

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТРАВЕРТИНООБРАЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА Р.ТУГОЯКОВКА)

Петрова О.Е., Копылова Ю.Г., Мартынова Т.Е.

Рассмотрена распространенность травертинов - известковых туфов в окрестностях г. Томска и некоторых других регионах. Изучена связь их с местами разгрузки вод зон разрывных нарушений. Приведены результаты исследования химического состава родников, отлагающих травертины в бассейне р. Тугояковка. Оценено физико-химическое равновесие вод с карбонатными минералами как причина вторичного минералообразования. Изучены минерало-петрографические особенности состава травертинов и дана характеристика подвижности химических элементов в условиях карбонатообразования при формировании начального этапа щелочного карбонатно-кальциевого геохимического типа вод.

Постановка вопроса

В водах зоны гипергенеза выделяется несколько стадий взаимодействия воды с горными породами, сопровождающихся вторичным минералообразованием: оксидов и гидроксидов металлов, глин, карбонатов и других соединений. В гумидном климате на литогенном этапе эволюции химического состава подземных вод в результате неравновесного состояния с карбонатными породами происходит формирование гидрокарбонатных кальциевых вод, обогащенных углекислым газом. Изменение термодинамических условий при выходе вод на дневную поверхность приводит к увеличению щелочности. На создающемся геохимическом барьере осаждаются минеральные фазы, среди которых наибольший интерес представляют известковые туфы (травертины). Актуальность исследований связана с вопросами формирования щелочного карбонатно-кальциевого геохимического типа вод по С.Л Шварцеву. [20], который возникает при взаимодействии воды с карбонатно-терригенными породами и органическим веществом и характеризуется осаждением из вод травертинов. Интерес представляет изучение подвижности химических элементов в водной геохимической среде, контролирующей процесс травертинообразования.

Из истории изучения травертинов

Травертины – известковые туфы хемогенного происхождения. Они являются производными обогащенных углекислотой вод различной температуры. Широко известны образования углекислых термальных вод в Исландии, Турции, Горном Алтае, в Забайкалье и на Камчатке. Широкое развитие травертинов известно на северном Кавказе: в Пятигорске, Железноводске, Ессентуках, в районе кисловодского Нарзана, на лакколитах Юца, Лысая, Бык, частично на горах Развалка, Змеевая, Бештау (Мушкетов, 1887, Макаренко, 1949).

Изучению травертинов Пятигорска большое внимание уделил И. В. Мушкетов (1887), который увязывал их развитие с тектоническими процессами района. И. В. Мушкетов выделил древние и молодые травертины на Машуке и считал, что накопление древних травертинов связано с северо-западными, более древними, по его мнению, региональными нарушениями геологических образований в районе, а накопление молодых связывал с развитием северо-восточных трещин, по его мнению, самых поздних. Исследования Ф.П. Макаренко [14] показали, однако, что господствующими на Машуке и всегда

более крупными являются северо-восточные трещины. С ними же в основном связаны жилы кальцита и проявления травертиновых покровов, в свою очередь, связанных с основными полукольцевыми тектоническими разломами Машука. Именно по этим разломам и поднимались вверх потоки сероводородных вод, отложившие травертины.

Интересные отложения травертинов зафиксированы группой ученых (Б.И.Писарский, А.А.Конов, К.Г.Леви, Д.Дельво) при экспедиционных работах в 1993 г. в западной ветви Восточно-Африканской рифтовой системы [15]. В бассейне р.Сонгве ими установлена группа термальных (60-75⁰С) источников углекислых щелочных кремнистых карбонатно-гидрокарбонатных вод с минерализацией 3,3-3,4 г/л, что позволяет их отнести к солоноватым. Их особенностью является очень низкая концентрация кальция и магния и повышенное содержание хлора и сульфата, хотя в составе отложившихся из этих растворов травертинов кальцит и магний являются преобладающими компонентами.

Из термальных вод отлагаются травертины оригинального состава, весьма обогащенные стронцием. Стронций в основном входит в состав кальцита, арагонита и стронцианита. При этом арагонит и стронцианит образуют непрерывный изоморфный ряд в том интервале, где ранее в природе не наблюдался. Также в отложениях отмечается значительное количество соды (троны).

Проявления данных вод контролируются краевым разломом рифтового grabena Рукве и тяготеют к мезозойскому карбонатитовому массиву Панда Хил. Отложения травертинов в этом районе рассматривается авторами как результат гидротермальной деятельности, связанной с неоген-четвертичной стадией вулканизма при уже сложившейся современной гидросети. Измеренная мощность достигает 80 м., т.е. их общий объем огромен. Происхождение гидротерм Б.И.Писарский и другие исследователи связывают с значительным участием магматических флюидов, порождаемых магматическим очагом щелочно-карбонатного типа, привносящий стронций и ряд других компонентов (Ca, Mg, Li, Rb) [15].

На Юго-Восточном Алтае скопления травертинов впервые были отмечены А.С.Мухиным в 1936 г. Позже они были установлены вдоль подножия Шапшальского и Северо-Чуйского хребтов на Южном и Рудном Алтае. В.В.Бутвиловским [4] тела травертинов были найдены на склонах Телецкого озера, в долине Чулышмана, Чибитки, в среднем течении Р.Катунь, в Курайской, Чуйской впадинах вдоль хребтов Чихачева, Айгулакского. Г.Г.Русановым (1988) открыты еще 5 месторождений травертинов в Курайско-Чуйском районе. Географически тела травертинов приурочены к зонам активизированных разломов, строго к каналам, подводящим гидротермы. Тела травертинов, как правило пластовые, представлены щебнисто-глыбовыми, галечно-валунными, гравийно-песчаными брекчиями, конгломератами, литифицированными серым, светло-серым, желто-бурым арагонит-кальцитовым цементом, составляющим 26-60% объема толщ, пористым и монолитным.

В.В.Бутвиловский (1993) образование травертинов Алтая связывает с фазами деградации оледенения в период кайнозойской тектонической активизации. Тектонические деформации сопровождались гидротермальным процессом, приводящим к образованию травертинов. Процесс выделения гидротерм, несомненно, оказывал влияние не только на оттайку мерзлоты, но и на таяние ледников и ход деградации оледенений. Активизация потока гидротерм из зон подвижных разломов фиксируется травертинизацией и образованием гидротер-

мального карста. Травертины представляют собой тела с коллювиальным матриксом, т.к. наиболее интенсивно коллювиальное осыпание шло сразу после освобождения склонов ото льда. Спектральный анализ цемента травертинов этого типа показал повышенное содержание Ag, Hg, Co, Mn, Zn, Sr, Ni, Fe, что резко отличает эти образования от их органогенных аналогов межледникового периода, которые зачастую бывают стерильнее обычных известняков [4].

