Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LI, вып. 2, 1966 г.

УДК 550. 844

О ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ПОИСКОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

В. М. Питулько

Как известно, на образование вторичных ореолов рассеяния в покровных отложениях влияют в основном: первичное содержание и распределение металлов в коренных породах и их химический и минеральный состав; климатические, орографические и гидрогеологические условия; геоморфологическое строение района; мощность, состав и происхождение покровных отложений; миграционная способность элементов или соединений в водных средах; наличие сред, способствующих осаждению металлов во время их миграции.

Для района исследования характерен слаборасчлененный рельеф с относительными превышениями не более 100—150 *м* и преимущественно широкими, равнинного характера водораздельными участками. Крутизна склонов, как правило, не превышает 3—5°. Среди структурных форм микро- и мезорельефа наиболее распространены пятна-медальоны, бугры пучения и полигональные почвы. Район расположен в таежной и частично в лесотундровой зоне. Климат резко континентальный, субарктический.

Территория сложена известняками и доломитами синия, карбонатными осадками нижнего и среднего кембрия, метаморфическими породами архея. Терригенные отложения развиты в основном, в нижней части синийского разреза (мукунская свита) и представлены кварцевыми песчаниками и кварцито-песчаниками. Отложения синия и кембрия полого погружаются на северо-восток, восток, юго-восток, юг. Магматические породы представлены почти исключительно кимберлитами и дайками долеритов, залегающих среди осадочных и метаморфических пород, а также интрузиями гранитного состава в пределах выходов архейского фундамента.

В районе широко развиты разрывные нарушения, с некоторыми из них связана полиметаллическая и редкоземельная минерализация.

Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены элювио-делювиальными глинами, суглинками, реже супесями мощностью до 2—5 *м* и аллювиальными образованиями в долинах рек мощностью 5—10 *м*. Широко развита современная обломочная кора выветривания в виде крупноглыбовых россыпей.

Район попадает в зону развития сплошной вечной мерзлоты. Мощность слоя сезонного оттаивания 0,5—1,0 *м* (для склонов южной экспозиции).

Работами ВНИГРИ в районе в 1961—1963 гг. было выявлено около 10 вторичных ореолов рассеяния меди, свинца, цинка, а также редких

и рассеянных элементов. Ореолы рассеяния пространственно приурочены к зонам тектонических нарушений в поле развития терригенно-карбонатных осадков синия и метаморфических образований архея. Они располагаются на водораздельных частях и пологих склонах сопок и сопровождаются потоками рассеяния. Размеры вторичных ореолов рассеяния 600×80 *м*, длина потоков рассеяния от 150 до 800 *м*. Рыхлые отложения на территории ореолов представлены глинами различных оттенков бурого цвета.

В результате литогеохимических съемок получены данные о содержании в породах района ряда редких и рассеянных элементов. По данным анализа 300 проб коренных пород и рыхлых покровных отложений, в распространении ряда элементов по площади отмечена закономерность: элементный состав покровных отложений (фоновые содержания) над терригенными нижнесинийскими породами (мукунская свита) отличается от состава над карбонатными осадками верхнего синия (билляхская свита).

Как видно из табл. 1, различие в составе покровных отложений определяется содержанием в песчаниках и гнейсах значительного количества акцессорных минералов. В элювиальных глинах в контурах ореолов рассеяния заметно увеличиваются концентрации Nb, Ni, Ti, Pb, Zn, Cu, Zr, редких земель.

Таблица 1

Средние содержания элементов (местный фон) в покровных отложениях

Порода	Ni, 10^{-3}	Co, 10^{-3}	Ti, 10^{-1}	V, 10^{-3}	Cr, 10^{-3}	Mo, 10^{-4}	Zr, 10^{-3}	Pb, 10^{-4}	Cu, 10^{-3}	Zn, 10^{-3}	Th, 10^{-3}	U, 10^{-4}	Число проб
Доломит	2	0	2	1,5	2	0	1	5	2	0	2,5	2,5	84
Песчаник	5	0	3,6	5	7	1	20	5	2	1	3,5	3	67
Гнейс А	10	1	6	3	10	2	6	10	4	0	2,5	1	20

Несмотря на то, что выявленные геохимические аномалии приурочены к продуктам разрушения разнообразных по составу пород (карбонатных и терригенных отложений синия и метаморфических образований архея), в элювио-делювиальных покровных отложениях установлены ореолы рассеяния одних и тех же элементов. Контуры ореолов элементов близко совпадают, что свидетельствует о едином типе минерализации в коренном залегании для всех выявленных участков.

