

УДК 553.411.071:550.4

АПРОБАЦИЯ СНЕЖНОЙ И АТМОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМОК ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ОРЕЛОВ РАССЕЯНИЯ ПОГРЕБЕННОЙ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ТУРУНТАЕВСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Гаврилов Роман Юрьевич¹,
GavrilovRY@tpu.ru

Соболев Игорь Станиславович²,
geolsob@yandex.ru

Соболева Надежда Петровна¹,
sobnadi@yandex.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович¹,
v_g_v@tpu.ru

Тентюков Михаил Пантелеймонович³,
tentukov@yandex.ru

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

² ООО «Гео Сервис»,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Учебная, 5-21.

³ Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
Россия, 167001, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55.

Актуальность исследования связана с необходимостью внедрения в практику прогнозно-поисковых работ новых методик глубинного геохимического картирования.

Цель: выявление и оценка особенностей аномального геохимического поля над перекрытым свинцово-цинковым оруденением на основе снежного и атмогеохимического опробования.

Методы: геохимическое картирование, математическая обработка результатов геохимических работ, моделирование геохимических полей методами многомерной статистики, геолого-генетическая интерпретация геохимических данных.

Объект: геохимические ореолы Турунтаевского свинцово-цинкового рудопроявления.

Результаты. В результате обработки геохимических данных установлено, что большинство химических элементов в снежном покрове и почвенном воздухе характеризуются низкой степенью неоднородности распределения их концентраций, что свидетельствует об отсутствии на площади контрастных геохимических ореолов. После математической обработки геохимических данных установлено, что наиболее контрастные аномалии основных рудных элементов – Pb+Zn, As, Sn и Cu – и их нормированных содержаний расположены над скважинами, вскрывшими рудную минерализацию. По результатам снежного опробования в распределении всех рудных элементов: Pb+Zn, As, Sn и Cu, выделяются также ложные аномалии, расположенные в пределах развития лесной растительности. Полученные данные дают основание утверждать, что точно установить в снежном покрове наложенные ореолы по изменению концентраций рассеянных элементов не представляется возможным. Однако результаты корреляционного и регрессионного анализов свидетельствуют о наличии взаимосвязей между элементами со схожими геохимическими свойствами. Вероятнее всего, в данном случае проявляется дифференциация компонентов по главным формам нахождения: растворенная и нерастворенная. Целый ряд элементов проявляет взаимосвязь как с жидкой, так и с твердой фазой. Наличие значимых взаимосвязей рассеянных элементов с маркерами нерастворенной (редкоземельные элементы) и растворенной (Na+Cl) форм нахождения позволяет использовать индикаторные отношения для обнаружения в снежном покрове слабо проявленных наложенных ореолов.

Ключевые слова:

полиметаллы, Турунтаевское рудопроявление, геохимические аномалии, снежное и атмогеохимическое опробование, математическая статистика.

Постановка задачи

В настоящее время вопрос выявления новых рудных месторождений стоит достаточно остро в связи с жесткой привязкой бюджета Российской Федерации к минерально-сырьевым ресурсам, в том числе твердым полезным ископаемым. Большинство месторождений, выходящих на дневную поверхность, уже выявлено, что предполагает опосредованное закрытие и перекрытие перспективных площадей [1, 2]. В свою очередь данный вид геологоразведочных работ обладает

определенной спецификой, обусловленной проведением как высокоточных аналитических исследований, так и математической обработки полученных результатов опробования. За последние десятилетия уровень аналитической базы существенно вырос, что позволяет проводить определение содержания химических элементов с крайне низкими концентрациями.

Одним из потенциально значимых, но в то же время и недостаточно обоснованных методов поисков месторождений полезных ископаемых на закрытых

территориях является выявление геохимических аномалий на перспективных площадях по результатам снежной съемки. Снег, занимающий значительные площади в ряде стран северного полушария, может быть использован как источник информации не только о пыле-аэрозольных отложениях [3–8], но и как критерий выявления месторождений полезных ископаемых [9–11].

К несомненным преимуществам использования данного вида опробования следует отнести и то, что снежный покров является субстратом, накапливающим вещества текущего снежного сезона, что, при методически обоснованном подходе к опробованию, исключает возможность попадания веществ, аккумуляировавшихся в почвенном или породном субстрате на протяжении всей истории его существования. Также следует отметить простоту выполнения отбора проб с ограниченным количеством необходимых приспособлений и пробоподготовки – снеготаяния.

Снег как естественный природный субстрат является экранирующей и депонирующей средой не только для пыле-аэрозольных образований, но и для соединений, поступающих из глубоких горизонтов земной коры. Одной из главных и наиболее трудных задач при интерпретации полученных аналитических данных снежного опробования является разделение двух источников аккумуляции инородных для снежного покрова веществ.

