

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗАБАЙКАЛЬЕ

П. А. УДОДОВ

(Представлено кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии)

В период полевых работ 1957—1958 гг. Читинским геологическим управлением проводились поиски рудных месторождений гидрохимическим методом. В условиях многолетней таликовой мерзлоты этот метод ранее почти не применялся. Поэтому необходимо было прежде всего установить поисковые критерии для различных тяжелых металлов в природных водах этого района.

Опыт проведенных работ показывает, что методика полевых гидрохимических исследований несколько изменяется в зависимости от ландшафтных зон. К сожалению, специфика этих исследований остается пока недостаточно разработанной. Проводимые гидрогеохимические исследования ставили своей целью одновременно с основной задачей — поиски рудных месторождений — уточнить и некоторые вопросы методики полевых работ.

Полевые гидрогеохимические исследования в Красночикойском районе Забайкалья были поставлены по инициативе геолога А. Д. Канищева. Весь комплекс этих работ проводился студентами Томского политехнического института: З. К. Моисеевой, Н. А. Молчановым, А. Н. Иваненко и др. под руководством доцента П. А. Удодова.

Гидрогеохимические условия любого района определяются рядом факторов, которые можно объединить в следующие две группы: 1) физико-географические, 2) геолого-гидрогеологические.

Кроме того, они определяются геохимическими свойствами распространенных в районе элементов и их соединений.

Как известно, при изучении гидрогеохимии района необходимо прежде всего изучить условия и характер среды, в которой идет миграция и осаждение элементов. Эти факторы определяются физико-географическими и геолого-гидрогеологическими особенностями района. Кроме среды, огромное значение на миграцию элементов оказывает и сам элемент, а именно: его ионный радиус, валентность, способность химических элементов к образованию комплексных соединений, к миграции в ионной и коллоидной формах. Одновременно с этими данными необходимо учитывать растворимость соединений, величину значения рН природных вод, химическую активность горных пород и их сорбционную способность.

Содержание тяжелых металлов в природных водах определяется наличием зон минерализаций в районе и характером рудоносности горных пород. Поэтому прежде всего рассмотрим содержание рудных эле-

ментов в различных типах горных пород. Для характеристики рудоносности последних дадим оценку их по И. И. Гинзбургу [1]. В зависимости от содержания в горных породах тяжелых металлов он различает 4 следующие градации: «безрудная» минерализация, «рассеянная» минерализация, «обогащенная» минерализация и «рудная» минерализация.

Гранитные интрузии, песчаники, филлиты, инъекционные сланцы бальджиканской и чикойской свит исследуемого района по металлометрическому опробованию показывают наличие в них 17 элементов — Pb, Cu, V, Ba, Sn, Co, As, Ag, Ni, Ti, Mn, Cr, Zn, Sb, Mo, Bi, Sr. Содержание и количество этих элементов в гранитах для различных участков неодинаковое. Граниты, распространенные в бассейне р. Куналея, характеризуются наличием 14 элементов: W, Bi, As, Zn, Pb, Cu, Ba, Cr, Co, Sr, Ag, Ni, Sn, V. Породы с так называемой «безрудной» минерализацией характеризуются наличием Pb в 13 точках, Cu — в 13 точках, V — в 15 точках, Ba — в 13 точках, Cr — в 11 точках, Co — в 2 точках, Sr — в 4 точках, Ag — в 1 точке, Ni — в 3 точках, Sn — в 6 точках.

«Рассеянная» минерализация отмечена для Pb в 2 точках, Sr — в 2 точках, Ba — в 1 точке, Sn — в 2 точках, Zn — в 1 точке, W — в 2 точках, As — в 1 точке. «Обогащенная минерализация» наблюдается для As в 1 точке. «Рудная» минерализация установлена для W в 3 точках и Bi — в 2 точках.

«Обогащенная» и «рудная» минерализация в горных породах приурочены к участку вольфрамового рудника Куналей.