В Западно-Сибирском регионе в современных условиях наблюдается образование травертинов из родников в Кузнецком Алатау, на Салаире и Колывань-Томской складчатой зоне [16, 18, 21].

Уникальными по своей природе являются Таловские известковые чаши, расположенные в 40 км к юго-востоку от г. Томска в верховьях р.Басандайка в северной части Колывань-Томской зоны. Первые сведения об этом удивительном творении природы приводит А.М. Зайцев в 1895 г [6], а позже в водах окрестностей Томска профессором П.П.Орловым, который занимался этим вопросом с 1904 г, была установлена повышенная радиоактивность. В 1911 г. им был найден вблизи д. Заварзино небольшой ключ, с заметным содержанием извести, т.к. вокруг него можно было наблюдать отложения известкового туфа. Анализ ключевой воды был произведен фармацевтом Смирновым в 1914 г.

Летом 1924 г. по предложению профессора М.Г. Курлова и по поручению директора Физико-терапевтического института доктора Штамова М.П. Орлова [9] исследовала этот и еще второй известковый ключ, находящийся близ с. Петухова. Источник этот известен под названием "Чаша". Данный источник представляет собой ряд водоемов (всего пять), сообщающихся между собой, залегающих в известковых туфах, отложенных ими, с постепенно падающей высотой уровня воды, так что разность уровней между первой и пятой "Чашей" около двух аршин (142 см). Известковый туф образует вокруг источника естественный барьер, высотой у первой "Чаша" около полуаршина (30-40 см). По размерам самой большой является вторая "Чаша", площадь ее около 2,5 квадратных саженей (5,3 м²). Подобные водоемы, но меньших размеров, встараются и в других местах недалеко от главных "Чаш". Выход источника замечен на дне второй "Чаша", на глубине 2 аршина 3 вершины (1,7 м). Дебит его, определенный приблизительно, по скорости наполнения ведра через желоб, около 3900 литров в сутки. Ключ зимой не замерзает и температура его довольно постоянна - 4-5⁰С. Вода прозрачная, приятная на вкус, без запаха. При стоянии выпадает буроватый осадок, в котором качественными пробами обнаружено присутствие Ca, Mg, Mn и CO₃.

Общий химический состав вод чаши Удивительной, 1924 (Орлова) Таблица 1.

год	T, °C	pH	мг/л								
			CO ₂	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe _{общ}	SiO ₃ ⁻
1924	5	7	219	Следы	589.1	46.6	5.9	156.5	21	0.07	9

Анализ воды был произведен М.П. Орловой осенью того же 1924 г (табл.1). Таким образом, вода этого источника является слабоминерализованной с содержанием, главным образом, кальциевых солей с повышенной радиоактивностью. Считалось, что между коллоидным состоянием солей в растворе и их диссоциацией и радиоактивностью существует соотношение, благодаря чему, по мнению некоторых авторов, известь в минеральных источниках находится в состоянии высшей усвояемости и активности. Применение радио-

активных источников для бальнеологических целей, как описывает М.П. Орлова, в то время в Западной Европе достигло полного развития [9], что придавало практический интерес их изучению.

Значительное содержание в воде кремневой кислоты, отложение водой больших количеств известковых туфов, постоянная температура и повышенная радиоактивность воды могут служить, как предполагает М.П. Орлова, указанием на то, что источник этот глубинный. По дебиту и содержанию солей он стоит на 1-ом месте среди источников окрестностей Томска [9]. Другую, отличную от мнения М.П. Орловой, схему образования травертинов приводит Г.А. Иванкин [7]: «...атмосферные воды, просачиваясь сквозь толщу лессовидных суглинков, обогащаются карбонатом кальция и железом. На глубине 10 м. давление горной массы составляет около 3 атм. Повышенное давление является причиной высокого содержания углекислого газа в воде, а также повышенных способностей воды удерживать в растворенном состоянии карбонат кальция. Тонкодисперсные отложения, перемываемые временными потоками, формируют своеобразный водоупорный слой в нижней части и у подножия склона долины. Базисом дренажа здесь является уровень воды в ручьях – тальвег долины. Грунтовые воды, перемещаясь от водораздела долины у их места выхода, теряют углекислый газ, что обуславливает выпадение карбоната в осадок. Упомянутый выше пролювиальный слой обуславливает появление здесь восходящих источников...».

В настоящее время наиболее крупная травертиновая чаша, заполненная водой, площадью 2 м², высотой около 1 м.; толщина её стенок 20-30 см. (чаша “Удивительная”). Источник приурочен к толще четвертичных отложений, представленных лессовидными суглинками. Дебит источника – около 1 л/с, температура воды - 5⁰С. В непосредственной близости от описанного источника находятся чаши меньшего размера (не более полуметра при высоте 10-20 см) и причудливой формы (чаши “Змейка” и “Коварная”).

Изучение минералогического состава показало, что кроме карбоната кальция и гидроксида железа, в травертиновой постройке Таловской чаши отмечается водный оксид марганца – бернессит, исследование которого выполнил В.А.Баженов [1]. Образование этого минерала происходит из холодных слабоминерализованных вод в нейтральных или слабощелочных условиях.

Многообразие геологических условий образования травертинов, обуславливает различные источники кальция в глубинных водах, причины обогащения этих вод кальцием, а также глубинность этих растворов. В зависимости от литологического состава вмещающих толщ, в которых циркулируют углекислые воды, осажденные из них травертины разделяются на несколько групп: поля травертинов на карбонатных отложениях карбонатно-сульфатного комплекса, травертины на глинистых и терригенных отложениях, травертины на метаморфических и интрузивных породах, травертины на карбонатно-терригенных породах [2].

Геологические и гидрогеологические особенности изучаемого района
Основной тектонической структурой Томского района является Колывань-Томская складчатая зона. В пределах области зона получила название Томского прогиба (Матвеевская, 1969). Томский прогиб – восточная часть тектонического блока фундамента платформы, имеющую субмеридиональную ориентировку [5]. Данный район представляет собой крупный синклинирий на севере Колывань-Томской складчатой зоны. Он выполнен терригенными флишевыми отложениями девона – карбона, общей мощностью около 6 км

и протягивается в юго-западном направлении более чем на 100 км, уходя за пределы Томской области.

Район Томского прогиба характеризуется системой тектонических трещин западного и северо-западного простирания, к которым приурочены дайки “томских диабазов” и долины рек Тугояковка, Басандайка, Ушайка и Киргизка. К этой же системе разрывных нарушений приурочены холодные источники, образующие на выходах карбонатные травертины в долинах рек Басандайка и Тугояковка.

