Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

О ФОРМИРОВАНИИ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ В НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОДАХ

В. П. Боровицкий

Как показывают геохимические исследования на площади распространения многолетней мерзлоты, даже для рудных тел, целиком находящихся в зоне мерзлых пород, на дневной поверхности выявляются жидкие или солевые ореолы рассеяния, по происхождению связанные с этими телами [2, 4, 11].

Центральная часть Джидинского рудного района на юге Забайкалья, где нами проведены гидрохимические исследования, сложена мощными кембрийскими осадочными образованиями. Месторождения и рудопроявления молибдена и вольфрама связаны с молодыми мезозойскими гранитными интрузиями, представленными гранит-порфирами, лейкократовыми розовыми и серыми гранитами и кварцевыми сиенитами. К этим интрузиям приурочен комплекс элементов (молибден, вольфрам, олово, бериллий, цинк, висмут и др.), почти всегда сопутствующий молибденово-вольфрамовой минерализации.

В районе развита островная многолетняя мерзлота. Подземные воды представлены водами болот, делювиально-аллювиальных отложений, зон выветривания коренных пород и зон тектонических разломов. Состав их преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый, с минерализацией не более 0,5 *г/л*. Величина pH обычно 6—7, и только на участках развития карбонатных пород достигает 8,2. Для опробования отбирали в основном надмерзлотные воды, микрокомпоненты из которых соосаждались с сульфидом кадмия [2]. При интерпретации результатов опробования главное внимание обращали на содержание в водах молибдена — прямого поискового признака на молибденовые рудопроявления.

Аномально повышенные содержания молибдена в надмерзлотных водах отмечены только вблизи рудного тела — не более чем в 200—300 *м*. Вдали от рудопроявления надмерзлотные воды вообще не содержат молибдена или его концентрация не превышает фоновых содержаний. Более протяженны жидкие потоки рассеяния. По мелким рекам, например, прослеживалось повышенное содержание молибдена на расстоянии более 1 *км*.

Подмерзлотные воды, питающие поверхностные водотоки, более четко выделяют перспективные участки. Опробование надмерзлотных вод в условиях развития островной мерзлоты имеет гораздо меньшее значение, так как этими водами образуются небольшие ореолы рассеяния с относительно невысоким содержанием молибдена и других металлов. Опробование этих вод рекомендуется при детализации выявленных по поверхностным водотокам ореолов. Здесь можно широко использовать искусственное вскрытие надмерзлотных вод мелкими закопушками. Таким образом,

островная многолетняя мерзлота не препятствует применению гидрохимических методов поисков рудных месторождений [2, 10, 11].

В 1959 г. на одном из месторождений молибдена, расположенном в северной части Витимского плоскогорья, выяснялась возможность применения метода в условиях сплошного и мощного (более 250 *м*) развития мерзлой зоны. Молибденовые месторождения штокверко-прожилкового типа и ряд участков с вольфрамовой минерализацией приурочены к экзоконтактовой зоне молодых мелкозернистых лейкократовых гранитов, прорывающих древние палеозойские граниты. Зона окисления, по данным наблюдений в горных выработках и скважинах, не превышает 40—50 *м*. Средняя мощность рыхлых четвертичных образований 1,5—2 *м*. Мощ-

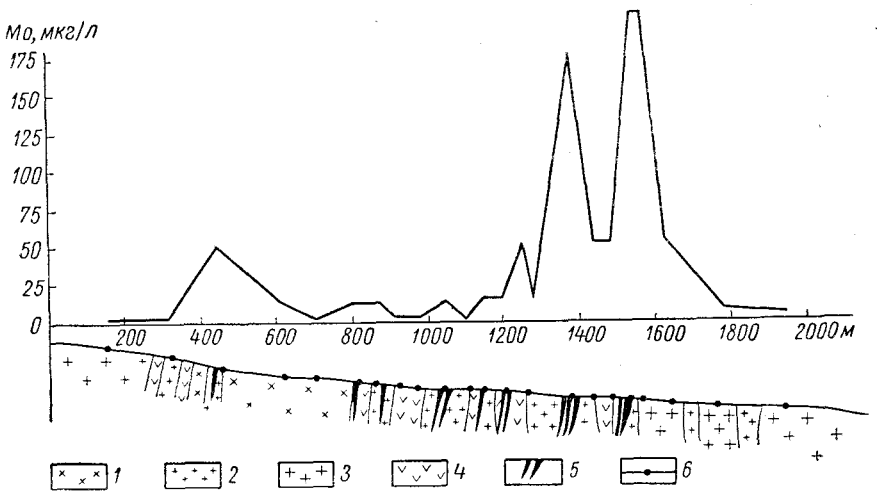


Рис. 1. Гидрохимический профиль содержания молибдена, по данным опробования надмерзлотных вод над рудными телами, находящимися в зоне сплошного развития мерзлых пород