Возможность глубинной эмиссии вещества в снежный покров обосновывается известными механизмами миграции подвижных форм химических соединений в осадочные отложения, перекрывающие глубоко залегающие минеральные скопления [12–17]. Зимой в результате нарушения теплообмена между почвой и приземной атмосферой и физическим свойствам снега в снежной толще в зоне контакта «снег–почва» возникает градиент температур и водяного пара. В итоге в приповерхностной части сезоннопромерзающих почв формируется криогенный солевой ореол из легкорастворимых форм элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный слой снега, что вызывает устойчивый приток из почвы [18].

Целью настоящей работы является апробация возможностей снежной и атмогеохимической съемок при проведении поисковых работ на примере перекрытого полиметаллического оруденения.

Геологическое строение рудопоявления

Турунтаевское рудопоявление цинка, как и ряд других рудопоявлений Томской области, сосредоточено в основном в пределах Ташминского полиметаллического рудного узла, располагающегося на восточном фланге Томского рудного района [19].

Рудный узел располагается в зоне сочленения структур Кузнецкого Алатау и Кольвань-Томской складчатой зоны (рис. 1). В его геологическом строении принимают участие породы всех выделяемых в районе структурно-фациальных зон и подзон от мраморов и амфиболитов рифея до терригенных отложений нижнебалахонской серии верхнего карбона. Руд-

ный узел располагается во фронтальной и прифронтальной частях Томского шарьяжа. Восточной границей узла является зона субмеридиональных разломов, контролирующих протрузии гипербазитов, западной границей служит Урбейский разлом. На севере рудный узел ограничен диагональными разломами Киргизской системы, а на юге – Омутнинскими разломами. Основной рудоконтролирующей структурой узла является диагональная Щербакская зона разломов восток-северо-восточного простирания. К структурным узлам, образованным этой диагональной зоной с продольными субмеридиональными разломами, приурочены основные лито- и гидрогеохимические аномалии узла, а также известные рудопоявления полиметаллов. По комплексу поисковых признаков в рудном узле выделяется пять потенциальных рудных полей: Турунтаевское, Киргислинское, Леспромхозовское, Барнашовское и Кульское. Они имеют линейную форму, обусловленную приуроченностью к зонам субмеридиональных разломов, поэтому в дальнейшем называются потенциальными рудными зонами.



Рис. 1. Схематическое расположение Турунтаевского полиметаллического рудопоявления

Fig. 1. Schematic location of the Turuntaevsky polymetallic ore occurrence

Турунтаевская рудная зона расположена в 65 км от Томска, у села Турунтаево. Она выявлена в 1964 г. А.Ф. Рубцовым и др. при проведении геологосъемочных работ масштаба 1:50000 Томской геологоразведочной экспедицией. С 1964 по 1983 гг. в пределах зоны пробурено 230 скважин (42917 п.м.). Зона прослежена по простиранию на 12 км при ширине 1...2 км и вскрыта скважинами на глубину до 500 м. По комплексу геофизических и геохимических признаков протяженность рудной зоны составляет около 40 км от р. Латат на севере до устья р. Омутной на юге. Рудная зона приурочена к крутопадающим разрывным нарушениям субмеридионального (Кузнецко-Алатауского) направления. В наиболее богатой части минерализация приурочена к зоне контакта между черными филлитовидными сланцами и андезибазальтами единисской свиты (рис. 2)