В пределах региона отмечается большое многообразие химических типов пресных вод по макро- и микро компонентному составу, по газовому, изотопному составу, содержанию органических кислот микрофлоры.

Подземные воды данной зоны подразделяются по условиям циркуляции на два типа [17]: порово-пластовый и трещинный. Порово-пластовый тип подземных вод приурочен к верхнему структурному этажу – рыхлому чехлу мезокайнозойских осадков. Трещинный тип развит в палеозойских породах нижнего структурного этажа – фундамента. Среди последних наибольший интерес представляют трещинные воды, связанные с зонами разрывных нарушений.

Воды зон разрывных нарушений отличаются от грунтовых трещинных вод более высокой минерализацией, спецификой газового состава, постоянным дебитом источников. Разгрузка вод на поверхности фиксируется обилием источников, отложениями карбонатных травертинов, гидроксидов железа и другими новообразованиями. Впервые принципы выделения вод зон разрывных нарушений установлены в Колывань-Томской складчатой зоне П.А.Удодовым и В.М.Матусевичем (1965) и ими же предложен термин “воды зон разрывных нарушений” [18]. Данные воды характеризуются сложным макро- и микрокомпонентным составом (что обусловлено условиями их питания, циркуляции и разгрузки), более высокой минерализацией (0.6-0.8 г/л), спецификой газового состава, постоянным дебитом источника и постоянной температуры (4-5⁰С). В целом, воды, отлагающие травертины, нейтрально и слабощелочные гидрокарбонатные, преимущественно кальциевые с различной долей магния и натрия и с высоким содержанием углекислого газа [17].

Гидрогеохимические особенности бассейна р.Тугояковка

В бассейне р. Тугояковка, правого притока р. Томь, расположен Ларинский заказник, являющийся излюбленным местом расположения детских эколого-туристических лагерей «Кедр» и «Горизонт». Водоемы р. Тугояковка используются для водоснабжения лагерей и расположения мест купания. Долина р. Тугояковка протянулась вдоль тектонического разлома и сопровождается многочисленными выходами подземных вод. Исследования химического состава родников, отлагающих карбонатные травертины, проводились в процессе полевых работ 2001 г. студентами и сотрудниками ПНИЛ гидрогеохимии Института геологии и нефтегазового дела ТПУ и студентами ТПУ под руководством С.Л. Шварцева (рис.1).

Для изучения особенностей формирования химического состава вод и условий карбонатообразования нами исследовался широкий комплекс элементов в водах, травертинах с применением современных физико-химических методов анализа вещества. В период полевых исследований выполнялись определения неустойчивых компонентов в водах поверхностных источников подземных вод. Проведенные исследования позволили получить обширную информацию о распределении в изучаемых водах химических элементов, органических веществ и микрофлоры. Опробованы родники в правом борту р. Тугояковка

(4п, 2п, 7п) в бассейне р. Березовой (5п и 6п) и в бассейне р. Басандайка (9п- Таловская чаша "Удивительная").

Воды родников являются холодными с постоянной температурой 5⁰С, пресными с минерализацией от 300 до 612 мг/л, нейтральными и слабощелочными с рН от 6,8 до 8, умеренно жесткими и жесткими с общей жесткостью от 3,5 до 6,7, гидрокарбонатными кальциевыми с повышенным содержанием углекислоты. Содержание нормируемых компонентов, т.е. элементов, повышенные концентрации которых оказывают неблагоприятное физиологическое воздействие на организм человека, чаще всего не превышают их ПДК. Повышенное содержание кремния приближает данные источники к минеральным водам и позволяет рекомендовать их для питьевых целей. Кроме того, во всех источниках имеется закисное железо, столь необходимое для лечения больных анемией.

Химический состав подземных вод очень близок составу речных вод в р. Тугояковка, что подтверждает преимущественно подземное ее питание (табл.2).

Таблица 2.

Средние содержания химических элементов в природных водах бассейна реки Тугояковка

Компонент	Содержание		Компонент	Содержание	
	в реке	в подземных водах		в реке	в подземных водах
Мин-ция, мг/л	482	400	Cl ⁻ , мг/л	2,5	0,61
рН	8,5	7,2	PO ₄ ⁻³ , мг/л	0,086	0,07
Об.ж., мг-экв/л	5,5	4,6	F ⁻ , мг/л	0,33	0,3
NH ₄ ⁺ , мг/л	0,23	0,58	Al, мг/л	0,3	0,12
NO ₂ ⁻ , мг/л	0,2	0,03	Si, мг/л	6,14	6,8
NO ₃ ⁻ , мг/л	8,38	3,8	Li, мг/л	0,01	0,0064
Fe ⁰⁶ , мг/л	0,42	0,1	Pb, мкг/л	0,49	0,5
Ca ²⁺ , мг/л	87,9	73,4	Cu, мкг/л	1,21	0,1
Mg ²⁺ , мг/л	13,6	5	Zn, мкг/л	11,71	2,8
Na ⁺ , мг/л	9,15	8,1	Cd, мкг/л	0,1	0,1
K ⁺ , мг/л	1,08	0,69	Bi, мкг/л	0,008	0,0002
HCO ₃ ⁻ , мг/л	353,2	298	Hg, мкг/л	0,0899	0,119
SO ₄ ²⁻ , мг/л	4,21	4,7	Co, мкг/л	0,38	0,3
			Число анализов	10	9

