*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 2, 1969 г.*

# О ВОСХОДЯЩЕЙ МИГРАЦИИ НИКЕЛЯ И МЕДИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОЛЕВЫХ ОРЕОЛОВ В УСЛОВИЯХ МОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

*Н. Ф. Майоров*

Поиски сульфидных медно-никелевых руд на Кольском полуострове и Карелии в местах сплошного перекрытия коренных пород моренными отложениями сопряжены с большими трудностями. Геофизические методы, широко применяемые в этих условиях с поисковой целью, часто не дают однозначного ответа о причинной связи вызванных аномалий. Разработанная Ленинградским горным институтом методика литохимической съемки применительно к этим условиям может оказать существенную помощь в повышении эффективности поисков. В настоящее время она внедряется в ряде геофизических партий Кольского районного геологоразведочного управления и Западного геофизического треста с целью разбраковки геофизических аномалий. Применение литохимической съемки в одной из таких партий в 1966 г. в комплексе с геофизическими методами привело к вскрытию оруденения на глубине.

Исследования на площадях с различной мощностью моренного покрова показали, что все рудные тела, вскрытые эрозией, отчетливо отмечаются этим методом по вторичным ореолам при наблюдаемой мощности моренного покрова от первых метров до 10—12 *м*. Значительная контрастность наблюдаемых аномалий дает возможность предполагать, что даже мощность морены 10—12 *м* не является пределом для применения данного метода.

Представления о глубинности литохимической съемки в рассматриваемых условиях связаны со взглядами на генетические особенности формирования вторичных ореолов рассеяния. Некоторые исследователи, как например, А. Дрейманис [1964] и Л. К. Кауранне [1957, 1959], считают, что формирование вторичных ореолов никеля, меди, цинка и других элементов в моренном покрове обязано в основном механическому рассеянию в результате двигавшегося в прошлом ледника. Первый из них отводит также некоторую роль и солевому переносу элементов с возвышенных мест в пониженные под действием грунтовых вод. Восходящей миграции элементов оба автора не придают сколько-нибудь серьезного значения. Д. В. Полферов [1962], проводивший геохимические исследования на Кольском полуострове, пришел к выводу о преобладающем значении солевой составляющей при формировании вторичных ореолов рассеяния. На значительную роль солевого рассеяния в образовании вторичных ореолов в моренном покрове указывает также Н. И. Сафронов [1957]. В. В. Добровольский [1964], занимав-

шийся ландшафтно-геохимическими исследованиями на Кольском полуострове, считает, что образование вторичных ореолов в морене в значительной степени носит эпигенетический характер. Доказывая наличие в этих условиях гипергенной миграции элементов в моренных отложениях, он связывает ее главным образом с биогенными и почвообразовательными процессами. В. В. Добровольский считает, что литохимическая съемка в условиях Кольского полуострова может быть эффективна лишь на площади развития рыхлых отложений с большим количеством элювиальных компонентов, и в связи с этим рекомендует для опоискования территории с мощностью моренных отложений менее 10 *м*.

Не отрицая некоторой роли механического рассеяния при формировании вторичных ореолов, особенно в местах маломощного покрова и нижних горизонтах большой мощности, весь фактический материал, полученный нами, указывает на преобладающее значение солевого рассеяния над механическим. В связи с этим важно выяснить механизм восходящей миграции элементов при формировании наблюдаемых солевых ореолов.

Опытное применение литохимической съемки на разведанных площадях показывает, что ореолы в пределах 10—12 *м* мощности моренного покрова фиксируются как на равнинной, так и на возвышенной местности, как на поверхности, покрытой древесной растительностью, так и в условиях распространения мхов, травяной или кустарниковой растительности со слаборазвитой корневой системой, как в условиях сильного обводнения морены, так и в местах относительно глубокого залегания уровня грунтовых вод (до 7—10 *м*). Наблюдаемую восходящую миграцию на столь значительную высоту в морене, сложенной песчаными преимущественно и супесчаными разностями с обломками кристаллических пород различных размеров, нельзя объяснить ни капиллярным подъемом (по И. И. Гинзбургу [1957] возможен в таких грунтах до 1 *м* или немногим более), ни явлениями инфильтрации, ни напорными водами (ореолы отмечаются и вне наличия подземных напорных вод), ни биогенной аккумуляцией. Значение последнего фактора снижается еще и тем, что отбор проб при литохимической съемке производится с горизонта ниже почвенного слоя *. При формировании солевых ореолов в моренных отложениях большое значение, несомненно, имеет связанная вода.