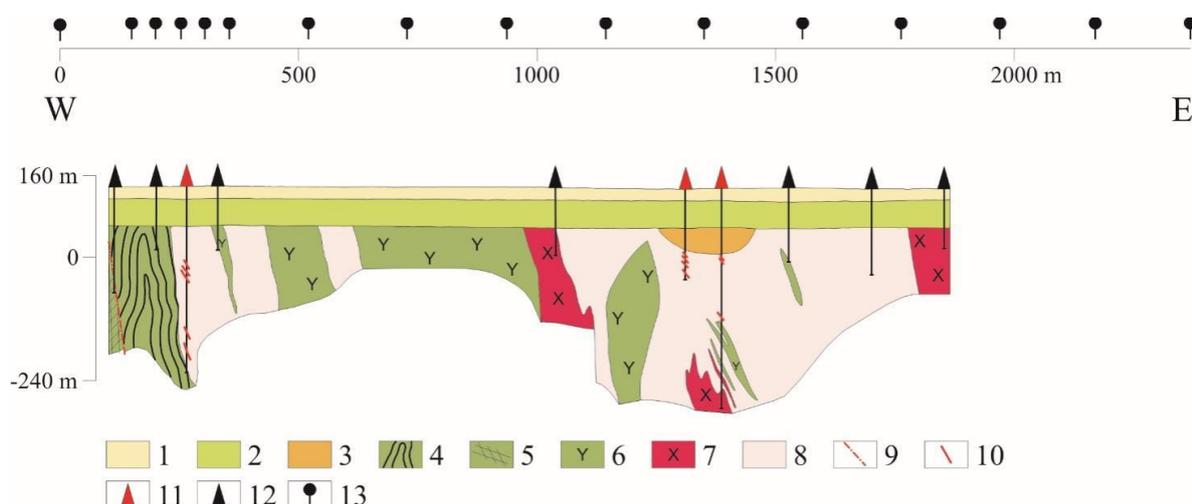


Рис. 2. Геологический разрез через центральную часть Турунтаевского свинцово-цинкового рудопоявления с проекцией линии геохимического опробования: 1 – четвертичная система: суглинки, глины, галечники, гравелистые пески; 2 – верхний мел (s-t): глины, пески; 3 – нижний девон: алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, базальтовые порфириды; 4–6 – нижний кембрий: филлиты (4), милониты и брекчии тектонических зон (5), андезитовые порфириды (6); 7 – магматические образования: микродиориты (δO); 8 – кварц-карбонатные метасоматиты; 9 – разлом; 10 – рудный интервал; 11, 12 – скважины: рудные (11), безрудные (12); 13 – точки опробования

Fig. 2. Geological section through the central part of the Turuntaevsky lead-zinc ore occurrence with a projection of the geochemical sampling line: 1 – Quaternary system: loams, clay, bench gravels, gravelly sands; 2 – Upper Cretaceous (s-t): clay, sands; 3 – Lower Devonian: siltstone, sandstone, gristone, conglomerate, basaltic porphyry; 4–6 – Lower Cambrian: phyllites (4), mylonite and fault breccia (5); andesite porphyry (6); 7 – intrusive: microdiorite (δO); 8 – quartz-carbonate wallrock alteration; 9 – fault; 10 – ore interval; 11–12 – holes: ore (11), blank (12); 13 – sampling points

Методика исследования

Опробование снежного покрова осуществлялось по профилю тестовых исследований, совпадающему с линией ранее проведенных геологических работ различного содержания. Шаг пробоотбора варьировал от 50 до 200 м (рис. 2). Снежное опробование проведено в начале марта 2019 г. Снег собирался в чистую пластиковую тару из стенок шурфов, выше горизонта прошлогодней травянистой растительности в среднем на высоте 30 см от земной поверхности. Отобрано 16 проб объемом не менее 1 литра каждая. Вытаивание снега происходило естественным образом в закрытых сосудах при комнатной температуре. Перед анализом талая вода фильтровалась для удаления крупных взвешенных частиц через обеззоленные бумажные фильтры – «синяя лента». Фильтры предварительно десятикратно отмывались деионизированной водой.

В летний период в точках отбора снежного материала осуществлено активное опробование почвенного воздуха. Активный сбор вещества проводился по методике, реализуемой с помощью специального устройства с вкручиваемым в почву конусовидным пробоотборником [20]. Откачки почвенного воздуха осуществлялись в съемные одноразовые жидкостные коллекторы (liquid collector). В качестве жидкости использовался 3 % HNO_3 , приготовленный из ультрачистой HNO_3 и деионизированной воды. В газовой арматуре устройства перед коллектором устанавливалась мембрана из ацетат целлюлозы с порами 0,45 μm . После откачки из шпура почвенного воздуха со скоростью 20 л/мин на протяжении 20 мин коллекторы герметично закрывались.

Химический состав талой воды и жидкости коллекторов анализировался методом ICP-MS на содержание 72 химических элементов с применением масс-спектрометра NexION 300 D в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Содержания целого ряда элементов в снеготалой воде и жидкости коллектора находятся на грани предела обнаружения анализом ICP-MS. В случае определения содержания элемента менее чем в 80 % проб такой элемент исключался из последующей обработки. Содержания ниже порога чувствительности анализа, в случае отсутствия определения концентраций в единичных пробах, были заменены на содержания, составляющие 2/3 от предела их обнаружения. В результате геохимический спектр снеготалой воды и жидкости коллекторов представлен одинаковым набором, состоящим из 56 элементов. При обработке геохимических данных истинные содержания нормировались на медианное значение соответствующего элемента. Это позволило привести в одну размерность как данные по различным элементам, так и результаты опробования различных субстратов. Отмечается характерная для многих природных сред значимая положительная корреляционная связь в распределении редких земель (определено 15 элементов), что позволило представить их в виде суммы (REE).

Результаты исследования

Большинство химических элементов характеризуются однородным и неоднородным характером рас-

пределения (табл. 1), что свидетельствует об отсутствии на площади контрастных ореолов ими образованных. Кроме того, некоторые рудные элементы – индикаторы оруденения – на изучаемой площади характеризуются концентрациями, не превышающими фоновые значения. Для снега это As, Cd, Pb, Sb, Zn, для жидкости коллекторов – As, Sb.

По результатам кластер-анализа переменных можно выделить три группы элементов. В первой группе, где наиболее подвижными являются такие элементы, как Na и Cl, обособились преимущественно лито-

фильные элементы. Для данной группы элементов значительную роль играет водо-растворенное состояние. Большинство связанных с парой Na-Cl компонентов относятся к талассофилам. Во второй группе, кроме Mo и Ni, выделяются как литофильные, так и халькофильные элементы. Третья, наиболее представительная группа, включающая в себя редкоземельные элементы, характеризуется преимущественно лито-халькофильной специализацией. Элементы второй и третьей ассоциаций, вероятно, связаны с частичками почв и горных пород.