На площади бассейна р. Асакан, в гранитном массиве, отмечается, кроме тех элементов, которые были встречены в бассейне р. Куналей, исключая W, As, ряд новых металлов. Граниты на площади бассейна р. Асакан характеризуются наличием 15 элементов. Все элементы, которые встречены только на площади бассейна р. Асакан, являются весьма специфичными для зон минерализаций. Содержание наиболее характерных элементов изменяется в следующих пределах: «безрудная» минерализация характеризуется наличием Cu в 32 точках, Pb — в 23 точках, Zn — в 7 точках, Ba в 17 точках, Ag — в 7 точках, Ni — в 31 точке, Co — в 5 точках, Sn — в 18 точках, Mo — в 5 точках, Ti — в 22 точках, Mn — в 26 точках, Sr — в 17 точках, Cr — в 16 точках, Bi — в 2 точках.

«Рассеянная» минерализация: Cu — в 1 точке, Pb — в 16 точках, Zn — в 16 точках, Ba — в 9 точках, Co — в 2 точках, Sn — в 3 точках, Ti — в 4 точках, Mn — в 11 точках, Sr — в 6 точках, Cr — в 13 точках.

«Обогащенная» минерализация: Ba — в 4 точках, Ti — в 3 точках, Zn — в 1 точке, Pb — в одной точке. «Рудная» минерализация: Sn — в 1 точке, Ba — в 1 точке.

Необходимо отметить, что точки главным образом «обогащенной» и «рудной» минерализации характеризуются одновременно повышенным содержанием не одного, а нескольких элементов. Так, точка 226, кроме рудной минерализации олова, характеризуется «обогащенной» минерализацией свинца. Точка 220 имеет «рудную» минерализацию Ba и «рассеянную» — для Pb, Zn, V и Sr.

Горные породы бальджиканской свиты в верховьях речки Антснотки, в среднем течении р. Асакан и в верховьях р. Горначихи, представленные серыми кварцитовидными граувакковыми и аркозовыми песчаниками, переслаивающимися с черными аргиллитами, характеризуются следующими особенностями.

Породам бальджиканской свиты, по данным спектрального анализа, свойственно наличие «безрудной» минерализации для тяжелых металлов: Pb — в 24 точках, Zn — в 7 точках, Ba — в 14 точках, Sr — в 14 точках, Cu — в 28 точках, Ni — в 23 точках, Co — в 12 точках, Sn — в 11 точках, Mn — в 14 точках, Ti — в 13 точках, Cr — в 11 точках, V —

