



На правах рукописи

ТИШКИНА ВИТАЛИЯ БОРИСОВНА

**ГЕНЕЗИС БЛАГОРОДНОГО ОПАЛА В ВУЛКАНИТАХ  
СЕВЕРЯНСКОЙ СВИТЫ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Владивосток  
2006

Работа выполнена в Дальневосточном геологическом институте  
Дальневосточного отделения РАН

Научный руководитель

академик А.И. Ханчук

Официальные оппоненты

член-корреспондент РАН  
В.Г. Сахно  
(ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток)  
член-корреспондент Международной  
Академии минеральных ресурсов,  
доктор геолого-минералогических  
наук Г.А. Юргенсон  
(ИПРЭК СО РАН, г. Чита)

Ведущая организация

Российский государственный  
геологоразведочный университет  
(РГГРУ, г. Москва)

Защита диссертации состоится 20 октября 2006 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 005 006 01 при ДВГИ ДВО РАН, в конференцзале,  
по адресу: 690022, г.Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДВГИ ДВО РАН

Автореферат разослан      «15» сентября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук



Б.И. Семеняк

## **Введение**

**Актуальность исследования.** Известково-щелочной магматизм имеет огромное значение в формировании земной коры. Широкий спектр рудных и минеральных месторождений, приуроченных к его проявлениям, определяет практический интерес затрагиваемой проблемы. Работа посвящена происхождению благородного опала в маастрихтских андезитах северянской свиты Приморья и представляет собой опыт комплексного анализа магматической системы, эволюция которой завершается образованием месторождения благородного опала, уникального и единственного в России [Пляшенко, 2004; Турашева, 2004].

Существующие представления о происхождении благородных опалов основаны, главным образом, на изучении опалов Австралийских месторождений в древних корах выветривания. При этом многие аспекты образования опалов в эффузивах остаются невыясненными.

**Цель и задачи исследования.** Основная цель исследования – выявить геологические и петрологические особенности формирования опаловой минерализации на месторождении Радужное, а также физико-химические параметры процесса образования благородного опала различными методами и обосновать его происхождение. Для достижения этой цели решались следующие задачи: 1. изучение геологического строения месторождения Радужное; 2. петрографическое и петрохимическое изучение пород месторождения; 3. минералогические и термобарогеохимические исследования опалов месторождения и вмещающих андезитов.

**Фактический материал и методы исследования.** Основой диссертации послужили материалы, собранные автором и сотрудниками геммологической лаборатории ДВГИ ДВО РАН в период 2000 – 2004 г.г. в процессе полевых исследований на площади Алчанской агат-опалоносной зоны. В предлагаемой работе использовались как ставшие уже традиционными для геологической науки методы – петрографический, химический, спектральный, рентгенофлуоресцентный, так и более специфические методы термобарогеохимии – главным образом, крио- и термометрия в комплексе с современными методами локального исследования микрообъектов: электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, рентгенография, электронно-парамагнитный резонанс и дериватография. Изучение элементов-примесей в опалах для получения данных о природе их окраски проводилось методом атомной абсорбции, (фторидно-атомно-абсорбционный способ определения кремния, разработанный и запатентованный к.х.н. Н.М. Лапаш, ИХ ДВО РАН). Изотопный состав кислорода в опалах определен на прецизионном масс-спектрометре МИ 1201-В (Россия) в лаборатории геохимии стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН. Определение возраста андезитов (K-Ar метод), вмещающих благородный опал, проводилось на масс-спектрометре МИ-1201 ИГ в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

**Исходные материалы и личный вклад автора в решение проблемы.** Основу работы составляют результаты геолого-минералогических и термобарогеохимических исследований автора на площади месторождения

Радужного. Основные защищаемые положения сформулированы по результатам как проведенных лично автором, так и совместных исследований, опубликованным в статьях и тезисах. Научные задачи исследования и основные подходы к их решению намечены совместно с научным руководителем, академиком А.И. Ханчуком, к.г.-м.н. Б.Л. Залищакон, к.г.-м.н. В.А. Пахомовой, д.г.-м.н. В.В. Голозубовым, к.г.-м.н. В.П. Симаненко. Исследование первичных расплавных и сопутствующих им углекислотных включений в андезитах и опалах месторождения Радужное проведено благодаря содействию д.г.-м.н. Ф.Г. Рейфа и к. г.-м. н. Н.С. Карманова (ГИН СО РАН), минеральных – к.г.-м.н. А.В. Мохова и ст.н.с. М.И. Лапиной (ИГЕМ РАН).

Анализ структурных особенностей опалов и интерпретация ИК-спектров поглощения проведены в ИХ ДВО РАН, под руководством д.х.н. Л.А. Земнуховой, фторидно-атомно-абсорбционный анализ благородных опалов выполнен также в институте химии ДВО РАН при непосредственном участии и постоянном консультировании к.х.н. Н.М. Лапаш и к.х.н. Л.А. Куриленко.

Разработка методологии исследования, выявление особенностей изучаемого объекта и сравнение полученных данных с литературными по природным объектам и экспериментальными осуществлены лично автором.

**Научная новизна работы.** 1. Впервые определены физико-химические параметры кристаллизации вкрапленников андезитов, вмещающих опаловую минерализацию. 2. Показано, что опаловая минерализация связана с процессами пропилитизации андезитов. 3. Установлены физико-химические параметры образования благородных опалов месторождения Радужное. 4. Предложена модель эволюции флюида и образования благородных опалов. 5. Уточнены данные о структуре опалов месторождения Радужное, в частности, обнаружено присутствие в опалах в качестве кристаллической фазы кремнезема исключительно тридимита. 6. Получены первые данные о природе окраски обыкновенных опалов и окраски фона благородных опалов месторождения Радужное.

**Практическая ценность работы.** 1. Выявленные геологические и физико-химические особенности андезитов и опалов, а также основные факторы и условия образования месторождения Радужное могут быть использованы при поисках месторождений подобного типа. 2. Методические подходы, предложенные автором, могут применяться для выяснения роли эффузивов и связанных с ними метасоматитов в формировании опаловой минерализации. 3. Определение типоморфных особенностей благородных опалов, их минералого-геохимических и геммологических характеристик может быть использовано для разработки методик облагораживания некондиционного сырья с целью увеличения запасов месторождения.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на III международном минералогическом семинаре "Новые идеи и концепции в минералогии". (УрО РАН, Институт геологии, г. Сыктывкар, 2002 г.), на XI международной конференции по термобарогеохимии (ВНИИСИМС, г. Александров, 2003 г.), VI-ой Международной конференции «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение» (г. Александров, 2003 г.), на

Годичном собрании Минералогического общества при РАН «Минералогия, геммология, искусство» (Санкт-Петербург, 2003 г.), Международном семинаре «Кварц-Кремнезем», (г. Сыктывкар, 2004 г), международной IAGOD – конференции (Vladivostok, 2004), на научной сессии (по результатам НИР ДВГИ ДВО РАН, 2004 г.), на международном (X всероссийском) петрографическом совещании (г. Апатиты, 20 - 22 июня 2005 г.), VII международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2005 г). Всего опубликована 21 работа, из них по теме диссертации 18 работ (15 тезисов и 3 статьи).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из 4 глав, Введения и Заключение, имеет общий объем 148 страниц, 18 иллюстраций, 23 фотографии, 21 таблицы. В списке литературы 145 источников.

