

ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВУЛКАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО (О-В ПАРАМУШИР)

Бойкова И.А., Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Главатских С.Ф.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
Россия, E-mail: ryshsn@kcs.iks.ru*

Проанализированы результаты изучения гидротермально-метасоматических процессов, происходивших на новейшем этапе эволюции Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы (вулканический хребет Вернадского, северная часть о-ва Парамушир). Изучены глубокие разрезы в естественных обнажениях пород и по данным бурения глубоких скважин (1200 - 2500 м от дневной поверхности). Выделены зоны кварц-адуляровых (с ортоклазом ?) метасоматитов, приуроченных к трещинам и высокопористым участкам пород. Восстановлена метасоматическая зональность: от среднетемпературных кварц-хлорит-серицит-альбитовых пропилитов (в основании разрезов) до низкотемпературных опал-тридимит-кристобалит-смектит-алунитовых разностей (в приповерхностных горизонтах). Последние широко распространены на площади, занимаемой гидротермально-магматической системой, и, по-видимому, играют роль верхнего водоупора и теплового экрана для системы, что обуславливает значительную долю скрытой разгрузки гидротерм в общем выносе тепла для данной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-05-64044а, 05-05-79101к и 05-05-74029г) и Президиума ДВО РАН (проекты 05-III-E-08-029 и 05-III-G-08-146).

HYDROTHERMALLY-METASOMATIC ZONALITY AND FORMATION ROCKS CONDITIONS OF VERNADSKOGO VOLCANIC RIDGE (ISLAND PARAMUSHIR)

Boikova I.A., Rychagov S.N., Sandimirova E.I. and Glavatskikh S.F.

Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, E-mail: rychsn@kcs.iks.ru

The outcomes of learning hydrothermally-metasomatic processes happening at the newest stage of evolution of North-Paramushir hydrothermal-magmatic system (volcanic Vernadskogo ridge, northern part of Paramushir Island). The deep cross-section of natural exposures of breeds and on datas of deep wells (1200-2500 m) are learnt. The zones a quartz-adularia metasomatites, dated to fractures and high-porosity rocks, are studied. Is reduced the metasomatic zonality: from a middle-temperature quartz-chlorite-serizite-albite propylites (in the basis of cross-section) up to low-temperature opal-tridimite-cristobalite-smectite-alunite metasomatites (in near-surface horizons). Last widespread on square taken up hydrothermal-magmatic system, and, apparently, play a role of upper cape-rock.

The work is performed with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 03-05-64044a, 05-05 79101k and 05-05-74029g) and Presidium of Far East Division RAS (projects 05-III-E-08-029 and 05-III-G-08-146).

1. Введение

Взаимодействие гидротермальных растворов и меторных вод с вмещающими породами вызывает изменение физических, минералогических и геохимических свойств пород, что, соответственно, отражает эволюцию температуры, химического

состава и других параметров флюида, продолжительность и интенсивность его воздействия на породу. Изучение гидротермально измененных пород петрографическими, минералогическими, геохимическими и др. методами позволяет решать следующие задачи, что было показано на примере нескольких геотермальных месторождений страны и мира [2, 9, 12, 14, 15]: моделирование системы зон перетока холодных и горячих вод, оконтуривание геотермального резервуара и определение границ гидротермальной системы в целом, выделение и изучение условий образования зон перехода жидкость-пар (вскипания гидротерм), и другие.

Изучению гидротермально измененных пород современных высокотемпературных гидротермальных систем Курило-Камчатского региона посвящены основополагающие работы С.И. Набоко с соавторами [5-7], В.Л. Русинова [8], Г.А. Карпова [3], А.Д. Коробова [4], Ю.П. Трухина и В.В. Петровой [13] и других исследователей. Рассмотрены метасоматическая зональность, характер, степень и направленность гидротермально-метасоматических изменений вулканитов Паужетской, Паратунской, Большебанной, Мутновской, Узон-Гейзерной и др. гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов (Горячий Пляж на о-ве Кунашир). Нашими работами продолжено изучение гидротермального метаморфизма пород геотермальных месторождений и гидротермально-магматических систем (ГМС) Курило-Камчатской островной дуги с целью решения ряда научных и практических задач (см. выше).