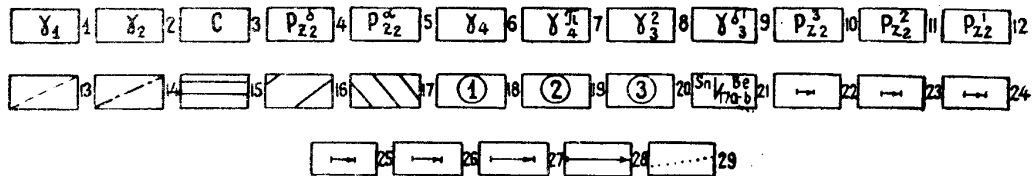
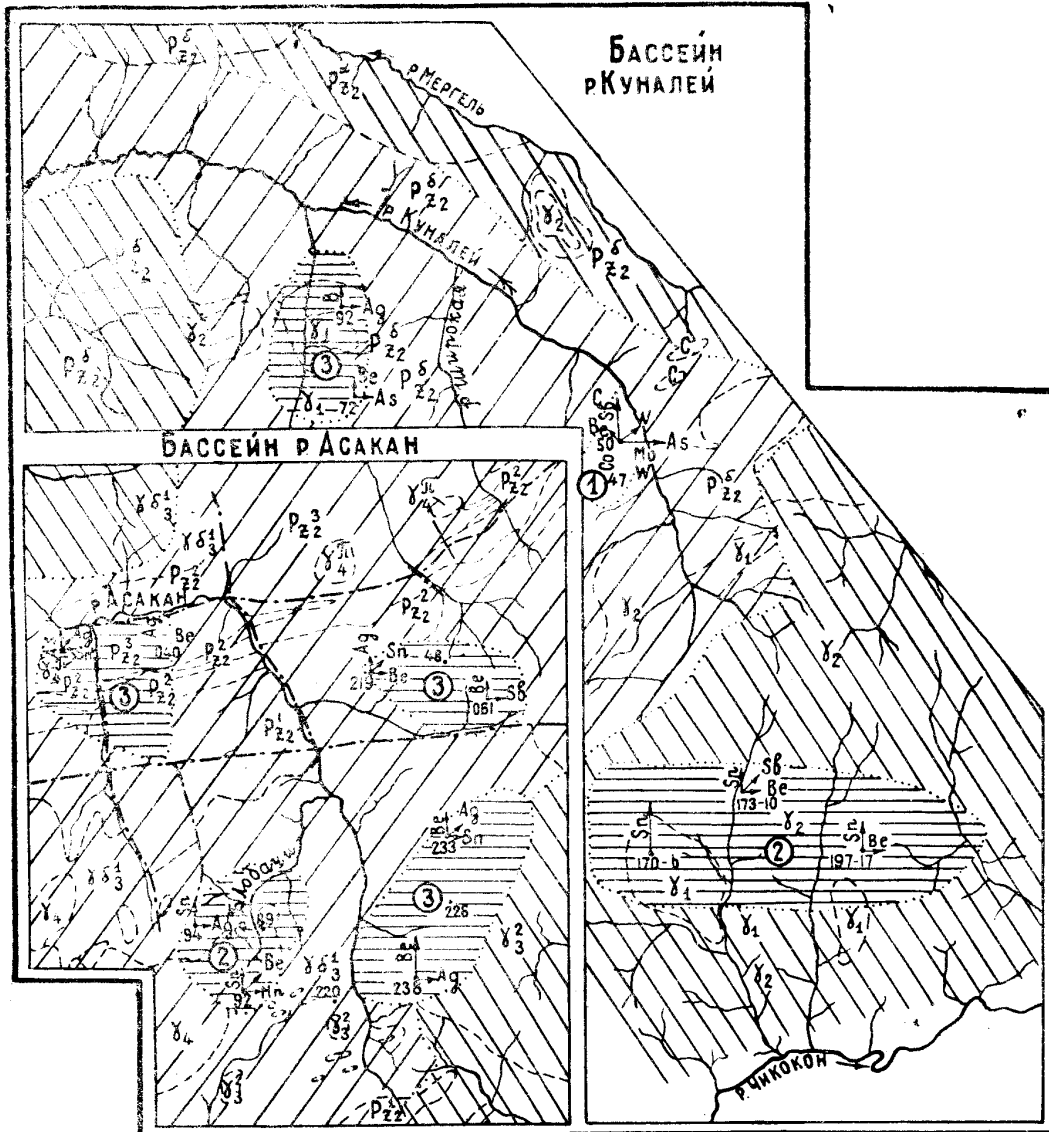


Рис. 1. Схематическая карта гидрогеохимического районирования.

Геология бассейна р. Куналей приводится по данным группы геологов ЧГУ. 1 — лейкократовые порфиридные граниты (мезозой); 2 — среднезернистые, неравномернозернистые порфиридные биотитовые граниты (мезозой); 3 — переслаивание конгломератов, песчаников, кварцевых порфиров; 4 — орговикованные песчаники и сланцы, окварцованные песчаники, кристаллические сланцы и гнейсы, перемежаемость песчаников с филлитовидными сланцами; 5 — зеленовато-серые песчаники с прослоями филлитов.

Геология бассейна р. Асакан составлена А. Д. Канищевым. Варисская и мезозойская интрузии. 6 — средние и мелкозернистые биотитовые и лейкократовые граниты; 7 — малые интрузии гранит-порфиров и биотитовых гранитов; 8 — резкопорфиридные и крупнозернистые биотитовые граниты; 9 — биотит-роговообманковые гранодиориты; 10 — чикойская свита, переслаивание известковистых песчаников и филлитовидных сланцев, кислые эффузивы; 11 — чикоконская свита, черные алевролиты, песчаники, в подчинении конгломераты и кислые эффузивы; 12 — бальджиканская свита, песчаники, филлиты, инъекционные сланцы; 13 — предполагаемые геологические границы; 14 — предполагаемые зоны тектонических нарушений.

Участки с содержанием различных комплексов тяжелых металлов в природных водах. 15 — участки с наличием в большинстве случаев полного комплекса специфических элементов в природных водах (для потоков рассеяния зон минерализаций) и повышенное содержание некоторых из них; 16 — участки с наличием неполного комплекса специфических элементов в природных водах (для потоков рассеяния зон минерализаций); 17 — участки с наличием отдельных тяжелых металлов в природных водах (содержание металлов — фоновое).