1 — среднезернистые порфировидные граниты; *2* — мелкозернистые лейкократовые пегматоидные граниты; *3* — среднезернистые биотитовые граниты; *4* — биотит-роговообманковые диориты; *5* — рудные жилы и прожилки молибдена; *6* — точки отбора водных проб

ность деятельного слоя изменяется в зависимости от экспозиции и заболоченности склонов от 0,3 до 1,5 *м*. Опробовались в основном надмерзлотные воды, так как подмерзлотные вскрывались только скважинами на глубине 150—300 *м*. Установлены фоновые концентрации молибдена 2 *мкг/л*, повышенные — от 2 до 25 *мкг/л* и аномальные — свыше 25 *мкг/л*.

На профиле (рис. 1), построенном по данным опробования надмерзлотных вод, довольно четко отражены участки с повышенной молибденовой минерализацией зон оруденения. По отдельным точкам концентрация молибдена достигала 300—400 *мкг/л*. Режимные наблюдения за надмерзлотными водами позволили проследить закономерность изменения содержания молибдена от количества выпадающих осадков. После интенсивных дождей надмерзлотные воды весьма ощутимо разубоживаются. В некоторых источниках, например, обычное содержание молибдена свыше 100 *мкг/л* после дождей снижалось от следов до 5—7 *мкг/л*. Следовательно, атмосферные воды могут за короткое время почти целиком промыть относительно небольшой по мощности деятельный слой от продуктов окисления сульфидных минералов. Однако концентрация молибдена всегда восстанавливается непосредственно над рудным телом или вблизи его за счет глубинных источников. В результате этого рудные тела или месторождения могут оконтуриваться по водным ореолам рассеяния.

Зависимость содержания микроэлементов от выпадающих осадков в мелких поверхностных водотоках меньше, чем в надмерзлотных водах. В этом определенную роль играют широко развитые в описываемом районе болотные образования. Мхи и торфы в сухой период года накапливают микроэлементы из надмерзлотных вод, а при выпадении атмосферных осадков отдают их в воды мелких поверхностных водотоков [21].

Результаты спектрального анализа торфов показывают более высокое содержание в них микроэлементов по сравнению с пробами надмерзлотных вод, отобранных одновременно на одних и тех же участках. Поэтому торфометрическая съемка рекомендуется на заболоченных участках, где

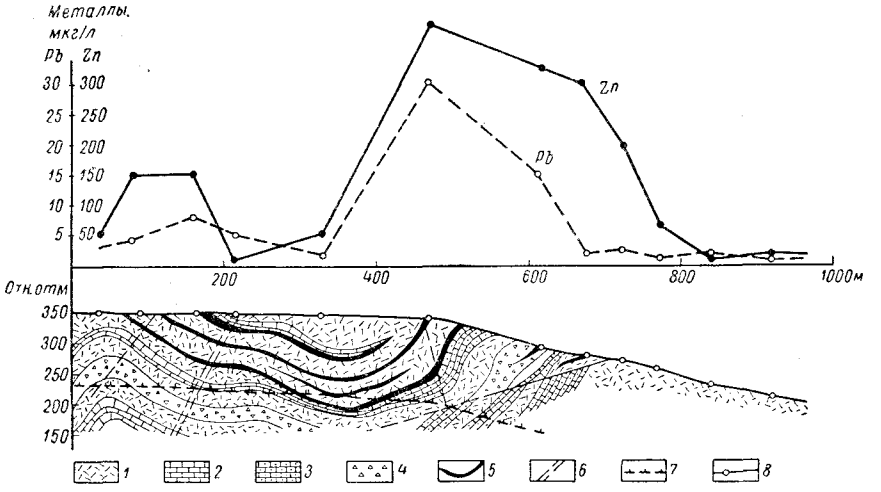


Рис. 2. Гидрохимический профиль одного из месторождений Северного Забайкалья по результатам опробования надмерзлотных вод

1 — кислые эффузивы и их туфы; *2* — известняки; *3* — известковистые туффиты; *4* — туфобрекчии; *5* — рудные тела; *6* — зоны тектонических нарушений; *7* — нижняя граница многолетней мерзлоты; *8* — точки отбора водных проб

металлометрическое опробование фактически невозможно проводить из-за близкого залегания верхней границы многолетнемерзлых пород.

