

**РАЗВИТИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТПИ**

П. А. УДОДОВ, Н. М. РАССКАЗОВ, С. Л. ШВАРЦЕВ

Развитие науки в последнее время показывает, что некоторые вопросы в геологии требуют серьезных корректив. Особенно это остро чувствуется в отношении природных вод, к которым привыкли относиться весьма упрощенно. Многие положения ученых, относящиеся к подземным водам, носили умозрительный характер. А между тем роль подземных вод во многих геологических процессах является решающей. Вот что писал по этому поводу академик В. И. Вернадский: «Вода, образующая сплошь одну из земных геосфер — гидросферу, определяет всю химию земной коры в доступной нашему непосредственному изучению ее области. Химические реакции идут главным образом в водных растворах, жидких или парообразных, и свойства растворов обуславливают в главной мере течение вадозных и фреатических минералов. Они же определяют среду жизни».

Не менее велика роль подземных вод и в формировании месторождений полезных ископаемых. В работах академиков В. И. Вернадского и А. Е. Ферсмана была показана принципиальная возможность использования подземных вод в поисковых целях. Однако разработка этого вопроса тормозилась отсутствием надежных и достаточно чувствительных методов анализа подземных вод. Поэтому в 1951 г. в ТПИ на кафедре гидрогеологии была поставлена задача — разработать метод определения микрокомпонентов в природных водах, применимый для полевых условий. К этой работе была привлечена кафедра аналитической химии, что позволило уже в 1952 г. И. П. Онуфриенко и П. А. Удодову предложить принципиально новый метод анализа, основанный на осаждении микрокомпонентов с гидроокисью алюминия. Проверка метода в полевых условиях показала его надежность и достаточную чувствительность. Несколько позже была также усовершенствована методика спектрального анализа получаемых водных концентратов, что позволило одновременно определять в одной пробе в полевых условиях более 40 химических элементов. Разработанный метод анализа под названием «метода ТПИ» получил широкое распространение в СССР и за рубежом и дал толчок к разработке других аналогичных методов. Сейчас таких методов анализа существует несколько в Союзе.

Разработка метода изучения химического состава подземных вод позволила сотрудникам ТПИ начать планомерные исследования условий формирования водных потоков рассеяния зон минерализаций. Примерно в это же время аналогичная работа была начата во Всесоюзном

научно-исследовательском геологическом институте, Ленинградском университете, во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрогеологии и инженерной геологии, Геологическом институте АН Армянской ССР и некоторых научных организациях АН СССР.

В ТПИ в это время проводились исследования по выяснению условий применимости гидрогеохимического метода поисков в различных ландшафтных зонах и геологических условиях. Особое внимание было обращено на такие трудно доступные районы, как районы высокогорий, районы с развитием многолетнемерзлых пород, заболоченные районы и др. Одновременно в изучение включались все новые и новые виды месторождений полезных ископаемых. Если на первом этапе исследование водных потоков рассеяния проводилось только около сульфидных месторождений, как наиболее подверженных разрушению в условиях зоны гипергенеза, то уже начиная с 1957 г. в изучение были включены месторождения редких и рассеянных элементов.

Исследование условий формирования водных потоков рассеяния невозможно без выяснения роли отдельных факторов в миграции химических элементов в подземных водах. Поэтому в ТПИ эта работа была начата уже на первом этапе исследований. В результате этих работ была показана важная роль в миграции химических элементов активности горных пород и разработана методика ее определения, которая получила широкое признание в Союзе, выяснены отдельные моменты влияния сорбционной способности горных пород на миграцию химических элементов в водах, разработана методика режимных наблюдений при гидрогеохимических поисках и использования результатов при интерпретации полученных данных, предложен коэффициент для определения миграционной способности химических элементов и решены некоторые другие вопросы.

В результате гидрогеохимических исследований выяснилось, что обогащение подземных вод тяжелыми металлами происходит и в условиях восстановительной геохимической обстановки, где реакции окисления невозможны, что потребовало выяснения характера протекающих здесь процессов. В результате экспериментальных работ Н. М. Рассказовым было показано, что на мышьяковых месторождениях в обогащении подземных вод тяжелыми металлами в условиях восстановительной геохимической обстановки решающую роль играют процессы электрохимического растворения, известные ранее для сульфидных месторождений. Одновременно для этой же цели было начато изучение изотопного состава подземных вод.