Диссертация выполнена в геммологической лаборатории ДВГИ ДВО РАН под руководством академика РАН А.И. Ханчука, при постоянных консультациях к.г.-м.н. Б.Л. Залищака и к.г.-м.н. В.А. Пахомовой, которым автор выражает свою искреннюю благодарность за постановку задач исследований, всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор весьма признателен Н.С. Карманову (ГИН СО РАН), М.И. Лапиной и к.г.-м.н. А.В. Мохову (ИГЕМ РАН) за проведение электронно-зондовых анализов минералов и индивидуальных включений, сотрудникам института химии ДВО РАН к.х.н. Н.М. Лапаш и д.х.н. Л.А. Земнуховой за неоценимую помощь в аналитических исследованиях опалов. Кроме того, автор признателен член-корр. РАН В.Г. Сахно, д.г.-м.н. В.В. Голозубову, к.г.-м.н. В.П. Симаненко за терпение, проявленное при многократных консультациях и д.г.-м.н. С.А. Щеке, д.г.-м.н. Л.П. Плюсниной и к.г.-м.н. С.О. Максимову за критические замечания, высказанные во время предварительного рассмотрения диссертации.

#### **Основные защищаемые положения.**

1. Благородно-опаловая минерализация северянской свиты связана с андезитовым вулканизмом, который по петрогеохимическим особенностям, структурной позиции и данным термобарогеохимии может быть отнесен к магматическим проявлениям трансформных окраин. Формирование андезитов северянской свиты происходило из маловодной, обогащенной углекислотой полигенной магмы в условиях высоких температур (1150 - 1100<sup>0</sup>С) и давлений (3.5 – 4 кбара).

2. Метасоматоз андезитов северянской свиты, вмещающих опал-агатовую минерализацию, обусловлен высокой интенсивностью поствулканических низкотемпературных преобразований и отражает регрессивный этап пропилитизации. Метасоматические растворы проявили максимум кислотности в температурном интервале 250 – 200<sup>0</sup>С, что вызвало разложение алюмосиликатной матрицы вмещающих андезитов с одновременным выносом кремнезема.

3. Опалы месторождения Радужное образовались в результате выполнения трещин в андезитах коллоидным раствором кремнезема, формирование которого обусловлено метасоматическими процессами. Максимальная температура образования благородного опала составляла

160°C. Отложение опала происходило на фоне пересыщения раствора кремнеземом и повышения щелочности среды от 7.5 до 9.5.

### **Глава 1. Объекты и методы исследования**

В главе содержатся обзор основных проблем образования месторождений опала и их современного состояния, а также обоснование выбора объекта изучения и методов, которыми воспользовался автор при проведении исследований. Согласно «Балансу запасов полезных ископаемых» по состоянию на 2000 год, в России известно единственное месторождение благородного опала, которое находится на севере Приморского края - это месторождение Радужное. По прогнозным оценкам, запасы сортового ювелирного благородного опала на месторождении Радужное составляют 238,4 кг (в пересчете к условно приведенным запасам категории С<sub>2</sub>). Даны краткие характеристики методов исследований, среди которых перечислены как традиционные, так и современные, с применением современного аналитического оборудования. В процессе изучения вмещающих пород и опала применялись: оптическая микроскопия, рентгенографические исследования, электронная микроскопия на сканирующем микроскопе JSM-5300, оборудованном аналитической приставкой – энергодисперсионным спектрометром LINK ISIS для анализа микровключений (ИГЕМ РАН), на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430VP с EDS-системой (ГИН СО РАН), для выявления элементов-примесей в опалах для получения данных о природе их окраски применялся метод атомной абсорбции, (фторидно-атомно-абсорбционный способ определения кремния, разработанный и запатентованный к.х.н. Н.М. Лапташ, ИХ ДВО РАН). Для выявления элементов-примесей в андезитах, вмещающих опаловую минерализацию, применялся рентгено-флуоресцентный анализ, для обнаружения в благородных и обыкновенных опалах воды и формы её нахождения проводились исследования методом ИК-спектроскопии на спектрометре с Фурье-преобразованием «IRPrestige-2» (Shimudzu, Япония) в Институте химии ДВО РАН. Для определения условий образования вмещающих опаловую минерализацию андезитов применялись методы термобаргеохимии (волюмометрии и динамической фазометрии, гомогенизации, барометрии). Изотопный состав кислорода в опалах определен на прецизионном масс-спектрометре МИ 1201-В (Россия) в лаборатории геохимии стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН. Определение содержания радиогенного аргона для уточнения возраста андезитов, вмещающих благородный опал, проводилось на масс-спектрометре МИ-1201 ИГ в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

### **Глава 2. Геология, петрология, геохимия**

#### **вулканитов северянской свиты**

Месторождение Радужное находится на севере Приморского края в 50 км от пос. Шумный. Геологическое строение района месторождения, расположенного в пределах Западно-Сихотэ-Алинской вулканической зоны, изучалось многими исследователями. Наиболее полные сведения о районе месторождения представлены в отчетах начала 90-х годов, а также в современных публикациях В.В. Голозубова, Г.Л. Амельченко, А.Н. Филиппова,

В.С Маркевич, А.И.Ханчука, В.П. Симаненко, Ю.А. Мартынова и др. Согласно современным представлениям (Ханчук и др., 1997, Амельченко и др., 2001, Сахно, 2001, Симаненко и др., 2004, Симаненко и др., 2006, Бугдаева и др., 2006) о строении, формировании и развитии Алчанского бассейна, в пределах которого находится месторождение Радужное, известно следующее. Алчанский бассейн, выполненный меловыми терригенными и вулканогенными образованиями, имеет в плане форму вытянутого в северо-восточном направлении треугольника, главная часть которого занимает долину р. Алчан и междуречье рек Бикин и Большая Уссурка. Бассейн располагается в северо-восточной части Ханкайского массива на сочленении его с самаркинским террейном. Фундаментом служат докембрийско-раннепалеозойские образования Ханкайского массива, участками перекрытые терригенными отложениями верхней перми, триаса, юры. Формирование бассейна происходило, главным образом, в апт-сеноманское время на участке сочленения Алчанского и Арсеньевского разломов, принадлежащих сдвиговой системе Тань Лу. Месторождение "Радужное" (рис.1) входит в состав Алчанского агатоносного района, выделенного как минерагеническое подразделение по результатам поисковых работ на агат. Границы района определяются площадью развития вулканитов андезито-базальтовой формации верхнемелового возраста, с которыми пространственно и генетически связана опал-агатовая минерализация. Площадь месторождения занимает среднюю часть агатоносного района. Из стратифицированных образований в её пределах широко развиты позднемеловые вулканиты, значительно менее распространены осадочные породы триаса и мела, а также и четвертичные отложения. Отложения триасовой системы представлены толщей алевролитов и песчаников с прослоями туфогенных алевролитов. Берриасский и валанжинский ярусы нижнемеловой системы ( $K_1$  kl) отмечены в северной и северо-восточной части площади и сложены песчаниками, алевролитами с прослоями кремней и кремнистых сланцев, линзами базальтов и гиалокластитов. Мощность свиты более 700 м. Алчанская свита ( $K_1$  al) обнажается в восточной части района, состоит из переслаивающихся туфов риолитов, риодацитов и туфлав риодацитов, общей мощностью более 1400 м и выполняет большую часть одноименного бассейна. Верхнеалчанская подсвита представлена вулканогенно-осадочными породами с прослоями туфов дацитов. В подошве подсвиты отмечается наличие пачки туффитов или туфогенно-осадочных пород мощностью не менее нескольких десятков метров (Черныш, 1971). Заломнинская толща ( $K_2$  zl) обнажается в юго-восточной части площади. Отдельные её фрагменты отмечены в бассейнах ручьев Петля и Обжитая. Толща сложена слаболитифицированными конгломератами, гравелитами, песчаниками и алевролитами. Мощность более 150 м, она с угловым несогласием перекрывает култухинскую и алчанскую свиты. Северянская свита ( $K_2$  sv) слагает значительный по площади вулканический покров, с угловым несогласием перекрывающий все более древние образования района. В её составе доминируют андезиты, андезибазальты, базальты и их туфы. В виде линз и маломощных прослоев встречаются также вулканогенно -

осадочные породы. Мощность толщи варьирует от 10 до 50 м. С вулканитами северянской толщи генетически связаны проявления агатовой и опаловой минерализации, в частности, месторождение благородного опала "Радужное".

