

РУДНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.84.09+549+553.41(571.65)

**БРИОЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ И ОЦЕНКЕ
ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПО ПОТОКАМ РАССЕЯНИЯ
(Северо-Восток России)**

А.С. Макшаков, Р.Г. Кравцова

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

Впервые на территории Дукатского рудного поля (Балыгычано-Сугойский прогиб, Северо-Восток России) в пределах его северо-восточной части (Au-Ag месторождение Дукат, уч. Чайка) и на восточном фланге (Au-Ag рудопоявление, уч. Пиритовый) были выполнены бриолитохимические исследования. Опробование осуществлялось по водотокам I порядка, дренирующим Au-Ag рудные зоны, и было обусловлено тем, что в условиях криолитозоны в вершинах водотоков скопления аллювиальных отложений фрагментарны или полностью отсутствуют, но при этом по их берегам и руслу произрастают водные и полуводные мхи. Отбирали пробы, состоящие из моховых подушек и удерживаемых ими рыхлых отложений, представленных тонкими илистыми взвесями и песчано-илистым материалом. Показано, что моховые подушки являются эффективной природной ловушкой, позволяющей извлекать из водной взвеси современных водотоков, даже временных, тонкодисперсные, ультрадисперсные и коллоидно-дисперсные частицы, в том числе рудные.

Проведено сопоставление содержаний основных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Zn) в бриолитохимических и литохимических пробах. Установлено, что наиболее высокими концентрациями этих элементов характеризуются бриолитохимические пробы. С помощью сцинтилляционного анализа показано преобладание тонкодисперсных частиц Au и Ag в бриолитохимических пробах. Методом РСМА изучен вещественный состав литочастиц, а также возможные формы нахождения элементов-индикаторов оруденения. Сделан вывод о том, что бриолитохимические потоки рассеяния являются составной частью литохимических потоков и наравне с ними могут эффективно использоваться для выявления геохимических аномалий и оценки их рудно-формационной принадлежности. Показано, что бриолитохимические потоки рассеяния в значительной степени отражают особенности вещественного состава первичных руд: те же основные элементы-индикаторы (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и тот же близкий минеральный состав (тонкодисперсное золото и серебро, электрум, сульфосоли серебра, простые сульфиды).

Предложенные бриолитохимические исследования имеют широкие перспективы использования не только на территории Северо-Востока России. Они могут эффективно применяться и в других районах, имеющих сходные ландшафтные условия, в первую очередь, на тех площадях, где формирование литохимических и бриолитохимических потоков рассеяния происходит в условиях северных субарктических и арктических обстановок.

Литохимические потоки, бриолитохимические потоки, золото-серебряная минерализация.

**BRYOLITHOCHEMICAL STUDIES IN THE SEARCH FOR AND EVALUATION
OF GOLD-SILVER MINERALIZATION BASED ON STREAM SEDIMENTS
(northeastern Russia)**

A.S. Makshakov and R.G. Kravtsova

The first bryolithochemical studies have been carried out within the Dukat ore field (Balygychan-Sugoi trough, northeastern Russia), in its northeast (Dukat Au-Ag deposit, Chaika site) and on its eastern flank (Au-Ag ore occurrence, Piritovyi site). Sampling was made along primary water streams draining Au-Ag ore zones, because the headstreams localized in the permafrost zone are poor in alluvial sediments or lack them, whereas the stream banks and beds are overgrown with aquatic and semiaquatic mosses. We examined samples of moss cushions with loose sediments (fine silt suspension and sand-silt material). The study has shown that moss cushions are an effective natural trap extracting finely dispersed, ultradisperse, and colloid-dispersed particles, including ore ones, from water stream suspension.

The contents of major elements indicating Au–Ag mineralization (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, and Zn) in the bryolithochemical and lithochemical samples were compared. The highest contents of these elements have been revealed in the bryolithochemical samples. Scintillation analysis shows a predominance of finely dispersed Au and Ag particles. The chemical composition of lithoparticles and probable species of elements indicating mineralization were studied by energy-dispersive X-ray microanalysis. It has been concluded that the bryolithochemical stream sediments are an integral part of the lithochemical ones and can also be effectively used to reveal geochemical anomalies and identify the corresponding ores. It is shown that the bryolithochemical sediment streams bear important information about the chemical composition of primary ores, as they have the same major indicator elements (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, and Zn) and nearly the same mineral composition (finely dispersed gold and silver, electrum, silver sulfosalts, and simple sulfides).

The proposed bryolithochemical research is promising not only for northeastern Russia but also for other areas with similar landscapes, primarily areas where lithochemical and bryolithochemical stream sediments form in the northern subarctic and arctic environments.

Lithochemical and bryolithochemical stream sediments, Au–Ag mineralization

ВВЕДЕНИЕ

При проведении геохимических работ важную информацию о золото-серебряной (Au–Ag) минерализации территории дают аномальные геохимические поля (АГХП), выявленные по литохимическим потокам рассеяния (ЛПР). Опыт проведения разномасштабных литохимических съемок на территории рудных районов Северо-Востока России в областях горного рельефа, подверженных перигляциальным процессам, показал, что при отборе проб аллювия в верховьях водотоков возникают определенные трудности. В зонах криолитогенеза, где основным процессом, формирующим ЛПР, считается физическое выветривание, скопления более мелких фракций аллювия (песчано-гравийной, песчаной, песчано-илистой) фрагментарны, появляются на поверхности лишь в отдельных точках верховьев русла или вообще отсутствуют. ЛПР в подобных условиях формируются при резком дефиците такого материала, а именно он является концентратором большинства рудных элементов. В связи с этим отбор аллювия начинается в лучшем случае с водотоков II порядка. Водотоки I порядка практически не опробуются. В результате ЛПР на таких площадях имеют относительно бедный компонентный состав, низкую контрастность или вообще не проявлены.

Все вышесказанное в значительной степени осложняет изучение состава АГХП, выявленных по ЛПР, масштабов их развития и закономерностей размещения в пространстве. Иными словами, затрудняется типизация экзогенных АГХП, выявление зональности, менее эффективной становится оценка их рудно-формационной принадлежности. В то же время в вершинах водотоков по берегам и руслам почти всегда можно обнаружить скопления водных (гидрофиты) и полуводных (гигрофиты) мхов [Водоросли..., 1978] — моховых подушек, которые способны захватывать и прочно удерживать тонкие илистые взвеси и песчано-илистый материал, переносимый водным потоком. Если этот материал образовался в результате разрушения руд, их первичных и вторичных ореолов, то возникают участки повышенных концентраций химических элементов, в целом отвечающие по составу дренируемым рудным телам и минерализованным зонам. Все это вместе образует так называемые бриолитохимические (от греч. *bryon* — мох и *lithos* — камень) потоки рассеяния. Последующее изучение особенностей состава и закономерностей распределения рудных элементов в бриолитохимических потоках рассеяния (БЛПР), проведенное нами впервые на территории одного из рудных районов Северо-Востока России, показало высокую эффективность водных и полуводных мхов при опробовании верховьев водотоков. Основная цель — повышение эффективности площадных съемок по ЛПР.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Изучение БЛПР было проведено в пределах Дукатского рудного поля, в его северо-восточной части (Au–Ag месторождение Дукат, уч. Чайка) и на восточном фланге (Au–Ag рудопроявление, уч. Питеритовый). Бриолитохимическое опробование проводилось по водотокам I порядка, дренирующим Au–Ag рудные зоны (рис. 1), где основными элементами-индикаторами этого типа минерализации являются Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn.

В структурном отношении район исследований находится в центральной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса на территории Балыгычано-Сугойского прогиба (см. рис. 1, врезка). Геологическое строение, минералогия и геохимия Дукатского рудного поля и одноименного Au–Ag месторождения хорошо изучены [Наталенко и др., 1980; Сидоров и др., 1989; Шило и др., 1992; Берман и др., 1993; Константинов и др., 1998, 2003; Двуреченская, 2001; Кравцова и др., 2003; Кравцова, 2010; и др.].



Рис. 1. Схема геологического строения Дукатского рудного поля (фрагмент). Составлена по материалам В.Н. Макурина (фонды ПГО «Севвостокгеология», г. Магадан) и М.М. Константинова с соавторами [1998].

1 — четвертичные отложения современных водотоков; 2 — верхнемеловая шороховская свита, игнимбриты риолитов, массивные риолиты с прослоями туфов, туфопесчаников, вулканомиктовых брекчий, риодациты; 3 — нижневерхнемеловая каховская свита, андезиты, андезитобазальты с прослоями туфопесчаников, аргиллитов, разнообразных туфов; 4, 5 — нижнемеловые отложения: 4 — уликская свита, конгломераты, гравелиты, алевролиты, линзы и пласты каменных углей, туфы андезитов, андезитобазальты, 5 — аскольдинская свита, мелкопорфировые риолиты, флюидалные риодациты, игнимбриты риолитов и риодацитов, алевролиты, песчаники; 6 — верхнетриасовые алевролиты, туфопесчаники, известняки; 7, 8 — интрузивные образования: 7 — раннепозднемеловые гранодиорит-порфиры, 8 — раннемеловые диоритовые порфиры; 9—11 — субвулканические образования: 9 — позднемеловые афировые, порфировые и фельзитовые риолиты, их автомагматические брекчии, невадиты, 10 — раннепозднемеловые риодациты, 11 — раннемеловые невадиты, порфировые риолиты, их автомагматические брекчии; 12 — рудные тела; 13 — разломы: а — основные рудоконтролирующие (Д — Диагональный, В — Восточный, М — Марганцевый, А — Амплитудный), б — прочие; 14 — водотоки: а — постоянные, б — временные; 15 — участки бриллиантохимических исследований (Ч — Au-Ag месторождение Дукач, уч. Чайка; П — Au-Ag рудопроявление, уч. Пиритовый). На врезке в рамке показан Балыгычано-Сугойский прогиб, черным квадратом отмечено местоположение Дукатского рудного поля. ОЧВП — Охотско-Чукотский вулканогенный пояс.