В настоящей статье на основании изучения гидротермально-метасоматической зональности в пределах северной части хребта Вернадского (о-в Парамушир) сделана попытка восстановить характер, интенсивность и направленность воздействия глубинных парогидротерм на вмещающие вулканогенно осадочные, вулканические и интрузивные породы.

Проведено изучение пород на площади и в разрезах, вскрытых глубокими (до 2500 м) скважинами ГП-3 и 4-ГП и несколькими мелкими (до 50 м) скважинами.

2. Гидротермально-метасоматические изменения пород по разрезу глубокой скважины ГП-3

Как отмечалось ранее [10], опорный геологический разрез Северо-Парамуширской ГМС сложен 4 толщами, а гидротермально-метасоматические изменения пород имеют зональный характер, определяющийся не только первичным

составом пород, но в большей степени – расположением и структурой источника теплового питания системы в данном геологическом блоке (предполагается, что это кровля мощного субвулканического тела) и Р-Т и физико-химическими параметрами восходящего потока гидротерм.

Верхние отложения разреза – лавы андезитового и андезито-базальтового состава практически не затронуты гидротермально-метасоматическими процессами: изменены породы лишь вдоль тонких трещин и вокруг отдельных пустот. Но глубже расположена зона интенсивного взаимодействия смешанных и глубинных высокотемпературных растворов с вмещающими породами (**рис. 1**).

В интервале от ~ 100 м до ~ 750 м основным новообразованием является кремнезем, выполняющий роль цемента в вулканогенно-осадочной породе. Цемент базального и порового типа. Содержание кремнекислоты достигает 60%. По минеральному виду цемент делится на две группы: 1 – опал-кристобалит-тридимитовый, 2 - кварц-халцедоновый. Преобладает кварц-халцедоновая минерализация. За счет окремнения породы становятся массивными, прочными и могут служить верхним водоупором для парогидротерм. Эти породы, вероятно, обеспечивают в настоящее время тепловую изоляцию гидротермальной системы. Последнее обстоятельство способствует сохранению на десятки и сотни тысяч лет высоких Р-Т параметров в недрах системы и ведет к образованию рудных геохимических барьеров. В этом же интервале, начиная с глубины ~ 550 м, наблюдается развитие адуляра по плагиоклазу, вначале в виде отдельных зерен, а ниже 750 м – заметно увеличение количества адуляра, ассоциирующего с кварцем, хлоритом и эпидотом. Интервал 550-750 м выделяется более интенсивным окремнением туффитов.

Вся рассмотренная толща гидротермально измененных пород (~100-750 м) отличается широким развитием реликтового органического вещества, замещенного кремнеземом и сульфидами. Нижняя граница зоны приходится на смену литологических разностей пород.

Интервал 750-1650 м представлен существенно кварц-адуляр-гидрослюдистыми породами. В отличие от вышележащей толщи, окварцевание здесь развивается в зонах трещиноватости и дробления пород. Кварц - от криптокристаллического до крупнозернистого, ассоциирует с адуляром, эпидотом, хлоритом, гидрослюдами, рудными минералами. По всему интервалу развиты прожилки кварц-адулярового

состава с пиритом и др. рудными минералами (их характеристику смотри ниже).