Содержание элементов в элювиальных отложениях постепенно увеличивается по мере приближения к минерализованным зонам тектонических нарушений (рис. 1). Непосредственно над такими зонами разломов, зонами окремнения, рассланцевания и ожелезнения содержание элементов резко возрастает и иногда превышает фоновые количества в десятки раз. Здесь же в удалении от разломов появляются такие элементы как W, Ag, Sc, Mo.

Никель над зонами минерализации, контролируемыми тектоническими нарушениями, образует четкие ореолы рассеяния, со средним содержанием элемента 0,01—0,06% (выше местного фона в 5—6 раз), максимальным 0,1%. Концентрация хрома в литогеохимических пробах доходит до 0,02% и составляет в среднем по аномальным зонам 0,005—0,01%, что превышает нормальный фон хрома по району в 3—4 раза. Содержание титана в аномальном поле в 2—3 раза выше местного фона, который составляет 0,3%. Ниобий, кобальт, бериллий, иттрий и иттербий характерны только для глин, залегающих внутри контуров ореолов.

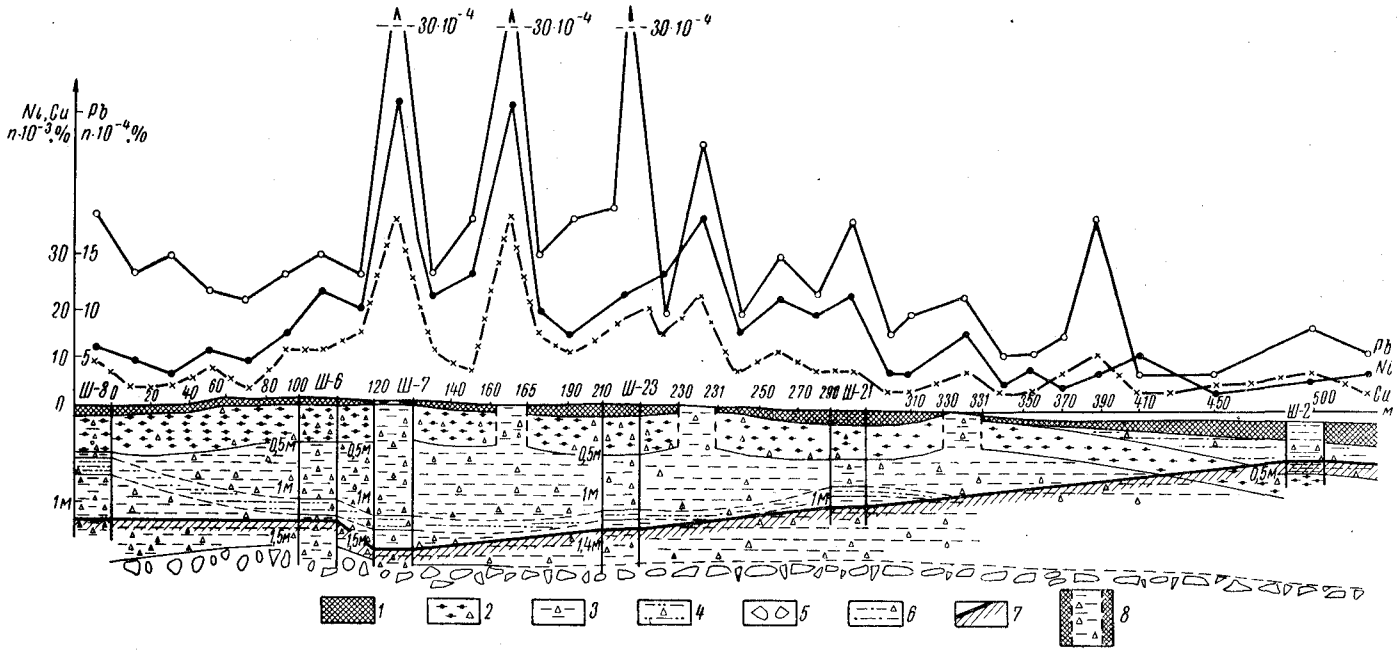


Рис. 1. Содержание Ni, Pb, Cu в покровных отложениях над зоной минерализации.