Участки потоков рассеяния в природных водах по типу минерализации. 18 — вольфрамовая минерализация; 19 — оловянная минерализация; 20 — комплексная минерализация; 21 — 170-6 — номера точек гидрогеохимического опробования; направление и длина вектора соответствуют содержанию определенного элемента в природных водах. Содержание специфических элементов в воде в мг/л. 22 — 0,0001; 23 — 0,0002; 24 — 0,0003; 25 — 0,0005; 26 — 0,0008; 27 — 0,002; 28 — 0,004; 29 — намечаемые границы участков потоков рассеяния зон минерализаций.

Примечание. В нанесенных на карту точках показано содержание только специфических элементов в природных водах, характерных для данного участка.

в 25 точках. Однако в поле Бальджиканской свиты имеется значительное количество точек рассеянной минерализации. Так, Pb встречен в 3 точках, Zn — в 16 точках, Cu — в 1 точке, Sn — в 1 точке, Ba — в 8 точках, Co — в 4 точках, Sr — в 1 точке, Cr — в 14 точках.

Чикоконская свита, залегающая севернее бальджиканской, имеет небольшую мощность, представлена черными сланцеватыми алевролитами, переслаивающимися с серыми псаммитовыми песчаниками, и характеризуется наличием в ней 13 тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ba, Sn, Ni, Co, Mo, Mn, Ti, Sr, Cr, V). «Рассеянная» минерализация наблюдается в одной точке для Sn, в одной точке для Sr, в шести точках для Cr и в четырех точках для Zn. «Обогащенная» минерализация зарегистрирована только для Ba в двух точках. Рассмотрение этих данных показывает, что чикоконская свита является, по-видимому, менее перспективной в отношении «рудной» минерализации горных пород. В породах чикоконской свиты не встречено таких специфических элементов, как As, Bi и др.

Чикойская свита представлена переслаивающимися зелеными и стально-серыми сланцами с коричневыми и зеленовато-серыми известковистыми песчаниками и песчанистыми известняками, среди которых выделяют горизонт туфолов, кварцевых порфиров и туффигов. Металлогения этой свиты характеризуется «безрудной» и «рассеянной» минерализацией. Для нее типичны 13 элементов, из них Pb, As, Cu, Ni, Ti, Mn имеют характер только «безрудной» минерализации. Для Co, Zn, Sn, Ba, Sr, Cr, V, кроме «безрудной» минерализации, наблюдается в отдельных точках и «рассеянная». «Обогащенной» и «рудной» минерализаций в породах чикойской свиты не встречено.

Рассмотрение данных металлометрии коренных пород района исследований позволяет заключить, что наибольшее количество образцов с «обогащенной» и «рудной» минерализацией наблюдается только в гранитах и породах бальджиканской свиты. Однако необходимо заметить, что весьма ограниченное количество образцов горных пород для спектрального анализа затрудняет дать более полную оценку их металлогении.

При изучении содержания рудных минералов в горных породах особое внимание должно быть уделено участкам первичных ореолов рассеяния зон минерализаций, так как они служат основными источниками обогащения природных вод рудными и особенно специфическими элементами.

Приведенная оценка горных пород района в отношении их степени минерализации необходима при гидрогеохимических исследованиях для понимания источников минерализации природных вод. Кроме того, это также весьма важно для изучения процесса миграции тяжелых металлов.

В результате полевых исследований было отобрано 145 образцов различных горных пород для определения их химической активности. Эти определения были выполнены в проблемной геологической лаборатории Томского политехнического института. Результаты определений показали, что большинство пород района относится к группе слабоактивных [3]. К ним относятся филлитизированные сланцы и кварцитовидные песчаники. Повышенной активностью обладают карбонатизированные песчаники и роговики, развитые вокруг небольших интрузий. Активность роговиков увеличивается за счет прожилков кальцита (вторичная химическая активность горных пород). Химически неактивными или весьма слабо активными горными породами являются массивно-кристаллические породы района: гранит, аплит и др.

Изучение химической активности горных пород весьма важно и для выделения и обоснования зон минерализаций.

В зависимости от химической активности горных пород изменяется и рН природных вод. Так, например, воды неактивных гранитов кислые, воды кристаллических сланцев слабокислые и нейтральные, воды активных песчаников и роговиков слабощелочные и даже щелочные.