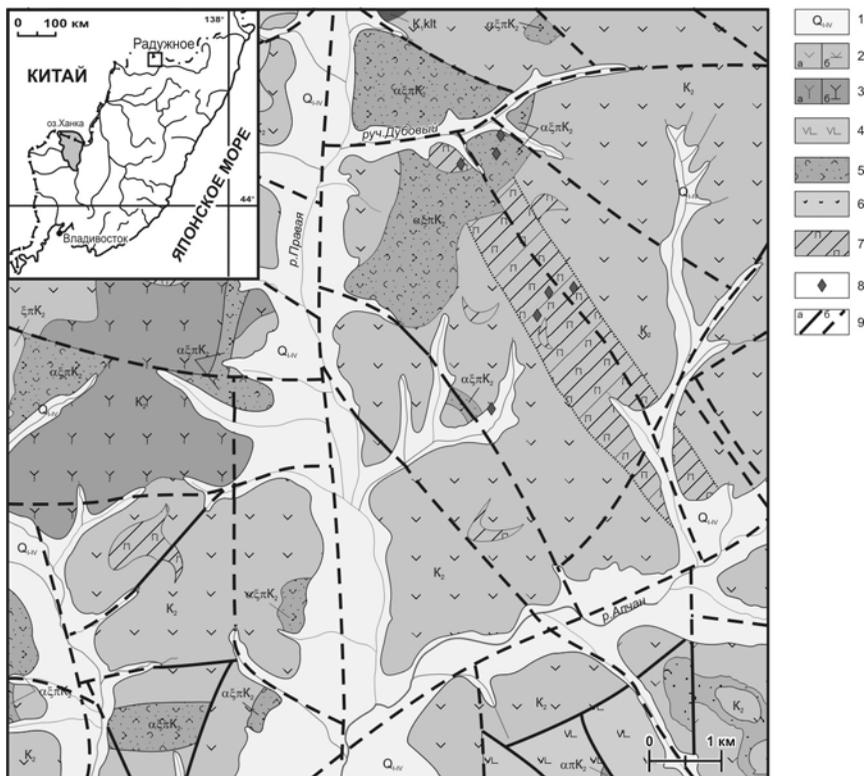


Рис. 1. Геологическая карта-схема района месторождения Радужное (Составил Высочин В.И., с дополнениями Рязанцевой М.Д.)

1 - аллювиальные современные и четвертичные отложения; Вулканиты северянской свиты: 2 - а-лавы, б- экструзии андезитов; 3 - а-лавы, б- экструзии андезито-дацитов; 4 - лавы базальтов и андезибазальтов; 5 - туфы среднего состава; 6 - дайки и экструзии дацит-порфиров; 7 - пропилиты; 8 - благородный опал; 9 - разломы: а-достоверные, б-предполагаемые.

Магматические образования представлены берриасским (култухинским) вулcano-плутоническим, готеривским интрузивным, альбским (алчанским) и маастрихтским (северянским) вулканическими комплексами.

Маастрихтский (северянский) вулканический комплекс включает покровные (северянская толща) и субвулканические фации. Покровные вулканиты с размывами залегают на отложениях алчанской свиты и представлены, главным образом, лавовыми потоками андезитов,

андезибазальтов и базальтов. Туфы развиты ограниченно и слагают невыдержанные горизонты между лавовыми потоками. Субвулканические фации по возрасту и петрохимическим особенностям разделены на две группы: к первой фазе относятся экструзии и дайки базальтов ( $\beta_1K_2$ ) и андезитов ( $\alpha_1K_2$ ), ко второй, более поздней, - экструзии и дайки дацитов ( $S_2K_2$ ) и риолитов ( $\lambda_2K_2$ ). Экструзии и дайки кислого состава не имеют эффузивных и пирокластических аналогов и внедрились, вероятно, в заключительные стадии маастрихтского вулканизма. Непосредственно на месторождении выделены три фазы внедрения даек и штоков андезитов. В первую фазу внедрились роговообманковые андезиты ( $\alpha_1K_2$ ). Они слагают крупные ( $0,1-3,5 \text{ км}^2$ ) субизометричные в плане штокообразные тела. Вторая фаза ( $\alpha_2K_2$ ) проявилась в виде редких небольших, но сложных по форме тел (дайки, силлы) пироксеновых кварцсодержащих андезитов. В третью фазу ( $\alpha_3K_3$ ) формировались нежки и дайки, сложенные массивными лавами афириновых андезитов, переходящими в краевых частях в лавобрекчии характерного кирпично-красного цвета.

Вторичные гидротермальные изменения в пределах площади представлены аргиллизацией и окварцеванием. Окварцевание характерно для терригенных пород основания северянской депрессии. Песчаники и алевролиты триаса и нижнего мела в локальных зонах превращены в кварциты. Аргиллизация развита, в основном, в породах северянского вулканического комплекса, в зонах интенсивной тектонической переработки. С участками аргиллизированных пород связано месторождение благородного опала "Радужное".

В этой же главе рассмотрены петрографические особенности, петрология и геохимия пород северянской свиты. Отмечается, что современная классификационная позиция андезитов требует рассмотрения не только петрографических, минералогических и химических особенностей пород, но и применения современных классификационных диаграмм, так как петрохимически сходные вулканические породы, сформированные в различных геодинамических обстановках, обладают специфическими геохимическими особенностями.

Основные вмещающие опаловую минерализацию породы в пределах Центральной опалоносной зоны на месторождении Радужное представляют собой брекчиевидные роговообманковые и плагиоклаз-роговообманковые андезиты. По составу изученные породы образуют непрерывный ряд от базальтов до андезитов (рис. 2), располагающихся в основном вблизи границы полей толеитовой и известково-щелочной серий.

Концентрации переходных когерентных элементов в рассматриваемых породах сравнительно низкие (Ni - 15-20 г/т, Co - 18-11 г/т, Cr - 55 - 42 г/т), при этом наблюдается несколько повышенное содержание V, варьирующее в широких пределах от 102 до 55 г/т.

Рассмотрено положение на дискриминационных диаграммах соотношений Nb/Y и Zr/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Zr, а также других (подвижных и транзитных) элементов и на основании анализа их поведения сделан вывод о