1 — почвенно-растительный слой; *2* — темно-бурая глина с мелкими обломками доломитов; *3* — желто-бурая глина с мелкими обломками доломитов; *4* — желто-бурая, охристая глина; *5* — растресканный элювий доломитов; *6* — серовато-бурая глина; *7* — граница мерзлых пород; *8* — пятна-медальоны.

Сечение шурфов *Ш* и пятен-медальонов. 1 *м*.

Свинец образует наиболее обширные вторичные ореолы рассеяния. Среднее содержание его превышает местный фон в 3—5 раз и составляет 0,003%, максимальные содержания в отдельных точках достигают 0,3%. Аналогично и распределение циркония, концентрации которого в среднем составляют 0,03—0,06%, доходят до 0,1% и значительно превышают фоновые количества. Ванадий, медь, цинк и уран превышают местный фон в ореолах рассеяния в 3—4 раза.

Содержание элементов в покровных отложениях дает общую характеристику геохимических аномалий над зонами полиметаллической и редкоземельной минерализации.

Как видно из табл. 2, элювиальные отложения значительно богаче элементами там, где они перекрывают зоны минерализации.

Таблица 2

Концентрация элементов в ореолах и нормальном поле

Элемент	Местный геохимический фон $C_н$, %	Среднее содержание в ореоле $C_а$, %	Коэффициент аномальности $K_{ан}=\frac{C_а}{C_н}$	Присутствие элемента в ореоле
Ni	0,002—0,01	0,01—0,06	5—6	Во всех ореолах
Cr	0,002—0,003	0,005—0,01	3—4	В большинстве ореолов
Ti	0,2—0,6	0,05—1,0	2—3	То же
Pb	0,0005—0,001	0,0013—0,0030	3	Во всех ореолах
Zr	0,001—0,006	0,030—0,060	30	То же
Th	0,0025	0,0075—0,011	3—4	»
Nb *	—	0,003—0,006	—	»
Co *	—	0,001—0,003	—	»
Y *	—	0,003	—	»
Yb *	—	0,0004	—	»
Cu	0,002—0,004	0,005—0,008	2—8	В большинстве ореолов
Zn *	—	0,002—0,005	—	То же
U	0,0025	0,004—0,001	2—4	»
Be *	—	0,0003	—	»
V	0,002	0,006	3	»

* В нормальном поле не фиксируются.

В разрезе элювия, по данным спектральных анализов, наблюдается следующая закономерность распространения химических элементов: в интервале 0—0,5 *м* содержание элементов постепенно увеличивается, в интервале 0,5—0,9 *м* существенно уменьшается, далее непрерывно и резко возрастает (рис. 2).

Так, пробы, отобранные из элювия с глубины 2,5—3,0 *м*, содержат в среднем 0,02—0,03% Ni, 0,01—0,02% Cr, до 1—3% Ti, до 0,1% Nb, до 0,01% Co, до 0,3% Pb, 0,1% Cu, 0,06% Zn, 0,1% Zr.

Процессы пучения, возникающие при промерзании высокодисперсных отложений, выводят на дневную поверхность более глубокие горизонты промерзающего элювия, поэтому максимальные содержания элементов, которые фиксируются в литогеохимических пробах, соответствуют чаще содержаниям, свойственным покровным отложениям на глубине 2—3 *м*. Изучая распределение элементов в разрезе рыхлых отложений, целесообразно пользоваться усредненными содержаниями элементов в приповерхностном слое (до 0,6 *м*) и в более глубоких горизонтах (1,5—2,0 *м*). В этом случае влияние «аномальных» участков верхних горизонтов разреза

элювия на качественную оценку ореола по полезным компонентам будет минимальным. При поисках необходимо обращать внимание даже на небольшие повышения концентраций.