Широкий размах исследований по разработке гидрогеохимического метода поисков позволил уже в 1960 г. провести в ТПИ первую Всесоюзную конференцию по этому вопросу, а в 1962 г. издать труды этой конференции и первую монографию «Опыт гидрогеохимических исследований в Сибири». Авторы этой монографии — П. А. Удодов, И. П. Онуфриенко и Ю. С. Париллов. В этой работе впервые в Союзе были подведены итоги разработки гидрогеохимического метода поисков и результаты его внедрения в производство. Эта монография сыграла важную роль для широкого внедрения метода в практику геолого-поисковых работ, что нашло отражение в соответствующих постановлениях Министерства геологии СССР и в «Инструкции по геохимического растворения, известные ранее для сульфидных месторождений в 1965 г.

Широкое внедрение метода в производство потребовало расширения работ по разработке поисков так называемых «слепых» рудных тел, что является одной из важнейших современных задач геологии в целом. Поэтому, начиная с 1963 г., проблемная геологическая лаборатория была полностью переключена на разработку этих вопросов.

Объектом исследований была выбрана Колывань-Томская погребенная складчатая зона. Этот регион, расположенный в центре промышленной части Западной Сибири, оставался весьма слабо изученным в связи с тем, что визуальные методы исследований не давали положительных результатов ввиду мощной толщи рыхлых образований. Гидрогеохимические исследования в этом регионе показали его перспективность на полиметаллические и другие полезные ископаемые и позволили выяснить ряд интересных моментов, помогающих обнаруживать скрытые рудные тела. В частности, П. А. Удодовым и В. М. Магусевичем разработана методика прослеживания зон тектонических нарушений по гидрогеохимическим данным, что является важным при картировании закрытых территорий. Результаты этих работ в настоящее время переданы геологическим организациям и обобщены в виде двух монографий, одна из которых опубликована в 1965 г., а вторая — в 1971 г.

Таким образом, в пределах крупного региона была подтверждена глубинность этого метода поисков, что делает его наиболее эффективным по сравнению с другими геохимическими методами.

Разработка методики поисков «слепых» рудных тел потребовала более углубленного изучения миграции химических элементов не только в подземных водах, но и в почвах и растениях, играющих исключительную роль в перераспределении химических элементов в биосфере. Эта работа в проблемной геологической лаборатории была начата уже в 1962 г. Частично результаты этих исследований были переданы Томскому совхозу, так как они помогают в оценке плодородия почв. В связи с этими работами встала необходимость детального изучения роли органического вещества почв, в частности гуматов, в миграции химических элементов в конкретных условиях. Идея о том, что роль органики исключительно велика в поведении многих металлов, высказывалась еще раньше некоторыми учеными, однако до сих пор этот вопрос остается неизученным. В проблемной лаборатории была разработана Р. С. Солодовниковой и др. методика выделения гуматов из различных природных объектов, дано их электронномикроскопическое описание и составлен атлас этих снимков.

Гуматы различных металлов имеют разнообразную форму, однако в нейтральной, слабощелочной и щелочной средах им присуща общность строения — листовидная форма, которая меняется от гумата к гумату в зависимости от металла (рис. 1). На этих рисунках показаны электронномикроскопические снимки природных гуматов, выделенных из природных вод, торфа, почв и горных пород.

Результаты этих исследований подтверждают:

1. Наличие соединений гуматов металлов в природных условиях.
2. Электронномикроскопические снимки дают некоторое представление о расположении частичек гуматов металлов, позволяют судить о них как о соединениях с определенной формой частиц, свойственных только этому типу соединений.
3. Дают возможность предполагать, какие из ионов металлов в природных условиях находятся в соединении с природным органическим веществом, что имеет важное значение при интерпретации результатов полевых гидрогеохимических исследований.

Таким образом, в результате многолетних исследований в ТПИ разработана методика гидрогеохимических поисков, включающая полевые исследования, методы анализа подземных вод, интерпретацию результатов работ, оценку выявленных аномалий с широким использованием методов математической статистики. Эта методика в виде отдельной работы передана Министерству геологии СССР для внедрения в производство. Результаты гидрогеохимических исследований ТПИ

в виде отдельных монографий, карт, схем и макетов демонстрировались на ВДНХ в 1965 г. и на советских выставках за рубежом.

Следует отметить, что разработка гидрогеохимического метода поисков в ТПИ ведется с первых дней в тесном содружестве с производственными организациями. Это позволяет внедрять результаты исследований непосредственно в производство и повышает эффективность геолого-поисковых работ.

Именно благодаря этому в результате гидрогеохимических работ и проверки выявленных аномалий научными сотрудниками проблемной лаборатории, кафедры гидрогеологии и их учениками выявлены следующие рудные месторождения и рудопроявления; медно-никелевое в районе г. Норильска, полиметаллические в Рудном Алтае и Кольвань-Томской складчатой зоне, молибденовое в Кузнецком Алатау, и др.