Одно значение рН природных вод для описываемого района не может служить поисковым критерием зон минерализаций, так как в ряде случаев оно обусловлено кислыми болотными водами. Если, кроме низкого значения рН природных вод, в них наблюдается повышенное значение сульфат-иона, то такие точки указывают на наличие зон минерализаций.

Рассмотренные косвенные гидрогеохимические критерии (рН, SO_4^{2-}) могут дать правильную оценку району в отношении его металлогении только при определенных геолого-гидрогеологических и физико-географических условиях.

Опыт полевых исследований показал, что наиболее точными являются прямые гидрогеохимические критерии. К ним относится наличие специфических элементов в природных водах и вообще повышенное содержание какого-либо металла. В полевых условиях нами определялось непосредственно в точках исследований общее содержание металлов в природных водах дитизоном. Это определение дает только некоторое представление о сравнительной оценке отдельных точек. Определение же тяжелых металлов производилось путем концентрирования их методом соосаждения (методика ТПИ), что позволяет определить качественное и полуколичественное содержание отдельных металлов в водах.

Применимость гидрохимического метода для поисков рудных месторождений в Забайкалье подтверждается проверкой его на ранее известных зонах минерализаций. Так, на вольфрамовом руднике Куналей спектральный анализ горных пород и минералов показал наличие 16 тяжелых металлов: Pb, Cu, Ni, Co, As, Ag, Zn, V, Sr, Ba, Bi, Cr, Ti, W, Mn, Sb. Сопоставляя результаты этих анализов с комплексом тяжелых металлов, установленным в природных водах путем соосаждения, имеем почти полное соответствие. Содержание тяжелых металлов в природных водах зоны минерализации рудника Куналей показывает наличие 16 следующих тяжелых металлов: Pb, Cu, Mo, Ni, Co, As, Zn, Sb, Ba, Bi, Cr, Ti, Be, W, V, Sr.

Кроме того, сравнивая спектральные анализы горных пород вне зоны минерализации (Pb, Co, Ni, V, Ba, Cr, Ti, Cu) с содержанием металлов в природных водах фона района (Pb, Cu, V, Zn, Ni, Ti, Mn), устанавливаем также некоторое соответствие в количественном отношении.

В природных водах бассейна реки Куналей было установлено 18 тяжелых металлов, а именно: W, Sn, Mo, Pb, Zn, Ba, As, Ni, Co, Ag, Bi, Cr, Ti, Sr, Mn, Sb, V, Cu.

Точно такой же комплекс элементов был установлен и в природных водах бассейна р. Асакан. Интересно отметить, что в количественном отношении распространенность встречи некоторых элементов в водах различна. Например, серебро в бассейне р. Куналей было встречено только в одной пробе, в бассейне же р. Асакан оно встречено в 87 пробах. Некоторые характерные микрокомпоненты отмечаются в пробах воды для бассейна р. Асакан почти в 5 раз чаще, чем в бассейне р. Куналей. Число встреч Zn, Sn, Cu, Cr, Ti, Mn в пробах природных вод бассейна р. Асакан вдвое больше, чем для р. Куналей.

Весьма редко встречаются такие элементы, как Bi, Co, Mo, W, As, Sb. Они главным образом наблюдаются в природных водах зон минера-

лизаций. Поэтому данную группу элементов мы относим к специфическим показателям различных зон минерализаций. Так, в водах рудника Куналей встречена почти вся группа специфических элементов, но для нее пока недостаточно изучены условия их миграции. Показателем зон минерализаций может быть любой элемент, если его содержание превышает фоновое не менее, чем в пять раз. Нами разработана схема классификации природных вод зон минерализаций горных массивов Западной Сибири, которая опубликована в работе И. И. Гинзбург [1]. Согласно этой классификации зона минерализации выделяется на основе ряда гидрогеохимических критериев, из которых основным является содержание в водах ведущего одного, двух или трех элементов, характерных для данного типа зоны. На основе этой классификации на схематической карте гидрогеохимического районирования выделены различные участки зон минерализаций.

Фоновое содержание металлов в водах для района в целом определяется от 0,0025 до 0,0030 мг/л. На отдельных участках, по-видимому, за счет многолетней мерзлоты фон района снижается (рудник Куналей), при этом фоновое содержание элементов меняется в зависимости от геологического строения. Так, например, воды гранитов имеют повышенное фоновое значение (0,0030—0,0035 мг/л). Для вод песчано-сланцевой толщ фоновое значение несколько ниже (0,0020—0,0025 мг/л).