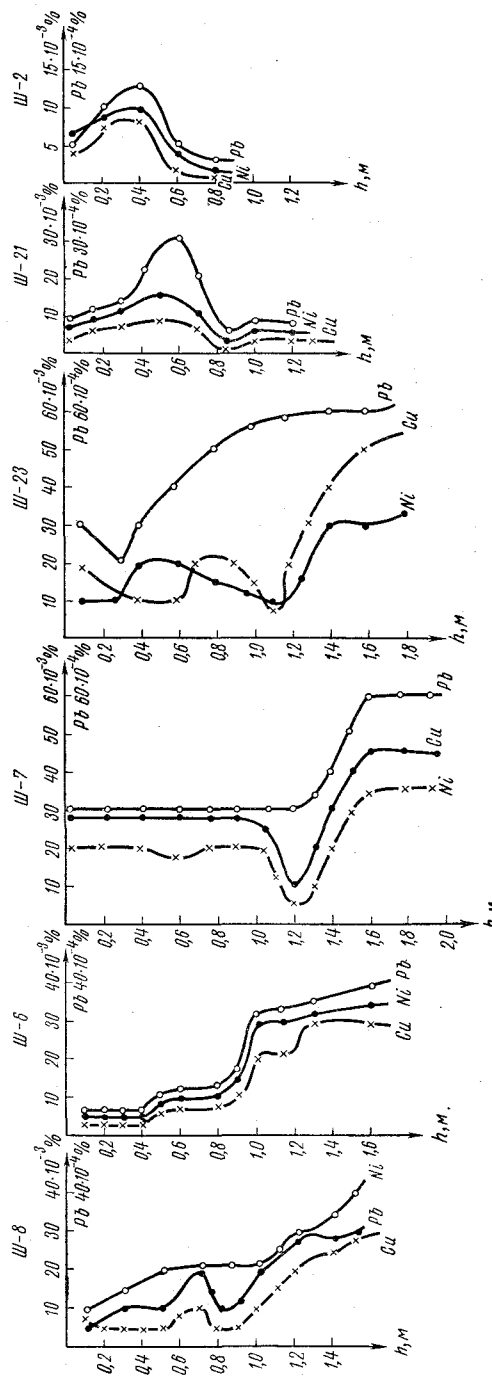


Рис. 2. Изменение содержаний Ni, Pb, Cu в разрезе покровных отложений.

Данные табл. 3 свидетельствуют о наличии повышенных по отношению к фону содержаний Ni, Co, Ti, V, Zr, Cu, Pb, Zn и редких земель в элювии над зонами минерализации. В более глубоких горизонтах содержания многих элементов возрастают в несколько раз.

В распределении химических элементов в элювиоделювиальных отложениях устанавливаются следующие закономерности.

1. Элементарный состав покровных отложений за пределами аномалий тесно связан с химическим составом подстилающих их пород. Более разнообразный элементарный состав элювия отмечен для продуктов разрушения терригенных образований нижнего синия и метаморфических пород архея, менее разнообразный — для относительно однородных остаточных глин, развитых над карбонатными породами верхнего синия.

2. На территории всех аномалий наблюдаются ореолы рассеяния Ni, Co, Nb, Zr, Mo, Pb, Y и Yb. На большинстве аномалий встречены ореолы рассеяния Ti, V, Cu, Zn, Be. Коэффициент аномальности элементов колеблется от 2—3 до 5—10.

Образование ореолов рассеяния в процессе формирования глинистых элювиоделювиальных отложений района тесно связано с последними этапами истории геологического развития данной территории. По мнению большинства исследователей [Кирюшина, 1959; Эрлих, 1963], архейские породы фундамента и его синийское обрамление были выведены на дневную поверхность в постпермское время. Начиная с пермо-триаса преобра-

Таблица 3

Изменение средних содержаний элементов с глубиной

Тип глины, глубина отбора, *м*	Ni, 10^{-3}	Co, 10^{-3}	Ti, 10^{-1}	V, 10^{-3}	Cr, 10^{-3}	Mo, 10^{-4}	Zr, 10^{-3}	Nb, 10^{-3}	Cu, 10^{-3}	Pb, 10^{-4}	Zn, 10^{-3}	Bc, 10^{-3}	Y, 10^{-2}	Yb, 10^{-3}
Темно-бурая, 0—0,6 . .	15	3	20	8	3	8	30	16	8	20	1	0	10	10
Желто-бурая, 1,5—2,0	25	2	30	6	6	10	40	10	6,5	30	2	3	18	8
Геохимический фон по участку (для песчаников нижнего синия)	10	1	6	3	10	2	6	0	4	10	0	0	0	0

зование поверхности района шло исключительно в континентальных условиях. Район в мезозое и в последующее время испытывал тенденцию к поднятию и претерпел значительную денудацию. Климат севера Сибирской платформы в раннечетвертичное (доледниковое) время был достаточно теплым и влажным [Зубаков, 1961]. К этому времени резкие формы рельефа приняли черты пенеплена. В среднечетвертичное время район подвергся покровному оледенению, а климатические условия приобрели черты субарктического пояса, сохранившиеся до настоящего времени. И в этих условиях происходит физико-химическое преобразование пород, но не в столь значительных размерах. Поэтому можно допустить, что элювио-делювиальные отложения на территории района сформировались вначале в условиях умеренно-теплого и влажного климата, а затем субарктического при наличии многолетней мерзлоты. Оба этапа накладывают на ореолы рассеяния специфический отпечаток.