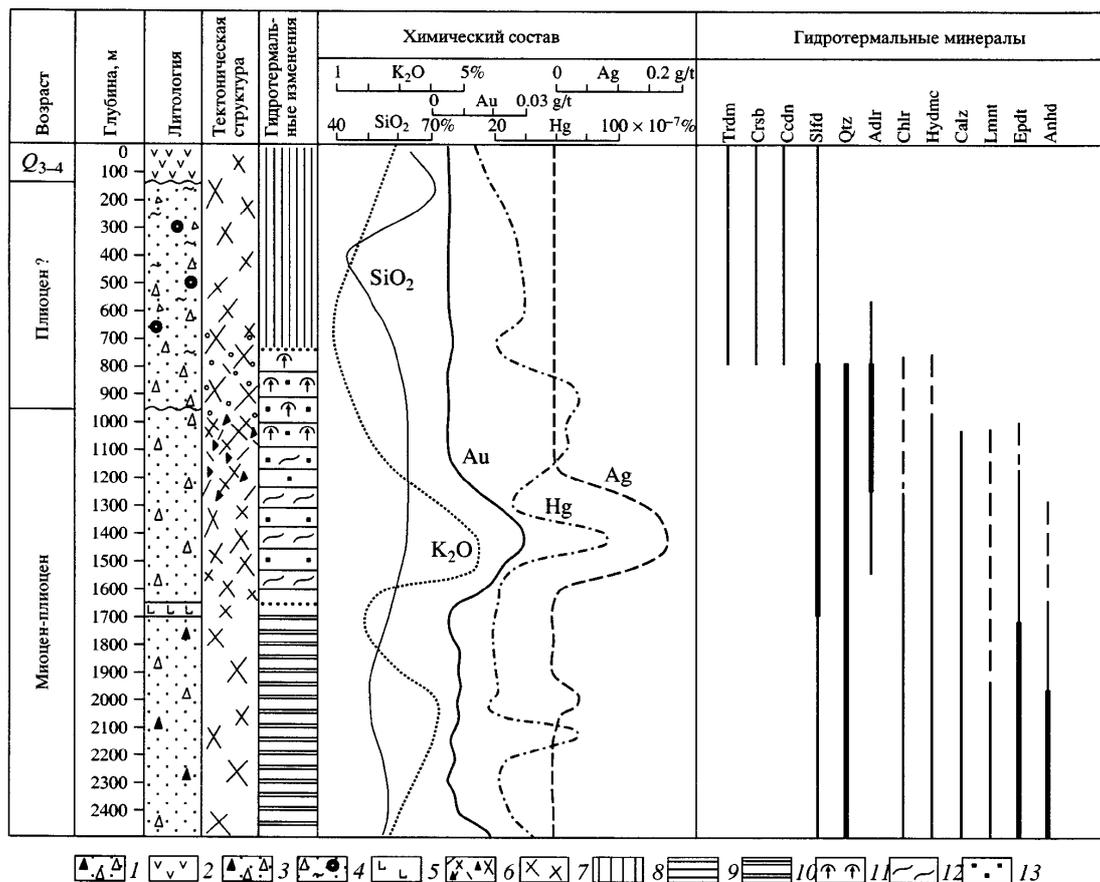


Рис. 1. Сводный геолого-геохимический разрез Северо-Парамуширской ГМС (скважина ГП-3) [1]. 1 – Интрузивная брекчия андезитово-базальтового состава; 2 – лавы андезитов; 3 – туф литокристаллокластический пестроцветный андезитового состава, псефопсаммитовой размерности обломков; 4 – туффит с включениями реликтового органического материала; 5 – лавы (дайки, силлы ?) андезитово-базальтов; 6 – тектоническая брекчия; 7 – умеренно трещиноватые породы; 8 – низкотемпературные опал-кристобалит-тридимит-халцедоновая минерализация; 9 – низко-среднетемпературные существенно кварц-адуляр-гидрослюдистые метасоматиты с включениями рудных минералов; 10 – среднетемпературные пропилиты кварц-хлорит-эпидот-мусковитового состава; 11 – зоны перехода жидкость-пар (кварц-адулярные метасоматиты); 12 – кварц-халцедоновые прожилки с рудными минералами; 13 – рудная минерализация. Гидротермальные минералы: Trdm – тридимит, Crsb – кристобалит, Ccdn – халцедон, Sfld – сульфиды, Qtz – кварц, Adlr – адуляр, Chlr – хлорит, Hydmc – гидрослюда, Calz – кальцит, Lmnt – ломонит, Epdt – эпидот, Anhd – ангидрит.

Верхняя часть этой зоны гидротермально измененных пород, ~ от 670-750 до 1200 м, подвержена интенсивному химическому выщелачиванию и (вероятно) механическому вымыванию цемента туфов с образованием большого количества свободных пор, каверн, открытых трещин. Ввиду отсутствия керна на этом интервале невозможно количественно оценить пористость и кавернозность пород, но по петрографическим данным в шламе фиксируется почти полное выщелачивание зерен плагиоклазов и темноцветных, и вымывание участков рыхлого цемента туфов. Метасоматиты приурочены к переходу между вулканогенно-осадочной и туфовой

толщами. Границы этой зоны гидротермально-метасоматических изменений пород на схеме (см. рис. 1) условны. Судя по геохимическим данным, а также постепенности перехода в нижележащие метасоматиты, мощность зоны в целом может быть значительно больше. По аналогии с нашими данными по хорошо изученным геотермальным месторождениям Камчатки и Курильских островов, этот участок разреза представляет собой зону перехода жидкость-пар. Зона обладает характерным обликом пород, специфической минералогией и геохимией метасоматитов [2, 11]. Такие участки контролируют крупные области кипения гидротерм и формирования в настоящее время золото-полиметаллических руд. Температуры минералообразования (по данным гомогенизации газово-жидких включений и минеральным геотермометрам) на всем интервале колеблются от 130-150 до 220-250⁰С, в зоне кипения происходит резкое колебание и снижение температур (до 130-180⁰С).