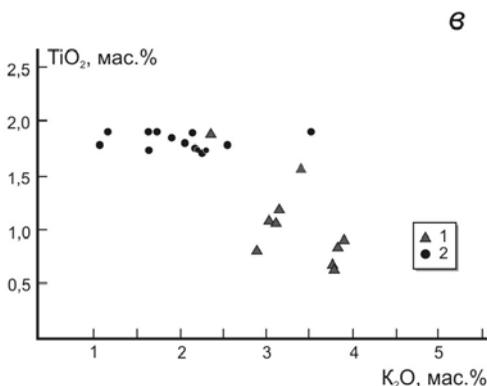
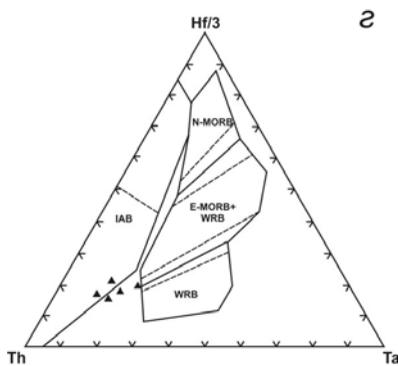
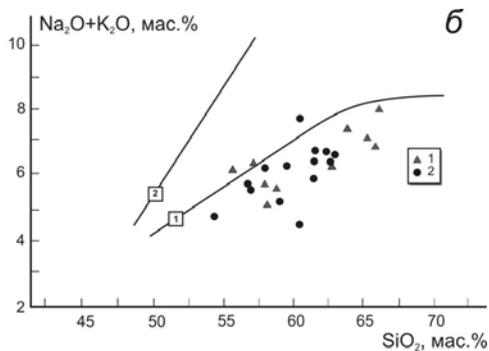
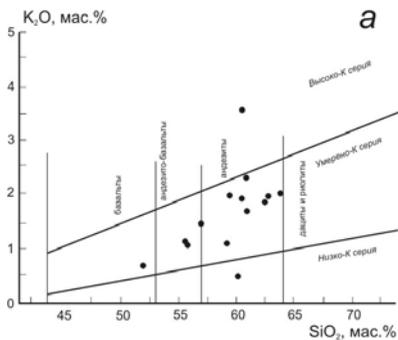
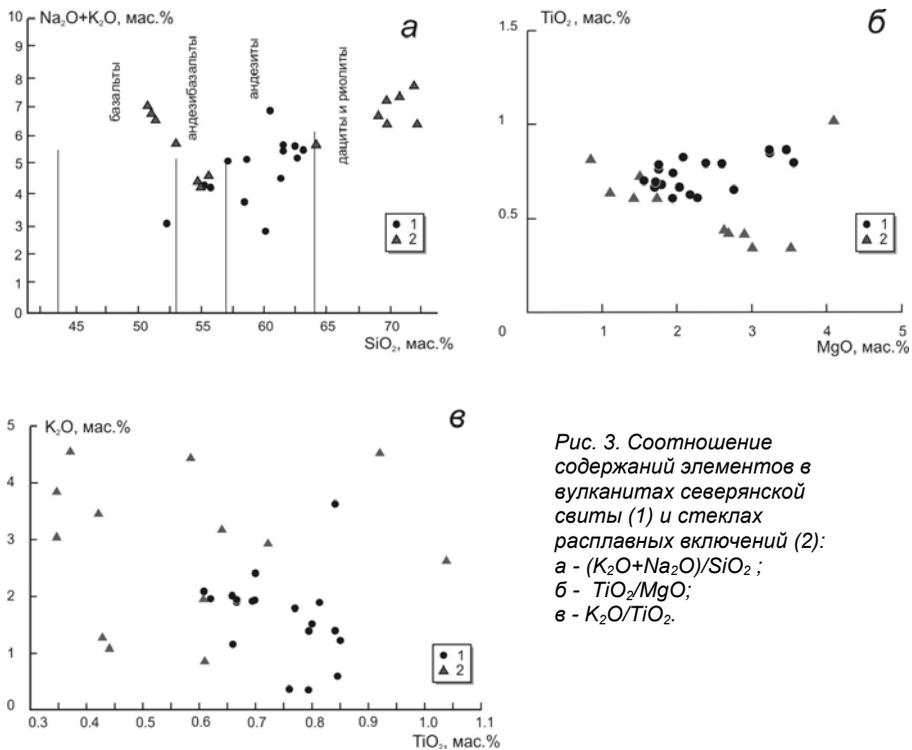


Рис. 2. Классификационные диаграммы для вмещающих опал-агатовую минерализацию вулканитов. а -  $K_2O/SiO_2$ , точками обозначена анализы образцов, отобранных автором; б, в -  $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$  (б) и  $TiO_2-K_2O$  (в): 1 - неизменные вулканические породы северянской свиты, приведены по данным (Симаненко и др., 2006) и 2 - пропилитизированные, разделительные линии субщелочной (1) и щелочной (2) серий (Классификация и номенклатура..., 1981); г - Th-Hf-Ta для вулканитов трансформных окраин, треугольниками вынесены точки составов вулканитов северянской свиты по данным В.П. Симаненко (Симаненко и др., 2006), поля составов различных геодинамических обстановок: N-MORB - дилетированных базальтов срединно-океанических хребтов, E-MORB+WPB - обогащенных толеитов срединно-океанических хребтов и интратрипличных толеитов, WPB - щелочных базальтов интратрипличных структур, IAB - базальтов островных дуг и активных континентальных окраин.

принадлежности магм, производными которых являются андезиты месторождения Радужное, к смешанному геохимическому типу, а именно, наличие признаков как островодужных, так и обогащенных E-MORB и интратрипличных лав (Симаненко и др., 2006).

Обсуждаются термометрические исследования и особенности интерпретации термобарогеохимических данных. Исследованием первичных



*Рис. 3. Соотношение содержаний элементов в вулканитах северянской свиты (1) и стекол расплавных включений (2): а -  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{SiO}_2$ ; б -  $\text{TiO}_2/\text{MgO}$ ; в -  $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ .*

включений во вкрапленниках плагиоклаза установлено, что начало кристаллизации андезитов северянской толщи, вмещающей опаловую минерализацию месторождения Радужное, характеризуется интервалом температур 1150 - 1100<sup>0</sup>С и давлений 3.5 – 4 кбара. Выявлено также гетерогенное состояние магмы в период кристаллизации плагиоклаза, его маловодность и обогащенность углекислотой. Анализ закаленных стекол расплавных включений из плагиоклазов андезитов при рассмотрении на вариационной диаграмме  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  (рис. 3) занимает область, которая оказывается заметно шире интервала составов самих пород. Рассмотрение трендов анализов стекол включений в плагиоклазе андезитов и андезибазальтов месторождения Радужное на вариационных диаграммах совместимых с магмами компонентов показывает участие в формировании исходной магмы различных источников. На этом основании сделан вывод о полигенном происхождении магмы, родоначальной для андезитов северянской свиты.

На основании изложенных выводов формулируется 1 защищаемое положение.

Благородно-опаловая минерализация северянской свиты связана с андезитовым вулканизмом, который по петрогеохимическим особенностям, структурной позиции и данным термобарогеохимии может быть отнесен к магматическим проявлениям трансформных окраин. Формирование андезитов северянской свиты происходило из маловодной, обогащенной углекислотой полигенной магмы в условиях высоких температур (1150 - 1100<sup>0</sup>С) и давлений (3.5 – 4 кбара).

### **Глава 3. Метасоматоз вулканитов северянской свиты**

По характеру метасоматических процессов и минеральным ассоциациям в изучаемых андезитах они отнесены к пропилитам. Макроскопически аргиллизация выражена осветлением пород, появлением глинистых агрегатов различных цветов (белого, желтого, розового, красного, желто-зеленого, темно-зеленого), проявлением прожилков и секреций опала, халцедона. Микроскопически в аргиллизированных вулканитах опалоносной зоны установлены вторичные минералы: монтмориллонит, каолинит, глауконит, гидрослюда, опал, халцедон, редко цеолиты, карбонаты, хлорит. Последовательность образования минералов, установленная в результате исследований шлифов и пластин, следующая: халцедон + глинистые (глауконит и др.) по андезитам, опал + кристобалит + тридимит. Метасоматически измененные андезиты являются вмещающей средой для размещения прожилков опала, который наиболее часто концентрируется в пределах зон и участков развития опал-гидрослюдисто-монтмориллонитовой аргиллизации брекчиевидных роговообманковых андезитов.

Брекчиевидные роговообманковые андезиты отличаются редкими порфиоровыми выделениями плагиоклаза, которые обычно раздроблены и «растщены» по основной массе, а также более интенсивными изменениями. Как правило, они аргиллизированы до образования гидрослюдисто-монтмориллонитовых метасоматитов с включениями гнезд и прожилков обыкновенного и благородного опала. Судя по сопоставлению анализов минералов андезитов, метасоматитов по андезитам, опациitized андезитов и прожилков опала, в том числе и благородного, набор индикаторных элементов в последних напрямую зависит от состава матрицы, т.е. носит унаследованный характер.