Наблюдаемые вторичные ореолы в моренном покрове над известными рудными телами обычно проявляются непосредственно над ними или вблизи от них. Подобная картина наблюдается не только на относительно сухих с поверхности участках, но и на болотах с обводненной поверхностью, в условиях значительной подвижности грунтовых вод. В связи с этим можно высказать предположение о подчиненном значении гравитационных вод как среды для восходящей миграции элементов при формировании солевых ореолов. Диффузионная восходящая миграция элементов в гравитационных грунтовых водах, насыщающих моренный покров, идет несоизмеримо медленнее, чем инфильтрационная горизонтальная миграция. По грубым расчетам, в рассматриваемых условиях при 5—7-метровой мощности морены, полностью насыщенной водой, и местоположении источника минерализации у ее основания перемещение никеля и меди в верхние горизонты в результате диффузии через эти воды произойдет лишь на расстоянии многих

* С глубины 0,7—1 *м*, на болотах — из подторфяного слоя, с углубкой в морену на 0,3—0,4 *м*.

сотен метров — первых километров от проекции такого источника. Грунтовые воды, как среда для восходящей миграции элементов, могут иметь самостоятельное практическое значение в образовании наблюдаемых ореолов лишь на участках застоя этих вод.

В соответствии с современными взглядами ряда исследователей [Лебедев, 1936; Роде, 1965; Тютюнов, Нерсесова, 1963 и др.], связанная вода по своим свойствам существенно отличается от свободной гравитационной. Из свойств, присущих рыхло связанной (пленочной) воде, особенно важными для нас являются два. Во-первых, эта вода с растворимыми веществами может передвигаться в грунтах под действием сорбционных сил в любых направлениях, в том числе и с глубины к поверхности. Сила тяжести при этом практически не влияет на ее передвижение (по-видимому, некоторой ее части). Во-вторых, перемещение солей и других воднорастворимых веществ может происходить в самих пленках рыхло связанной воды.

Передвижение пленочной влаги в виде жидкости, как показал А. Ф. Лебедев [1936], возможно в довольно узких пределах влажности, от максимальной гигроскопичности (МГ) до максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ). Последняя величина характеризует, по его мнению, то максимальное количество влаги, которое может быть удержано сорбционными силами на поверхности твердых частиц. А. А. Роде [1965] предполагает, что эта величина условна, поскольку зависит от метода измерения. В действительности количество сорбированной воды твердыми частицами может быть, по-видимому, значительно бо́льшим.

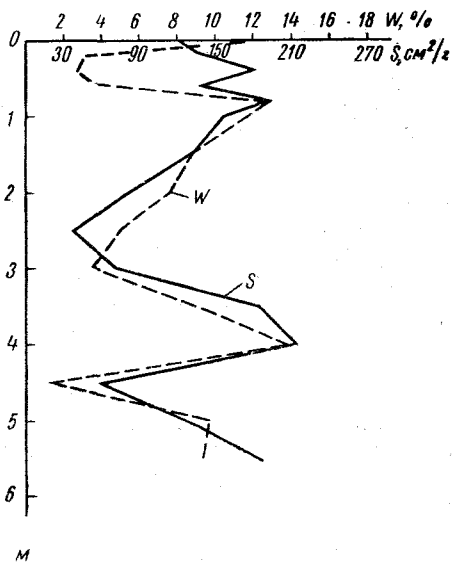



Рис. 1. Графики удельной поверхности $S$ (суммарной поверхности частиц в единице веса, форма частиц принята кубическая) частиц морены и естественной влажности $W$. Разрез *2* участка *1*

Проведенные нами определения естественной влажности, максимальной гигроскопичности и максимальной молекулярной влагоемкости морены по 6 вертикальным разрезам на одном из участков съемки, расположенном на относительно возвышенной местности, с залеганием грунтовых вод на глубине 8 *м*, дали следующие результаты. Величина естественной влажности моренных отложений, изученных до глубины 5—6,5 *м*, по всем этим разрезам значительно превосходит максимальную гигроскопичность (от 2,2 до 41,7 раза), в среднем в 21,1 раза. За исключением 3 случаев из 37, она больше и максимальной молекулярной влагоемкости в среднем в 3,3 раза. Полученные результаты позволяют считать, что в рассматриваемых условиях в толще моренных отложений, вероятно, всегда существует (учитывая в весенне-летне-осенний периоды постоянное преобладание осадков над испарением) необходимый минимум влажности, при котором возможно передвижение рыхло связанной воды за счет молекулярных сил притяжения.