В доледниковый период развития района в условиях умеренно-теплого и влажного климата на метаморфических породах архея, терригенных и карбонатных отложениях синия образовались остаточные коры выветривания. Климат и растительность соответствовали таежному ландшафту [Перельман, 1953], в условиях которого, как известно, формируются коры выветривания кислого типа. Для этого типа коры характерно глинообразование. Во влажном климате кора выветривания интенсивно промывается, выносятся все растворимые продукты выветривания, элювий сильно обедняется катионами и частично кремнекислотой, в нем накапливаются глинистые минералы. На карбонатных породах вначале образовалась карбонатная кора выветривания, которая во влажном климате оказалась неустойчивой и при дальнейшем выветривании была преобразована в кислый глинистый элювий. Из элювия карбонатных пород района постепенно выщелачивался углекислый кальций. В нерастворимом остатке доломитов и известняков района содержались гидроокислы железа, силикаты и другие вещества в количестве 4—5%, поэтому на поверхности разрушающихся материнских пород эти соединения накапливались и образовывали сиаллитный глинистый элювий.

О достаточно длительном процессе кислого выветривания свидетельствует и состав глинистого элювия. По данным термической лаборатории ВНИГРИ, где было исследовано 200 образцов глин, отобранных из элювиальных отложений, перекрывающих различные по составу породы (гнейсы, песчаники, доломиты), в элювии независимо от состава исходных пород накапливались сходные продукты. Термограммы свидетельствуют о довольно однообразном минералогическом составе глин. Почти во всех образцах присутствуют гетит и гидрогетит, во многих пробах встречены карбонаты и кремнезем. Глинистые минералы представлены двумя группами. Кривые нагревания исследованных глин показывают, что во всех

пробах преобладают глинистые минералы группы гидрослюд и незначительные примеси в отдельных образцах монтмориллонита.

Судя по гидрослюдистому составу, глины являются начальными продуктами выветривания, образовавшимися в условиях умеренно влажного и теплого климата (в холодном климате образуются маломощные гидрослюдистые коры выветривания). Этому климату соответствуют темно-коричневые, бурые и красно-бурые глины и суглинки [Перельман, 1953].

Таким образом, состав, мощность и окраска глин свидетельствуют о наличии в прошлом благоприятных для формирования коры выветривания климатических условий. Следовательно, глины, развитые на территории района, являются, по-видимому, продуктами древнего (доледникового) глубокого выветривания (разложения и выщелачивания) архейских и синийских пород. При содержании в среднем в карбонатных синийских отложениях 5% и более нерастворимого остатка для образования 2—3-метровой коры выветривания потребовалась переработка толщи доломитов мощностью 20—40 *м* (а с учетом сноса в 2—3 раза больше). Это также свидетельствует о значительных размерах корообразовательных процессов, участвовавших в формировании глинистого элювия на территории района.

Поведение отдельных элементов при формировании кислой коры выветривания определялось в основном их миграционной способностью. Легкоподвижными водными мигрантами на участках зон минерализации являлись цинк и уран. Но в карбонатных породах преобладали нейтральные и слабощелочные воды, где цинк и уран оказывались малоподвижными, накапливались в коре выветривания, образуя солевые ореолы рассеяния. Медь и никель мигрировали менее активно. Соединения их выпадают из растворов в нейтральной и слабощелочной среде. Концентрация их соединений увеличивалась в глинах, залегающих на карбонатных породах.

Кобальт в кислой коре выветривания таежной зоны легко сорбировался гидроокислами марганца. В пробах рыхлых отложений, отобранных в пределах ореолов рассеяния, намечается близкая корреляция между этими элементами.

Миграционная способность железа зависела от состава вод, промывавших элювиальные отложения: в почвах железо легко мигрировало в кислых водах, а в более глубоких горизонтах коры выветривания в условиях слабокислой среды оно оказывалось малоподвижным и переходило в гидроокись, которая придавала коре желтую, бурую и буро-красную окраску. Внешне глины на участках геохимических аномалий выглядят интенсивно ожелезненными, хотя содержание железа нигде не превышает кларковых.