Интервал 1650-2500 м. Вторичная минерализация представлена среднетемпературными пропилитами кварц-хлорит-эпидот-мусковитового состава. Температуры минералообразования составляют 180-200 – 250-270⁰С, возможно – до 300⁰С. Глубже 2000 м, наряду с окварцеванием, наиболее широко развиты эпидотизация, мусковитизация и серицитизация пород. Интенсивность и температуры пропилитизации увеличиваются с глубиной, что выражено постепенным увеличением к основанию разреза хлорита, эпидота, мусковита и альбита, меньше – кварца и рудного вещества. Также с глубиной увеличивается частота встречаемости ангидрита. Ангидрит выполняет, в основном, трещины и пустоты, совместно с криптокристаллическим кварцем. По нашим данным массовое развитие ангидрита происходит в зоне смешения высоко-среднетемпературных растворов хлоридно-натриевого состава с морской водой.

Таким образом, гидротермально-метасоматические изменения пород в разрезе скважины ГП-3 представлены тремя зонами и наложенной на среднюю зону областью кипения гидротерм. Состав минеральных ассоциаций, характер границ и особенность переходов от зоны к зоне, постепенная смена температур при формировании минерализации и др. данные свидетельствуют в пользу развития зон в результате единого современного однонаправленного гидротермально-метасоматического процесса за счет продвижения фронта газо-гидротермального флюида от интрузивного магматического (субвулканического) тела к дневной поверхности. В результате интенсивного кипения гидротерм на интервале 750-1200

м в породах выпадают рудные компоненты и минералы кремнезема (тридимит, кристобалит, опал, халцедон и кварц). В процессе залечивания пор, пустот и трещин кремнеземом в туффитах дополнительно образуется верхний водоупор, который изолирует в настоящее время высокотемпературный гидротермальный поток от дневной поверхности и способствует сохранению высоких термодинамических параметров растворов в недрах Северо-Парамуширской ГМС [10]. По-видимому, данный геологический блок является поднятым и контролирует восходящий поток гидротерм [9].

В 2003-2004 гг. ОАО «Сахалинская гидрогеологическая экспедиция» пробурена еще одна скважина № 4-ГП с целью поиска геотермального теплоносителя в бассейне р. Птичь (скважина расположена в 7-8 км к югу от г. Северо-Курильска). Техническое задание на бурение не предусматривало отбор горных пород, но по нашей просьбе был выполнен отбор шлама, в среднем, через каждые 10 м проходки. Отсутствие керна не позволяет с достаточной точностью выделить все границы литологических толщ и метасоматических зон, но с учетом характеристики опорного геологического разреза (см. выше скв. ГП-3) и выполненных нами исследований на всей площади Северного Парамушира, восстановлена метасоматическая зональность района распространения Северо-Парамуширской ГМС.

3. Петрографическое изучение пород по разрезу скважины 4-ГП (0 - 1120 м)

Интервал от 0 до 75м представлен двупироксеновыми андезитами порфировой и гломеропорфировой структуры с кучным расположением фенокристаллов. Порода хорошо раскристаллизована. Кристаллы плагиоклаза (андезин) – удлиненные, идиоморфной и неправильной формы. В кристаллах повсеместно наблюдается полисинтетическое двойникование. Фенокристаллы пироксена - короткопризматический авгит и гиперстен удлиненной формы, плеохроирующий оттенками желтого. Основная масса имеет витрофировую структуру, сложена микролитами андезина, авгита и рудной «сыпью». По порам резорбированного плагиоклаза и по некоторым кристаллам пироксена развивается монтмориллонит в виде чешуйчатых и червеобразных форм бурого цвета.