Графики удельной поверхности частиц и естественной влажности морены, за немногим исключением, повторяют друг друга (рис. 1).

Следовательно, эта вода удерживается в основном поверхностными силами частиц морены. Произведенные подсчеты показали заметное различие толщины водных пленок на частицах морены при естественной ее влажности по отмеченным выше вертикальным разрезам от точки к точке даже на близких расстояниях. Предельные колебания толщины таких пленок характеризуются отношением 1 : 51. Эти данные указывают на существование градиента свободной энергии поверхности водных пленок и, как следствие — на их потенциальную возможность к передвижению. Однако из-за относительно большой толщины этих пленок в рассматриваемых условиях передвижение их происходит, по-видимому, крайне медленно. На участках полной влагоемкости и поверхностного обводнения морены пленки рыхло связанной воды должны иметь предельно большую толщину, поэтому перемещение их в весенне-летне-осенний периоды при положительных температурах практически не должно происходить.

Направленное передвижение пленок рыхло связанной воды с глубины к дневной поверхности может происходить в результате испарения, всасывающей деятельности корневой системы растений и промерзания грунтов. Применительно к рассматриваемым условиям влияние первых двух факторов на перемещение пленок воды неэффективно из-за преобладания осадков над испарением и хорошей просачиваемости моренных отложений. Промерзание грунтов могло оказывать некоторое влияние на перемещение пленочной влаги с глубины к поверхности в период наблюдаемых минусовых температур (более 7 месяцев в году). Однако промерзание морены с поверхности ограничено участками, на которых торфяное покрытие отсутствует или имеет небольшую мощность. На болотах, в местах, где морена покрыта мощным слоем торфа (3—4 *м* и более), промерзания ее с поверхности даже в сильные морозы часто не происходит.

Растворенные вещества перемещаются с глубины к поверхности, по-видимому, в основном в результате диффузии по пленкам рыхло связанной воды. По представлениям А. Ф. Лебедева [1936], вода, удерживаемая частицами почвы, имеет весьма резкую границу. Такая точка зрения в настоящее время многими исследователями не разделяется. Так, по мнению А. А. Роде [1965], резких границ между связанной и свободной водой нет. Переход между ними существует постепенный, и область перехода в зависимости от различных условий может смещаться в ту или иную сторону. Вторая точка зрения более правильна. Однако связанная вода (даже наиболее удаленные ее оболочки) по некоторым свойствам должна существенно отличаться от свободной гравитационной. Рыхло связанная вода изучена далеко недостаточно. Даже точное прямое определение ее содержания, как отмечает А. А. Роде, пока не осуществимо. В связи с этим дальнейшее изложение миграционного процесса элементов путем диффузии с участием этой категории влаги в значительной мере носит предположительный характер.

В соответствии с наблюдаемым различием интенсивности ореолов на относительно возвышенной местности с уровнем грунтовых вод на глубине в несколько метров и в депрессиях с сильно обводненной на всю мощность мореной целесообразно рассмотреть процесс диффузии на этих участках раздельно.

Диффузионный процесс, как известно, может совершаться в результате наличия ряда градиентов и, в частности, давления, температуры и концентрации элементов. При рассмотрении диффузии в воде применительно к данным условиям первостепенное значение имеет по-

следний фактор, и некоторую роль в этом процессе в отдельные периоды года играет также температурный градиент.

На относительно возвышенной местности, как следует из приведенного выше примера, морена почти на всю мощность обычно имеет естественную влажность, при которой вода удерживается в основном сорбционными силами твердой фазы. Наблюдаемая толщина пленок в таких местах, хотя и превышает толщину, обусловленную величиной ММВ, однако, по-видимому, значительно меньше, чем могла бы быть при насыщенности морены свободными гравитационными водами. Оболочки рыхло связанной воды, наиболее удаленные от поверхности частиц морены, не могут, очевидно, быть удержаны сорбционными силами и «падают» под действием силы тяжести. В таких пленках растворимость элементов должна быть понижена (вследствие более определенной ориентировки диполей молекул воды относительно поверхности частиц морены). Это приводит к ослаблению диффузионного процесса, уменьшению поглощения элементов твердой фазой и, как следствие,— формированию ореолов несколько пониженной интенсивности.