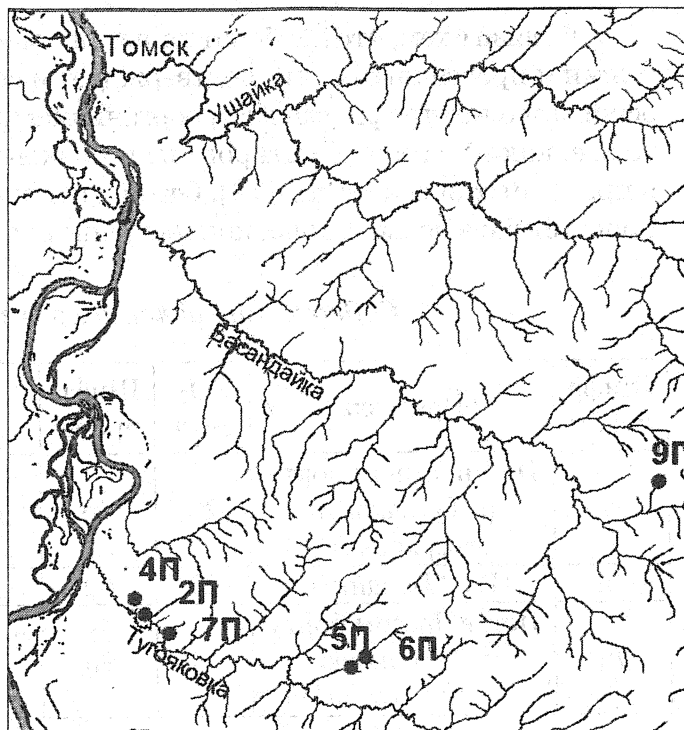


Рис.1. Схема расположения изучаемых источников р.Тугояковка

В связи с тем, что карбонат кальция – мощный коагулятор, воды являются чистыми и прозрачными, что подтверждает и состав микрофлоры, представленной в основном олиготрофными микроорганизмами (78% от общего числа бактерий), которые, как известно, адаптированы к низкому содержанию органических веществ в природных экосистемах [12]. Отличительной особенностью состава вод является присутствие в повышенных концентрациях свободной углекислоты (табл. 3).

Таблица 3.

Содержание углекислого газа в источниках

Шифр пробы	Привязка	СО ₂ , мг/л	Шифр пробы	Привязка	СО ₂ , мг/л
2п	Ист. в правом борту р. Тугояковка (верховье)	20	5п	Ист. в прав. борту р.Березовка	114
4п	Ист “Звездный”	39	6п	Ист. в лев. борту р.Березовка	69
7п	Ист. в правом борту р. Тугояковка (среднее течение)	114	9п	Таловская чаша “Удивительная”, верховье р.Басандайка	118

Углекислый газ является продуктом биохимических процессов, в том числе и жизнедеятельности многих микроорганизмов, и имеет важное геохимическое значение, так как определяет карбонатное равновесие природных вод. В целом, для данных вод выявилась следующая закономерность: с увеличением числа бактерий содержание углекислого газа (также как и гидрокарбонат-иона и кальция) уменьшается. Это происходит потому, что, микроорганизмы, выделяя углекислый газ, способствуют обогащению вод гидрокарбонат-ионом, который связывается с кальцием при осаждении травертинов, это приводит к уменьшению их концентраций в растворе. Кроме того потребителями бактериального СО₂ являются автотрофные микроорганизмы.

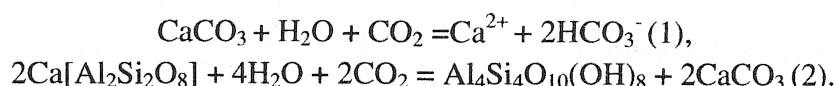
Выходы изучаемых источников наблюдаются либо на склонах бортов рек, где они вытекают из карстообразных пещер и, образуя небольшие водопады, впадают в р. Тугояковка (например, родник «Звездный»), либо на выровненных возвышенных площадках (высоких цоколях верхнечетвертичной надпойменной террасы реки), где они локализируются в виде чаш. Все это создает удивительной красоты ландшафт Ларинского заказника. И наша задача сохранить этот экологически чистый уголок природы среди постоянно испытывающих антропогенное воздействие городских и близ лежащих территорий.

Источники химических элементов в водах. Равновесие их с карбонатными и алюмосиликатными породами

Травертины образуются в связи с быстрым уменьшением давления и раздробленностью струй воды, когда происходит потеря углекислоты в воде и других газов и поглощение водой атмосферного кислорода, при увеличении температуры холодной воды. Такого типа проявления барьер назван А.И. Перельманом термодинамическим барьером [10].

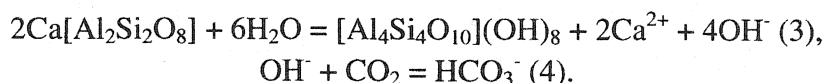
Источником кальция в воде являются дренируемые породы. На участке исследований наблюдается переслаивание по площади карбонатно-алюмосиликатных и алюмосиликатных пород, представленных басандайской и лагерносадской толщами, турнейским ярусом, юргинской и пачинской свитами. В

общем случае с запада на восток карбонатность увеличивается (от устья к истоку р. Тугояковка). При этом выходы изучаемых источников в основном приурочены к турнейскому ярусу, лишь источники Таловских чаш, относящиеся к бассейну р. Басандайка, разгружаются из пород пачинской свиты. Турнейский ярус и пачинская свита сложены глинистыми сланцами с прослоями песчаников, алевролитов, известняков и мергелей. Образование кальцита связано с разрушением карбонатных и алюмосиликатных пород и может быть прослежено по следующим реакциям:



Как видно, разрушение исходных пород идет при активном участии углекислого газа, который, как считает С.Л. Шварцев (1998), имеет биогенное происхождение. Это подтверждается и результатами изотопного состава углерода в воде, проведенного Н.Л. Падалко в изотопной лаборатории ТО СНИИГ-ГиМС, и показавшего, что $\delta^{13}\text{C}$ колеблется от -18 до -26 ‰, что указывает на биогенный источник.

Благодаря присутствию углекислого газа нейтрализуется щелочность, которая образуется в процессе гидролиза при диссоциации воды. В этой связи реакцию (2) можно представить в два этапа:



Таким образом, происхождение кальцита является гидрогенно-биогенно-литогенным, поскольку он связан с конечным продуктом минерализации органического вещества CO_2 , продуктом диссоциации воды OH^- и процессами взаимодействия воды с горной породой.

Для выяснения причин, приводящих к выпадению травертинов из вод источников, отбор проб воды производился в двух местах: непосредственно у выхода источника и в месте образования травертинов, которое, как правило, располагается в нескольких метрах ниже по течению. При изучении особенностей процессов вторичного карбонатообразования нами использован параметр насыщенности вод относительно карбоната кальция - индекс неравновесности А (по терминологии В.П. Зверева), который равен натуральному логарифму отношения константы равновесия и произведения активности ('квотанта') реакции осаждения минерала из раствора. Исследования характера равновесия вод с карбонатами показали, что воды находятся в состоянии равновесия к кальциту у выхода вод и дости-

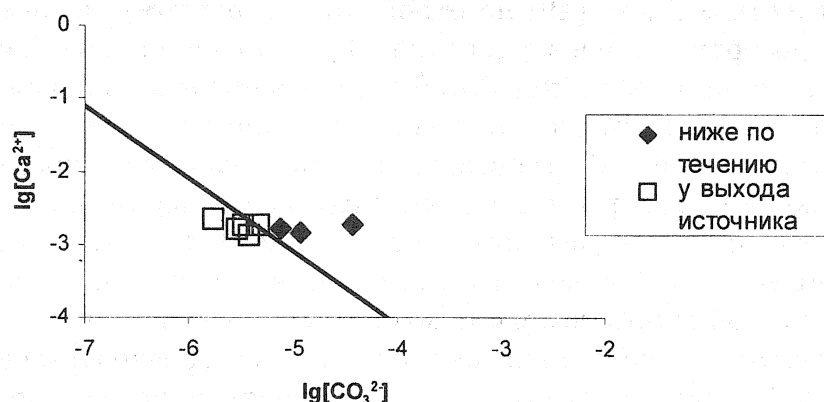


Рис.2. Насыщенность подземных вод относительно кальция при температуре 10°C

гаются их пересыщение ниже по течению ручья по мере изменения термодинамических параметров (уменьшения свободной углекислоты, повышения температуры и рН вод) (рис.2) и происходит вторичное минералообразование.

