (Altai Republic). *Bulletin of the Trans-Baikal State University*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 34–43. In Rus.
4. Arkhipov I.A., Robertus Yu.V. Distribution of trace elements in soils of areas of natural geochemical anomalies (on the example of the Karakul deposit of polymetals). *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2018, no. 2, pp. 53–58. In Rus.
5. Gololobova A.G. Mobile forms of heavy metals and microelements in soils of permafrost in conditions of technogenesis. *International scientific research journal*, 2020, no. 12, pp. 49–54. In Rus.
6. Brenko T., Borojević Sostarić S., Ružičić S., Sekelj Ivančan T. Evidence for the formation of bog iron ore in soils of the Podravina region, NE Croatia: geochemical and mineralogical study. *Quaternary International*, 2020, vol. 536, pp. 12–29.
7. Johnsen A.R., Thomsen T.B., Thaarup S.M. Test of vegetation-based surface exploration for detection of Arctic mineralizations: The deep buried Kangerluarsuk Zn-Pb-Ag anomaly. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 220, pp. 1–8.
8. Protopopov R.I., Suleimanov A.M., Pichugin E.P. *Podschet zapasov zolotorudnogo mestorozhdeniya Vyun v Verkhoyanskom uluse Respubliki Sakha (Yakutiya) po sostoyaniyu na 01.01.2009 g.* [Calculation of the reserves of the Vyun gold ore deposit in the Verkhoyansk ulus of the Republic of Sakha (Yakutia) as of 01.01.2009]. Yakutsk, 2009. 175 p.
9. Romanovsky N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere]. Moscow, Moscow State University Publ., 1993. 336 p.
10. Nekrasov I.A., Devyatkin V.N. *Morfologiya kriolitozony basseyna reki Yany i sopredelnykh rayonov* [Morphology of the permafrost zone of the Yana River basin and adjacent areas]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 72 p.
11. Dostovalov B.N., Kudryavtsev V.A. *Obshee merzlotovedenie* [General permafrost]. Moscow, Moscow State University Publ., 1967. 403 p.
12. *Natsionalny atlas pochv Rossiyskoy Federatsii* [National atlas of soils of the Russian Federation]. Moscow, Astrel Publ., 2011. 632 p.

13. Okoneshnikova M.V. The humus state of permafrost pale-yellow solodized soils of Central Yakutia of different granulometric composition. *Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov*, 2019, no. 4, pp. 34–45. In Rus.
14. Yakutin M.V., Andrievsky V.S., Puchnin A.N. Soil-biological methods in ecological monitoring of pale-colored soils of Central Yakutia. *Interexpo Geo-Siberia*, 2019, no. 1, pp. 39–46. In Rus.
15. Anisimova G.S., Protopopov R.I. Geological structure and composition of ores of the Vyun gold-quartz deposit, Eastern Yakutia. *Ores and metals*, 2009, no. 5, pp. 59–69. In Rus.
16. Grigoriev N.A. Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust. *Geochemistry*, 2003, no. 7, pp. 785–792. In Rus.
17. Volkova L.S., Makarov V.N. Ekologicheskiy monitoring v rayonakh padeniya otdelyayushchikhsya chastei raketonositel'ya «Soyuz-2» na territorii Yakutii [Environmental monitoring in the fall areas of the separating parts of the Soyuz-2 launch vehicle on the territory of Yakutia]. *Natural resources of the Arctic and Subarctic*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 38–48.
18. Yaroshevsky A.A. Klarki geosfer [Clarke of geospheres]. *Spravochnik po geokhimiicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh* [Handbook of Geochemical Prospecting for Minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1990. pp. 7–14.
19. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Achkasov A.I., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Sargsyan S.Sh., Smirnova R.S., Trefilova N.Ya. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
20. Grigoryan S.V. *Geokhimiicheskie metody pri poiskakh endogennykh rudnykh mestorozhdeniy* [Geochemical methods in the search for endogenous ore deposits]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1974. 216 p.
21. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. FL, USA, CRC Press Publ., 2010. 548 p.
22. Fordyce F. Selenium deficiency and toxicity in the environment. *Essentials of medical geology*, 2005, vol. 1, pp. 373–415.
23. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the elements*. Oxford, Pergamon Press. Publ., 1984. 1542 p.
24. Pyrzyńska K. Determination of selenium species in environmental samples. *Microchimica Acta*, 2002, vol. 140, pp. 55–62.
25. Fendorf S., La Force M.J., Li G. Temporal changes in soil partitioning and bioaccessibility of arsenic, chromium, and lead. *Journal of Environmental Quality*, 2004, vol. 33, pp. 2049–2055.
26. Bowel R.W. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: implications for the supergene behavior of gold. *Mineralogical Magazine*, 1992, vol. 56, pp. 545–560.
27. Gray D.J., Lintern M.J., Longman G.D. *Chemistry of gold-humic interaction*. London, CSIRO division of exploration geoscience report, 1990. 32 p.