В условиях полной влагонасыщенности моренных образований, как например, на заболоченных участках, нередко обводненных даже с поверхности, пленки рыхло связанной воды на частицах морены могут иметь максимально возможную толщину. Периферийные оболочки таких пленок по целому ряду свойств (в частности, по способности к растворению) будут мало отличаться от свободных гравитационных вод. В то же время при установившемся динамическом равновесии между этими категориями вод даже наиболее удаленные внешние оболочки рыхло связанной воды должны существенно отличаться от свободной гравитационной воды отсутствием «свободы» к перемещению под влиянием силы тяжести. Пленочная вода, находясь под воздействием сорбционных сил, как бы «привязана» к поверхности частиц морены.

Растворенные элементы, поступив в пределы таких пленок, испытывают на себе воздействие силового поля поверхности частиц. При установившемся процессе фазового равновесия между сорбированной и свободной гравитационной водой эти элементы, находясь в непрерывном движении, будут стремиться не выходить за пределы внешних границ пленочной воды. Это подтверждают исследования И. А. Тютюнова и З. А. Нерсесовой [1936], которые экспериментально установили, что в пленочных растворах концентрация веществ более высокая, чем в свободной воде.

При движении часть элементов, естественно, поглощается твердой фазой, а значительная часть диффундирует по экспоненциальному закону вдоль пленок: от участков большей концентрации к участкам меньшей концентрации в различных направлениях, в том числе и с глубины к поверхности (частично диффузия может зависеть и от температурного градиента). Увеличение толщины пленок рыхло связанной воды в этих условиях, несомненно, способствует более энергичному переносу элементов путем диффузии, приводит к увеличению поглощения элементов твердой фазой и в итоге — к формированию более интенсивных ореолов над рудными телами по сравнению с участками, расположенными на возвышенной местности.

Таким образом, свободные гравитационные воды, участие которых в формировании наблюдаемых солевых ореолов сравнительно ограничено, насыщая морену и способствуя тем самым увеличению толщины пленок рыхло связанной воды, оказывают стимулирующее воздействие на повышение интенсивности диффузионного процесса. Пленки рыхло

связанной воды образно можно рассматривать как каналы, по которым ионы (в данном случае катионы никеля и меди), беспорядочно сталкиваясь между собою и отчасти поглощаясь поверхностью частиц морены, с некоторым поступательным движением медленно перемещаются. Объем воды в таких каналах на единицу веса морены, естественно, будет зависеть не только от толщины пленок, но и от их площади, т. е. суммарной поверхности частиц морены, на которых удерживаются эти пленки. Различный механический состав моренных отложений от пункта к пункту, а следовательно, и различная удельная поверхность, обусловливают разную ширину этих каналов. Как следствие этого, при установившемся диффузионном потоке по направлению с глубины к поверхности и скорость поступательного перемещения растворимых элементов в отдельных местах разреза будет неодинаковой. Она будет больше в интервалах, где морена слагается из более крупных частиц, обладающих меньшей удельной поверхностью. Там столкновения катионов будут более частыми, вследствие чего и поглощение их поверхностью частиц морены будет более интенсивным. На рис. 2 довольно отчетливо наблюдается определенная закономерность: с уменьшением удельной поверхности частиц морены возрастает поверхностная плотность сорбированных никеля и меди и наоборот. Эта зависимость при наличии определенно направленного процесса солевой миграции элементов (рис. 3) может быть выражена уравнением

$$\sigma = CS^K,$$

где $C$ и $K$ — коэффициенты, зависящие, соответственно, от наблюдаемой поверхностной плотности элементов и интенсивности сорбционного процесса.

При отсутствии определенной направленности миграционного процесса эта зависимость между $S$ и $\sigma$ нарушается. При определенно направленном миграционном процессе в условиях очень слабой минерализации с увеличением удельной поверхности $S$ возрастает и количество $Q$ сорбируемых никеля и меди. В условиях же интенсивной минерализации количество сорбируемых элементов возрастает с уменьшением удельной поверхности частиц морены (рис. 4). При значительном сосредоточении в поверхностном слое компонент выделяется на поверхности раздела в самостоятельную фазу [Киреев, 1951]. Поэтому для перевода сорбированных элементов из неодинаково насыщенных систем в растворимое состояние требуются, по-видимому, разные приемы. Выделившаяся часть компонента в самостоятельную фазу может иметь другие формы соединений, нежели сорбированные элементы в слабонасыщенных системах.