Оценка условий образования изучаемых метасоматитов и самих прожилков благородных опалов осложнена отсутствием надежных термодинамических данных для рассматриваемой минеральной ассоциации, а также недостатком экспериментальных исследований в низкотемпературной области. Тем не менее, некоторые выводы могут быть сделаны.

Согласно физико-химической систематизации метасоматических формаций и несмотря на отсутствие единой универсальной генетической классификации такой обширной и разнородной группы геологических объектов, как метасоматические формации, систематика определенного комплекса фаций, т.е. минеральных ассоциаций, в интересующих нас пределах осуществлена В.Л. Русиновым (Русинов, 1989).

Принято, что концентрация химических компонентов в растворе задается их равновесием с соответствующими минералами породы.

Полученное расположение полей на диаграмме (рис. 4) в целом соответствует взаимоотношениям природных метасоматических образований.

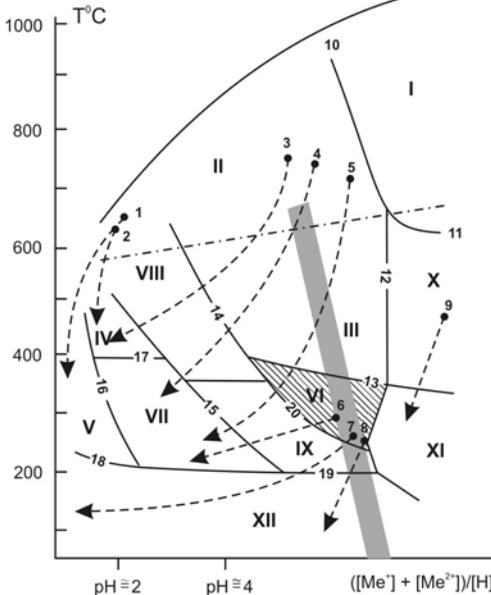


Рис. 4. Полуколичественная диаграмма полей главных метасоматических формаций (Жариков и др., 1989). Сплошные линии - границы полей формации (I-XII) и граница пород с расплавом; штрих-пунктир - граница магматического (вверху) и постмагматического (внизу) этапов метасоматизма; штриховые линии - тренды метасоматических процессов (1-9); затененная полоса - приблизительная позиция нейтральных и околонейтральных растворов. Поля формаций: I - метасоматиты щелочно-ультраосновных комплексов; II - магнезиальные скарны; III - известковые скарны; IV - грейзены; V - вторичные кварциты; VI - пропилиты; VII - березиты; VIII - кварц-полевошпатовые метасоматиты; IX - гумбеиты; X - щелочные метасоматиты

(эгирин-альбитовые, альбититы, микроклиниты); XI - эйситы; XII - аргиллизиты. Тренды эволюции (1-9): 1 - "порфиновый" (кварц-полевошпатовые метасоматиты - вторичные кварциты); 2 - грейзеновый; 3 - скарново-грейзеновый; 4 - скарново-березитовый; 5 - скарново-пропилит-березитовый; 6 - пропилит-гумбеит-березитовый; 7 - пропилитово-аргиллизитовый (в эпitherмальных рудных месторождениях); 8 - пропилитово-аргиллизитовый (в геотермальных полях); 9 - щелочно-полевошпатовый. Моновариантные границы полей (10-20): 10 -  $Fsp + (K, Na)_2O = Fspd$ ; 11 -  $Aeg + H_2O = Rbc$ ; 12 -  $Cpx + (K, Na)_2O = Aeg$ ; 13 -  $Di + H_2O + CO_2 = Act + Chl$ ; 14 -  $Ab + CaO = Pl$ ; 15 -  $Ms + K_2O = Fsp$ ; 16 -  $Kln + K_2O = Ms$ ; 17 -  $Ms + H_2O = Ser$ ; 18 -  $Dsp + Qtz + H_2O = Kln$ ; 19 -  $Ab + H_2O = An$ ; 20 -  $Ank + Qtz + MgO = Cc + Chl + CO_2$ .

Тренды эволюции параметров флюидов и соответствующие последовательности метасоматических формаций в ходе развития магматогенных гидротермальных систем, показанные на диаграмме, отмечают нарастание кислотности флюидов и во времени (стрелки направлены от ранних образований к поздним).

Максимум кислотности флюидов и растворов проявляется в разных системах при разной температуре. В интересующем нас пропилит-аргиллизитовом ряду максимум кислотности проявляется в интервале 150 – 250°C. В конце обозначенных стрелками трендов происходит инверсия щелочности (поздняя щелочная низкотемпературная стадия по Д.С. Коржинскому). Различия температур инверсии показывают, что кроме температуры, кислотность раствора определяется волновой функцией,

связывающей кислотность раствора с динамикой его фильтрации через породы с реакциями взаимодействия раствор – порода.

В этой же главе предложена схематическая модель эволюции магматического флюида и пропилитизирующих растворов.

Согласно полученным нами данным, мы можем утверждать, что на глубине около 14 км существует родоначальная для андезитов месторождения Радужное магма, обладающая установленными термобарогеохимическими методами свойствами. Условия дегазации основных магм при подъеме расплава и различных содержаниях во флюиде воды и углекислоты подробнейшим образом рассмотрены в работах А.А. Кадика (Кадик и др., 1976; Кадик и др., 1982). Как известно, определяющее значение для образования эндогенного кремнезема в эволюции магмы и эндогенных флюидов имеют фазовые переходы газ – жидкость (Малышев, 2004). Для оценки поведения флюида (в нашем случае это маловодный флюид, насыщенный  $\text{CO}_2$ ) наиболее существенной особенностью при снижении внешних параметров (таких как температура и давление) считается перемежаемость эпизодов гомогенного и гетерогенного состояния (Котельникова, 1996) и фазовые переходы газ – жидкость. Таким образом, можно предполагать, что первоначально сухой углекислотный флюид родоначальной для андезитов магмы при взаимодействии с вмещающими породами, а в нашем случае это кристаллический фундамент Ханкайского метаморфического массива, сложенный магнезиальными сланцами, гнейсами, мраморами, т.е. карбонатно-силикатными породами (Амельченко и др., 2001; Сахно, 2001; Бугдаева и др., 2006), насыщался углекислотой и водой. О насыщении расплава водой в процессе ее эволюции свидетельствует состав андезитов, вмещающих опаловую минерализацию, а именно преобладание среди породообразующих минералов роговой обманки.

Анализ изучения метасоматитов Алчанской зоны месторождения Радужного приводит автора к следующим выводам:

Зона пропилитов приурочена к линейным протяженным зонам, наследующим магмовыводящие разломы, и трещинам отрыва, оперяющим разломы северо-западного и субмеридионального простираний. Вулканогенная (глубинная) деятельность является важнейшим геологическим фактором и энергетическим источником для формирования метасоматитов. Зоны метасоматитов, благоприятные для отложения опала, имеют устойчивую минеральную ассоциацию: монтмориллонит, каолинит, глауконит, гидрослюда, опал, халцедон, ± цеолиты, карбонаты, хлорит. Судя по сопоставлению анализов минералов андезитов, метасоматитов по андезитам и опациitized андезитов, набор индикаторных элементов в последних напрямую зависит от состава матрицы, т.е. носит унаследованный характер. Обсуждаемые пропилиты содержат минералы, осажденные растворами, и реликты не полностью растворенных минералов исходных андезитов (рис. 5). Продвинутая пропилитизация связана с ощелачиванием гидротермального раствора в результате вскипания на малой глубине и уходом кислотных компонентов в газовую фазу.