О возможности выявить гидрохимические ореолы рассеяния по надмерзлотным водам в условиях сплошного развития многолетнемерзлых пород достаточно большой мощности (150—200 *м*) свидетельствуют также исследования в пределах Витимского плоскогорья. Гидрохимическое опробование надмерзлотных вод в этом районе показало определенную связь гидрохимических аномалий с рудопроявлениями и месторождениями (рис. 2).

Интересные данные получены гидрохимическими исследованиями на участке одного из рудопроявлений золота в районе Баргузинской тайги. При концентрировании микроколичеств золота в водных пробах соосаждением с каломелью удалось обнаружить водные ореолы рассеяния этого элемента в надмерзлотных водах. При чувствительности метода до 0,001 *мкг/л* золото фиксировалось даже в 250 *м* от рудного тела. Концентрация его (0,01 *мкг/л*) указывает на связь с золоторудной минерализацией. На этом рудопроявлении золото связано с кварцсульфидными жилами и прожилками в отложениях верхнего протерозоя и нижнего кембрия. Пространственно оно приурочено к зоне даек кислого состава и концентрируется вблизи узлов пересечения разнонаправленных тектонических нарушений. Содержание золота в наиболее мощной жиле составляет

более 20 *г/т*. Глубина сезонного оттаивания на участке рудопроявления не превышает 0,7—1,5 *м* при мощности многолетней мерзлоты около 150 *м*.

Приведенный фактический материал свидетельствует об успешном применении гидрохимического метода поисков в районах развития сплошной многолетней мерзлоты. Вполне естественно возникает вопрос о путях и условиях миграции микроэлементов через мерзлые породы. Вопрос о возможности такой миграции элементов впервые поднят в 1960 г. на совещании по гидрохимическому методу поисков рудных месторождений в г. Томске [4].

В мерзлой зоне активно протекают многие химические и физические процессы, под действием которых рудные тела способны окисляться, а продукты окисления выноситься к деятельному слою, формируя в нем геохимические ореолы рассеяния.

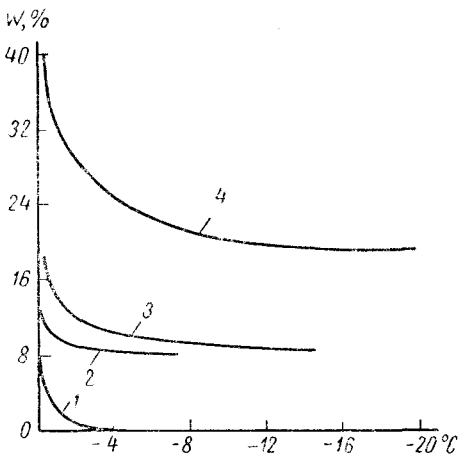


Рис. 3. Зависимость содержания воды W от температуры в различных мерзлых породах

1 — песок; *2* — супесь; *3* — суглинок; *4* — глина

В условиях отрицательных температур влага в мерзлых породах находится в трех фазовых состояниях — твердом, жидком и газообразном. В твердом состоянии вода содержится в порах и пустотах породы в виде многочисленных ледяных включений и может находиться в таком состоянии при стабильном температурном режиме длительное время (сотни и тысячи лет). Но в зависимости от баланса тепловой энергии, поступающей с поверхности и из глубины Земли, объем и химический состав твердой фазы воды в горных породах непрерывно изменяется во времени. В жидкой фазе в виде тонких пленок, покрывающих стенки трещин и пор, вода находится в горных породах при довольно низких отрицательных температурах. В капиллярных трубках [9] диаметром 1,5 *мм* вода не замерзает при температуре до —6,4° С, а при диаметре капилляра 0,06 *мм* переходит в кристаллическое состояние при температуре ниже —18° С. Количество жидкой воды в порах мерзлой породы зависит от температуры, состава содержащихся в воде солей, минералогического и гранулометрического состава пород, степени дисперсности мелкозернистых частиц и т. д. При сезонных изменениях температуры количество пленочной воды меняется. Как видно из рис. 3, наибольшее количество воды содержится в глинах и минимальное — в песках. В условиях Забайкалья при средней температуре мерзлых пород не более —4° С в жидком состоянии в глинах содержится до 25% воды, в супесях — до 8% и в песках 1—2%. Процентное содержание ее в тонких волосных трещинах, пронизывающих коренные кристаллические породы, невелико.