Изучение характера равновесия воды с алюмосиликатными горными породами на основе анализа полей устойчивости показало, что воды у выхода источника равновесны к каолиниту, но уже через несколько метров от выхода становятся равновесными к Са-монтмориллониту и кальциту, благодаря формирующейся повышенной щелочности. Здесь же отлагаются и травертины [13].

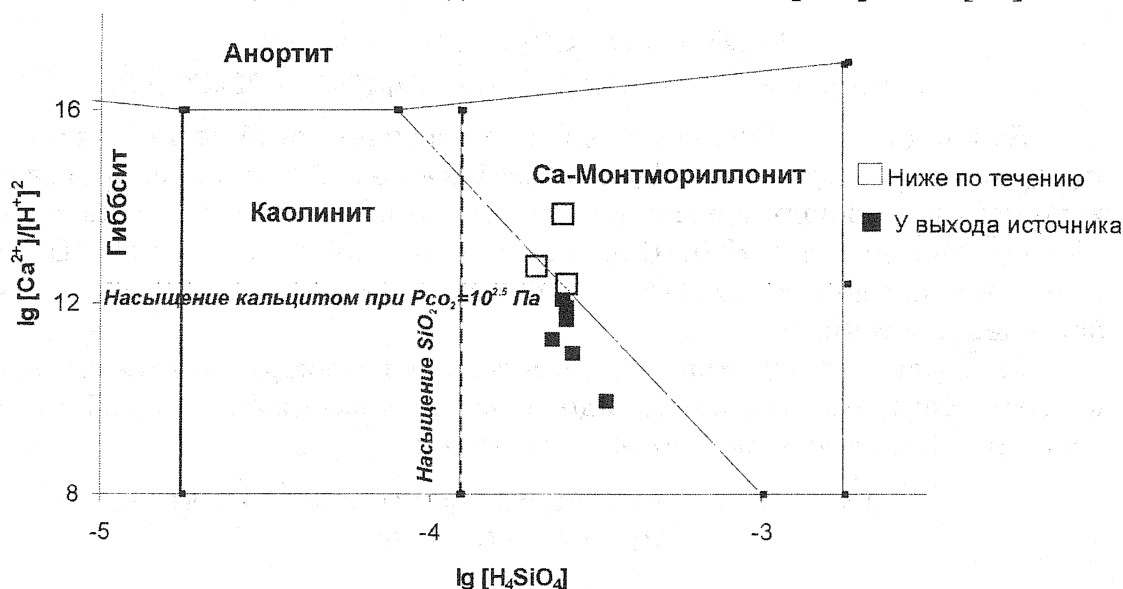


Рис.3. Система $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2$ при $25^\circ C$ с нанесением данных по составу вод источников бассейна рр. Тугояковка и Басандайка

Минералого-петрографические особенности состава травертинов

Травертины на склонах обычно осаждаются из источников подземных вод на некотором расстоянии от выхода, имеют невыдержанную протяженность и небольшую мощность (2-5 см). На выровненных площадках они формируются вокруг источников, сразу у выхода. Это прочные и пористые (повторяют структуру мха) породы. Для Тугояковки, как показали наши исследования, характерны однородные (без слоистости и вкраплений) микрозернистые травертины светло-коричневого цвета. Лишь на р. Березовка (правый приток р. Тугояковка) отмечены черные хрупкие землистые травертины (на правом борту) и ржаво-бурые (содержание железа в воде около 20 мг/л) средней прочности травертины (на левом).

По классификации Ю.В. Уткина [19] по отношению к водному потоку преимущественным распространением в верховьях р. Тугояковка пользуются травертины медленного течения источников (5п, 6п, 9п) и в низовье - каскадные, учитывая характер ступенчатого стекания воды по склону (2п, 4п, 7п). Основное место образования изучаемых травертинов (2-ой классификационный признак) - это отложение их на растениях, находящихся в позиции роста. По морфологии инкрустируемых растений (3-ий признак) тугояковские травертины являются типичными моховыми и отличаются только степенью пористости в связи с различной скоростью роста мха. Так, травертины источника "Звездного" представляют собой легкие, сильно пористые образования с выраженной верхней зоной "окаменелого мха", где карбонатные псевдомор-

фозы полностью повторяют форму и структуру мохового покрова. Такая тонкая инкрустация быстро растущих растений стала возможной благодаря осаждению карбоната из водяной пыли, возникающей при ступенчатом стекании потока. Моховые травертины Таловских чаш и чаш бассейна р. Тугояковка (5п, 6п) менее пористые и осаждаются непосредственно из воды. По морфологии построек (4-ый признак) выделяют каскады, покровные (5п и 6п) и бугры с крутыми склонами (“Удивительная”). Некоторая часть травертиновых отложений морфологически не оформлена, что объясняется, с одной стороны, молодостью этих геологических объектов, а с другой – их хрупкостью и подверженностью к саморазрушению (табл. 4).

При изучении травертинов в шлифах были отмечены следующие закономерности [11].

Травертины при образовании слагаются большей частью не кальцитом (как это указывается в литературе), а арагонитом, представляющим собой главным образом псевдоморфозы по растительным остаткам и мхам. Цемент, как правило, крустификационный, поровый или базальтовый, сложен тонкозернистым арагонитом, переслаиваемым с большим количеством такого же тонкодисперсного глинистого материала, не поддающегося диагностике. Поры травертинов заращаются карбонатно-глинисто-кремнистым материалом. Кремнезем представлен в виде аморфного опала. Со временем в травертинах создаются зоны уплотнения и аморфный кремнезем кристаллизуется в кварц, а арагонит - в кальцит. Проявляются ромбодрическая формы кристаллов (новообразованного кальцита) с явным двойникованием. Двойникование кальцита хорошо заметно и в порах отложений. Растительные остатки представлены чаще всего мхом, иногда встречаются и древесные остатки (табл. 4).