Таблица 1. Дифференциация распределения химических элементов по значениям коэффициента вариации (%) в снеге и жидкостных коллекторах Турунтаевского рудопроявления

Table 1. Differentiation of the distribution of chemical elements by the values of the coefficient of variation (%) in snow and liquid reservoirs of the Turuntaevsky ore occurrence

Область исследования Study area	N	Градации неоднородности геохимической структуры Gradation of geochemical pattern inhomogeneity (Lithogeochemical..., 1987)		
		Однородный Homogeneous (< 39 %)	Неоднородный Inhomogeneous (40 ... 79 %)	Весьма неоднородный Highly inhomogeneous (80 ... 159 %)
снег snow	16	As, Ba, Br, Cd, Cl, I, Na, Pb, Sb, Zn	Al, B, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, K, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Rb, REE, S, Si, Sn, Sr, U, Th, Ti, Tl, V, Zr	Ag, Hf, Sc
жидкость коллекторов liquid of collectors	16	Al, As, Ba, Ca, Cs, Ga, Hf, K, Li, Mo, Na, Rb, REE, Sb, Sc, Sr, Zr	B, Br, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, I, Mg, Mn, Ni, P, S, Si, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, Zn	Ag, Ge, Pb

Дендрограмма для 42 переменных
Метод Варда
1-г Пирсона

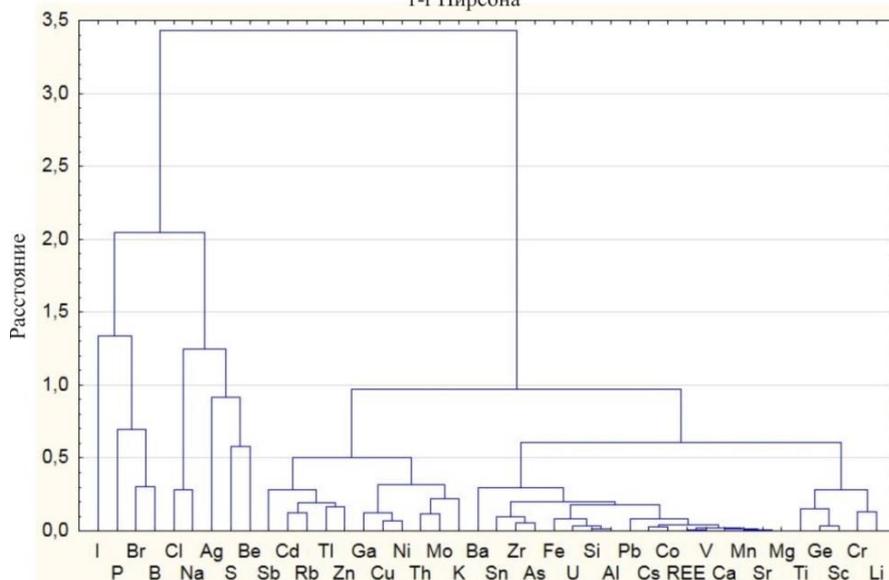


Рис. 3. Результаты кластер-анализа по снеготалой воде
Fig. 3. Results of cluster analysis for snow melted water

Установленные взаимосвязи между элементами позволяют сделать предположение о доминировании нерастворенной фазы в снежном покрове над Турунтаевским рудопроявлением.

Регрессионный анализ подтвердил дифференциацию химических элементов по их взаимосвязи с «опорными компонентами» – Ba, Na+Cl и REE. Выбор REE обусловлен высокой статистической устойчивостью суммы их содержаний, которая обеспечена данными о концентрации 15 элементов. Оценка зависимостей проводилась по значениям коэффициента

концентрации (КК), а суммы Pb+Zn, Na+Cl и REE делились на числа, равные количеству компонентов в показателе. Этот принцип применялся для всех суммарных показателей коэффициентов концентраций. Парный регрессионный анализ демонстрирует, что взаимосвязи с «опорными компонентами» многих химических элементов удовлетворительно описываются линейной функцией (табл. 2). Наличие линейных зависимостей свидетельствует о дифференциации химических элементов по их геохимическим свойствам и формам нахождения. Слабые водные ми-

гранты твердых частиц по своему поведению близки с REE. Химические элементы, способные к образованию солей, схожи по распределению с Na+Cl. Обособляется группа компонентов смешанных фазовых состояний, к которой, по всей видимости, относятся Ba и поливалентные элементы, преимущественно халькофилы. Небольшое количество проб не позволяет говорить о статистической устойчивости

линейных зависимостей. Тем не менее полученные результаты не противоречат классическим представлениям о миграции и концентрировании химических элементов в различных природных средах (вода, горные породы, почвы). То же самое относится к аэрозолям и атмосферным осадкам, для которых идентификация антропогенной составляющей производится на основе закономерностей линейных связей [21, 22].