28. Wang-Wang T., Guang-Ming Z., Ji-Lai G., Piao X., Chang Z., Bin-Bin H. Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: A review. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 1, pp. 1014–1027.
29. Pandey A.K., Pandey S.D., Misra V. Stability constants of metal-humic acid complexes and its role in environmental detoxification. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. *Environmental Research*, 2000, vol. 47, pp. 195–200.
30. Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. *Trace elements from Soils to Humans*. Berlin, Springer Publ., 2007. 449 p.
31. Ratte H.T. Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: a review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, vol. 18, pp. 89–108.
32. Shuster J., Reith F., Izawa M.R.M., Flemming R.L., Banerjee N.R., Southam G. Biogeochemical cycling of silver in acidic, weathering environments. *Minerals*, 2017, vol. 7, pp. 218.
33. Fernández-Caliania J.C., Giráldez M.I., Riveraa M.B. Source and geochemical partitioning of silver in a naturally-enriched soil. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 103, pp. 85–96.
34. Settimo L., McLaughlin M.J., Kirby J.K., Langdon K.A., Janik L. Complexation of silver and dissolved organic matter in soil water extracts. *Environmental Pollutants*, 2015, vol. 199, pp. 174–184.
35. Jacobson A.R., McBride M.B., Baveye P., Steenhuis T.S. The desorption of silver and thallium from soils in the presence of a chelating resin with thiol functional groups. *Water, Air and Soil Pollutants*, 2005, vol. 160, pp. 41–54.
36. Shahida M., Khalida S., Dumat C., Pierarte A., Khan Niazi N. Biogeochemistry of antimony in soil-plant system: Ecotoxicology and human health. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 106, pp. 45–49.
37. Li J., Wei Y., Zhao L., Zhang J., Shangguan Y., Li F., Hou H. Bioaccessibility of antimony and arsenic in highly polluted soils of the mine area and health risk assessment associated with oral ingestion exposure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, vol. 110, pp. 308–315.
38. Wilson S.C., Lockwood P.V., Ashley P.M., Tighe M. The chemistry and behavior of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: a critical review. *Environmental Pollutants*, 2010, vol. 158, pp. 1169–1181.
39. Okkenhaug G., Mulder J. Antimony (Sb) and arsenic (As) in Sb mining impacted paddy soil from Xikuangshan, China: differences in mechanisms controlling soil sequestration and uptake in rice. *Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 46, pp. 3155–3162.
40. Lee J.C., Kim E.J., Kim H.W., Baek K. Oxalate-based remediation of arsenic bound to amorphous Fe and Al hydrous oxides in soil. *Geoderma*, 2016, vol. 270, pp. 76–82.
41. Cherepnin V.K., Bernatonis V.K. *Vtorichnyye protsessy v sulfidnykh i zolotorudnykh mestorozhdeniyakh* [Secondary processes in sulfide and gold deposits]. Tomsk, TPI Publ., 1981. 90 p.
42. Vasilyeva T.I. Features of the formation of properties and composition of permafrost soils in Central Yakutia. *Science and Education*, 2016, no. 1, pp. 30–39. In Rus.
43. Petrov O.V. *Geologicheskii slovar* [Geological dictionary]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2010. 430 p.
44. Sergeev A.V., Korshunova V.A., Semyonova V.V. Forms of As and Au occurrence in the secondary dispersion halos of the Piilola gold ore occurrence in Eastern Finland. *Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2015, no. 6, pp. 61–74. In Rus.
45. Sindeeva N.D. *Mineralogiya, tipy mestorozhdeniy i osnovnye cherty geokhimii selena i tellura* [Mineralogy, types of deposits and the main features of the geochemistry of selenium and tellurium]. Moscow, AN USSR Publ., 1959. 257 p.
46. Kovalenker V.A. *Mineralogiya i geokhimiya selena i tellura v medno-nikelevykh mestorozhdeniyakh Talnakhskogo rudnogo uzla* [Mineralogy and geochemistry of selenium and tellurium in copper-nickel deposits of the Talnakh ore cluster]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 136 p.
47. Kirezidi S.V. *Geokhimiya selena i tellura v rudakh mestorozhdeniya Kochbulak* [Geochemistry of selenium and tellurium in the ores of the Kochbulak deposit]. *XII Mezhhregionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Geologiya, poleznye iskopayemye i problemy geokologii Bashkortostana* [XII Interregional Scientific and Practical Conference. Geology, Mineral Resources and Problems of Geoecology of Bashkortostan]. Ufa, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center RAN Publ., 2018. pp. 249–255.
48. Vlassopoulos D., Wood S.A., Mucci A. Gold speciation in natural waters. II. The importance of organic complexing – experiments with some simple model ligands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1575–1586.
49. Makarov V.N. Geochemistry of the environment of the Verkheindigirsky gold-bearing region. *Science and Education*, 2008, no. 4, pp. 45–48. In Rus.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Andrey Yu. Mishankin, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Filimonenko, Cand. Sc., expert, University of Tyumen.

Yuri P. Sobyenin, director, LLC Boguslavets.