Рудовмещающими породами на изученной площади являются главным образом нижнемеловые вулканы риолитового состава аскольдинской свиты (см. рис. 1). Выше по разрезу они перекрыты нижнемеловыми терригенно-вулканогенными отложениями уликской свиты. На флангах появляются вулканические образования нижневерхнемеловой каховской, а также верхнемеловой шороховской свит. В южной части отмечается небольшой выход осадочных пород верхнетриасового возраста. Из интрузивных образований выделяются раннемеловые диоритовые порфиры и раннепозднемеловые гранодиорит-порфиры, которые выявлены на флангах. Субвулканические образования представлены раннемеловыми невадитами, порфировыми риолитами, позднемеловыми невадитами и фельзитовыми риолитами, а также раннепозднемеловыми риодацитами. Оруденение контролируется Диагональным, Восточным, Марганцевым и Амплитудным глубинными разломами.

Руды имеют полихронный характер развития и представлены в основном серебро-полиметаллической, золото-серебряной и серебряной минерализацией. В серебро-полиметаллических кварц-серицитовых жилах и зонах часто присутствует полевой шпат, хлорит и железистые карбонаты; в золото-серебряных кварц-полевошпатовых — родонит, хлорит и серицит; в серебряных кварц-родонитовых — родохрозит, пиролюзит. На флангах рудного поля и месторождения часто проявлена непромышленная

полисульфидная олово-серебряная минерализация, представленная прожилками кварц-эпидот-хлоритового состава. Широко развиты зоны площадной рассеянной сульфидной минерализации [Константинов и др., 1998, 2003; Кравцова, 2010; и др.].

Руды, относящиеся к типичной эпitherмальной вулканогенной Au-Ag формации, встречаются реже и установлены в пределах Дукатского рудного поля лишь на отдельных участках, в том числе на тех, где проводились исследования (Чайка, Пиритовый). Минеральный состав жил таких руд достаточно прост: кварц (до 95 %), адуляр (до 25 %), гидрослюда и серицит (до 5 %), реже хлорит и сидерит (до 1—2 %). К числу важнейших серебросодержащих минералов относятся акантит, самородное серебро, кюстелит, пираргирит, в меньшей степени штернбергит, прустит, полибазит, стефанит. Золото представлено мелкими (0.01—0.20 мм) и тонкодисперсными (0.01 мм и менее) зернами электрума (450—600 %). Незначительное количество золота связано с сульфидами (микровключения, микропримеси). Из других рудных минералов наиболее распространенными являются галенит и сфалерит. Реже встречаются пирит, пирротин, халькопирит, магнетит. К редким минералам относятся марказит, арсенопирит, блеклая руда, пирсеит, станнин, антимонит, халькостибит, борнит, киноварь.

В зонах окисления Au-Ag рудных зон и участков Дукатского рудного поля из первичных минералов постоянно отмечаются электрум, самородное серебро, разрушенные зерна акантита, пираргирита, штернбергита. Часто встречаются частично сохранившиеся зерна галенита, сфалерита, пирита, пирротина, халькопирита, магнетита. Преобладающим развитием пользуются гипергенные минералы, такие как оксиды и гидроксиды Fe и Mn, ярозит, англезит, церуссит, смитсонит, халькозин, ковеллин, реже встречаются водорастворимые сульфаты Cu, Fe и Zn — малахит, азурит, борнит, скородит и др. [Двуреченская, 2001]. Из нерудных минералов широко распространены разрушенные кварц и полевые шпаты, серицит, гидрослюда и каолинит, карбонаты, эпидот и хлорит.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика проведенных исследований заключалась в следующем. Вдоль водотоков I порядка с шагом 100 м из русла с валунов и глыб отбирались моховые подушки, состоящие из водных и полуводных мхов с трудноотделяемым от них литохимическим материалом, представленным илистой и песчано-илистой фракциями. Затем отобранный материал был хорошо отжат от воды и помещен в несколько стандартных тканевых мешочков, используемых при отборе рядовой пробы аллювия. В каждом случае масса сырого мха с илистой и песчано-илистой фракциями составляла около 300—400 г.

В полевых условиях этот материал был доведен до сухого состояния путем сушки на солнце и разделен на две пробы — литохимическую и бриолитохимическую. В первую пробу ручным способом путем встряхивания с моховой подушки отделялся, если была такая возможность, илисто-песчаный материал. Вторая проба представляла собой мох с трудноотделимым преимущественно илистым материалом. Для сравнения содержаний элементов по всем пробам в местах, где фрагментарно был сформирован аллювий, традиционным способом отбиралась литохимическая проба, состоящая из илисто-песчаного материала. Все литохимические пробы просеивались через сито с размером ячейки 1 мм и затем истирались механическим путем на вибрационном истирателе в стальных стаканах до состояния пудры.

Бриолитохимические пробы помещались в фарфоровые чашки и озолялись в муфельной печи при температуре около 400 °С. Время сжигания от начала нагрева до выключения составляло 4 ч. После этого смесь из золы и литохимического материала моховой подушки дополнительно просеивалась через сито с размером ячейки 0.1 мм с целью окончательного очищения от песчаной фракции. Кроме того, для определения содержания Hg, которая улетучивается при прокаливании, до озоления бриолитохимических проб от них отделялась небольшая часть материала, анализировавшегося затем отдельно. Все пробы прошли анализ на широкий круг элементов в лабораториях ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

При определении содержаний Au применялся атомно-абсорбционный метод анализа с предварительной экстракцией сульфидами нефти [Торгов, Хлебникова, 1977]. Замеры проводили на атомно-абсорбционном спектрометре Perkin-Elmer M-405 с пределом обнаружения 0.002 г/т. Аналитики А.А. Хлебникова, Л.Д. Андрулайтис, П.Т. Долгих.

Содержание Hg анализировалось атомно-абсорбционным методом с применением кислотного разложения в HNO₃. Замеры проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре с зеемановской коррекцией неселективного поглощения [Методика..., 2005] с пределом обнаружения 0.005 г/т. Аналитик Л.Д. Андрулайтис.

Все пробы, отобранные на уч. Чайка, прошли спектральный приближенно-количественный атомно-эмиссионный анализ на широкий круг элементов [Эмиссионный..., 1976]. Использовался метод просыпки на спектрографе ДФС-8 с приставкой УСА-5 в дуге переменного тока от генератора ДГ-2. Аналитик В.С. Кишечникова.

Литохимические пробы, отобранные на уч. Пиритовый, были проанализированы с помощью спектрального количественного атомно-эмиссионного метода по способу вдувания-просыпки [Васильева, Шабанова, 2005]. Применяли автоматизированное устройство для введения проб в дуговой разряд «Поток» со встроенным спектроаналитическим генератором «Шаровая молния», дифракционный спектрограф ДФС-458С, многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров с фотодиодными линейками (МАЭС). Аналитики И.Е. Васильева, Е.В. Шабанова. Бриолитохимические пробы уч. Пиритовый анализировались с помощью спектрального количественного атомно-эмиссионного метода путем полного испарения материала из канала угольного электрода [Васильева, Шабанова, 2005]. Использовали электродуговой генератор «Везувий-2», дифракционный спектрограф ДФС-458С, многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров с фотодиодными линейками (МАЭС). Аналитик И.Е. Васильева.

Для изучения Au и Ag применялся сцинтилляционный эмиссионный анализ. Метод предназначен для приближенно-количественных определений Au и Ag в геологических пробах руд, горных пород, рыхлых отложений и золы растений в диапазоне от 0.01 до 5—10 г/т и размером частиц больше 1—2 мкм. Наряду с концентрациями методика позволяет оценивать гранулометрический состав частиц самородных Au и Ag [Прокопчук, 1994]. Аналитик С.И. Прокопчук.

Для проведения минералогических и микроминералогических исследований из озоленных бриолитохимических проб были изготовлены образцы в виде брикетных аншлифов-шайб. Минеральный состав изучался с помощью рудного микроскопа «Микромед Полар 3» и микроанализаторов Superprobe-733 и JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония) по специально разработанной методике рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа — РСМА [Павлова, Кравцова, 2006]. Аналитик Л.А. Павлова.

БРИОЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рассматриваемой территории по всем ручьям произрастают разнообразные мхи. В целом среди них выделяются по отношению к воде гидрофиты (водные мхи) и гигрофиты (полуводные мхи). К первой группе относятся растения, живущие непосредственно в воде. Они при помощи ризоидов прикрепляются к подводному субстрату либо свободно плавают на поверхности и в толще воды. Водные мхи чаще всего встречаются в водотоках II и более старших порядков в связи с постоянным наличием в них воды. Наиболее распространенными являются бриевые мхи, характеризующиеся большим видовым разнообразием. Ко второй группе относятся растения избыточно увлажненных мест. Они наиболее часто произрастают по берегам или непосредственно в руслах рек и ручьев I порядка. Преобладающим развитием пользуются бриевые мхи, реже сфагновые.