Интервал 75-425м представлен вулканогенно-осадочными отложениями. В толще распространены алевролитовые и, в меньшей степени, псаммо-алевролитовые кристаллокластические туффиты с реликтами диатомовых водорослей и

микроорганизмов. Породы сложены угловатыми обломками кристаллов плагиоклаза (андезин – лабрадор), моноклинного пироксена, кварца и амфибола неправильной формы. Основная масса и поры заполнены цеолитом, мелкими чешуйками монтмориллонита бурого цвета, зернистыми формами выделений кальцита и бурого глинистого агрегата. Диатомовые водоросли и микроорганизмы располагаются ориентированно по направлению слоистости пород и замещены кремнистым веществом, кальцитом и рудной сыпью (**фото 1, 2**).

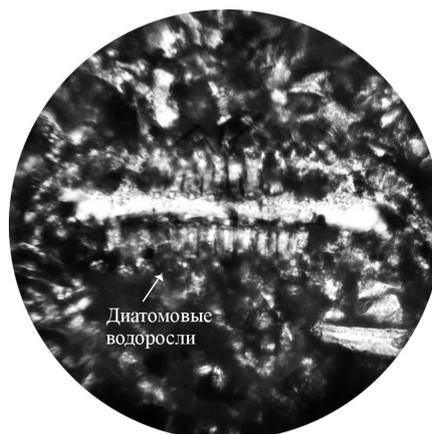
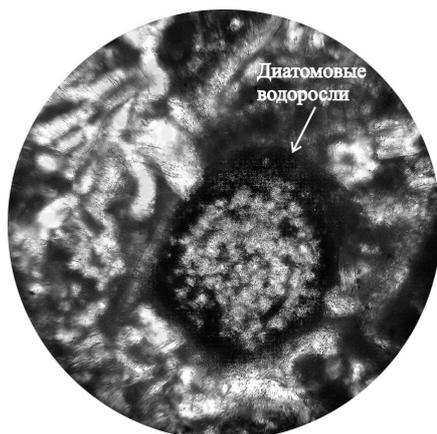


Фото 1, 2. Диатомовые водоросли в алевролитовом туффите. 45 X.

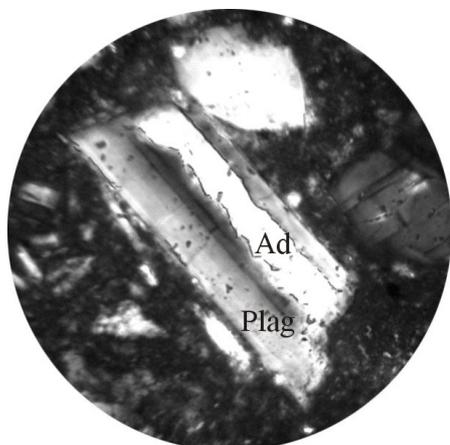


Фото 3. Развитие адуляра по трещинке в плагиоклазе (николи скрещены). 45 X.

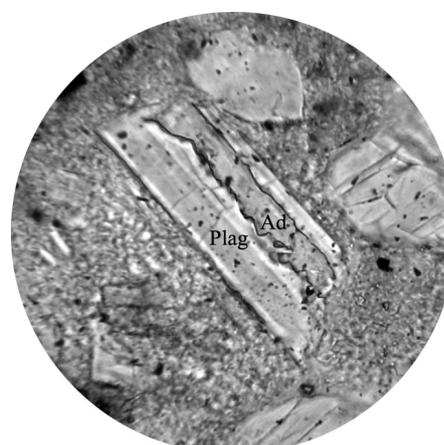


Фото 4. То же, при одном николе 45 X.

На глубине 305 м наблюдается окварцевание основной массы и развитие адуляра по трещинкам плагиоклаза (**фото 3, 4**).

Интервал 425 - 470 м. Диабазы офитовой структуры, сложены короткопризматическими фенокристаллами основного плагиоклаза – лабрадора, моноклинного пироксена – авгита, зернами кварца. Порода пористая, поры

заполнены бесцветным халцедоном, образующего параллельно-лучистые агрегаты с прямым погасанием, кальцитом и соссюритом.

Интервал 470- 1120 м. Представлен переслаиванием алевролитового кристаллокластического туффита, псаммитового кристаллолитокластического и псефитового литокластического туффов.