На фоновое содержание металлов в природных водах влияет также и режим вод.

Характерный для района сложный комплекс элементов (как для горных пород, так и природных вод) в общем соответствует оловянно-вольфрамовому поясу минерализации, выделенному С. С. Смирновым [2]. В пределах этого пояса распространены зоны минерализации касситерито-кварцевой и касситерито-сульфидной формаций.

Результаты гидрогеохимических исследований и геохимического изучения описываемых районов Забайкалья позволяют наметить для них некоторые дополнительные закономерности в распределении тяжелых металлов. Схематическая карта гидрогеохимического районирования (рис. 1) показывает, что специфические элементы с повышенным содержанием их в природных водах приурочены к отдельным участкам, воды которых обычно характеризуются наличием определенного комплекса элементов, представляющих собой естественные ассоциации зон минерализаций. Выделение и обоснование их с геолого-гидрогеологической стороны и составляет основную задачу гидрогеохимической съемки.

Зоны минерализаций наиболее часто прослеживаются по контактам интрузий и осадочных горных пород. Кроме того, особое внимание заслуживают зоны крупных тектонических нарушений. К ним в большинстве случаев бывают приурочены зоны различных минерализаций. Это подтверждается также результатами изучения металлоносности природных вод. Так, по данным гидрогеохимических исследований 1952—1953 гг., в Кузнецком Алатау, вдоль тектонической зоны от Брусничного плеса до ключа Крутого (на протяжении ~32 км), прослежена на отдельных участках зона минерализации.

Следовательно, при интерпретации результатов гидрогеохимических исследований необходимо увязывать их с тектоникой района. На участках с развитием покрова рыхлых отложений результаты гидрогеохимических исследований могут иногда быть использованы для прослеживания зон тектонических нарушений.

Данные гидрогеохимических исследований по содержанию и количеству специфических элементов в природных водах позволяют выделить в описываемом районе три резко отличных участка (рис. 1). Один из них в большинстве случаев характеризуется наличием полного комплекса

специфических элементов, встречаемых в потоках рассеяния зон минерализаций. Участок с неполным комплексом специфических элементов в водах выделен отдельно. Кроме того, выделен участок главным образом только с наличием отдельных тяжелых металлов, среди которых не встречено специфических элементов.

На первом участке, в зависимости от разнообразия ассоциаций тяжелых металлов в водах, выделены потоки рассеяния с вольфрамовой, оловянной и бериллиевой минерализацией. Всего на этом участке намечается семь потоков рассеяния: один — с повышенным содержанием вольфрама, два — с повышенным содержанием олова и четыре — с повышенным содержанием бериллия.

Выявленные потоки рассеяния зон минерализаций требуют дальнейшего более детального их изучения.

Потоки рассеяния с повышенным содержанием олова расположены в верховьях р. Б. Лобачи (бассейн ручья Федюшкин ключ) и в среднем течении рек Увалистая, Собашникова.

В пределах потока рассеяния р. Б. Лобачи на площади ~ 30 км² отобрано 34 концентрата. В девяти из них встречено олово (рис. 1), причем в трех отмечено повышенное содержание его. Кларковое содержание олова в водах 0,00008 мг/л, а в точке 89 спектральный анализ концентрата показал наличие олова 0,002 мг/л.

Повышенное содержание Sn наблюдается не только в концентратах вод гранитов, но и в образцах породы. «Рудная» минерализация в гранитах характерна для олова и его спутников W и Bi. Кроме того, в гранитах отмечается также и «обогащенная» минерализация для мышьяка.

Таким образом, потоки рассеяния в водах гранитов подтверждаются и минерализацией горных пород.

В природных водах рассматриваемого участка из элементов индикаторов зон минерализации следует отметить Bi.

Шлиховая съемка, проведенная на этом участке, показывает повышенное содержание вольфрама.