В мерзлых грунтах в жидкой фазе вода сохраняется за счет присутствия на поверхности твердого тела ионов со свободной энергией, часть которой остается неизрасходованной. Под влиянием этой энергии разрушаются водородные связи молекулы воды, которые ориентируются и уплотняются в сфере влияния этого энергетического поля [9].

Наличие влаги в мерзлых породах обусловливает процессы окисления сульфидных руд. Хотя зоны окисления сформировались в основном до возникновения многолетней мерзлоты [11], развитие их продолжается

с образованием малоустойчивых в обычных условиях минералов. На месторождениях Яно-Адычанского района зона окисления, например, представлена ранней сульфатной стадией (мелантерит, фиброферрит и др.) и непосредственно следующей за ней стадией гидроокислов железа [8]. Карбонатная стадия развита слабо. Аналогичная зона окисления отмечена и для других месторождений Крайнего Севера. Мощность ее нередко достигает 150—200 *м* от поверхности земли. В окисленных зонах установлены молодые стадии гипергенного минералообразования [8, 11]. Достаточно наличия тонких пленок влаги в капиллярных трещинах, чтобы рудное тело начало окисляться. Этому способствует и повышенная растворимость углекислоты и кислорода в водных пленках при 0° С [5].

Таким образом, основная роль в физическом и химическом выветривании пород принадлежит адсорбированной воде. Вода в мерзлых породах непрерывно мигрирует, главным образом, под влиянием температурного градиента [1, 6, 9]. К. И. Дьяков изучал миграцию влаги в промерзающих грунтах с помощью радиоактивных элементов [6]. Исследования проводились в двух цилиндрах высотой 20 *см*, заполненных супесью одинаковой влажности и плотности. Оба цилиндра устанавливались в раствор соли радиоактивного цезия, после чего один помещался в холодильную камеру на 10 суток, а другой находился в течение всего опыта при 8° С. В результате в промораживаемом грунте радиоактивного цезия оказывалось в 2—2,5 раза больше, чем в непромораживаемом, что говорит о значительном количестве переместившейся воды и большой скорости ее перемещения.

Вместе с пленочной водой мигрируют и микрокомпоненты. Интересны опыты с миграцией соли радиоактивного железа [6]. Опытный цилиндр с супесью промораживался при —12° С в течение четырех суток. Содержание соли радиоактивного железа и влажности грунта по высоте определялось радиометром. Установлено, что железо мигрирует вместе с пленочной влагой. При этом в промораживаемом грунте отмечено движение как связанной, так и парообразной воды. В области распространения мерзлых пород за счет отрицательного среднегодового баланса тепла миграция влаги имеет направленный характер — от нижней границы многолетней мерзлоты к дневной поверхности.

В связи с этим в районах сплошного развития мерзлой зоны формируются довольно четкие ореолы рассеяния в пределах деятельного слоя при отсутствии подтока гравитационных вод из более глубоких горизонтов. Там, где в формировании жидких ореолов рассеяния принимают участие меж- и подмерзлотные воды, наиболее пестрые гидрохимический фон и аномалии.

Движение влаги и содержащихся в ней микроэлементов при отрицательной температуре происходит преимущественно за счет диффузионных, термоосмотических и, вероятно, электроосмотических процессов. Диффузионные процессы, как известно, объясняются стремлением молекул растворенного вещества занять наибольший объем, в связи с чем происходит миграция их из участков водного раствора с более высокой концентрацией в участки с меньшей концентрацией. При этом пористая среда может играть роль полупроницаемой завесы, затрудняющей движение молекул воды и ионов растворенного вещества.

Термоосмотическое движение происходит за счет перемещения пленочной воды из области высоких температур, обеспечивающих существование относительно толстых пленок, в область более низких температур, где толщина пленок уменьшается. В итоге влага и содержащиеся в ней элементы медленно движутся от нижней границы мерзлых пород к дневной поверхности, обеспечивая возможность формирования жидких и солевых ореолов рассеяния.

Электроосмотические процессы миграции наблюдаются, главным образом, на участках залегания окисляющихся рудных тел. Известны многочисленные факты существования устойчивых и достаточно мощных естественных электрических полей над рудными телами в мерзлой зоне, что объясняется разностью окислительно-восстановительного потенциала вод на различных глубинах и концентрацией в водах ионов серы различной валентности [7].