Приведенные представления о механизме восходящей солевой миграции элементов позволяют объяснить в условиях болотистой местности с обводненной мореной, при значительной ее мощности и относительно большой скорости грунтовых вод, развитие лито- и гидрохимических ореолов непосредственно над рудными телами или вблизи от них. На таких участках, как известно, морена обычно покрыта слоем торфа (рис. 5). Между торфом и мореной в результате инфильтрации атмосферных осадков и гравитационных вод с возвышенных мест периодически происходит движение свободных вод с бóльшей скоростью, нежели скорость грунтовых вод на более глубоких горизонтах моренного покрова. В эти периоды нарушается в самой верхней части разреза термодинамическое равновесие между связанной и свободной гравитационной водами, приводящее к уменьшению толщины пленок

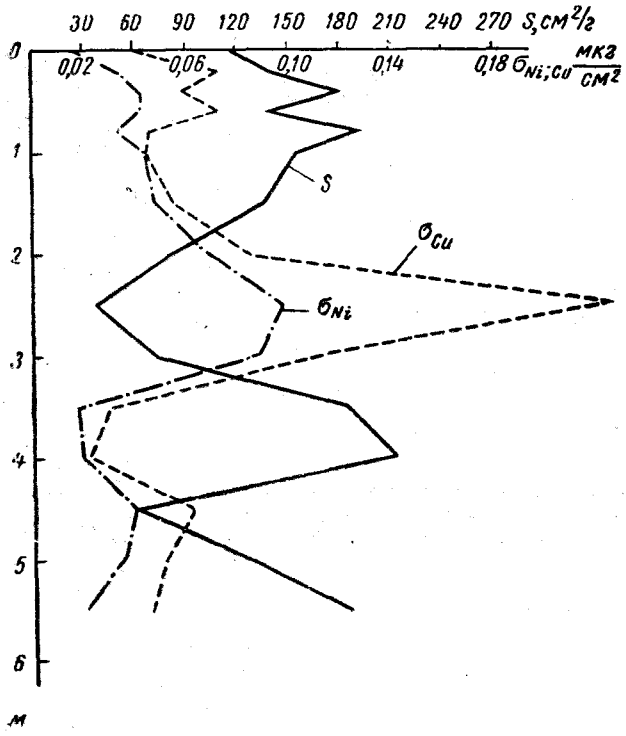



Рис. 2. Зависимость между удельной поверхностью $S$ частиц морены и поверхностной плотностью σ сорбированных никеля и меди. Разрез *2* участка *1*

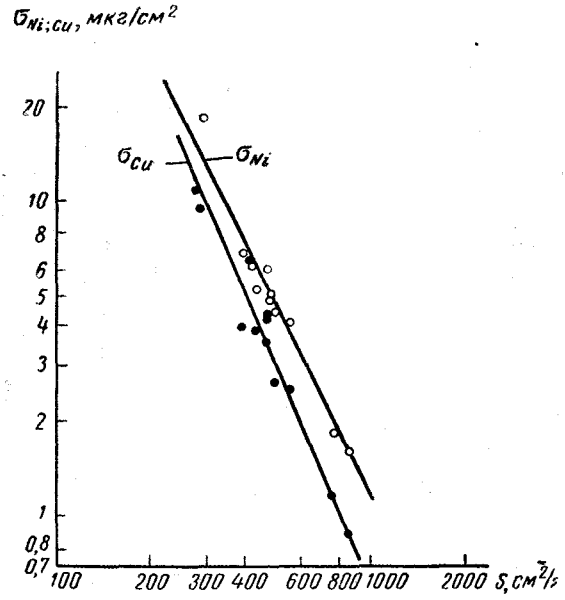



Рис. 3. Зависимость между удельной поверхностью $S$ частиц морены и поверхностной плотностью σ сорбированных никеля и меди при определенно направленном миграционном процессе. Скв. *2* участка *2*