В верхней части интервала в алевролитовом кристаллокластическом туффите обломки кристаллов плагиоклаза альбитизированы, по трещинкам развивается адуляр и мелкие зерна кальцита. Основная масса насыщена бурым пелитовым агрегатом и замещена цеолитом. В порах развивается монтмориллонит, хлорит и кальцит. Сфен выделяется в виде неправильных зерен и их агрегатов, характерны ромбические и клиновидные формы кристаллов бурого цвета, с заметным плеохроизмом.

Псаммитовый литокристаллокластический туф на глубине 695 м состоит (в основном ?) из обломков андезитового порфирита. Обломки окварцованы, по плагиоклазу андезитового порфирита развивается серицит и кальцит. Хлорит замещает основную массу и фенокристаллы плагиоклаза и пироксена - в виде чешуек и радиально-лучистых агрегатов, окрашен в зеленый цвет различной степени насыщенности, буроватый с ясным плеохроизмом до желтого и прекрасной спайностью (001). Погасание относительно спайности прямое. Наблюдаются скопления зерен эпидота таблитчатой и вытянутой формы с аномальной интерференционной окраской. Бурые хлопьевидные выделения лейкоксена развиваются по всей массе обломков.

Следует отметить появление ангидрита в интервале 775 м, развивающегося вместе с альбитом по плагиоклазу. Формы выделений: зернистые агрегаты, кристаллы толстотаблитчатого габитуса. Высокий рельеф. Совершенная спайность по (010) и хорошая - по (100) и (001).

Ниже по разрезу толщи туффитов и туффов хлорит замещает не только цемент, но и развивается по обломкам эффузивных пород (как по основной их массе, так и фенокристаллам). Из вторичных минералов зафиксирован кварц, который выполняет поры и, реже, слагает тонкие прожилки, где ассоциирует с хлоритом и рудным минералом.

В верхних горизонтах характеризуемой толщи пород цеолит имеет расплывчатые очертания и загрязнен. На большей глубине он развивается в хорошо индивидуализированных зернах с ярко выраженной спайностью (под углом 90°).

Возможно, это ломонтит (**фото 5, 6**).

От глубины 1045 м и до забоя скважины проявляется интенсивная альбитизация и калишпатизация основной массы. Нонтронит встречается в виде мелких чешуек с совершенной спайностью, зеленовато-желтого и буровато-желтого цвета.

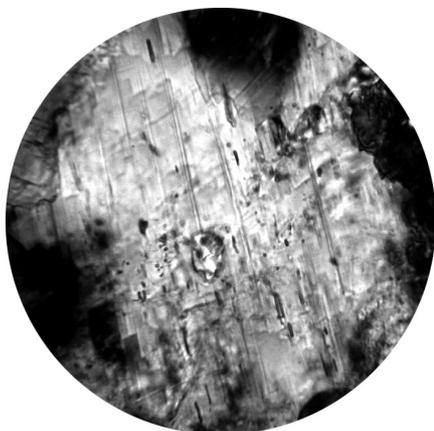


Фото 5. Зерно ломонтита (?) (николи скрещены). 45 X

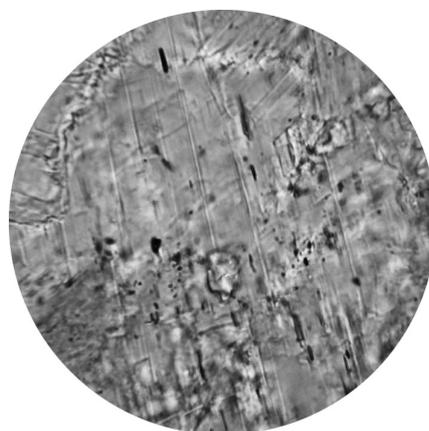


Фото 6. То же, при одном николе. 45 X.

В заключение к характеристике разреза по скважине 4-ГП отметим, что интенсивность и степень изменения отложений, а также характер гидротермальных изменений зависит от величины, структуры и состава обломков исходной породы. Пористость пород с глубиной уменьшается, что подтверждается данными каротажа скважины (**рис. 2**).