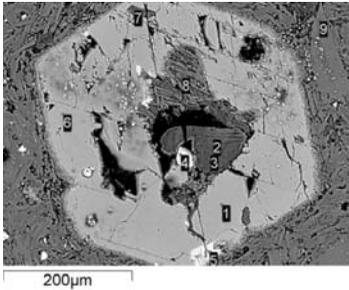


Рис. 5. Вкрапленник роговой обманки из измененного амфибол-плагиоклазового андезита (образец ВР-18н/2) центральная часть разложена; номера в таблице соответствуют точкам анализа, изображенным на фотографии.

Точка измерения	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO, общ.	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	F	S	SrO	Сумма
1	41.8	3.22	10.98	12.79	13.52	11.11	2.56	0.57	-	0.22	-	-	-	96.76
2	55.87	0.54	10.63	7.79	6.72	1.11	0.38	3.58	-	0.26	-	-	-	86.88
3	56.64	0.37	9.93	7.20	6.57	1.30	-	3.26	-	-	-	-	-	85.27
4	-	-	-	0.85	-	54.35	-	-	42.21	0.40	3.55	-	0.71	102.06
5	-	-	-	0.47	-	54.06	-	-	42.89	0.34	4.00	0.83	0.79	103.37
6	42.58	3.02	11.47	13.44	13.84	11.23	2.48	0.51	-	-	-	-	-	98.57
7	52.26	0.68	14.27	8.28	3.40	1.38	0.51	2.68	-	0.32	-	-	-	83.78
8	59.79	-	22.94	1.32	-	6.46	6.45	1.62	-	-	-	-	-	98.58
9	53.57	-	27.37	0.47	-	10.91	4.81	0.41	-	-	-	-	-	97.55

Эти данные явились основанием для 2 защищаемого положения:

Метасоматоз андезитов северянской свиты, вмещающих опал-агатовую минерализацию, обусловлен высокой интенсивностью поствулканических низкотемпературных преобразований и отражает регрессивный этап пропилитизации. Метасоматические растворы проявили максимум кислотности в температурном интервале 250 – 200°С, что вызвало разложение алюмосиликатной матрицы вмещающих андезитов с одновременным выносом кремнезема.

#### Глава 4. Опалы месторождения Радужное

В главе рассматривается минералогия опала, формы выделения опала на месторождении, существующие классификации опала, основанные на особенностях химического состава, кристаллической структуры, физических свойствах и оптических эффектах в опалах. Формы выделения благородного опала на месторождении Радужное: желваки размером от 5 до 30 мм в плотных гидрослюдисто-монтмориллонитовых агрегатах; гнезда от первых мм до 45 мм (максимально 15х70х40 мм); прерывистые прожилки мощностью до 8 мм и пленки в матричной породе; прослойки или опалесцирующие области без четких границ в обыкновенном опале. Обыкновенные опалы встречаются в виде прожилков в породе: тонкие прожилки прозрачных яркоокрашенных разностей 15х10х5 мм; крупные прожилки, гнезда в андезитах измененных в

различной степени; натечные формы, часто в ассоциации с халцедоном, размером  $25 \times 50 \times 15$  мм, средняя трещиноватость. Часто встречаются переходные и зональные жилки. Как правило, бесцветный благородный или обыкновенный опал выполняет центральную зону, а к краевым частям жилы сменяется светлоокрашенным молочным обыкновенным опалом.

Приведены классификации исследованных опалов согласно Российским ТУ-41-07-055-89 и по классификации А.Смолвуда (Smallwood, 1997). По классификации Anthony Smallwood, на месторождении Радужное большинство опалов можно отнести по тону к №№4-9, степень прозрачности различна, большая часть исследованных образцов имеет не менее трех цветов игры. Большинство благородных опалов на месторождении, вне зависимости от игры цветов, светлоокрашенные, просвечивающие, молочные, голубовато-зеленые. Кроме того, встречаются прозрачные образцы ярко-желтого и ярко-оранжевого цветов, так же, как и практически непрозрачные темно-серые и темно-коричневые. Что касается обыкновенного опала, необходимо отметить присутствие на месторождении практически всех описанных в литературе цветовых разновидностей, кроме черного (смоляного). Приведены предварительные результаты исследований элементов-примесей, которые могут вызывать окраску (речь в данном случае идет об окраске обыкновенных опалов и окраске фона благородных опалов). Установлено, что в качестве основных элементов, ответственных за окраску опалов, выступают Fe, Mn, Ti и Ni, для которых четко выявлена общая прямая зависимость насыщенности и интенсивности окраски. Такие элементы, как Cr, Cu, Zn, Pb, Rb, Sr, Y, Zr, не обнаруживают прямой связи между их содержаниями и окраской опалов. Для Mn, Ti, Ni – выдержаны те же закономерности, что и для железа, т.е. интенсивность окраски напрямую связана с повышением (на порядок) этих элементов, светлоокрашенные и белые разновидности имеют существенно более низкие содержания. Содержания Na, K, Ca стабильны для всех образцов.

Химический состав опалов месторождения Радужное сходен по соответствующим параметрам с благородными опалами зарубежных месторождений. Из редко встречающихся в опалах элементов отмечены V (до  $8.5 \cdot 10^{-3}$  масс.%), Rb (до  $2.24 \cdot 10^{-3}$  масс.%), Sr (до  $4.09 \cdot 10^{-2}$  масс.%), Zr (до  $9.73 \cdot 10^{-2}$  масс.%), Mg (до 1,42 масс.% MgO). Физические свойства опалов месторождения Радужное: плотность от 1,85 до 2,07 г/см<sup>3</sup>; твердость по шкале Мооса 4,5-5; количество воды от 2,5 до 5,8 вес.% (расчетные величины); показатель преломления от 1,395 до 1,487. К особой группе можно отнести пористые и хрупкие опалы, которые отличаются низкой плотностью, повышенной хрупкостью, высоким показателем преломления.

Сравнение между собой ИК-спектров поглощения разновидностей опалов месторождения Радужное показывает, что общим является положение полос поглощения в области колебания связей Si-O. Наиболее интенсивные полосы наблюдаются в диапазоне частот 1080 – 1200 см<sup>-1</sup>, где проявляются валентные асимметричные колебания связи Si-O-Si в тетраэдрах SiO<sub>4</sub>. Одиночные полосы сильной или средней интенсивности присутствуют во всех ИК спектрах в области валентных (785- 800 см<sup>-1</sup>) и деформационных (400–

500 см<sup>-1</sup>) колебаний связи Si-O-Si. Кроме того, в спектрах всех исследованных образцов имеются полосы разной интенсивности, связанные с деформационными (1616 – 1645 см<sup>-1</sup>) и валентными колебаниями (3180 – 3650 см<sup>-1</sup>) молекул воды.

Согласно результатам электронно-микроскопических исследований и данным РФА, образцы опала месторождения Радужное относятся к промежуточной группе между А- и КТ-опалами.

Большинство благородных опалов месторождения Радужное отличаются неравномерностью опалесценции. В опалах, различающихся по основной окраске и степени прозрачности, каких-либо существенных различий не выявлено.

В этой же главе рассмотрены существующие теории образования месторождений опала в вулканогенных толщах, известные экспериментальные данные о синтезе благородного опала (Калинин, Сердобинцева, 2003; Serdobintseva e.a., 2002; Денискина и др., 1987; Потапов, 2002; 2003; 2004) и, на основании изучения природных образований и экспериментальных данных (по литературным источникам), обобщены выводы о физико-химических параметрах среды, необходимых для образования благородных опалов: 1. температуры от 15-20 до 150<sup>0</sup>С; 2. рН раствора изменяется от слабощелочного (рН 8-9) на стадии образования первичных глобулей, затем, на стадии формирования сфер щелочность возрастает (рН=7-10) и на стадии цементации необходимо наличие слабокислого (рН 6-5) раствора (Калинин и др., 2003); 3. соленость – в начальной стадии процесса может присутствовать в незначительных количествах (до 0.2%), на конечной стадии – отсутствие солей.