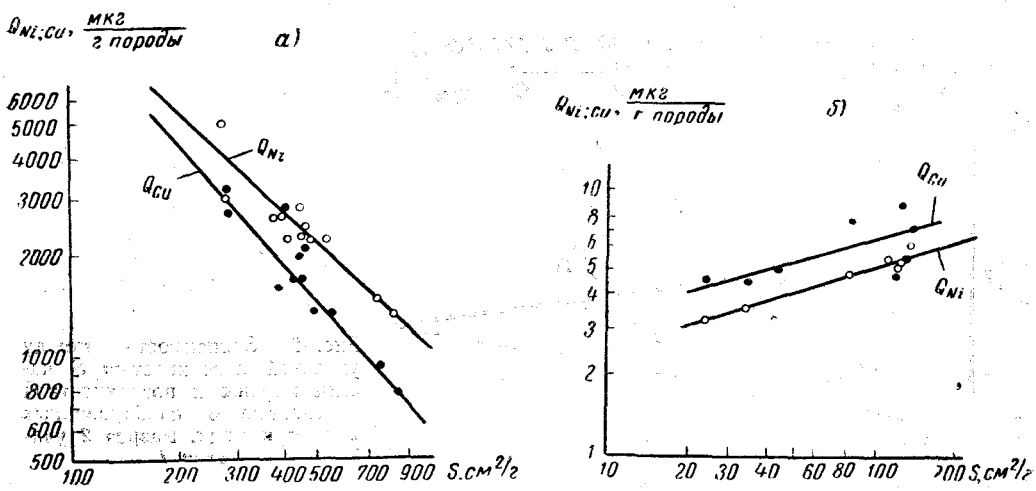



Рис. 4. Зависимость между удельной поверхностью $S$ частиц морены и количеством $Q$ сорбированных никеля и меди при определенно направленном миграционном процессе в условиях интенсивной *а* и слабой *б* минерализации