Параллельно с разработкой гидрогеохимического метода поисков в ТПИ впервые в Союзе была начата подготовка специалистов в этой обла-

сти, которые в настоящее время работают в различных производственных и научных организациях страны. Это, в свою очередь, потребовало создания специализированных курсов по гидрогеохимии.

Почти все освещенные выше вопросы относятся главным образом к поисковой гидрогеохимии. Между тем, опыт работ показывает, что гидрогеохимический метод может дать весьма большой производственный эффект не только при геолого-поисковых исследованиях, но также и при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Этап гидрогеохимических исследований при разведочных работах нами выделяется как разведочная гидрогеохимия. Используя результаты гидрогеохимических исследований, можно значительно уменьшить объем дорогостоящих разведочных и горных работ, сократить время освоения месторождения и сильно облегчить труд при эксплуатации. Однако методика полевых и камеральных работ, а также интерпретация полученных данных пока еще очень слабо разработаны.

Исследования в данном направлении не вышли еще из стадии разработки методики. Проводятся они различными организациями Министерства геологии, институтами АН СССР и вузами.

Сотрудники проблемной геологической лаборатории Томского политехнического института успешно выполняют подобные работы на Барановском полиметаллическом рудопроявлении. Это рудопроявление остается пока наиболее интересным в пределах Кольвань-Томской складчатой зоны. Решающую роль в его открытии сыграли поисковые гидрогеохимические исследования, выполненные сотрудниками ТПИ.

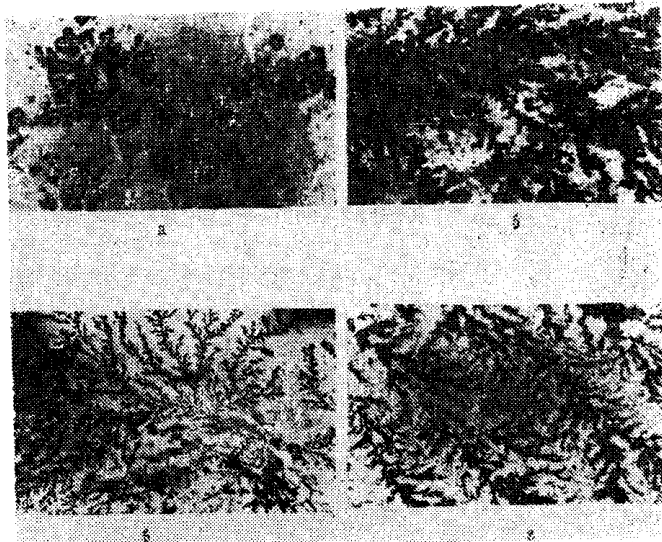


Рис. 1. Электронномикроскопические фотоснимки: а — сухого остатка исходного раствора соли марганца  $MnCl_2$ ; б — синтезированный гумат марганца; в — природный гумат марганца, выделенный из цирконо-ильменитового песка; г — природный гумат марганца, выделенный из травертина с микрокомпонентным составом Ва—0,03%; Мп—0,5%; С—1,25%

Буровые и разведочные работы, проведенные на участке выявленной гидрогеохимической аномалии, вскрыли свинцово-цинковую минерализацию. Однако полная оценка масштабов оруденения этими работами не была получена. Естественно, что дальнейшее направление разведочных работ должно базироваться на учете всех геологических и геохимических особенностей участка. Гидрогеохимические исследования, которые на данной стадии оценки участка рассматриваются как детальные, должны занимать ведущее положение. Это обусловлено тем, что район рудопроявления характеризуется развитием мощного покровя рыхлых отложений и обычно применяемые в практике разведочных работ методы здесь себя или не оправдывают, или являются дорогостоящими.

С целью расширения перспектив Барановского рудопроявления и определения мест заложения скважин, которые дали бы наибольший эффект при его разведке и проводились детальные гидрогеохимические работы. В ходе последних изучалась зональность водных потоков рассеяния и пространственное их соотношение с рудной минерализацией, а также определялась протяженность их относительно рудной зоны.

Наряду с этим устанавливалась роль процессов химического окисления и электрохимического растворения в вертикальной и горизонтальной зональности зоны минерализации.

Значительное внимание было уделено формированию солевых ореолов в почвах и в коре выветривания, а также изучению поровых растворов. При этом выяснялось влияние микробиологических процессов на обогащение вод микрокомпонентами.