Наличие арагонита подтверждается данными физико-химического моделирования состава вод на основе программы ЭВМ, входящей в состав программного комплекса М.Б.

Таблица 4.
Морфология и состав травертинов

Травертины низовья р.Тугояковки	Травертины верховья рек Тугояковки и Басандайки
<i>1. Текстура</i>	
плотная пористая	
<i>2. Структура</i>	
крустификационная базальная органогенная	
<i>3. По морфологии построек</i>	
каскады	слабо террасированные бугры с крутыми склонами конусовидные покровные
<i>4. По морфологии инкрустируемых растений</i>	
моховые инкрустации	
<i>5. По отношению к водному потоку</i>	
каскадные	медленного течения
<i>6. По месту образования и кластичности</i>	
моховые травертины, образованные по органике, находящейся в позиции роста кластичные травертины, образованные на растительных остатках	
<i>7. Минеральный состав</i>	
Тонкозернистый арагонитовый материал 80% Дендриты 5% Глинистый материал 10%	Тонкозернистый арагонитовый материал 50% Бернессит 25% Лимонит 15% Ожелезненные дендриты 5%
<u>Поры выполнены:</u> Кремнисто-кальцито-глинистым материалом	

Букаты HydrGeo [3]. В изучаемую систему включено около 30 минералов. Для оценки степени насыщения раствора относительно каждого из минералов используется параметр насыщенности (индекс неравновесности), натуральный логарифм отношения константы равновесия и произведения активности ('квотанта') реакции осаждения минерала из раствора. На момент опробования воды источников по результатам моделирования откладываются следующие минералы.

Воды у выхода вод недонасыщены относительно арагонита и достигается их пересыщение ниже по течению ручья по мере изменения термодинамических параметров (уменьшения свободной углекислоты, повышения температуры и pH вод). Именно в этих местах и отмечается травертинообразование. В источнике 6п по результатам моделирования из вод выпадает сидерит, здесь наблюдается выход железистых вод (содержание железа в воде около 20 мг/л). При этом в шлифах он не был зафиксирован. На всем протяжении течения воды равновесны относительно кварца и гиббсита.

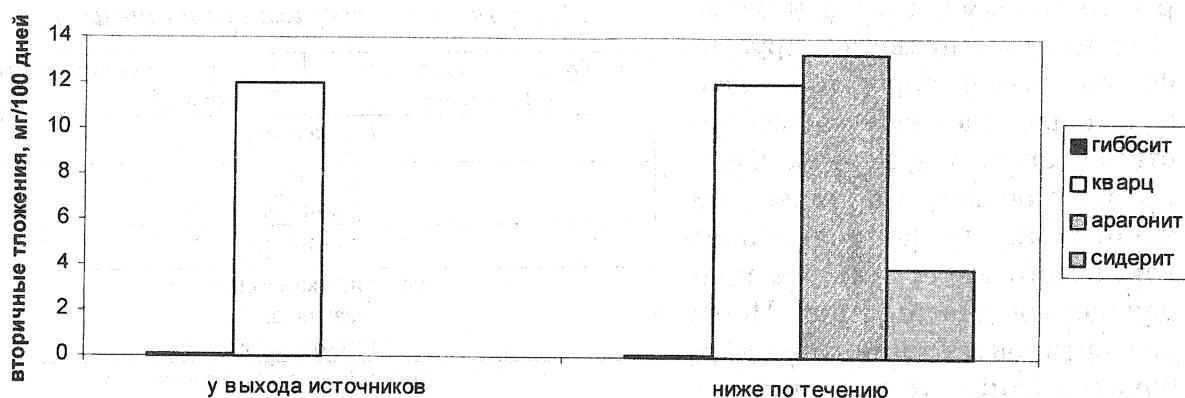


Рис. 4. Результаты физико-химического моделирования программного комплекса HydrGeo (средние значения по всем источникам)

При изучении в шлифах отмечается также наличие гидроксильных пленок железа (лимонита) и тонкодисперсных коллоидных образований водного окисла марганца (бернессита). Бернессит представляет собой черные землистые марганцевые образования в виде примазок, присыпок, гнезд и линз от долей мм до 5 мм. Железо-марганцевые разновидности травертинов приурочены к верховью рек Тугояковки и Басандайки. На данной площади распространены породы турнейского яруса C_1t и пачинской свиты D_2pc , в которых, между карбонатными и обломочными породами, имеются прослой черных сливных сидеритов.

Спектральный анализ травертинов, выполненный Н.И. Шердаковой в ПНИЛ гидрогеохимической, показал высокое содержание марганца в пробах травертинов и вод верховьях рек Басандайки и Тугояковки (0,1-0,7 % и 10-130 мкг/л соответственно), где и отмечаются повышенным содержанием бернессита, определяемым макроскопически.

По химическому составу отложения травертинов также разделяются на две группы. Так, травертины в низовье р. Тугояковки отличаются повышенным содержанием меди и хрома, в то время как травертины в верховьях рек Тугояковка и Басандайка содержат повышенное содержание кобальта (в 20 раз больше, чем в верховьях), марганца (в 30 раз), мышьяка, молибдена (табл. 5). Эта закономерность характерна и для подземных вод.

Таким образом, при общности текстурных и структурных свойств, тра-

Таблица 5.

Средний химический состав травертинов бассейна р.Тугояковка, %

	Mn	Ba	Sn	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cr	Mo	Ti
Низовье	0,015	0,1	0,0003	0,002	0,002	0,002	<0,001	<0,007	0,005	0,0003	0,02
Верховье	0,4			0,0005			0,02	0,009	<0,001	0,0005	

вертины бассейна р. Тугояковка подразделяются на две большие группы по двум признакам - различаются по минералогическому и химическому составу и по морфологии построек и отношению к водному потоку. В верховье отмечаются железо-марганцевые отложения травертин в виде чаш с характерным комплексом микрокомпонентов (Mn, Co, As, Mo). В низовье – типичные каскадные травертины с повышенным содержанием меди и хрома.

Подвижность химических элементов при карбонатообразовании

Отложение карбонатных травертинов способствует перераспределению химических элементов в зоне гипергенеза. Для оценки миграции химических элементов в процессах карбонатообразования в бассейне р. Тугояковки нами использованы коэффициенты водной миграции K_x (по А.И.Перельману, [10]) и геохимической подвижности K_{II} (по С.Л.Шварцеву, [20]). В основу расчетов положены данные нейтронно-активационного анализов травертинов, выполненного в лаборатории ядерно-геохимических исследований, и микрокомпонентного состава вод, выполненные в ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ. По данным коэффициентам составлены ряды миграции и геохимической подвижности элементов при карбонатообразовании (табл. 6 и 7).