На территории Северо-Востока России насчитывается около 20 видов сфагновых и более 50 видов бриевых мхов, но преобладает в основном не более 10 видов. Преимущественно это бриевые мхи, которые в нашем случае были основным объектом опробования. Зольность этих мхов составляет в среднем 10 %. Она практически не меняется при произрастании в одних и тех же условиях [Лапаев, 1979]. Зольность сфагнов в 1.5—2.0 раза ниже — около 5—7 %, что обусловлено наличием у них пустых, т.н. гиалиновых клеток.

Впервые метод использования водных мхов для поисков рудных месторождений был предложен Г.П. Лапаевым [1979] и назван бриогеохимическим. Сущность метода заключается в изучении распределения микроэлементов в поверхностных пресных водах путем отбора произрастающих в них водных мхов, тщательно отмытых от песчано-илистой фракции. Этот метод, согласно Г.П. Лапаеву, можно считать разновидностью гидрогеохимического метода.

При поисках полезных ископаемых водные мхи применялись также В.А. Загоскиным [2003, 2006]. Метод был назван бриогеохимическим (бактериальным) и по сути также является разновидностью гидрогеохимического. В отличие от метода, предложенного Г.П. Лапаевым, определение концентраций элементов проводится не в золе очищенных водных мхов, а во влаге, получаемой путем их отжимания.

Из зарубежных работ, в которых описывается применение мхов с целью поисков полезных ископаемых, можно отметить [Erdman, Modreski, 1984; Shacklette, 1984; Брукс, 1986; Smith, 1986]. Предложенные в них методики схожи с теми, которые применялись Г.П. Лапаевым, т.е. пробы мхов должны быть тщательно очищены от рыхлых отложений водотоков.

Необходимо подчеркнуть, что применение мхов при поисках месторождений имеет ряд существенных преимуществ. Мхи являются многолетними вечнозелеными растениями, вследствие чего элементный состав их золы отражает состав минерального вещества питающих их вод и субстрата, усредненный за весь период вегетации мхов, и не зависит от фенологической фазы развития, как для остальных видов высших растений [Алексеев, 2000]. По Г.П. Лапаеву [1979], определение видовой принадлежности необязательно, так как для основных видов и родов мхов уже доказано, что микроэлементы они концентрируют одинаково. К такому же выводу приходят и зарубежные исследователи [Shacklette, 1984; Smith, 1986]. Разделение на виды нецелесообразно еще и потому, что почти повсеместно мхи про-

израстают в виде тесно сплетенных кустиков, содержащих несколько видов. Кроме того, возникают трудности с определением видовой принадлежности, так как большинство мхов, особенно бриевых, даже по родовой принадлежности различимы только микроскопически.

Мхи пользуются широким распространением. Для них характерна высокая поглощающая способность и безбарьерность по отношению практически ко всем микроэлементам [Ковалевский, 1984]. Максимальные содержания элементов в золах мхов в сотни и более раз выше фоновых. Причина высоких содержаний заключается, по мнению Р.Р. Брукса [1986], в особом строении мхов. Большинство их являются эктоводными, т. е. не имеющими внутренней проводящей системы или кутикулоподобного слоя, поэтому поглощение воды и катионов металлов происходит по всей поверхности. В.А. Загоскин [2003, 2006] считает, что концентратором и носителем рудных элементов служит металлофильная микрофлора, которая представляет собой бактериальный геохимический барьер. Она постоянно обитает в водных пленках, которые, в свою очередь, окружают ризоиды и стебли мхов.

Сложность всех ранее предложенных *бриогеохимических* методов, в отличие от разработанного нами *бриолитохимического*, заключается в затрудненном поиске пробы водных мхов. Тем более это неприемлемо для водотоков I порядка, которые в большинстве случаев являются временными. Кроме того, микроэлементный состав золы водных мхов отражает не столько состав биогеохимического потока рассеяния, сколько минеральный состав речных вод, содержание в которых заметно ниже, чем в аллювии. При этом сжигание чистого мха в значительной степени снижает процент зольности. Это ведет, в свою очередь, к необходимости отбора достаточно большой по массе первоначальной пробы, намного превышающей массу бриолитохимической. Еще один серьезный недостаток предложенных бриогеохимических методов — это трудоемкость операции отделения и тщательного очищения моховой подушки от материала речных отложений.

Предложенный нами *бриолитохимический метод* основывается на отборе проб водных и полуводных мхов, произрастающих по берегам и руслам верховьев водотоков, совместно с тонкой илистой и песчано-илистой фракциями, которые прочно удерживаются моховой подушкой (рис. 2). Иными словами, отбираемая проба мха, в отличие от бриогеохимической, помимо биомассы включает в себя значительную часть трудноотделимого от нее литохимического материала. Особенностью мхов является то, что для прикрепления к субстрату, на котором они растут, в нижней части стебля имеются корнеподобные многоклеточные волоски, так называемые ризоиды (рис. 2, врезка). В процессе роста растения ризоиды внедряются в субстрат и очень крепко удерживаются. Основную массу воды и растворенные в ней минеральные составляющие мхи поглощают всей поверхностью, а минеральные вещества субстрата получают благодаря ризоидам.

Предложенный нами бриолитохимический метод имеет ряд преимуществ. В связи с более широким распространением по берегам и руслам полуводных мхов, способных существовать долгое время практически без воды во временных водотоках, отобрать такую пробу значительно легче, чем пробу водных мхов. Химический состав золы совместно с илистым материалом отражает главным образом не состав речных вод, а состав литохимических потоков. Вычисленная зольность бриолитохимических проб составляет в среднем 30—35 %, что в несколько раз выше, чем зольность проб, очищенных от илистой фракции (5—15 %). При отборе таких проб не требуется большого количества материала. По-



Рис. 2. Песчано-илистый материал в моховых подушках, произрастающих по берегам и руслам верховьев водотоков.

На врезке: стебель бриевых мхов (а) с ризоидным войлоком (б).

сле сжигания бриолитохимической пробы, при ее массе 50 г в сухом состоянии, образуется не менее 10 г золы, в составе которой илистая часть составляет 80—90 мас. %. Определение видовой принадлежности мхов проводить необязательно, так как вариации химического состава в разных видах мхов в бриолитохимической пробе отражаются крайне слабо или вообще отсутствуют. Кроме того, бриолитохимический метод лишен трудоемкой операции по очищению моховых подушек от аллювия. Следует отметить, что другого альтернативного способа опробования верховьев водотоков, где, как правило, отсутствует аллювий, на сегодняшний день не существует. По затратам при подготовке материала для анализа отбор и дальнейшая обработка бриолитохимических и литохимических проб в целом сопоставимы, отличаясь только тем, что на заключительном этапе литохимические пробы стираются, а бриолитохимические — сжигаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение БЛПР было проведено нами в пределах Дукатского рудного поля на Au-Ag месторождении Дукат (уч. Чайка) и на Au-Ag рудопроявлении (уч. Пиритовый). Пробы отбирали по водотокам I порядка, дренирующим Au-Ag рудные зоны (см. рис. 1). Исследовали такие основные для этого типа минерализации элементы-индикаторы, как Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn. Изучение Hg в бриолитохимических пробах, отобранных на уч. Чайка, не удалось провести в связи с недостаточным количеством отобранного здесь материала, который необходим для проведения анализа.

Особенностью изученных участков является то, что на них вскрываются различные рудные интервалы. Так, на уч. Чайка на поверхность выходят среднерудные интервалы, где наиболее хорошо проявлены такие элементы, как Au и Ag, а на уч. Пиритовый — нижнерудные интервалы, характеризующиеся более низкими концентрациями Au и Ag, но более высокими — Pb и Zn. Кроме того, здесь по водотокам I порядка кроме бриолитохимических проб на отдельных отрезках русла была возможность отобрать традиционные литохимические пробы, содержащие мелкую фракцию аллювия (песчаную, гравийно-песчаную), что, в свою очередь, дало возможность сопоставить результаты анализа по всем видам проб, отобранным как по БЛПР, так и по ЛПР. Следует заметить, что в отличие от бриолитохимических проб отобрать материал для литохимических проб удалось не в каждой точке как традиционным способом, так и с моховой подушки.

На уч. Чайка отбор проб производился в 14 точках по двум ручьям, являющимся водотоками I порядка, которые впадают в руч. Чайка (водоток II порядка). Ручьи дренируют Au-Ag рудные тела, которые выходят по склонам на поверхность (рис. 3). Результаты анализа отобранных здесь литохимических и бриолитохимических проб показаны в табл. 1. Как видно, уровни концентраций Au в бриолитохимических пробах достигают 0.802 г/т, что значительно превышает содержания этого элемента в литохимическом материале, отобранном с моховой подушки (0.205 г/т и менее), и еще в большей степени — содержания Au в литохимических пробах, отобранных традиционным способом (0.085 г/т и менее). Для Ag характерны те же особенности в распределении. Максимальные концентрации (до 100 г/т) установлены в бриолитохимических пробах. В литохимических они не превысили в основном 20 г/т. Сурьма, в связи с низким пределом обнаружения этого элемента спектральным приближенно-количественным анализом (30 г/т), не установлена ни в одной пробе. Максимальные концентрации As (40 г/т) обнаружены в литохимических пробах, отобранных традиционным способом. В пробах с моховой подушки содержания As составили < 10 г/т. В бриолитохимических пробах они не превысили 20 г/т. Концентрации Pb и Zn в бриолитохимических пробах в целом сопоставимы с теми, которые установлены в литохимических пробах, отобранных традиционным способом. Незначительные различия объясняются ошибкой анализа и природными особенностями в распределении этих элементов. Максимальные значения для Pb (5000 г/т) установлены в литохимических пробах, а для Zn (2000 г/т) — в

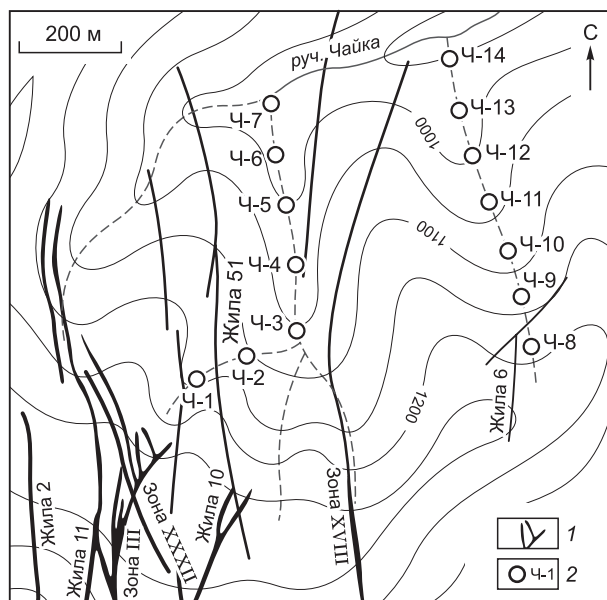


Рис. 3. Схема бриолитохимического и литохимического опробования водотоков I порядка. Au-Ag месторождение Дукат (уч. Чайка).