В процессе обработки материалов устанавливались корреляционные связи между основными рудообразующими элементами и элементами-индикаторами в водных потоках рассеяния, зоне минерализации, первичном ореоле и рыхлых образованиях.

Для выяснения закономерностей формирования и развития водных потоков рассеяния в пределах Барановского рудопроявления помимо широкого использования гидрогеохимических методов в комплексе с другими (литохимическим, биогеохимическим и др.) осуществлялись следующие специальные исследования: изучение вторичных образований зоны окисления и новообразований на выходах подземных вод; опробование керна, шлама, промывочной жидкости, подземных вод в скважинах, режимные наблюдения на источниках, изучение в природных водах переходных форм серы, определение Eh и pH, газового и изотопного состава вод, органического вещества и микрофлоры и специфических элементов в природных водах.

По результатам исследований на Барановском участке построены гидрогеохимические карты, профили и графики с учетом модуля подземного стока, химического выноса микрокомпонентов, коэффициента миграции, режимного поправочного коэффициента, спектральных анализов горных пород, подземных вод, шлама и других геохимических данных. Полученные результаты позволили уточнить намечаемую зону минерализации и геологически обоснованно запроектировать объем разведочных работ. Исследования в области разведочной гидрогеохимии заслуживают, несомненно, дальнейшего развития.

В настоящее время намечается дальнейшее развитие гидрогеохимических исследований, которые ставят своей целью эксплуатацию рудных месторождений гидробиохимическим методом. Академик А. А. Имшенецкий пишет: «Ученые полагали, что геологические процессы, вызываемые микробами, протекают чрезвычайно медленно и подчинить их воле и разуму человека нереально. Однако исследования последних лет опровергли такое представление». В связи с этим новым направлением

исследований была организована в ТПИ в 1962 г. микробиологическая лаборатория.

Поворотным этапом внедрения в практику гидрогеохимических исследований геологической микробиологии у нас в Союзе можно считать выход в свет работы С. И. Кузнецова, М. В. Иванова и Н. Н. Ляликовой «Введение в геологическую микробиологию». Эта книга, как совершенно правильно отмечают авторы, ставит своей задачей определить роль микроорганизмов в геологических процессах и установить основные пути управления их геологической деятельностью.

Опыт наших исследований на площади Колывань-Томской складчатой зоны показал, что микроорганизмы необходимо изучать как в почвах, горных породах, так и в различных типах природных вод. Только при таком комплексном подходе представляется возможным изучить различные среды жизнедеятельности микроорганизмов.

Принятое нами направление исследований отвечает замечаниям Б. Б. Полюнова о том, что «...состав природных речных вод обуславливается не простыми абиотическими реакциями действия воды на минералы магматических пород, т. е. гидролизом и растворением, как это придумано в учебниках, а более сложным, хотя и более быстро текущим процессом извлечения элементов из минералов организмами и растворением в воде зольной части организмов при их минерализации».

При региональных гидрогеохимических исследованиях на площади Колывань-Томской зоны нами было опробовано большое количество различных типов вод. Однако наше внимание было сосредоточено главным образом на изучении микроорганизмов в подземных водах, связанных с породами коры выветривания песчано-глинистых сланцев. Эти породы характеризуются синевато-серой окраской, обусловленной присутствием органического вещества, тонко распыленных сульфидов железа и хлорита в цементе. Присутствие, по нашим анализам, в них сидерита и пирита указывает на преимущественно восстановительную обстановку, существовавшую в иловых водах. Дальнейшие геологические процессы выразились в складкообразовании и гидротермальной деятельности, которые привели к минерализации пород и вымыванию из них морских седиментационных вод и, по-видимому, захоронению вод инфильтрационного типа.

При изучении подземных вод на отдельных участках нами были встречены специфические типы вод, которые характеризуются низким значением рН (1,4—1,5), высокой минерализацией (152—166 г/л), по химическому составу сульфатно-железистые. Содержание закисного железа достигает 12,8 г/л и окисного — 35,9 г/л, сульфат-иона — 117,6 г/л, хлора — 0,039 г/л, органического вещества —  $C_{\text{общ}}$  — 0,573 г/л. Органическое вещество изучено в лаборатории ТПИ Р. С. Солодовниковой по электронномикроскопическим снимкам. Изучаемая вода, по данным В. Г. Иванова, характеризуется повышенным содержанием дейтерия (+1,9 ‰). Такое содержание обычно характерно для подземных вод седиментационного происхождения или капиллярной конденсации. Дальнейшее изучение этих вод с постановкой экспериментальных работ позволит внести ясность в данный вопрос. Анализ микрокомпонентного состава описываемых вод показал тысячные доли процента Mn, Zn, Ni, Cr, Ba, Co, Cu.