Замеренная нами разность потенциалов над одним из рудных тел в Забайкалье, залегающим в мерзлой зоне, составляла 350—450 *мв* при разносе электродов в 20 *м*. Электрическая асимметрия рудного тела возбуждает естественное электрическое поле, направленное сверху вниз внутри залежи и снизу вверх — вне ее (рис. 4). Существование отрицательной электрической аномалии над сульфидными рудными телами приводит к развитию в горных породах электроосмотических процессов, заставляющих влагу и микроэлементы (в катионной форме) двигаться из глубины к дневной поверхности. Эти процессы наиболее интенсивны в верхней части рудного тела, где сульфидные минералы при свободном доступе кислорода активно окисляются.

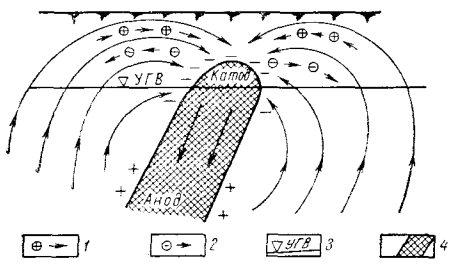


Рис. 4. Схема электрических токов поляризованного рудного тела

1 — движение катионов; *2* — движение анионов; *3* — уровень грунтовых вод; *4* — сульфидное рудное тело

По данным экспериментальных работ естественные электрические поля с разностью потенциалов 100—200 *мв* могут возникать при движении связанной и капиллярной воды в таких пористых средах, как песок, глина, торф и т. д. [3]. Наличие даже сравнительно небольших природных токов в верхней части зоны выветривания, безусловно, должно влиять на миграцию влаги и микроэлементов в пределах зоны формирования солевых и жидких ореолов рассеяния. Например, в образцах легкого суглинка влага начинала перемещаться при приложении электрического потенциала в 1 *мв/см*.

В полевых условиях возможность миграции микроэлементов под влиянием слабых электрических полей изучали на одном из участков полиметаллического рудопроявления в Западном Забайкалье. В небольшие шурфы, пройденные до надмерзлотных вод, опускали алюминиевые электроды, к которым подключали батарею питания напряжением 1,3 *в*. Периодически из обоих шурфов отбирали пробы воды в объеме 1 *л*. Микроэлементы, содержащиеся в пробах, концентрировали с сульфидом кадмия и определяли спектральным анализом. В результате была установлена довольно четкая зависимость содержания микроэлементов (свинца, цинка, меди, олова и др.) от времени приложения электрического поля. Свинец, цинк, медь накапливались в шурфе с отрицательным электродом. Олово же, мигрирующее в природных водах в анионной форме, накапливалось в шурфе с положительным электродом.

Пути миграции микроэлементов в пределах мерзлой зоны и деятельного слоя чрезвычайно сложны и разнообразны и требуют дальнейшего изучения. Исследование путей и форм миграции микроэлементов, вызывающих формирование жидких и солевых ореолов рассеяния в районах развития мерзлых пород, позволит значительно повысить эффективность геохимических поисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананян А. А. Перемещение влаги в мерзлых рыхлых горных породах под влиянием сил электроосмоса. Колл. журн., 1952, т. 14, вып. 1.

2. Боровицкий В. П. Опыт применения гидрогеохимических методов поисков рудных месторождений в условиях островной мерзлоты Бурятской АССР. Тр. Межвед. совещ. по гидрогеохимич. методу поисков рудн. месторожд. Изд. Томского ун-та, 1962.

3. Боровицкий В П. Электрические потенциалы при миграции влаги в песчано-глинистых породах. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, 1968, № 12.

4. Бугельский Ю. Ю. Гипергенная миграция рудных компонентов в различных климатических районах. В сб. «Кора выветривания», вып. 4. АН СССР, 1962.

5. Гинзбург И. И. Беляцкий В. В. Экспериментальные исследования по окислению сульфидов железа, меди и цинка. АН СССР, 1961.

6. Дьяков К. И. Результаты опытов по изучению миграции влаги в промерзающих грунтах с помощью радиоактивного излучения. В сб. «Исследования по физике и механике мерзлых грунтов», № 4. АН СССР, 1961.

7. Свешников Г. Б. О факторах, определяющих возникновение естественного электрического поля на сульфидных месторождениях. Вопросы рудной геофизики, 1961, вып. 2.

8. Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, 1936.

9. Тютюнов И. А. Введение в теорию формирования мерзлых пород. АН СССР, 1961.

10. Удодов П. А., Онуфриенок И. П., Парилов Ю. С. Опыт гидрогеохимических исследований в Сибири. Высшая школа, 1962.

11. Шварцев С. Л., Лукин А. А. Гидрогеохимическая зональность подземных вод некоторых сульфидных месторождений в многолетнемерзлых породах. В сб. «Криогенные процессы в почвах и горных породах». Наука, 1965.