1 — рудные тела, 2 — точки отбора проб и их номера.

Таблица 1. Содержание (г/т) Au, Ag, As, Pb и Zn в бриолитохимических и литохимических пробах, отобранных по водотокам I порядка, Au-Ag месторождение Дукат (уч. Чайка)

Номер пробы	Au			Ag			As			Pb			Zn		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ч-1	0.152	0.015	0.012	10	1	8	10	<10	40	1000	50	1000	2000	300	1000
Ч-2	0.420	—	—	30	—	—	10	—	—	1000	—	—	1000	—	—
Ч-3	0.125	0.025	<0.002	10	1	10	10	<10	<10	1000	150	2000	500	200	1000
Ч-4	0.105	—	0.065	5	—	15	10	—	30	3000	—	4000	500	—	300
Ч-5	0.200	—	—	2	—	—	<10	—	—	2000	—	—	300	—	—
Ч-6	0.106	0.205	—	5	<1	—	10	<10	—	2000	100	—	500	100	—
Ч-7	0.802	0.202	0.085	20	2	20	10	<10	40	2000	1000	5000	1000	300	800
Ч-8	0.105	0.065	0.033	30	2	10	10	<10	10	1000	50	500	500	300	300
Ч-9	0.105	0.072	—	30	2	—	20	<10	—	1000	50	—	500	150	—
Ч-10	0.402	—	0.015	6	—	8	<10	—	30	1000	—	500	500	—	400
Ч-11	0.060	0.010	0.032	100	50	10	10	<10	30	1000	1000	500	300	300	300
Ч-12	0.205	0.085	—	7	<1	—	20	<10	—	1500	20	—	400	40	—
Ч-13	0.202	0.072	—	20	2	—	20	<10	—	1500	100	—	500	300	—
Ч-14	0.250	0.105	0.045	100	5	10	10	<10	30	500	50	1500	500	150	300

Примечание. Au анализировалось атомно-абсорбционным методом (аналитики А.А. Хлебникова, Л.Д. Андрулайтис), остальные элементы – спектральным приближенно-количественным атомно-эмиссионным методом (аналитик В.С. Кишечникова). Содержание Sb во всех пробах ниже предела обнаружения (<30 г/т). Здесь и далее в табл. 2, 3: 1 — бриолитохимические пробы, 2 — литохимические пробы с моховой подушки, 3 — литохимические пробы, отобранные традиционным способом; прочерк – проба не отбиралась (отсутствовал материал).

бриолитохимических. Низкими концентрациями этих элементов выделяются только пробы, отобранные с моховой подушки.

На уч. Пиритовый отбор проб производился в 19 точках по одноименному ручью, который является водотоком I порядка и дренирует Au-Ag рудные тела, выходящие в правом борту долины (рис. 4). Результаты анализа отобранных здесь литохимических и бриолитохимических проб приводятся в табл. 2. Аномальные концентрации Au, Ag, Pb и Zn установлены во всех видах проб. Но по сравнению с уч. Чайка такие главные элементы Au-Ag минерализации, как Au и Ag, проявлены значительно хуже, а Pb и Zn, наоборот, лучше. Это объясняется большим уровнем эрозионного среза зон на уч. Пиритовый, в результате чего вскрываются нижнерудные интервалы, где появляется серебро-полиметаллическая минерализация, которая, так же как на Дукатском месторождении, приходит на смену Au-Ag. В целом в распределении всех изученных элементов, и в бриолитохимических, и в литохимических пробах, установлен ряд закономерностей. Уровни концентраций Au в бриолитохимических пробах достигают 0.050 г/т, что за редким исключением превышает таковые в литохимическом материале, отобранном с моховой подушки (0.028 г/т и менее), и еще в большей степени — в рядовых литохимических пробах, отобранных традиционным способом (0.019 г/т и менее). При этом для последних максимальные концентрации фиксируются в нижнем течении руч. Пиритовый. Для бриолитохимических проб, а также литохимических, отобранных с моховой подушки, характерна приуроченность максимумов к верхней части ручья, непосредственно под рудными телами. Такие различия в распределении наибольших содержаний Au вдоль водотока обусловлены, по-видимому, тем, что моховые подушки как своеобразный механический фильтр улавливают мелкую фракцию аллювия, содержащую больше всего частиц Au непосредственно в головной части потока. В литохимическом же потоке мелкая фракция аллювия на таких участках водотоков выносятся. Он начинает формироваться только в нижней части ручья, что отражено большими концентрациями Au именно в литохимических пробах, отобранных традиционным способом.

Наиболее высокие концентрации Ag также характерны для бриолитохимических проб (до 50.9 г/т), что значительно превышает содержание, установленное в литохимических пробах, отобранных с моховых подушек (до 10 г/т и выше), и на порядок превышает содержания в литохимических пробах, взятых традиционным способом (не более 4.8 г/т). В распределении Ag вдоль каждого ручья закономерности устанавливаются только по бриолитохимическим и литохимическим пробам с моховых подушек. Максимальные концентрации Ag отчетливо тяготеют к вершине ручья — непосредственно в области влияния рудных тел. При этом в головной части потока фиксируются максимальные содержания, которые затем постепенно снижаются.

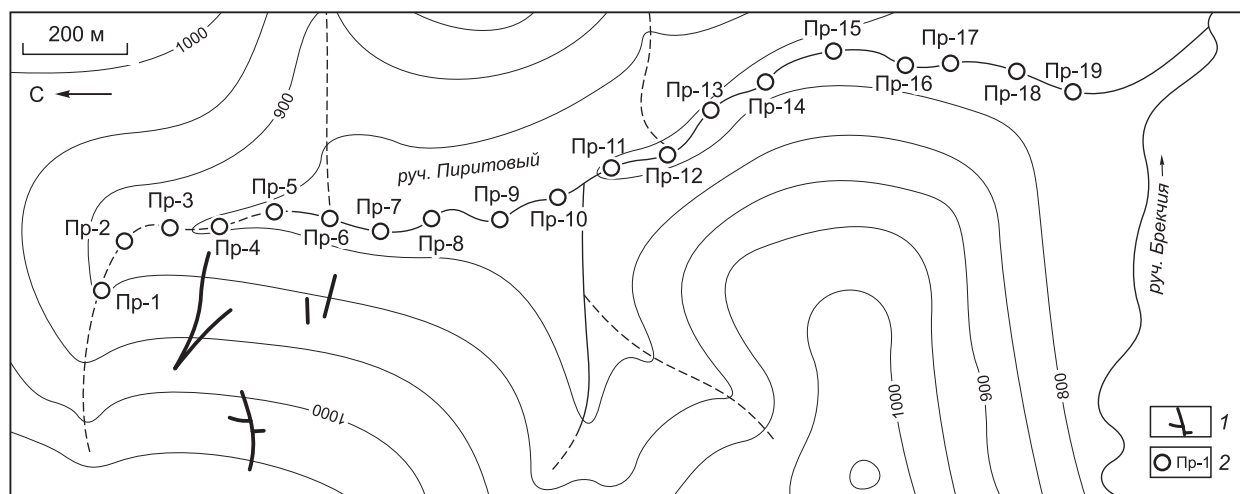


Рис. 4. Схема бриолитохимического и литохимического опробования водотока I порядка (руч. Пиритовый), Au-Ag рудопроявление (уч. Пиритовый).

1 — рудные тела, *2* — точки отбора проб и их номера.

Содержания Hg, изучавшейся только на уч. Пиритовый, имеют крайне низкие значения во всех пробах. Наибольшими концентрациями характеризуются неозоленные бриолитохимические (до 0.198 г/т) и литохимические (до 0.255 г/т) пробы, отобранные с моховых подушек, чего нельзя сказать о литохимических пробах, взятых традиционным способом (до 0.068 г/т). Если сравнивать первые два вида проб, то содержания Hg в бриолитохимических пробах все же являются в среднем более высокими.