Таблица 6.

Ряды миграции элементов

Интенсивность миграции	Коэффициент водной миграции K_x	Элементы
Очень сильная	>10	As, U
Сильная	1-10	Ca, Mg, Sr
Средняя	0,1-1	Na, Ba, Cu, Co, Cr, Mo, Sn, K, Fe,
Слабая	<0,1	Si, Ni, Ti, Mn

Таблица 7.

Ряды геохимической подвижности элементов

Интенсивность подвижности	Коэффициент геохимической подвижности K_{II}	Элементы
Очень сильная	>10	U
Сильная	1-10	Mg, Na, K, Sr, Cu
Средняя	0,1-1	Ca, Ba, Ni, As, Cr, Mo, Ti,
Слабая	<0,1	Sn, Fe, Co, Mn

Как следует из таблиц, хорошо переходят в раствор из горных пород и находятся в воде в данных условиях такие элементы как Ca, Na, K, Mg, Sr, а также анионогенные элементы: As, U, Mo и др. При этом, большинство из этих элементов, в частности U, Mg, Na, K, Sr, Cu, судя по коэффициенту геохимической подвижности, плохо связывается вторичными отложениями, что благоприятствует их миграции в водах.

Совместное проявление процессов миграции химических элементов (перехода элементов из горных пород в раствор и их удаление из раствора) можно представить в трех составляющих системы: основная порода – вода – вторичные отложения (табл. 8). Анализируя эту таблицу, можно условно выделить три группы элементов: элементы, склонные к накоплению в воде (Mg, Na, K, As, Mo, U, Br), элементы, склонные к осаждению (Ca, Hg, Fe, Mn, Ba, Co, Ti, Pb), и сквозные элементы (Ca, Sr, Cu, Si, Ni, Cr, Ce, La), т.е. находящиеся примерно в равных содержаниях и в воде и в травертинах.

Таблица 8.

Система первичная порода - вода - вторичные отложения

Элемент	Кларк в осадочной породае (по А.П.Виноградову), %	Содержание в воде относительно минерализации, %	Содержание в травертинах, %
Элементы, склонные к осаждению с травертинами			
Ca	2.53	17.5	38.2
Fe	3.33	0.07	1.39
Mn	0.067	0.002	0.15
Ba	0.08	0.019	0.05
Ti	0.45	0.000032	0.08
Pb	0.002	0.0003	0.001
Элементы, склонные к накоплению в воде			
Mg	1.34	3.2	0.41
Na	0.66	2	0.37
K	2.28	0.2	0.04
As	0.00066	0.015	0.008
Mo	0.0002	0.0025	0.0005
U	0.00032	0.0094	0.00042
Br	0.0006	0.0175	0.0047
Сквозные элементы			
Ni	0.0095	0.003	0.002
Cr	0.01	0.0064	0.004
Cu	0.0057	0.005	0.008
Sr	0.045	0.2	0.09
Ce	0.005	0.0012	0.0015
La	0.004	0.0012	0.005

Наиболее полно осаждаются в травертинах такие элементы как Hg, Mn, Fe, большая часть Pb, Co, Ag, Cu, что соответствует меньшими произведениями растворимости (ПР) карбонатов этих металлов по сравнению с кальцитом. Наличие бария в травертинах связано с близкими, хотя и несколько большими, по величине ПР. Однако осаждение микрокомпонентов в данном случае происходит по разным причинам, например, адсорбция, селективная сорбция, повышение pH вод и других причин. Примером могут служить Ni, Na, Zn, Mg, которые обнаружены в травертинах несмотря на сравнительно высокие показатели ПР [18].

Таким образом, данные воды не благоприятны для миграции большинства металлов, которые из них осаждаются в форме плохо растворимых гидроксидов и карбонатов. Аниогенные элементы (As, Mo, U, Br, J), напротив,

энергично мигрируют. При разложении органических веществ, здесь возникают угольная и органическая кислоты, которые полностью нейтрализуются группой OH^- , получающейся в процессе гидролиза алюмосиликатов. Повышение щелочности вод приводит к уменьшению растворимости карбонатов и, одновременно, достигается равновесие с монтмориллонитом и кальцитом. В результате этого формируется начальный этап щелочного гидрокарбонатно-кальциевого типа вод, на котором концентрируются в воде Na, Mg, K и специфический набор микрокомпонентов таких, как As, Mo, Br, Sr, Cr, U, Ni [13].

Заключение

Рассмотрена распространенность травертинов - известковых туфов в различных регионах и определена их приуроченность к зонам разрывных нарушений. В окрестностях г. Томска трещинные воды зон разрывных нарушений, отлагающие травертины, широко развиты в пределах Томского прогиба. В местах их разгрузки на поверхность в связи с повышением температуры, потерей водой углекислого газа и изменением кислотно-щелочных условий среды образуются известковые туфы (травертины).

Повышение щелочности вод приводит к уменьшению растворимости карбонатов, равновесию вод с монтмориллонитом и кальцитом и формированию щелочного карбонатно-кальциевого геохимического типа вод, на котором концентрируются в воде Na, Mg, K, а также As, Mo, Br, Sr, Cr, U, Ni и др. [13].

Изучение источников подземных вод в бассейне р. Тугояковка на территории Ларинского заказника Томской области показало, что воды относятся к чистым по всем показателям (химическим и микробиологическим). Очищению вод способствует процесс травертинообразования, поскольку вместе с вторичными карбонатами выпадает ряд вредных для здоровья компонентов.

Кристаллооптические методы исследования петрографических особенностей травертинов в бассейне рек Тугояковка и Басандайка показали, что травертины при образовании представлены большей частью не кальцитом (как это указывается в литературе), а арагонитом, что подтверждается и по данным физико-химического моделирования программного комплекса М.Б.Букаты на основе программы ЭВМ. Позже он кристаллизуется в кальцит, что отмечается в зонах уплотнения травертинов.

При общности текстурных и структурных свойств, травертины бассейна р. Тугояковка по классификации Ю.В.Уткина подразделяются на две большие группы, различающиеся по минералогическому и химическому составу, по морфологии построек и по отношению к водному потоку. В верховьях рек Тугояковка и Басандайка формируются травертины в виде чаш железо-марганцевого состава с характерным комплексом микрокомпонентов (Mn, Co, As, Mo). В низовье бассейна р. Тугояковка образуются каскадные травертины преимущественно кальцитового состава с повышенным содержанием меди и хрома.