Верхняя часть разреза вулканогенно-осадочных отложений, вскрытых скважиной 4-ГП, изучена также с помощью мелких (до 50 м от дневной поверхности) скважин, пробуренных в 2000-2002 гг. ОАО «Сахалинская гидрогеологическая экспедиция» в нижней части бассейна р. Наседкина в целях питьевого и технического водоснабжения г. Северо-Курильска.

Под делювиально-аллювиальными отложениями мощностью до 5-6 м залегают следующие породы.

Скважина П-4. Интервал 6,0 – 20,0 м. Слоистая осадочно-вулканогенная толща: чередование псаммитового песчаника и туффита с алевролитовой размерностью обломков. Из гидротермальных изменений, в целом по интервалу, хорошо выражены монтмориллонитизация и цеолитизация, развивающиеся преимущественно по трещинам, а также гидрослюда и гидроокислы железа. На интервале 12,2 – 15,1 м отмечается интенсивное окварцевание породы, с примесью

МОНТМОРИЛЛОНИТА И НЕБОЛЬШОГО КОЛИЧЕСТВА ЦЕОЛИТОВ.

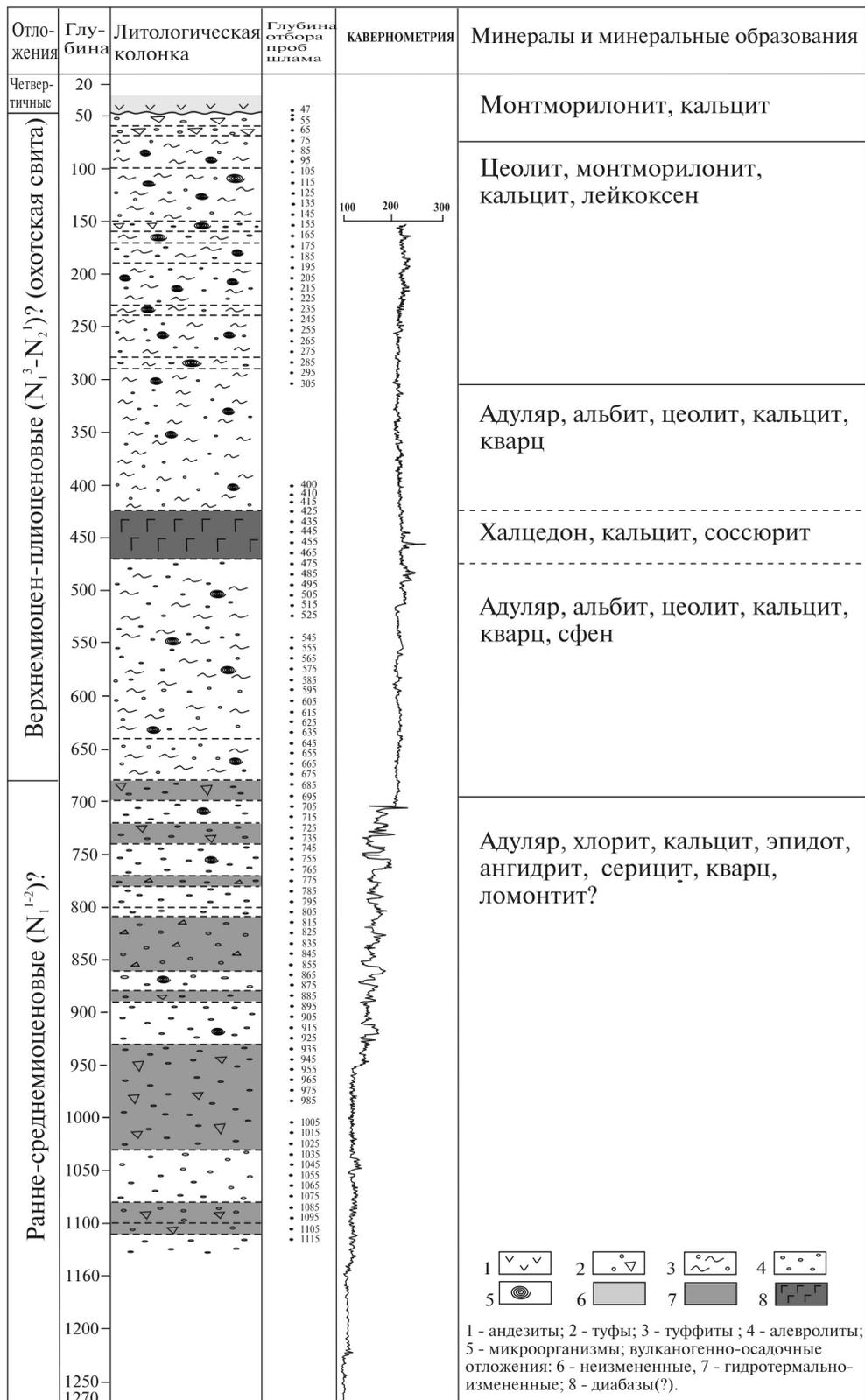


Рис. 2. Геологический разрез скважины 4-ГП (Северо-Парамуширская геотермальная площадь) Примечание: Кавернометрия выполнена ОАО «Сахалинская гидрогеологическая экспедиция».

Скважина П-5. Интервал 5,0 – 26,0 м. Слоистая осадочно-вулканогенная толща: от алевролитового - до алевро-псаммитового туффита, с прослоями диатомитов и пеплового материала. Гидротермальные изменения слабо выражены развитием цеолита по трещинкам в плагиоклазе и монтмориллонитизацией вулканического стекла. Встречается повышенное содержание обломков окварцованных лав, что говорит о более интенсивном гидротермальном процессе на участке бурения скважины П-5, по сравнению с блоками пород, вскрытых соседними скважинами. По всему разрезу развиты гидроокислы железа и гидрослюда.

Рудные выделения ильменита, магнетита, пирита в породе присутствуют в малых количествах и наблюдаются в коротких, тонких, прерывистых (альпийского типа) прожилках совместно с гидроокислами железа.

4. Заключение

Таким образом, изучены гидротермально-метасоматические процессы, происходившие на новейшем этапе эволюции Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы (вулканический хребет Вернадского, северная часть о-ва Парамушир). В разрезах в естественных обнажениях пород и по данным бурения глубоких скважин (от 1200 до 2500 м от дневной поверхности) на основании петрографического