Рассмотрены возможные варианты механизма образования опала на месторождении Радужное, среди которых предпочтение отдано идее о зарождении коллоидных растворов на месте формирования жил в результате диффузионных метасоматических процессов (Шабалин, 2002). В какой-то степени эта идея близка концепции А.Г. Бетехтина, постулирующей образование коллоидов из истинных растворов в результате реакций с вмещающими породами, но отличается тем, что предполагает зарождение коллоидных частиц в условиях метасоматоза в околотрещинном пространстве. Коллоидные частицы перемещаются в трещины, заполняют их, и при определенных условиях их концентрации возрастает до гелеподобного состава. Метасоматический процесс служит активным стимулятором и источником зарождения коллоидных частиц, а привнос истинных растворов из магматического очага содействует этому зарождению путем активизации метасоматоза. Избыточные продукты метасоматических реакций выделяются в трещинные пустоты в виде коллоидных частиц.

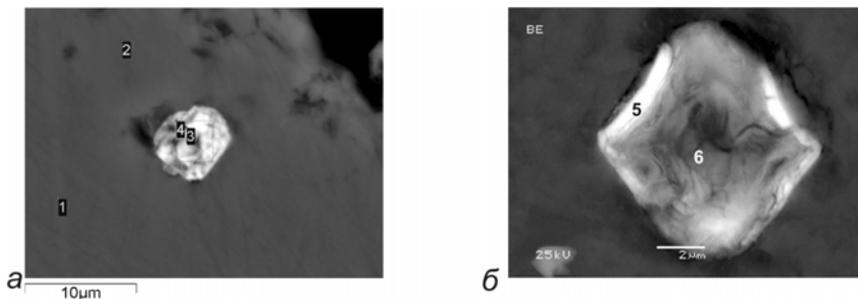
Для выявления факторов, повлиявших на эффективность отложения опала на месторождении Радужном, исследованы особенности строения и состава различных опаловых прожилков, которые обладают признаками двух взаимоисключающих способов заполнения пространства жил: 1) в виде существенно кремниевого флюида (жилы выполнения) и 2) метасоматическим способом (жилы и зоны замещения). Т.е. гидротермальное

минералообразование осуществлялось двумя способами: путем заполнения флюидопроводящих каналов (флюидодоминирующий режим) и посредством метасоматического замещения (породоформирующий режим).

Следует отметить обнаруженные нами минеральные включения в опалах, которые, прежде всего, являются идентификационным признаком и дают возможность сопоставить приморские опалы с известными зарубежными аналогами. В прожилках опала различного цвета и степени прозрачности установлены следующие два типа минеральных включений: 1) гидроокисиды железа, уплощенные обособления, в сечениях - квадратные и ромбические, размером до 200 мкм, как правило, приуроченные к трещинам; 2) минеральные фазы (рис. 6), имеющие кубический и октаэдрический габитус, равномерно объемного расположения, размером до 100 мкм. По результатам анализов включения второго типа можно разбить на две группы. Для первой группы (рис.6, б, в - анализы №№ 5-6) следующий механизм образования: в процессе метасоматоза зерно роговой обманки подверглось опацификации, при образовании непосредственно опала оно было захвачено и изменено. Таким образом, в центральной части сохранились реликты амфибола, а краевая, более опацифицированная зона, вероятнее всего, представляет собой высококремнистый магнетит, известный по литературным данным. Для второй группы включений (рис.6, а, в - анализы №№ 3-4) мы предполагаем перекристаллизацию магнетита из основной массы андезитов в высококремнистый магнетит или, возможно, замещение магнетита золями кремнекислоты. О подобном механизме образования свидетельствуют, так же достаточно значимые содержания Ni и Co.

Результаты исследований микровключений показывают присутствие SiO<sub>2</sub> (более 50%) и повышенные содержания Na, K, Fe, Mg, Al, Ca. Установлены также Ni, Co, P, характерные также для метасоматически измененных породообразующих минералов и основной массы андезитов и туфов, содержащих опаловую минерализацию.

Физико-химические условия образования опала месторождения Радужное оценены по известной методике расчета приблизительной температуры на основании данных об изотопном составе кислорода (Kawabe, 1978; Kita et al., 1985; O'Neil, 1987; Brandriss et al., 1998). Выяснилось, что благородные и обыкновенный опал имеют приблизительно равную величину  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  - около 19.5‰ и рассчитанную максимальную температуру образования опала, которая составляет 160°C. Воспользовавшись результатами экспериментальных данных (Калинин, 1998, 2003; Камашев, 2000, 2004), а также диаграммой растворимости кремнезема (Копейкин, 2004), получаем минимальное значение pH в присутствии солей, равное 7.5. Поскольку исследуемые объекты представляют собой благородный опал, следует учесть, что значения pH в интервале 7.5 – 9, по результатам экспериментов, приводит к образованию преимущественно кубической и примитивной гексагональной упаковки. Для образования плотнейшей упаковки, характерной для природного благородного опала, необходимо повышение pH раствора до 9.5 (Камашев, 2004). Для дальнейшего образования благородного опала, т.е. образования сферических частиц



б

Точка измерения	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO, общ.	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	Ni	Co	Сумма
1	84.78	-	3.42	-	-	0.87	-	0.58	-	-	-	-	-	89.65
2	85.71	-	3.42	-	-	1.02	-	0.70	-	-	-	-	-	90.85
3	26.13	-	0.99	56.07	0.42	0.62	0.54	0.18	1.22	0.84	0.64	1.84	1.76	91.25
4	25.92	-	1.42	54.72	0	0.74	0.64	0.41	1.05	1.12	0.49	1.83	1.25	89.60
5	50.27	0.24	2.81	41.62	1.03	1.05	0.43	0.88	-	0.33	-	-	-	98.66
6	69.80	0.32	13.47	5.22	3.43	1.33	0.24	1.72	-	0.41	-	-	-	95.94

Рис. 6. Минеральные включения второго типа в благородном опале: номера точек измерения в таблице (в) соответствуют точкам анализа, изображенным на вставках а, б.

второго порядка размером до 400 нм, необходимо дальнейшее увеличение pH опалообразующего раствора, обеспечивающееся поступлением щелочей из минералов пропицитизированных андезитов и уменьшением, за счет выпадения, содержания SiO<sub>2</sub>. В случае, если эти условия не соблюдаются, образуется обыкновенный опал.

Таким образом, установлено, что ведущий механизм образования опала – гидротермально-метасоматический. Отложение благородного опала происходило в условиях понижения РТ-параметров среды, повышения активности O<sub>2</sub> (в близповерхностных условиях) и pH растворов. Набор индикаторных элементов, обнаруженных в минералах андезитов, метасоматитов, опаловых гнезд, прослоев, прожилков и жезд, а также наличие в прожилках благородного опала метасоматически измененных реликтов минералов вмещающих андезитов свидетельствует о том, что гидротермальный процесс, приводящий к образованию обсуждаемых прожилков благородного опала, является естественным продолжением процесса пропицитизации. Выбор системой ступенчатого нетривиального пути эволюции (в отличие от прямого: раствор – кварц) может рассматриваться как элемент самоорганизации (Русинов, 1998).

На основании вышеизложенного формулируется третье защищаемое положение:

Опалы месторождения Радужное образовались в результате выполнения трещин в андезитах коллоидным раствором кремнезема,

формирование которого обусловлено метасоматическими процессами. Максимальная температура образования благородного опала составляла 160°C. Отложение опала происходило на фоне пересыщения раствора кремнеземом и повышения щелочности среды от 7.5 до 9.5.