Таблица 2. Дифференциация по степени аппроксимации к функции линейной регрессии по результатам снежного опробования Турунтаевского рудопроявления

Table 2. Differentiation by the degree of approximation to the linear regression function according to the results of snow sampling of the Turuntaevsky ore occurrence

Компоненты абсциссы Abscissa components	Коэффициент аппроксимации (R ²)/Approximation factor (R ²)					
	0,3–0,39	0,4–0,49	0,5–0,59	0,6–0,69	0,7–0,79	≥ 0,8
REE		Cl, Na, Zn	Cd, Cu, P, Sb, Tl	Ba, Cr, Li, Mo	Fe, K, Ni, Rb, Sc, Sn	Al, As, Ca, Co, Cs, Ga, Mg, Mn, Pb, Si, Sr, Th, Ti, U, V, Zr
Na+Cl	Al, As, Ca, Cd, Co, Cs, Cu, Mg, Mn, Sc, Sr, Ti, U, Zr	Rb, Zn	Tl			
Ba	As, K, Rb, Sb, Si, Sn, Th, Zr	Cr, Fe, Li, Ni, Pb	Al, Co, Ga, V, Mg, Mn, P, Ti	Ca, Cs, Sr, U		

Обсуждение результатов и выводы

В результате обработки геохимических данных опробования почвенного воздуха и снежного покрова установлено, что основные рудные элементы выделяются повышенными концентрациями над минерализованной зоной полиметаллического оруденения. Наиболее контрастные аномалии элементов-спутников оруденения – As, Sn и Cu – и их нормированных содержаний (рис. 4, а–е) расположены над скважинами, вскрывшими рудную минерализацию.

Комплексные показатели (КП) Pb+Zn и Pb+Zn/REE также характеризуются высокими концентрациями над зоной рудной минерализации по результатам опробования обоих субстратов (рис. 4, ж, з). Вместе с тем по результатам снежного опробования прослеживается взаимосвязь в распределении аддитивного показателя Pb+Zn и REE, что приводит к «затенению» полезного сигнала от зон рудной минерализации.

На рис. 4, Б, по результатам снежного опробования, в распределении всех рудных элементов: Pb+Zn, As, Sn и Cu, устанавливаются также ложные аномалии, связанные с повышенным содержанием REE в пределах развития лесной растительности. Таким образом, процедура нормирования рудных элементов на REE, прежде всего, по результатам снежного опробования, позволяет избавиться от ложных аномалий и увеличить полезный сигнал от рудного объекта.

По данным опробования почвенного воздуха и снежного покрова КП REE и Na+Cl не демонстрируют аномально высоких значений над установленными рудными зонами, а по результатам снежного опробования REE проявляет пространственную взаимосвязь с расположением древесно-кустарниковой растительности (рис. 4, ж, з). В то же время оба КП характеризуются крайне неоднородным распределением концентраций над оруденением, вскрытым единичной скважиной (начало профиля), что, по нашему мнению, может свидетельствовать о наличии относительно мощной зоны трещиноватости.

По профилю опробования происходит чередование двух типов ландшафтов, которые представлены лесом и открытыми луговыми пространствами. Часть последних не используется в настоящее время и зарастает редкими молодыми деревьями и кустарником. Сопоставление ландшафтных условий с изменчивостью REE по результатам снежного опробования показывает, что в целом наиболее высокие значения содержаний принадлежат отрезкам с развитой лесной растительностью. Эта зависимость объясняется захватом снегом вещества, которое было накоплено на кронах деревьев, преимущественно до периода снегопада [23, 24]. Изменчивость спектра концентрирующихся химических элементов в снеге в связи с видовым составом деревьев установлена также в [24].

Низкая вариативность геохимического поля свинцово-цинкового оруденения является первопричиной отсутствия контрастных ореолов элементов в снежном покрове.

Полученные данные дают основание утверждать, что точно установить в снежном покрове наложенные ореолы по изменению собственных концентраций рассеянных элементов не представляется возможным. Однако результаты корреляционного и регрессионного анализов свидетельствуют о наличии взаимосвязей между элементами со схожими геохимическими свойствами. Вероятнее всего, в данном случае проявляется дифференциация компонентов по главным формам нахождения: растворенная и нерастворенная. Целый ряд элементов проявляет взаимосвязь как с жидкой, так и с твердой фазой. Наличие значимых взаимосвязей рассеянных элементов с маркерами нерастворенной (REE) и растворенной (Na+Cl) форм нахождения позволяет использовать индикаторные отношения для обнаружения в снежном покрове слабо проявленных наложенных ореолов. Изменчивость фоновых концентраций в геохимическом поле прежде всего связана с изменчивостью твердых фаз, содержащихся в снежном покрове.

Заключение

В качестве природного субстрата снег представляет собой интерес как депонирующая среда при поисках месторождений полезных ископаемых в странах, характеризующихся устойчивым снежным покровом на протяжении длительного времени. Процесс опробования снега достаточно прост и малозатратен как с экономической, так и с временной точки зрения. Еще одним очевидным преимуществом является то, что снег представляет собой субстрат, характеризующий геологические процессы, происходящие в настоящее время.