Слабоподвижны в условиях таежного ландшафта Pb, Zr, Ti, Y, Yb, Nb, Mo и Th. Они, накапливаясь в коре выветривания, образовывали остаточные ореолы рассеяния. Повышенные содержания их фиксируются в нижних горизонтах элювия на территории всех изученных ореолов. В образовании ореолов принимали участие и такие подвижные водные мигранты, как Cu, Zn, U. По-видимому, в коре выветривания имела место и сорбция большинства подвижных мигрантов глинистыми продуктами выветривания. Таким образом, в доледниковый период в глинистых покровных отложениях были сформированы в основном ореолы рассеяния, фиксируемые ныне в нижних горизонтах элювия. Развитие коры выветривания в них было в значительной степени приостановлено наступившим оледенением, которое законсервировало до настоящего времени результаты древнего выветривания.

Дальнейшее формирование покровных отложений в районе протекало в условиях субарктического климата и многолетней мерзлоты.

Преобразование покровных отложений шло преимущественно в верхних горизонтах элювия, в слое сезонного оттаивания (деятельном слое) происходили интенсивное физико-механическое и химическое преобразования рыхлых отложений.

На участках выходов коренных пород, не затронутых древним выветриванием, в результате различных физико-механических процессов (миграции воды, выделения льда, пучения, миграции твердой фазы, трещинообразования, солифлюкции, делювиального сноса) формировались высокодисперсные покровные отложения. Вместе с тем в зоне криогенеза происходит значительное химическое преобразование пород [Тютюнов, 1960]. При этом в составе покровных отложений преобладают минералы группы гидрослюд, т. е. состав глинистых отложений по сравнению с доледниковой корой выветривания не изменяется. На кислой доледниковой коре формируется кислая современная кора выветривания, где интенсивному промыванию подвергается порода, залегающая в деятельном слое (зоне интенсивного водообмена).

В надмерзлотных водах активно мигрируют Zn, Cu, U, Ni, Co, что обедняет покровные отложения. Слабоподвижны в условиях таежно-мерзлотного ландшафта Pb, Zr, Y, Yb, Nb и Th.

Таким образом, верхние горизонты элювия на участках ореолов, сформированных в доледниковый период, обеднены подвижными мигрантами и относительно обогащены малоподвижными элементами. Так, по данным литогеохимических съемок ВНИГРИ, коэффициент аномальности, например, в верхних частях разреза рыхлых отложений для Pb, Ni, Zr, Y приближается к 10, а для Zn, Cu, U не превышает 2—3 (на глубине 2—3 *м* для всех элементов колеблется от 4 до 6).

В доледниковый и современный периоды они представлены механическими, солевыми, сорбционными и отчасти гидрохимическими ореолами. Ореолы рассеяния сопровождаются иногда потоками рассеяния, сформированными в современных условиях. Потоки рассеяния образуются в донных отложениях современной гидросети, а также в делювии на пологих склонах сопок в результате солифлюкции и делювиального сноса. Содержание полезных компонентов в отложениях потоков рассеяния обычно превышает фоновые значения лишь в 2—3 раза.

Выводы

1. В рыхлых отложениях в результате выветривания горных пород на участках зон минерализации образуются ореолы и потоки рассеяния продуктов разрушения этих пород, фиксируемые литогеохимической съемкой.

2. Поскольку ореолы рассеяния, сформированные в доледниковое время, ослаблены современными процессами, идущими в верхних горизонтах элювия, существенны даже небольшие повышения содержаний элементов, участвующих в построении ореолов.

3. Исследования, проведенные ВНИГРИ, подтверждают возможность геохимических методов поисков редкоземельного и полиметаллического оруденения по ореолам и потокам рассеяния в условиях многолетней мерзлоты на Сибирской платформе.

ЛИТЕРАТУРА

З у б а к о в В. А. Палеогеографические условия оледенения Приенисейской части Сибири в плейстоцене. Тр. ВСЕГЕИ, нов. сер., т. 64, 1961.

К и р ю ш и н а М. Т. О проявлениях новейшей тектоники в пределах Анабарского щита и прилегающих территорий. Тр. НИИГА, т. 96, 1959.

П е р е л ь м а н А. И. Формы коры выветривания и их распределение. Вопросы географии, № 33, 1953.

П е р е л ь м а н А. И. Геохимия ландшафта. Географгиз, 1961.

Т ю т ю н о в И. А. Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре (Криогенез). Изд-во АН СССР, 1960.

Э р л и х Э. Н. Геологическое строение и тектоника Анабаро-Оленекского района. Тр. НИИГА, т. 126, 1963.