Таблица 2. Содержание (г/т) Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn в бриолитохимических и литохимических пробах, отобранных по водотоку I порядка (руч. Пиритовый), Au-Ag рудопроявление (уч. Пиритовый)

Номер пробы	Au			Ag			Hg			Sb			As			Pb			Zn		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Пр-1	0.039	0.019	—	37.1	>10	—	0.014 (0.132)*	0.075	—	16	10	—	8	24	—	2800	430	—	2260	1400	—
Пр-2	0.017	0.011	—	50.9	>10	—	0.006 (0.132)	0.113	—	17	13	—	7	22	—	3010	410	—	2390	1400	—
Пр-3	0.009	0.012	—	37.6	>10	—	0.009 (0.198)	0.255	—	14	7	—	13	8	—	2230	410	—	2480	1200	—
Пр-4	0.050	0.028	0.002	18.2	2.7	4.8	0.014 (0.076)	0.122	0.062	4	1	4	6	10	23	2630	100	370	1000	230	890
Пр-5	0.033	—	0.002	26.6	—	0.9	0.014 (0.079)	—	0.015	4	—	2	8	—	26	4350	—	280	1060	—	410
Пр-6	0.039	0.092	0.003	16.9	2.8	3.0	0.011 (0.072)	0.050	0.058	6	2	2	13	11	21	4890	280	440	4400	990	930
Пр-7	0.046	0.023	0.003	25.2	7.9	0.9	0.007 (0.084)	0.101	0.019	8	3	2	13	15	24	4640	530	170	4600	1600	320
Пр-8	0.024	0.007	0.002	33.2	5.0	0.7	0.008 (0.102)	0.037	0.015	5	2	2	12	18	22	6200	480	170	1860	1200	320
Пр-9	0.048	0.005	0.001	21.3	1.5	0.7	0.009 (0.075)	0.026	0.015	6	2	2	14	21	21	5970	330	170	6240	820	340
Пр-10	0.025	0.005	0.003	21.2	1.7	0.7	0.008 (0.098)	0.042	0.013	7	2	3	14	20	18	4670	370	180	4830	850	420
Пр-11	0.024	0.006	0.001	15.0	1.2	1.0	0.005 (0.071)	0.025	0.020	6	2	2	10	21	26	5830	450	520	8520	650	560
Пр-12	0.027	0.004	0.004	16.4	1.7	1.4	0.006 (0.081)	0.033	0.022	7	2	2	32	28	33	4500	520	440	2420	860	540
Пр-13	0.012	0.004	0.004	13.2	3.0	2.1	0.006 (0.118)	0.058	0.037	5	2	2	33	27	33	4300	580	500	1740	1000	770
Пр-14	0.011	0.004	0.003	14.1	1.7	1.9	0.004 (0.084)	0.033	0.033	6	2	2	33	32	35	5200	480	480	2840	900	720
Пр-15	0.018	0.005	0.003	11.0	2.0	2.0	0.005 (0.138)	0.024	0.031	4	2	2	24	31	38	3000	490	450	1000	970	630
Пр-16	0.005	0.003	0.004	32.4	3.3	2.6	0.010 (0.126)	0.095	0.056	8	2	2	26	28	37	5800	560	500	3620	940	790
Пр-17	0.019	0.006	0.016	16.7	2.0	2.4	0.007 (0.084)	0.042	0.054	6	2	3	15	30	36	2540	390	490	1270	700	940
Пр-18	0.025	0.004	0.019	30.7	3.7	3.4	0.006 (0.140)	0.176	0.068	4	1	2	34	5	26	3000	270	460	3200	420	1000
Пр-19	0.018	0.010	0.007	22.8	4.0	2.5	0.009 (0.108)	0.102	0.049	4	2	2	32	17	43	4200	360	450	1500	490	680

Примечание. Au и Hg анализировались атомно-абсорбционным методом (аналитики: Au — П.Т. Долгих; Hg — Л.Д. Андрулайтис), остальные элементы — спектральным количественным атомно-эмиссионным методом (аналитики И.Е. Васильева, Е.В. Шабанова).

* Перед скобками указано содержание Hg в озолненной бриолитохимической пробе, в скобках — в неозолненной пробе.

Таблица 3. Распределение частиц Au и Ag по диаметрам в бриолитохимических и литохимических пробах, отобранных по водотоку I порядка (руч. Пиритовый), Au-Ag рудопроявление (уч. Пиритовый)

Диаметр частиц, мкм	Общее число частиц					
	Au			Ag		
	1	2	3	1	2	3
3—5 (3—7)*	15	0	1	>>>	932	1612
5—9 (7—11)	11	0	2	>>>	829	1305
9—12 (11—15)	3	0	1	>>>	352	193
12—15 (15—18)	6	1	0	>>>	159	90
15—25 (18—25)	6	1	0	>>>	28	28
Всего	41	2	4	>>>	2300	3228
Количество проб	19	18	16	19	18	16

Примечание. Результаты сцинтилляционного эмиссионного приближенно-количественного метода (аналитик С.И. Прокопчук). >>> – число фиксируемых частиц зашкаливает.

* Перед скобками указаны диаметры частиц для Au, в скобках – для Ag.

ми. Зависимость максимальных содержаний Hg от наличия рудной минерализации установлена только в бриолитохимических и литохимических пробах с моховых подушек. Максимумы ее концентраций, хотя и слабо, но все-таки тяготеют к верховьям ручья, где в правом борту выходят рудные тела.

Следует подчеркнуть, что определение содержаний Hg было проведено в неозоленном бриолитохимическом материале, так как при озолении бриолитохимической пробы, как было установлено нами, большая часть Hg испаряется. Содержания элемента в истертом неозоленном материале более чем на порядок выше, чем в озоленном (см. табл. 2), что говорит о перспективности использования неозоленных бриолитохимических проб для выявления аномалий этого элемента.

Максимальные концентрации Sb на уч. Пиритовый (до 16 г/т) были установлены в бриолитохимических пробах. В литохимических пробах, отобранных с моховых подушек, а также традиционным способом, они оказались более низкими и не превысили 13 и 4 г/т соответственно. Установлено, что эти концентрации тяготеют к вершине водотока, где идет наиболее интенсивное дренирование рудных зон.

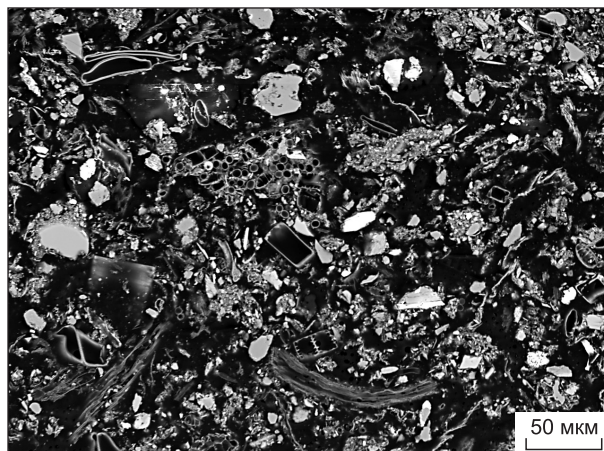
Максимальные концентрации As (43 г/т) установлены в литохимических пробах, отобранных традиционным способом. Они тяготеют к нижней части ЛПР и в значительной степени связаны не с Au-Ag минерализацией, а с зонами площадной сульфидизации, где сульфиды представлены арсенопиритом [Кравцова и др., 2016].

Pb и Zn на этом рудопоявлении, в отличие от уч. Чайка, весьма интенсивно накапливаются только в БЛПР. Концентрации Pb достигают 6200 г/т, Zn — 8520 г/т и почти на порядок превышают те, которые установлены в литохимических пробах. В пробах, отобранных традиционным способом, концентрации этих элементов еще ниже (см. табл. 2). При этом наиболее отчетливые закономерности в распределении максимумов наблюдаются преимущественно в бриолитохимических пробах. И для Pb, и для Zn они тяготеют в основном к верхней части водотока, т. е. к области влияния рудных тел.

С целью приближенной оценки гранулометрического состава частиц Au и Ag применялся сцинтилляционный эмиссионный приближенно-количественный анализ [Прокопчук, 1994]. Этим методом было установлено, что в бриолитохимических пробах, отобранных по руч. Пиритовый, фиксируется значительно большее число частиц Au и Ag (табл. 3). Так, если в 19 бриолитохимических пробах общее число обнаруженных частиц Au составило 41, то в 18 литохимических пробах, отобранных с моховой подушки, и 16 пробах, отобранных традиционным способом, — не более 2 и 4 соответственно. То же самое касается частиц Ag. В бриолитохимических пробах число частиц этого элемента зашкаливает, в то время как в литохимических пробах не превышает 3228.

Рис. 5. Литочастицы, частицы озолённых мхов и их спекшиеся агрегаты в бриолитохимической пробе.

Изображение дано в обратнорассеянных электронах.