Опробование почвенного воздуха возможно на любых геологических объектах. Процесс опробования достаточно прост при наличии соответствующего оборудования. Вещественный состав опробуемого воздуха также характеризует современные геологические процессы, протекающие в точке наблюдения.

Одной из главных причин, затрудняющих проведение исследований как снежного покрова, так и почвенного воздуха, является низкое содержание химических элементов. Это заставляет использовать высокоточные и высокочувствительные методы анализов, не допускающих каких-либо отклонений от методики их проведения. Определённую сложность при этом представляет так называемая «увязка» результатов анализов разного времени и/или различных лабораторий. Основными решениями данной проблемы могут служить как выполнение внутреннего и внешнего контроля анализов, так и создание эталонов, на которые можно будет ориентироваться лабораториям.

Вклад соединений, проникающих из глубин земной коры в снежной покров, сопоставим с привнесением

вещества из других источников. Корреляционные зависимости отражают типичные для природных образований формы нахождения: твердую, водорастворенную и парогазовую. Вероятно, фоновая составляющая локального геохимического фона в большей степени связана с твердой фазой, представленной частичками почвы и горных пород, семенами и чешуйками различных видов растительности. Установлено различие в накоплении элементов в снежном покрове в зависимости от степени открытости или закрытости (залесенности) ландшафтов. В качестве маркера твердой фазы нами была использована сумма REE. Нормирование концентраций рассеянных элементов на статистически устойчивую сумму REE позволило усилить полезный сигнал в виде геохимических ореолов над рудным объектом. Несмотря на то, что при расчёте статистических показателей использовано ограниченное количество проб, можно высказать предположение, что использование нелинейных функций позволит более точно охарактеризовать фоновые значения геохимического поля и выявлять наложенные геохимические ореолы в снежном покрове, связанные с глубинным массопереносом вещества.

Полученные результаты позволяют проявлять умеренный оптимизм в отношении использования снежной съемки и почвенного воздуха при поисках глубоко залегающих месторождений полезных ископаемых. Необходимо продолжить работы в данном направлении, в том числе и для решения выявившихся проблемных точек: методика отбора проб в зависимости от ландшафтных условий, обработка проб, точность аналитических исследований, методы обработки геохимической информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gonzales-Alvarez I., Gonsalves V.A., Carranza E.J.M. Challenges for mineral exploration in the 21st century: targeting mineral deposits under cover // *Ore Geology Reviews* – 2020. – V. 126. – 103785.
- Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration / I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Yu. Falk, O.S. Tolkachev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // *Applied Geochemistry*. – 2018. – V. 95. – P. 33–44.
- Сопряженный анализ гранулометрического состава аэрозольного вещества в приземном воздухе и снежном покрове: влияние воздушных масс на распределение аэрозольных частиц / М.П. Тентюков, К.А. Шукуров, Б.Д. Белан, Д.В. Симоненков, Е.Г. Язиков, В.И. Михайлов, В.С. Бучельников // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34. – № 8 (391). – С. 577–584.
- Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози / М.П. Тентюков, Д.Н. Габов, Д.В. Симоненков, Е.Г. Язиков // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 483–493.
- Распределение редкоземельных элементов в пробах снега – чувствительный показатель загрязнения окружающей среды / С.Ф. Винокуров, Д.Б. Петренко, В.А. Сычкова, Н.П. Тарасова // *Доклады АН*. – 2014. – Т. 456. – № 3. – С. 320–325.
- Анализ содержания элементов в аэрозолях по данным пассивного пробоотбора на обсерватории «Фоновая» / В.С. Бучельников, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Д.В. Симоненков, Б.Д. Белан, М.П. Тентюков // *Оптика атмосферы и океана*. – 2020. – Т. 33. – № 6. – С. 453–458.
- Estimation of air pollution due to gas glaring from remote observations of flare thermal radiation / M.N. Alekseeva, V.F. Raputa, T.V. Yaroslavtseva, I.G. Yashchenko // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2020 – V. 33. – № 3. – P. 289–284.
- Современный золотой морфолитогенез: изученность, региональные проявления / Н.С. Евсеева, Е.Г. Язиков, З.Н. Квасникова, А.С. Батманова, В.С. Бучельников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 96–107.
- Погребняк Ю.Ф., Татьянкина Э.М., Толочко В.В. Ореолы рассеяния золота в снежном покрове на поверхности рудопроявления // *Доклады АН СССР*. – 1979. – Т. 245. – № 4. – С. 953–955.
- Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain / A. Taivalkoski, P. Sarala, S. Lukkari, D. Sutherland // *Journal of Geochemical Explorations*. – 2019. – V. 200. – № 5. – P. 1–12.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations // *Endeavour, New Series*. – 1990. – V. 14. – № 1. – P. 28–35.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and new physical model for the transport // *Geophysics* – 1982. – V. 47. – № 10. – P. 1444–1452.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition // *Geoexploration*. – 1987. – V. 24. – P. 517–534.
- Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments // *Hydrocarbon Migration and its Nearsurface Expression: AAPG Memoir*. – 1996. – V. 66. – P. 71–89.
- Saunders D.F., Bursan K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations // *AAPG Bull.* – 1999. – V. 83. – № 1. – P. 170–185.
- Finding deeply buried deposits using geochemistry / E.M. Cameron, S.M. Hamilton, M.I. Leybourne, G.E.M. Hall, M.B. McClenaghan // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2004. – V. 4. – P. 7–32.

17. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. P. I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property / S.M. Hamilton, E.M. Cameron, M.B. McClenaghan, G.E.M. Hall // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2004. – V. 4. – P. 33–44.
18. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Т. 2. Геологическое строение / науч. ред. чл.-кор. РАН А.В. Коньгин, канд. геол.-минерал. наук В.Г. Свиридов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. – 254 с.
19. Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной толще / М.П. Тентюков, Г.В. Игнатъев, И.С. Соболев, Р.Ю. Гаврилов // *Вестник геонаук*. – 2022. – № 5 (329). – С. 26–37.
20. Wang M., Gao Y., Liu Y. Progress in the collection of geogas in China // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2008. – V. 8. – P. 183–190.
21. Dasch J.M., Wolff G. Trace inorganic species in precipitation and their potential use in source apportionment studies // *Water, Air and Soil Pollution*. – 1989. – V. 43. – P. 401–412.
22. Kowalczyk G.S., Gordon G.E., Rheingrover S.W. Identification of atmospheric particulate source in Washington, DC, using chemical elemental balances // *Environmental Science & Technology*. – 1982. – V. 16. – № 2. – P. 79–90.
23. Deposition. Forest condition monitoring in Finland (National report 1999) / A. Lindroos, J. Derome, K. Derome, K. Niska // *The Finnish forest research institute, research papers*. – 2000. – V. 782. – P. 61–69.
24. Pristova T.A., Vasilevich M.I. Chemical composition of snow cover in middle-taiga forest in Komi Republic // *Geochemistry International*. – 2011. – V. 49. – № 2. – P. 199–206.

Поступила: 17.11.2022 г.

Дата рецензирования: 02.12.2022 г.

Информация об авторах

Гаврилов Р.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соболев И.С., кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ООО «Гео Сервис».

Соболева Н.П., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ворошилов В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тентюков М.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры экологии и геологии Института естественных наук Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина.

UDC 553.411.071:550.4

APPROBATION OF SNOW AND ATMOGEOCHEMICAL SURVEYS FOR MAPPING DISPERSION HALOES OF BURIED POLYMETALLIC MINERALIZATION ON THE EXAMPLE OF THE TURUNTAEVSKY ORE OCCURRENCE (TOMSK REGION)

Roman Yu. Gavrilov¹,
gavrilovry@tpu.ru

Igor S. Sobolev²,
geolsob@yandex.ru

Nadezhda P. Soboleva¹,
sobnadi@yandex.ru

Valeriy G. Voroshilov¹,
v_g_v @tpu.ru

Mikhail P. Tentyukov³,
tentukov@yandex.ru

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

² Geo Service LLC,
5-21, Uchebnaya street, Tomsk, 634028, Russia.

³ Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
55, Oktyabrsky avenue, Syktyvkar, 167001, Russia.

The relevance of the study is related to the need to introduce new methods of deep geochemical mapping into the practice of forecasting and prospecting.

Purpose: to identify and evaluate the features of the anomalous geochemical field above the overburdened lead-zinc mineralization based on snow and atmogeochemical sampling.

Methods: geochemical mapping, mathematical processing of the results of geochemical work, modeling of geochemical fields using multivariate statistics, geological and genetic interpretation of geochemical data.

Object: geochemical halos of the Turuntaevsky lead-zinc ore occurrence.

Results. As a result of the processing of geochemical data, it was found that most of the chemical elements in the snow cover and soil air are characterized by a low degree of heterogeneity in the distribution of contents, which indicates the absence of contrasting geochemical halos in the area. After mathematical processing of geochemical data, it was found that the most contrasting anomalies of the main ore elements Pb+Zn, As, Sn and Cu and their normalized contents are located above the wells that exposed ore mineralization. According to the results of snow testing in the distribution of all ore elements: Pb+Zn, As, Sn and Cu, false anomalies are also distinguished, located within the development of forest vegetation. The data obtained give grounds to assert that it is not possible to accurately determine the superimposed halos in the snow cover from changes in the concentrations of trace elements. However, the results of correlation and regression analyzes indicate the presence of relationships between elements with similar geochemical properties. Most likely, in this case, the components are differentiated according to the main forms of occurrence: dissolved and undissolved. A number of elements exhibit a relationship with both liquid and solid phases. The presence of significant interrelations of trace elements with markers of undissolved (rare-earth elements) and dissolved (Na+Cl) occurrence forms makes it possible to use indicator ratios to detect weakly manifested superimposed halos in the snow cover.