Поток рассеяния на площади Шумиловского рудного узла, расположенного на водоразделе рек Куналей и Чикокон, охарактеризован по данным определения металлов в пробах природных вод, отобранных сотрудниками Шумиловского рудника. На схематической карте гидрогеохимического районирования он выделяется резко повышенным содержанием металлов в природных водах. Это может быть объяснено наличием здесь ряда оловянных и оловянно-вольфрамовых месторождений грейзенового типа, а также и россыпных месторождений олова.

Все концентраты участка характеризуются повышенным содержанием олова, которое в некоторых из них определяется — 0,007 мг/л. Кроме олова, встречаются специфические элементы. На всей площади Шумиловского рудного узла отмечается весьма повышенное содержание в воде Zn.

Для окончательной оценки металлогении рассматриваемой зоны минерализации необходимо провести гидрогеохимическую съемку.

Гидрогеохимические исследования показали неравномерное развитие специфических элементов в природных водах описываемого района Забайкалья. Так, в бассейне р. Куналей только 11% концентратов показали наличие этих элементов. Между тем в бассейне р. Асакан они были обнаружены в 46% концентратов. Такая резкая разница распространения их в водах обусловлена своеобразием геологического строения участков. На юге района пользуются более широким развитием интрузии гранитов и пегматитов, с которыми обычно бывают они связаны.

В результате гидрогеохимических исследований нами выделяются четыре потока рассеяния комплексной минерализации специфических

элементов. Один из них — в среднем течении р. Горначиха (бассейн р. Куналей) и три — в бассейне р. Асакан. Все потоки рассеяния этой минерализации, выделенные по содержанию металлов в природных водах, представляют интерес в отношении их дальнейшего гидрогеохимического изучения. Поэтому мы приведем для них более полное описание.

Минерализация в среднем течении р. Горначихи, по-видимому, связана с кислой мезозойской интрузией. В шлихах по р. Горначиха встречен шеелит, спектральный анализ горных пород показывает наличие Sn, Co и других.

Поток рассеяния на площади бассейна р. Баранчики, среднего и верхнего течения р. В. Подголенной (бассейн р. Асакан) также связан с гранитной мезозойской интрузией. Содержание специфических элементов почти во всех концентратах сравнительно высокое (тысячные доли мг/л). Такое содержание позволяет считать, что данный поток является наиболее перспективным из всех намечаемых для постановки дальнейших геолого-поисковых работ. В концентратах встречаются Sn, Ag, Ba и другие. На описываемой площади гравным образом пользуются распространением слабо кислые воды. Значение их рН равняется 6,4—6,8. Спектральный анализ коренных пород показывает наличие в них Sn, Co, Ba и других элементов. В шлифах обнаружен шеелит, касситерит и другие минералы.

Комплексная минерализация в природных водах отмечается в бассейне р. Антоновки (бассейн р. Асакан). Здесь установлена кислая интрузия, с которой, по-видимому, и связана эта минерализация. Общее содержание металлов в каждом концентрате — тысячные доли мг/л. Точек с резко повышенным содержанием металлов в природных водах не встречено. В водах обнаружены As, Sn, Ag, Ba и другие. В коренных породах, по данным спектрального анализа, установлено наличие Co и других специфических элементов. В шлихах обнаружен шеелит, рутил и другие минералы.

Для вод бассейна р. Антоновки рН равен 6,9—7,1 (нейтральный тип вод).

На гольце Асаканском и в верхнем течении р. Нижней Подголенной также выделяется поток рассеяния с комплексной минерализацией (бассейн р. Асакан). На склоне гольца были обнаружены глыбы мелкозернистого пегматита с кристаллами рудных минералов и жила его в коренном обнажении. Выход жилы наблюдается в стенках обрыва (кара). В основании его — небольшое озерко (диаметром около 200 м), в водах которого также обнаружена комплексная минерализация.

Приведенные данные гидрогеохимической съемки позволяют считать, что она уточняет и развивает некоторые вопросы геологии, геохимии и гидрогеологии района. Поэтому мы считаем, что гидрогеохимическая съемка найдет широкое признание в комплексе геологических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Госгеолиздат, 1957.
2. Смирнов С. С. Очерк металлогении Восточного Забайкалья. Госгеолиздат, 1944.
3. Удодов П. А., Онуфриёнок И. П., Кристалёв П. В. Химическая активность горных пород и минералов по отношению к ионам водорода. Опыт разработки гидрохимических методов поисков рудных месторождений. ОНТИ, Госгеолтехиздат, 1959.