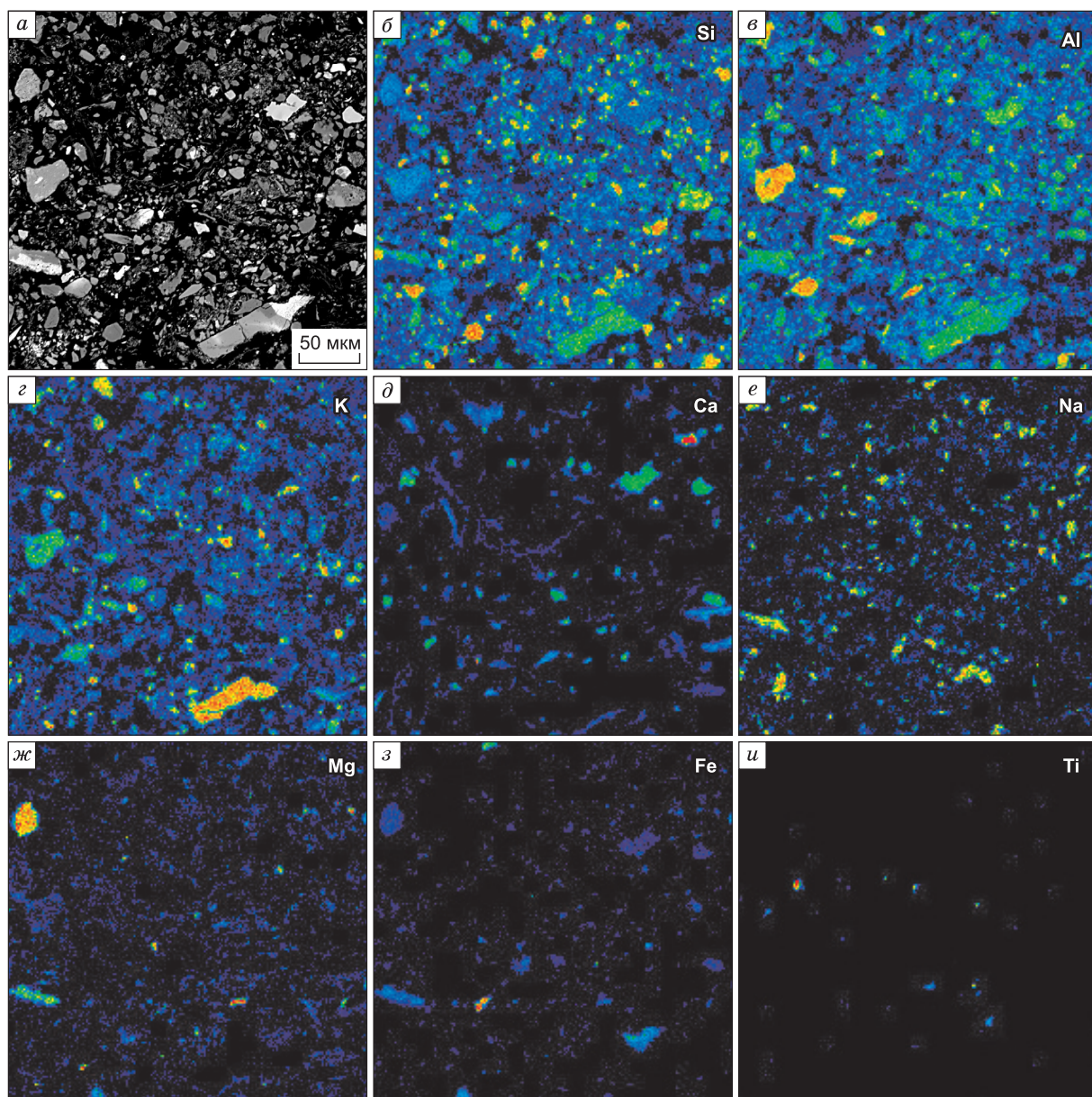


Рис. 6. Литочастицы, частицы озоленных мхов и их спекшиеся агрегаты в бриолитохимической пробе.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б–и* — в рентгеновских лучах.

Закономерности в распределении частиц золота выявлены только в бриолитохимических пробах. Максимальное их число (63 % от общего количества установленных) приходится на частицы размером 3—9 мкм, а минимальное — на 9—25 мкм. Наблюдается отчетливое преобладание тонкодисперсных частиц над мелкими. Те же закономерности были установлены на Au-Ag месторождении Дукат при изучении форм нахождения (ФН) этого элемента в рудах, первичных ореолах и ЛПР [Кравцова и др., 2010б, 2016].

Установить закономерности в распределении частиц серебра в связи с их очень большим количеством в бриолитохимических пробах не предоставляется возможным. В литохимических же пробах максимальное их число (77 и 90 % от общего количества частиц серебра, установленных в литохимических пробах, отобранных с мховой подушки и традиционным способом соответственно) приходится на частицы размером 3—11 мкм, а минимальное — на 11—25 мкм.

Для более детального изучения бриолитохимических проб, состава и размера литочастиц и их агрегатов, а также ФН рудных элементов в них был использован рентгеноспектральный микроанализ-

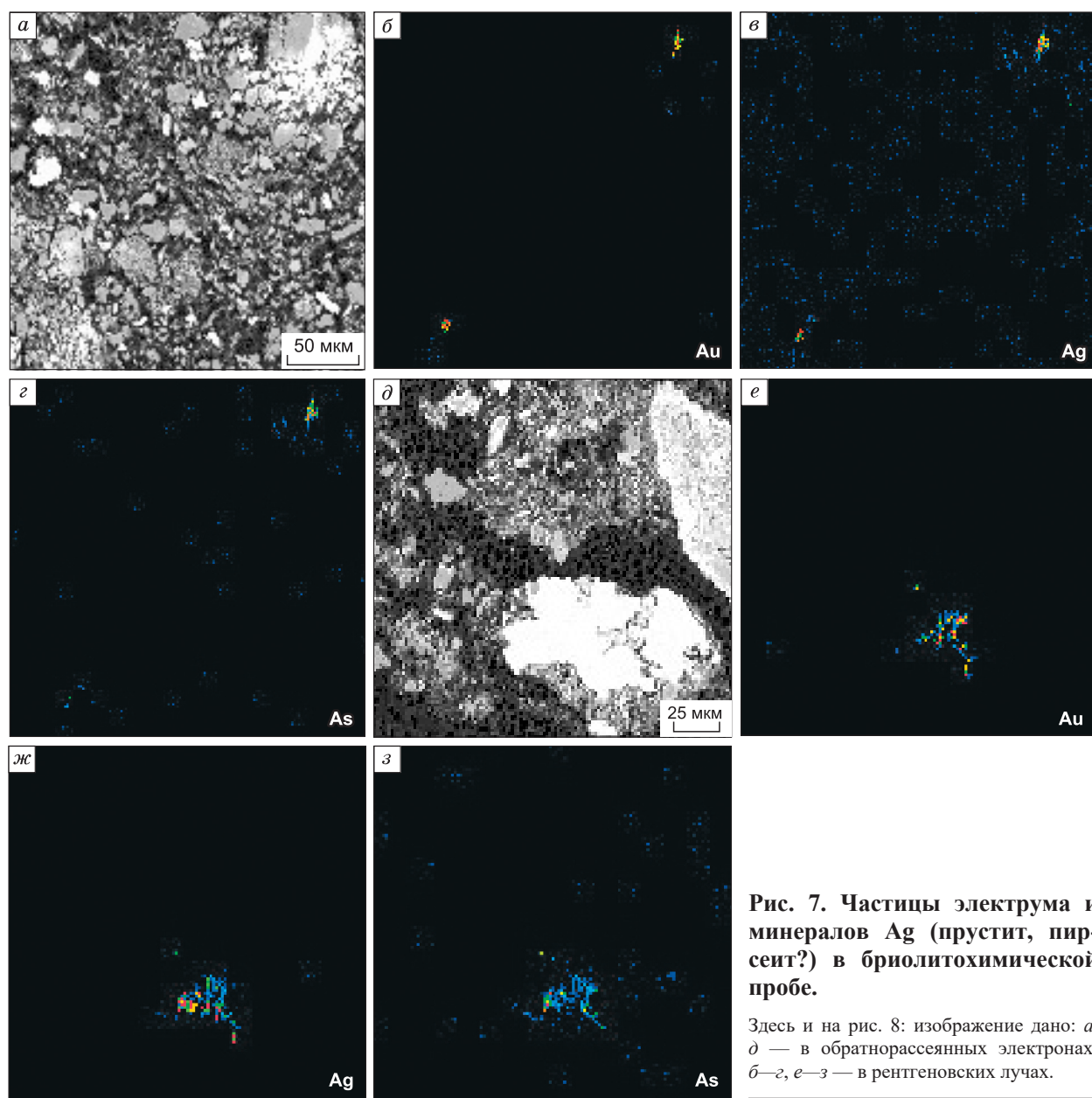


Рис. 7. Частицы электрума и минералов Ag (прусит, пирсент?) в бриолитохимической пробе.

Здесь и на рис. 8: изображение дано: а, д — в обратнорассеянных электронах; б—г, е—з — в рентгеновских лучах.

тор JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония) [Павлова, Кравцова, 2006]. С этой целью с учетом данных аналитики (атомно-абсорбционный, спектральный и сцинтилляционный методы) были отобраны бриолитохимические пробы с максимальным содержанием рудных элементов. Основное внимание было сосредоточено на изучении ФН Au, Ag, Sb, As, Pb и Zn в бриолитохимических пробах, проведено их сравнение с ФН в рудах. Поиск ФН Hg не осуществлялся в связи с ее крайне низкими концентрациями.

Необходимо подчеркнуть, что актуальность таких исследований определяется тем, что ФН элементов являются эффективным показателем рудно-формационной принадлежности выявленных не только эндогенных, но и экзогенных аномалий и, как следствие, дополнительным эффективным критерием оценки их промышленной значимости [Кравцова, 2010; Кравцова и др., 2010а,б, 2016].

Изучение полированной поверхности образцов в режиме обратнорассеянных электронов и в рентгеновских лучах показало, что большая часть изученных проб состоит из частиц озоленных мхов и литочастиц, а также их спекшихся агрегатов, имеющих сложную форму и разные размеры (рис. 5). Преобладают мелкая (10—20 мкм), тонкодисперсная (1—10 мкм), ультрадисперсная (0.1—1 мкм) и, по всей вероятности, коллоидно-дисперсная (< 0.1 мкм) их составляющие. Микрочастицы имеют крайне неоднородное распределение в структуре вещества.