Геохимическая среда карбонатообразования мало благоприятна для миграции большинства металлов, которые осаждаются из вод в форме плохо растворимых гидроокислов и карбонатов. Анионогенные элементы, напротив, энергично мигрируют. На основе анализа коэффициентов водной миграции и геохимической подвижности определены три группы химических элементов: склонные к накоплению в воде (Mg, Na, K, As, Mo, U, Br), к осаждению с травертинами (Ca, Hg, Fe, Mn, Ba, Co, Ti, Pb) и сквозные (Sr, Cu, Si, Ni, Cr, Ce, La), находящиеся в сравнимых количествах в воде и травертинах.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность профессору С.Л. Шварцеву за организацию научных исследований и консультации по проблемам взаимодействия системы вода-порода в условиях карбонатообразования, заведующей лабораторией ТО СНИИГГиМС, к.х.н. Н.Л. Падалко за проведение изотопного анализа травертинов и научные консультации. Особая признательность сотрудникам ПНИЛ гидрогеохимии учебно-научно-производственного центра «Вода» Института геологии и нефтегазового дела ТПУ за разработку и проведение количественного химического анализа вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов В.А., Соколова М.Ф. Бернессит в травертинах Томской области. // Вопросы генезиса эндогенных месторождений. Минералогия и геохимия. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. - вып. 7. - с. 157-163.
2. Байков А.А., Седлецкий В.И., Семенов Г.А. Травертины Северного Кавказа. - Геология рудных месторождений, 1983, №2, с. 57-63.
3. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтяной гидрогеологии. // Разведка и охрана недр. - 1997. - №2. - с.37-39.
4. Бутвиловский В.В. Палеогеография позднего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. - с. 155-159.
5. Врублевский В.А., Нагорский М.П., Рубцов А.Д., Эрвье Ю.Ю. Геологическое строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны. Томск: Изд-во ТГУ, 1987.
6. Зайцев А.М. Об отложениях известкового туфа около деревни Петухово // Труды Томского общества естествоиспытателей и врачей. Том 5, Томск, 1895.
7. Иванкин Г.А., Полиенко А.К., Вальд А.К., Захарова Т.В. Учебная геологическая практика в окрестностях г.Томска. - Томск: Изд.ТПУ, 1995. - 68 с.
8. Копылова Ю.Г., Лосева З.В., Дутова Е.М. К вопросу о выделении вод зон разрывных нарушений // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления. Тезисы III годичной конференции. Тюмень, 1982. - С. 116-117.
9. Орлова М.П. Некоторые известковые и радиоактивные источники окрестностей г. Томска // Изв. Томского гос. унив-та. - 1925. - т.76.
10. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. - М.: Недра, 1968.
11. Петрова О.Е. Минералого-петрографические особенности травертинов р.Тугояковка (Томская область)//Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Международного симпозиума. Томск: Изд-во НТЛ, 2002 (находится в печати).
12. Петрова О.Е. Микрофлора подземных вод бассейна р.Тугояковка как показатель эколого-геохимического состояния //Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Международного симпозиума. Томск: Изд-во НТЛ, 2002 (находится в печати).
13. Петрова О.Е. Формирование щелочного гидрокарбонатно-кальциевого геохимического типа вод (на примере бассейна р. Тугояковка)//Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Международного симпозиума. Томск: Изд-во НТЛ, 2002 (находится в печати).
14. Макаренко Ф.П. Гидрогеологический анализ травертинов Пятигорска // Труды ЛГГП. - 1951. - т.10.
15. Писарский Б.И., Конев А.А., Леви К.Г., Дельво Д. Углекислые щелочные гидротермы и стронцийсодержащие травертины в долине р.Сонгве (Танзания) // Геология и геофизика, 1998, т.39, №7, с.934-941.
16. Соловов А.П, Архипов А.Я. и др. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. - М: Недра, 1990. - 335 с.

17. Удодов П.А., Паршин П.Н., Левашов Б.М. и др. Гидрогеохимические исследования Колывань-Томской складчатой зоны. - Томск: изд-во ТГУ, 1971. - 284 с.
18. Удодов П.А., В.М. Матусевич, Н.В. Григорьев. Гидрогеохимические поиски в условиях полужакрытых геологических структур Томь-Яйского междуречья. - Томск: изд-во ТГУ, 1965. - 202с.
19. Уткин Ю.В. Классификация травертинов междуречья Малая Ушайка-Тугояковка (Томская область). // Проблемы географии на рубеже ХХIV. Материалы Всероссийской научной конференции. Томск: изд-во ТГУ, 2000. - с.197-199.
20. Шварцев С.А. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М: Недра, 1998. -366с.
21. Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г., Лосева З.В., Дутова Е.М. Гидрогеохимические условия образования карбонатных травертинов на юго-востоке Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления. Тезисы IV годичной конференции. - Тюмень, 1983. - С.175-176.

GEOCHEMICAL CONDITIONS OF TRAVERTIN FORMING (ON AN EXAMPLE OF BASIN THE RIVER TUGOJAKOVKA)

Petrova O.E., Kopylova J.G., Martynova T.E.

The prevalence of travertins in suburbs of Tomsk and some other regions has been considered. Its connection with unloading places of fractured zone waters has been investigated. The results of investigation of chemical composition of springs which deposited travertins in basin of river Tugoiakovka have been adduced. The physic-chemical equilibrium of water with carbonaceous minerals as the reason of secondary minerogenesis has been estimated. The mineralogy-petrography features of structure of travertins have been investigated. The characteristic of mobility of chemical elements in carbonate forming conditions under the initial stage formation of alkaline carbonate-calcium geochemical water type was given.

УДК 628.1

ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ НА ФИЛЬТРАХ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДОЗАБОРА ТОМСКОГО АКАДЕМГОРОДКА

Покровский Д.С., Дутова Е.М., Вологодина И.В., Тайлашев А.С.

В статье приведены результаты изучения минеральных новообразований, сформировавшихся на фильтрах очистных сооружений водозабора из подземных источников Академгородка. Осадки сложены преимущественно гидроксидами железа и марганца и карбонатами кальция, железистая фаза представлена ферригидритом и гематитом.
Водоснабжение, водозабор, подземные воды, водоподготовка, зернистые фильтры, минералогия техногенеза, минеральные новообразования, микроструктура, химический состав, минеральный состав.

Введение

Данная статья продолжает серию работ [1-5], являющихся попыткой заполнить пробел, существующий в настоящее время в области изучения природно-техногенного минералообразования и касающийся водоснабжения —