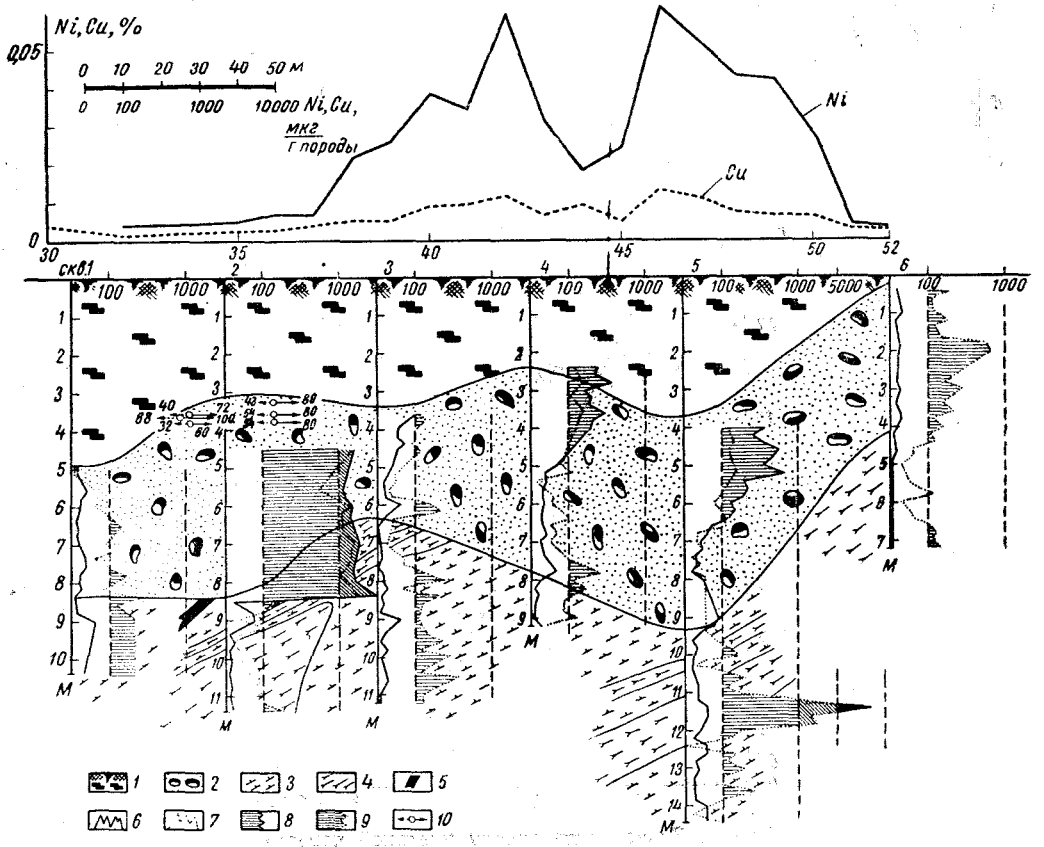



Рис. 5. Графики содержания никеля и меди в морене и коренных породах

Участок 2: *1*—торф; *2*—четвертичные отложения; *3*—полевошпатовые амфиболиты; *4*—плагио-микроклиновые граниты и гнейсо-граниты; *5*—богатые медно-никелевые руды; *6* и *7*—графики содержания Ni и Cu в морене фракции ≤ 0.04 *мм* по глубинным пробам, %; *8* и *9*—графики содержания Ni и Cu в морене и коренных породах по вертикальным скважинам, *мкг/г* породы; *10*—содержания Ni и Cu (указаны цифрами и векторами) в отдельных точках моренных отложений, *мкг/г* морены

рыхло связанной воды на частицах морены. При этом наиболее удаленные оболочки пленок, отделяясь вместе с растворимыми элементами, мигрировавшими с глубины, переходят в свободные гравитационные воды. В результате повышается минерализация свободных вод, находящихся в верхней части моренного покрова, и связанных с ними вод, насыщающих торфяной слой. Вместе с водами из слоя торфа выносятся и мелкие органические частицы. Обладая значительной сорбционной способностью, они поглощают растворенные элементы и переносятся на некоторое расстояние по направлению движения вод с последующей садкой на поверхности морены и нижних горизонтах слоя торфа. С помощью подторфяных потоков происходит перемещение и поверхностных частиц морены. В результате наблюдаемые литохимические ореолы в верхней части моренного покрова часто в этих условиях несколько смещены от проекции рудных тел, что наглядно видно на рис. 5. Здесь моренные образования по скважине *2,* пробуренной в нескольких метрах от выхода рудного тела, резко обогащены никелем и медью. Если на участке *1,* в зоне очень слабой минерализации, содержание никеля и меди по вертикальным разрезам не превышает 10 *мкг* на 1 *г* морены (при фоне 2—4 *мкг*), то здесь они достигают тысяч единиц. С глубины на 4 *м* к поверхности не наблюдается сколько-нибудь заметной тенденции к уменьшению количества сорбированных никеля и меди. И лишь в самой верхней части разреза минерализация по никелю и меди скачкообразно падает. Выщелоченные отсюда элементы перемещаются по направлению движения грунтовых вод к скважинам *3, 4* и *5* (рис. 5).

Гидрохимические аномалии, наблюдаемые в этих условиях также вблизи рудных тел, образуются в основном, по-видимому, в результате явлений десорбции, разубоживания литохимических ореолов (подторфяных потоков рассеяния). При отборе гидрохимических проб отбираются не только свободные гравитационные воды с наличием механической взвеси и растворенных органоминеральных комплексов, но и некоторая часть (неустойчивых при данном нарушении динамического равновесия систем) внешних оболочек рыхло связанной воды с растворенными веществами.

Рассмотренный механизм восходящей миграции никеля и меди в моренных отложениях и установленная при этом количественная зависимость между удельной поверхностью сорбента и поверхностной плотностью сорбируемых элементов представляют интерес не только для экзогенных условий при выяснении особенностей формирования вторичных солевых ореолов, но и для эндогенных условий при изучении гидротермального процесса рудообразования.

## ЛИТЕРАТУРА

Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Госгеолтехиздат, 1957.

Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимические особенности Кольского полуострова и их значение для поисковых работ. Советская геология, № 3, 1964.

Дрейманис А. Геохимические поиски меди, свинца и цинка в районах оледенения восточной Канады. Тр. XXI международ. геологич. конгресса, вып. III, изд-во «Мир», 1964.

Кириеев В. А. Курс физической химии. Госхимиздат, 1951.

Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. Изд-во АН СССР, 1936.

Полферов Д. В. Геохимические поиски месторождений медно-никелевых сульфидных руд. Бюлл. научно-техн. информ., № 1 (35), Госгеолтехиздат, 1962.

Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Гидрометеоиздат, 1965.

Сафронов Н. И. К вопросу о возможностях геохимических поисков в условиях моренных отложений. Сб. «Геохим. поиски рудных месторождений в СССР». Госгеолтехиздат, 1957.

Тютюнов И. А., Нерсесова З. А. Природа миграции воды в грунтах при промерзании и основы физико-химических приемов борьбы с пучением. Изд-во АН СССР, 1963.

Kauranne L. K. Geolgi, № 2, 1957.

Kauranne L. K. Bull. Commiss. geol. Finlande, № 184, 1959.