В составе бриолитохимических проб было обнаружено большое количество обломков нерудных минералов (кварц, полевои шпат, карбонаты, лейкоксен), гидроксидов Fe и Mn. В рентгеновских лучах

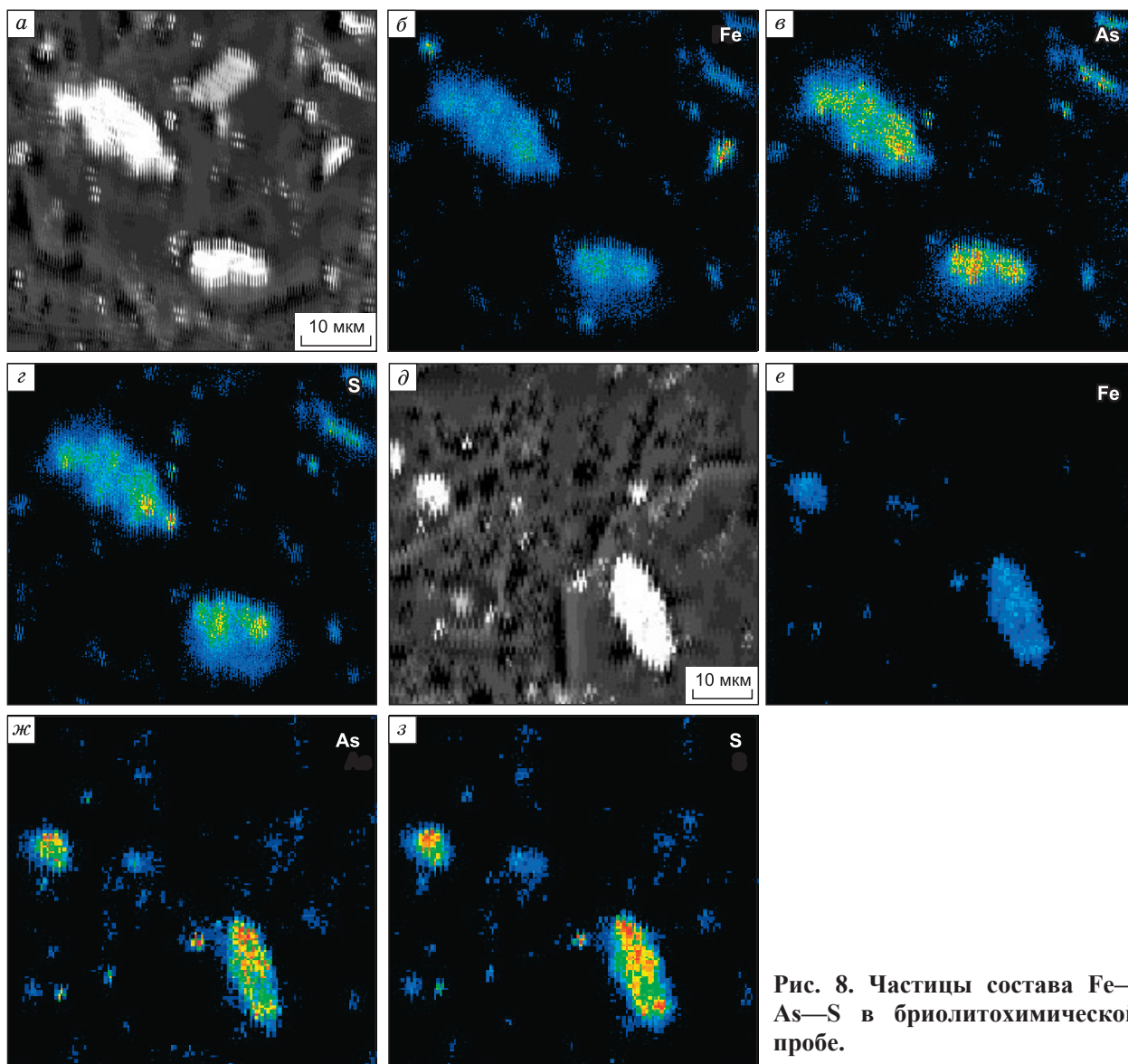


Рис. 8. Частицы состава Fe—As—S в бриолитохимической пробе.

обломки и частицы нерудных минералов имеют разный элементный состав, главными являются Si, Al, K, Ca, Na, Mg, Fe, Ti (O, C, Mn, P не определялись) (рис. 6), что вполне соответствует составу породообразующих и жильных минералов, из которых большей частью состоит бриолитохимическая проба. Эти же частицы являются наиболее крупными (до 100 мкм).

Рудные минералы представлены микрочастицами золота и серебра, реликтами сульфосолей серебра, сильноразрушенными мелкими зернами пирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Более или менее однородные частицы, состоящие из Au, Ag, As, Pb и Zn, обладают крайне малыми размерами. В большинстве случаев эти частицы образуют скопления в виде агрегатов, имеющих сложный и непостоянный химический состав. В связи с этим определений ни количественного, ни полуколичественного их химического состава провести не удалось. Частиц, достоверно содержащих Sb, не обнаружено.

Частицы, состоящие из Au и Ag, имеют в своем составе примесь As. Размер частиц чаще всего не превышает 1—2 мкм (рис. 7, а—г). Они имеют свойство соединяться в агрегаты, размер которых достигает 50 мкм (рис. 7, д—з). Внутри этих агрегатов частицы распределены крайне неравномерно. Представлены они, как и в рудах, по-видимому, электрумом.

Ag-содержащие частицы представлены, помимо электрума, вероятнее всего, сильно разрушенными собственными минералами (прустит, пирсеит?), в состав которых входит As (см. рис. 7). Ag-содержащие частицы, так же как и электрум, имеют свойство соединяться в агрегаты размером до 50 мкм.

Мышьяк образует еще агрегаты состава Fe—As—S (рис. 8) размером до 20 мкм. По всей вероятности, такие образования являются производными от разрушенных зерен арсенопирита и, частично,

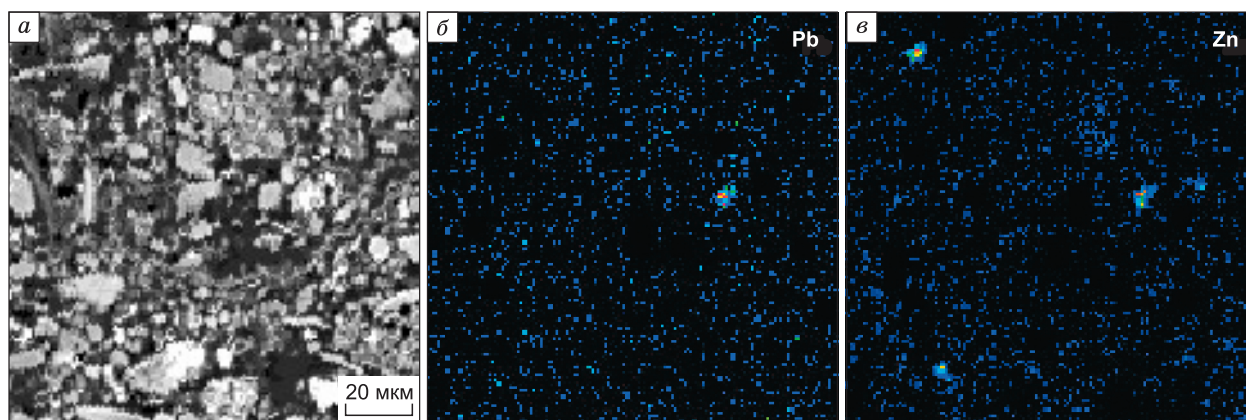


Рис. 9. Частицы, состоящие из Pb и Zn, в бриолитохимической пробе.

Здесь и на рис. 10: изображение дано: *а* — в обратнорассеянных электронах; *б, в* — в рентгеновских лучах.

питтитита, продукта разрушения арсенопирита, который во вторичных средах образует труднорастворимые формы.

Свинец и цинк встречаются в бриолитохимических пробах в виде агрегатов, размер которых достигает 10 мкм (рис. 9). Такие агрегаты представлены полностью преобразованными в гипергенных условиях зернами галенита и сфалерита, которые перешли в церуссит и смитсонит соответственно. Это объясняется отсутствием в их составе S. Значительно реже встречаются сохранившиеся зерна галенита (рис. 10), их размер не превышает 10 мкм.

Таким образом, основной рудноэлементный состав (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и первые данные по ФН Au, Ag, As, Pb и Zn в БЛПР Au-Ag зон Дукатского рудного поля (участки Чайка, Пиритовый) в значительной степени отражают особенности вещественного состава первичных руд: те же основные элементы-индикаторы (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и близкий минеральный состав (тонкодисперсное золото и серебро, электрум, сульфосоли серебра, реликты простых сульфидов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории рудных районов Северо-Востока России в областях горного рельефа, подверженных перигляциальным процессам, где в верховьях ручьев мелкая фракция аллювия, необходимая для отбора литохимических проб, почти повсеместно отсутствует, положительный результат при проведении съемок по ЛПР дает бриолитохимическое опробование. Сделан вывод о том, что БЛПР являются составной частью ЛПР и наравне с ними могут эффективно использоваться для выявления геохимических аномалий и оценки их рудно-формационной принадлежности.