Эти воды, кроме того, были изучены В. А. Шамолиным в микробиологической лаборатории ТПИ в отношении состава микрофлоры и влияния ее на обогащение вод тяжелыми металлами. Микробиологический состав исследуемых вод изучен пока еще крайне слабо. Однако, по нашему мнению, микрофлора этого типа вод может дать наиболее важную и полную картину участия бактерий в геохимических процессах.

Исследования бактерий этих вод могут позволить по-новому оценить роль биологического фактора при геохимических изменениях горных пород в зоне гипергенеза, а также помочь в обнаружении новых видов микроорганизмов, участвующих в этих процессах. При подтверждении этих предположений, по-видимому, можно будет конкретно говорить и о преимущественном биогенном характере формирования микрокомпонентного состава подземных вод по следующей схеме: бактерии изучаемых вод, воздействуя на породу, переводят различные соединения в поровый раствор, откуда последние и поступают в свободную фильтрационную воду.

При микроскопировании культуры охарактеризованных выше вод, по данным В. А. Шамолина, обнаруживаются короткие неподвижные палочки размером около  $2 \times 0,7$  мк, иногда неправильной формы, часто соединенные в группы, окруженные слизистым образованием. Морфологически данный микроорганизм отличается от большинства описанных видов тионовых бактерий. Все это, а также приуроченность их к слабо изученной среде обитания, позволяет предполагать, что эта культура может являться либо новым видом бактерий, либо еще не известной модификацией уже описанных микроорганизмов группы тионовых, весьма видоизмененной в специфических условиях обитания.

Разумеется, эти предположения еще нуждаются в самой тщательной проверке путем дальнейшего выделения и исследования чистой культуры. Данная культура была использована в опытах с сульфидными рудами цинка, ртути, меди, свинца. С этими рудами проводились в лабораторных условиях опыты, в которых руды заливались питательной средой без добавления железа. Таким образом, бактерии были вынуждены использовать этот элемент непосредственно из минерала. Результаты одного из опытов представлены в табл. 1.

Бактериальная эмульсия была внесена только через 40 дней. Все это время процесс выщелачивания металлов шел только химическим путем. Через 35 дней воздействия бактерий на руды в раствор перешло на 2—3 порядка больше металла, чем при окислении без микробов.

Как видно из табл. 1, почти все основные компоненты руд переходят в раствор. Исключение составляет ртуть. По-видимому, взятая концентрация ртутных соединений оказывает токсическое действие на бактерии.

Перспективность гидробиохимического метода заключается главным образом в том, что он может быть применен, как показали исследования, за рубежом и в СССР для добычи многих металлов, редких элементов и обогащения различных концентратов. Высокая экономическая эффективность его не вызывает сомнений.

Все освещенные выше вопросы используются при разработке целого ряда теоретических положений гидрогеохимии, которая быстро развивается в последнее время. Это развитие в значительной степени обусловлено внедрением гидрогеохимических исследований в практику геологических работ различными организациями, в том числе и Томским политехническим институтом.

С другой стороны, все глубже выясняется огромная роль природных вод во всех геологических процессах. При этом большое внимание уделяется не только их составу, но и структурным особенностям.

Так, по мнению А. М. Блоха, «следует ожидать, что модель жидкой воды М. Аджено и вытекающие из нее выводы можно с успехом использовать для разрешения многих геологических проблем».

Несомненно, что дальнейшее развитие работ в области гидрогеохимии будет способствовать более полному раскрытию основных геологических закономерностей и использованию их в решении практических задач.

Таблица 1

## Окисление сульфидных руд в зависимости от наличия бактерий

Процесс окисления	Продолжительность опыта (сутки)	Руда	Содержание металлов в растворе в мг/л			
			Медь	Цинк	Свинец	Ртуть
Без введения бактерий (химическое и электрохимическое окисление)	1	Халькопирит	0,3			
		Сфалерит	0,05			
		Галенит	0,2			
		Киноварь	0,02			
	14	Халькопирит	0,4			
		Сфалерит	0,1			
		Галенит	0,1			
		Киноварь	0,2			
	40	Халькопирит	7,0			
Сфалерит		1,1				
Галенит		0,2				
Киноварь		0,2				
В присутствии бактерий	35		Медь	Цинк	Свинец	Ртуть
		Халькопирит	2400	475	539	н/обн
		Сфалерит	300	320	593	н/обн
		Галенит	200	241	485	н/обн
		Киноварь	800	71,2	377	0,01

Содержание суммы металлов (Zn+Pb+Cu) по дитизону