### **Заключение**

Основные результаты проведенных исследований, которые сводятся к следующему. 1. Проанализированы основные факторы и параметры образования вмещающих опаловую минерализацию андезитов и благородных опалов месторождения Радужное. Выявлены РТ-параметры образования андезитов: температура соответствует интервалу 1150 - 1100°C, давление в период начала кристаллизации вкрапленников плагиоклазов - 3.5 – 4 кбара. Важным моментом исследований представляется определение полигенности андезибазальтовой магмы, т.е. существования не менее двух источников, при смешении которых происходило ее формирование. 2. Детальное изучение в различной степени измененных вмещающих пород северянского вулканического комплекса позволило установить тип метасоматоза и направленность метасоматического процесса, а также последовательность образования минералов в измененных в различной степени метасоматитах. По характеру метасоматических процессов и минеральным ассоциациям в изучаемых андезитах они относятся к пропилитам. Показана прямая зависимость состава парагенезисов минералов пропилитизированных андезитов от состава первичных минералов исходных пород, что свидетельствует о генетической связи андезитов и метасоматитов. 3. Установлено, что ведущую роль в образовании прожилков благородных опалов играют глубинные факторы, в частности, вулканогенная деятельность, связанная с конседиментационными разломами и обусловленная крупными расколами земной коры. 4. Набор индикаторных элементов, обнаруженных в минералах андезитов, метасоматитов, опаловых гнезд, прослоев, прожилков и секретий, а также наличие в прожилках благородного опала метасоматически измененных реликтов минералов вмещающих андезитов свидетельствует о том, что гидротермальный процесс, приводящий к образованию прожилков благородного опала, является естественным продолжением процесса пропилитизации. 5. Рассмотрен механизм образования опала, включающий продвинутую пропилитизацию, которая связана с ощелачиванием гидротермального раствора в результате вскипания на малой глубине и уходом кислотных компонентов в газовую фазу. 6. Сделан вывод о том, что благородный опал образуется из золь кремнезема, возникающих при концентрировании истинных растворов кремнезема, который продуцируется в процессе разложения минералов вмещающих пород под действием растворов первоначально кислотного характера, который в ходе эволюции и миграции меняется на щелочной. Зоны пропилитизации оказались вмещающими для опаловой минерализации как наиболее проработанные и подготовленные для отложения опала породы. 7. Исследованы физические, химические, оптические и минералогические свойства опалов месторождения Радужное. Установлено, что химический состав обсуждаемых опалов сходен по соответствующим параметрам с благородными опалами зарубежных

месторождений. Из редко встречающихся в опалах элементов отмечены V, Rb, Sr, Zr, Mg и P. Степень кристалличности исследованных опалов различна и изменяется в широких пределах от аморфного состояния до присутствия кристаллических фаз тримита и  $\alpha$ -кварца. 8. Впервые исследована природа фоновой окраски опалов (обыкновенных и фона благородных) и определена группа «ответственных» элементов-примесей. Выяснилось, что в качестве основных элементов, ответственных за окраску опалов выступают Fe, Mn, Ti и Ni, для которых четко устанавливается общая прямая зависимость насыщенности и интенсивности окраски. Интенсивно окрашенным опалам свойственны максимальные содержания железа, согласно данным ЭПР, в желтых, коричневых и красном образцах (ИКР-5, ИКР-7/1, ИХ-15, ИХ-16) присутствует  $Fe^{3+}$ , в зеленых различных оттенков -  $Fe^{2+}$ . 9. Предложена принципиально возможная модель образования опалов месторождения Радужное.

#### Опубликованные работы по теме диссертации

1. **В.Б. Тишкина**, Б. Л. Залищак. О драгоценных камнях Приморского края. Материалы региональной научной конференции «Молодежь и научно-технический прогресс». Владивосток, 1998 г., с 82 - 83.
2. Пахомова В.А., Залищак Б.Л., **Тишкина В.Б.** Генетические особенности опал-агатовой минерализации Приморья (Дальний Восток России) // Материалы III международного минералогического семинара "Новые идеи и концепции в минералогии". УрО РАН, Институт геологии, г. Сыктывкар, 2002 г., С. 207 – 209.
3. Залищак Б.Л., Пахомова В.А., **Тишкина В.Б.** О состоянии ювелирной отрасли в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы сохранения культурных ценностей в Дальневосточном регионе». Владивосток, 13 – 15 ноября 2002 г.
4. **Тишкина В.Б.**, Пахомова В.А., Залищак Б.Л., Одариченко Э.Г., Лапина М.И. Включения в благородных опалах и особенности андезитов, вмещающих опаловую минерализацию (месторождение Радужное, Приморский край, Дальний восток России). // Материалы XI международной конференции по термобарогеохимии, ВНИИСИМС, г. Александров, 2003 г., с. 227-230.
5. Залищак Б.Л., Пахомова В.А., **Тишкина В.Б.** Рациональный способ вычисления углов наклона граней в круглых ограненных ювелирных камнях. // Материалы годовичного собрания Минералогического общества РАН «Минералогия, искусство, культура», г. Санкт-Петербург, 2003 г., с.21-25.
6. Залищак Б.Л., Пахомова В.А., **Тишкина В.Б.** Камнесамоцветы Дальнего Востока России: месторождения, минералогия, геммология. // Материалы годовичного собрания Минералогического общества при РАН «Минералогия, искусство, культура», г. Санкт-Петербург, 2003 г., с.26-27.
7. **Тишкина В.Б.**, Одариченко Э.Г., Лапина М.И. Особенности внутреннего строения благородных опалов месторождения Радужное (Приморский край России). // Материалы годовичного собрания Минералогического общества при РАН «Минералогия, искусство, культура», г. Санкт-Петербург, 2003 г., с.75-77.

8. **Тишкина В.Б.**, Пахомова В.А., Лапина М.И. Агат-опаловая минерализация в андезитах Алчанского бассейна (Приморский край России). Материалы Международного семинара «Кварц-Кремнезем», г. Сыктывкар, 2004 г., с.314-315.
9. **Tishkina Vita**, Zalishchak Boris, Pakhomova Vera, Lapina Marija. Opal from the Raduznoe Deposit (Primorsky Krai, Russia). The Journal of The Gemmological Association of Hong Kong 2004 - Volume XXV, P 79-82.
10. **Tishkina V.B.**, Lapina M.I. Mineralogo-geochemical features of an agate-opal mineralization in andezitah deposits Raduznoe (Primorski Krai, Russia). Proceedings of the interim IAGOD conference, Vladivostok, 2004, p.p. 707-709.
11. Соляник В.А., **Тишкина В.Б.**, Одариченко Э.Г. Экспозиции музея ДВГИ как отражение нового направления в геологической науке. Альманах-2004, Музеи Российской Академии Наук, М. Научный мир 2004, с. 18 - 28.
12. **Тишкина В.Б.**, Пахомова В.А., Лапина М.И., Карманов Н.С. Минеральные включения в благородных опалах как отражение условий их образования (месторождение Радужное, Приморский край России). Материалы докладов VII международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». Москва, 2005, том 2, с. 65.
13. **Тишкина В.Б.**, Пахомова В.А., Залищак Б.Л., Лапина М.И., Карманов Н.С. Метасоматоз андезитов Западно-Сихотэ-Алинской вулканической зоны и его роль в формировании опаловой минерализации. Материалы Международного (X всероссийского) петрографического совещания. Т. 2. Апатиты. Изд-во Кольского научного центра РАН, 2005, с. 226 – 228.
14. Kurilenko L.N., Laptash N.M., Polyakova N.V., **Tishkina V.B.** Trace element analysis of natural opals. Proceedings of the International Congress on Analytical Sciences, Moscow, 2006, p. 603.

Подписано в печать 28.08.2006  
Формат 60×90/16 Уч.-изд.л.1. Тираж 100. Заказ №17  
Типография ТИПРО-центра, Владивосток, пер.Шевченко,4