При изучении потоков рассеяния (ЛПР и БЛПР) наиболее высокие содержания основных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения (Au, Ag, Hg, Sb, Pb и Zn) были установлены в бриолитохимических

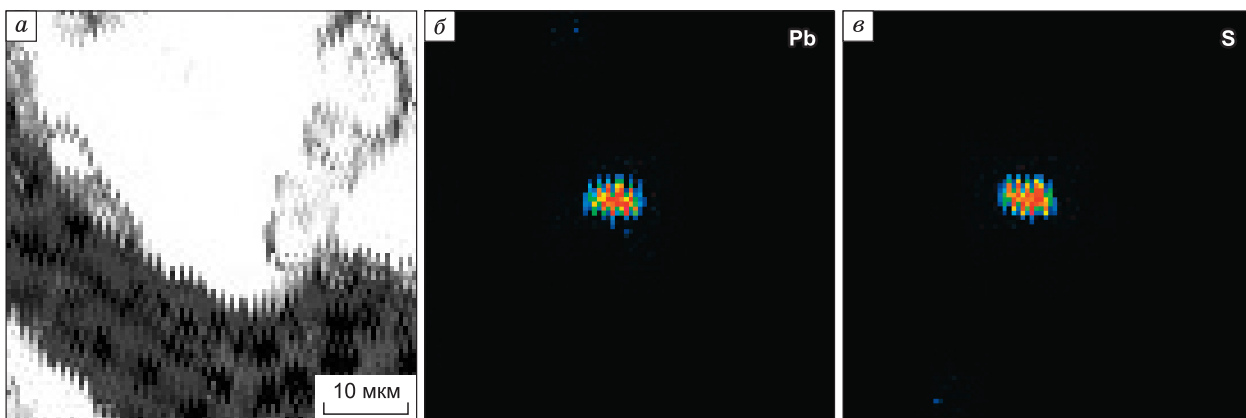


Рис. 10. Частица галенита в бриолитохимической пробе.

пробах. Показано, что они значительно выше, чем в литохимических. Максимальные концентрации Au, Ag, Hg, Sb, Pb и Zn установлены в верховьях водотоков, где они непосредственно дренируют рудные тела. При удалении от рудных тел содержания закономерно снижаются. Исключение составляет As. Для него установлена обратная закономерность. Максимумы концентраций As тяготеют к нижним частям потоков рассеяния и тесно связаны с зонами рассеянной сульфидной минерализации (площадной арсенизации). Важным практическим следствием является вывод о том, что значительная часть аномалий As, выявленная на территории Дукатского рудного поля, не только с Au-Ag, но и вообще с промышленной рудной минерализацией не связана.

По данным сцинтилляционного анализа установлено, что максимальное число литочастиц Au и Ag фиксируется в бриолитохимических пробах. Так же как в рудах, преобладают тонкодисперсные частицы размером менее 10 мкм. При изучении вещественного состава бриолитохимических проб с помощью рудного микроскопа и РСМА был установлен основной рудноэлементный состав (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и получены первые данные по ФН Au, Ag, As, Pb и Zn в БЛПР. Показано, что они в значительной степени отражают особенности вещественного состава первичных руд: те же основные элементы-индикаторы (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb и Zn) и близкий минеральный состав (тонкодисперсные золото и серебро, электрум, сульфосоли серебра, реликты простых сульфидов).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что моховые подушки являются эффективной природной ловушкой, позволяющей извлекать из водной взвеси современных водотоков, даже временных, тонкодисперсные, ультрадисперсные и коллоидно-дисперсные частицы. Подтверждается ранее сделанный вывод о том, что в условиях криолитозоны, где процессы физического выветривания считаются главными, немаловажная роль принадлежит химическим факторам [Кравцова и др., 2010 а,б].

Все вышесказанное говорит о том, что бриолитохимические исследования имеют широкие перспективы использования не только на территории Северо-Востока России. Они могут эффективно применяться и в других районах, имеющих сходные ландшафтные условия, в первую очередь, на тех площадях, где формирование ЛПР и БЛПР происходит в условиях северных субарктических и арктических обстановок. Следует особо подчеркнуть, что другого альтернативного способа опробования верховьев водотоков, где, как правило, отсутствуют рыхлые аллювиальные отложения, на сегодняшний день не существует, что является главным приоритетом предлагаемых нами бриолитохимических исследований.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проектам IX.130.3.1. (0350-2016-0032) (45 %) и IX.125.3.4. (0350-2016-0025) (30 %), при поддержке РФФИ (гранты 14-05-00361а, 17-05-0095а) (25 %) с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М., Логос, 2000, 354 с.

Берман Ю.С., Прокофьев В.Ю., Козеренко С.В., Елисеева Н.А., Колпакова Н.Н. Реювенация золото-серебряного оруденения вулканогенного месторождения Дукат (по результатам исследования флюидных включений) // Геохимия, 1993, № 4, с. 539—548.

Брукс Р.Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых. М., Недра, 1986, 311 с.

Васильева И.Е., Шабанова Е.В. Прямое атомно-эмиссионное определение серебра и золота в геологических образцах // Заводская лаборатория, 2005, т. 71, № 10, с. 10—16.

Водоросли, лишайники и мохообразные СССР / Ред. М.В. Горленко. М., Мысль, 1978, 365 с.

Двуреченская С.С. Гипергенные минералы серебряных месторождений. М., ЦНИГРИ, 2001, 258 с.

Загоскин В.А. Высокоэффективные технологии геохимических поисков руд и россыпей в таежных и субарктических ландшафтах. Т. 1. М., Пробел, 2003, 544 с.

Загоскин В.А. Высокоэффективные технологии геохимических поисков руд и россыпей в таежных и субарктических ландшафтах. Т. 2. М., Пробел, 2006, 524 с.

Ковалевский А.Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений. М., Недра, 1984, 172 с.

Константинов М.М., Наталенко В.Е., Калинин А.И., Стружков С.Ф. Золото-серебряное месторождение Дукат. М., Недра, 1998, 203 с.

Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. Геология месторождений серебра. Якутск, ГУП НИИП «Сахаполиграфиздат», 2003, 282 с.

Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск, Изд-во «Гео», 2010, 292 с.

Кравцова Р.Г., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Прокофьев В.Ю. Условия формирования золото-серебряных месторождений Северного Приохотья, Россия // Геология рудных месторождений, 2003, т. 45, № 5, с. 452—473.

Кравцова Р.Г., Павлова Л.А., Рогозина Ю.И. Формы нахождения серебра в рыхлых отложениях потоков рассеяния Дукатского золото-серебряного месторождения (Северо-Восток России) // Геохимия, 2010а, № 7, с. 779—784.

Кравцова Р.Г., Павлова Л.А., Рогозина Ю.И., Макшаков А.С. Первые данные по формам нахождения золота в литохимических потоках рассеяния Дукатского золото-серебряного месторождения (Северо-Восток России) // ДАН, 2010б, т. 434, № 1, с. 96—106.

Кравцова Р.Г., Тарасова Ю.И., Макшаков А.С., Павлова Л.А. Особенности распределения и формы нахождения золота, серебра и сопутствующих элементов в потоках рассеяния золото-серебряных зон Дукатского месторождения (Северо-Восток России) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (4), с. 676—698.

Лапаев Г.П. Бриогеохимический метод поисков рудных месторождений // Особенности геохимических ореолов в зоне криогенеза. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1979, с. 44—46.

Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути РА-915 + с приставкой РП-91. ПНД Ф 16.1:2:23-2000. М., НПФ «Люмэкс», 2005, 13 с.

Наталенко В.Е., Калинин А.И., Раевская И.С., Толстухин Ю.В., Халхалов Ю.А., Бельков Е.В. Геологическое строение Дукатского месторождения // Материалы по геологии и полез. ископ. северо-востока СССР. Вып. 25. Магадан, Магадан. кн. изд-во, 1980, с. 61—73.

Павлова Л.А., Кравцова Р.Г. Определение форм нахождения серебра в литохимических потоках рассеяния методом РСМА (Дукатское золото-серебряное месторождение) // Методы и объекты химического анализа, 2006, т. 1, № 2, с. 132—141.

Прокопчук С.И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии. Иркутск, ИГХ СО РАН, 1994, 64 с.

Сидоров А.А., Константинов М.М., Еремин Р.А., Савва Н.Е., Сафронов Д.Н., Найбородин В.И., Гончаров В.И. Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений). М., Наука, 1989, 240 с.

Торгов В.Г., Хлебникова А.А. Атомно-абсорбционное определение золота в пламени и беспламенном графитовом анализаторе с предварительным выделением экстракцией сульфидами нефти // Журн. аналит. химии, 1977, т. 32, № 5, с. 960—964.

Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А. Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруденения северо-западной части Тихоокеанского обрамления. М., Наука, 1992, 257 с.

Эмиссионный спектральный анализ в геохимии / Ред. Я.Д. Райхбаум. Новосибирск, Наука, 1976, 280 с.

Erdman J.A., Modreski P.J. Copper and cobalt in aquatic mosses and stream sediments from the Idaho Cobalt Belt // J. Geochem. Explor., 1984, v. 20, № 1, p. 75—84.

Shacklette H.T. The use of aquatic bryophytes in prospecting // J. Geochem. Explor., 1984, v. 21, № 1—3, p. 89—93.

Smith S.C. Base metals and mercury in bryophytes and stream sediments from a geochemical reconnaissance survey of Chandalar Quadrangle, Alaska // J. Geochem. Explor., 1986, v. 25, № 3, p. 345—365.

*Рекомендована к печати 25 апреля 2018 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию 7 ноября 2016 г.,
после доработки — 17 апреля 2018 г.*