Key words:

polymetals, Turuntaevsky ore occurrence, geochemical anomalies, snow and atmogeochemical surveys, mathematical statistics.

REFERENCES

1. Gonzales-Alvarez I., Gonsalves V.A., Carranza E.J.M., Challenges for mineral exploration in the 21st century: targeting mineral deposits under cover. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 126, 103785.
2. Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Yu., Tolkachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 95, pp. 33–44.
3. Tentyukov M.P., Shukurov K.A., Belan B.D., Simonenkov D.V., Yazikov E.G., Mikhailov V.I., Buchelnikov V.S. Conjugated analysis of the granulometric composition of aerosol matter in the surface air and snow cover: the effect of air masses on the distribution of aerosol particles. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2021, vol. 34, no. 8 (391), pp. 577–584.
4. Tentyukov M.P., Gabov D.N., Simonenkov D.V., Yazikov E.G. Pollution of the snow surface with polycyclic aromatic hydrocarbons during the formation of frost. *Ice and snow*, 2019, vol. 59, no. 4, pp. 483–493.
5. Vinokurov S.F., Petrenko D.B., Sychkova V.A., Tarasova N.P. The distribution of rare earth elements in snow samples is a sensitive indicator of environmental pollution. *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 456, no. 3, pp. 320–325.
6. Buchelnikov V.S., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Simonenkov D.V., Belan B.D., Tentyukov M.P. Analysis of the Content of Chemical Elements in Aerosols Using Data from Passive Sampling at Fono-vaya Observatory. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 6, pp. 453–458.
7. Alekseeva M.N., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V., Yashchenko I.G. Estimation of air pollution due to gas glazing from remote observa-

- tions of flare thermal radiation. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, vol. 33, no. 3, pp. 289–284.
8. Evseeva N.S., Yazikov E.G., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Buchelnikov V.S. Modern aeolian morpholithogenesis: knowledge, regional manifestations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 96–107. In Rus.
 9. Pogrebnyak Yu.F., Tatyankina E.M., Tolochko V.V. Halos of dispersion of gold in the snow cover on the surface of the ore occurrence. *Doklady Earth Sciences*, 1979, vol. 245, no. 4, pp. 953–955.
 10. Taivalkoski A., Sarala P., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain. *Journal of Geochemical Explorations*, 2019, vol. 200, no. 5, pp. 1–12.
 11. Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour, New Series*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 28–35.
 12. Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and new physical model for the transport. *Geophysics*, 1982, vol. 47, no. 10, pp. 1444–1452.
 13. Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*, 1987, vol. 24, pp. 517–534.
 14. Schumacher, D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. *Hydrocarbon Migration and its Nearsurface Expression. AAPG Memoir*. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. 1996, vol. 66, pp. 71–89.
 15. Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bull.*, 1999, vol. 83, no. 1, pp. 170–185.
 16. Cameron E.M., Hamilton S.M., Leybourne M.I., Hall G.E.M., McClenaghan M.B. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, vol. 4, pp. 7–32.
 17. Hamilton S.M., Cameron E.M., McClenaghan M.B., Hall G.E.M. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, vol. 4, pp. 33–44.
 18. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopayemye Zapadnoy Sibiri. T. 2. Geologicheskoe stroenie* [Geology and minerals of Western Siberia. Vol. 2. Mineral Resources]. Eds. A.V. Kanygin, V.G. Sviridov. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1998. 254 p.
 19. Tentyukov M.P., Ignatiev G.V., Sobolev I.S., Gavrilov R.Yu. Physical properties of the snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in the snow mass. *Bulletin of Geosciences*, 2022, no. 5 (329), pp. 26–37.
 20. Wang M., Gao Y., Liu Y. Progress in the collection of geogas in China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2008, vol. 8, pp. 183–190.
 21. Dasch J.M., Wolff G. Trace inorganic species in precipitation and their potential use in source apportionment studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, vol. 43, pp. 401–412.
 22. Kowalczyk G.S., Gordon G.E., Rheingrover S.W. Identification of atmospheric particulate source in Washington, DC, using chemical elemental balances. *Environmental Science & Technology*, 1982, vol. 16, no. 2, pp. 79–90.
 23. Lindroos A., Derome J., Derome K., Niska K. Deposition. Forest condition monitoring in Finland (National report 1999). *The Finnish forest research institute, research papers 2000*, vol. 782, pp. 61–69.
 24. Pristova T.A., Vasilevich M.I. Chemical composition of snow cover in middle-taiga forest in Komi Republic. *Geochemistry International*, 2011, vol. 49, no. 2, pp. 199–206.

Received: 17 November 2022.

Reviewed: 2 December 2022.

Information about the authors

Roman Yu. Gavrilov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor S. Sobolev, Cand. Sc., chief geologist, Geo Service LLC.

Nadezhda P. Soboleva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy G. Voroshilov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail P. Tentyukov, Dr. Sc., professor, Pitirim Sorokin Syktyvkar State University.