и минерографического анализов описаны ассоциации вторичных гидротермальных минералов. Выделены зоны кварц-адуляровых (с ортоклазом ?) метасоматитов, как правило, приуроченных к открытым трещинам и высокопористым участкам пород. Показано, что в интервале глубин от 2500 м до дневной поверхности на участках, приближенных к осевой зоне хребта Вернадского, существует метасоматическая зональность: от высокотемпературных кварц-хлорит-серицит-альбитовых пропилитов (в основании разрезов) до низкотемпературных опал-тридимит-кристаллит-сметтит-алунитовых разностей (в приповерхностных горизонтах). Последние широко распространены на площади, занимаемой гидротермально-магматической системой, и, по-видимому, играют роль верхнего водоупора и теплового экрана для системы, что обуславливает значительную долю скрытой разгрузки гидротерм в общем выносе тепла для данной системы (см. работы Е.Г. Калачевой, С.Н. Рычагова и др. в данном сборнике статей). В определенной степени можно согласиться с мнением Я.А. Рихтера (см. его статью «Современные и древние ...» в настоящем сборнике), что охарактеризованная

минерализация отражает современный высокотемпературный процесс гидротермально-метасоматического преобразования пород, наложенный на зеленокаменные изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // *Вулканология и сейсмология*, 2002. № 1. С. 34-50.
2. Жатнуев Н.С., Рычагов С.Н., Миронов А.Г. и др. Пародоминирующая система и геохимический барьер жидкость-пар Верхнего термального поля Паужетского месторождения // *Вулканология и сейсмология*, 1991. № 1. С. 62-78.
3. Карпов Г.А. Экспериментальные исследования минералообразования в геотермальных скважинах. М.: Наука, 1976. 171 с.
4. Коробов А.Д. Гидротермальный литогенез в областях наземного вулканизма // Автореферат дисс. на соискание уч. степ. докт. геол.-мин. наук. Москва, ГИН РАН, 1995. 44 с.
5. Набоко С.И. Минералогия действующих гидротермальных систем и минералогический критерий температурного режима в их недрах // *Минералогия гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов*. М.: Наука, 1970. С. 3-12.
6. Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР. 1963. 172 с.
7. Набоко С.И., Карпов Г.А., Розникова Л.П. Гидротермальный метаморфизм пород и минералообразование // *Паужетские горячие воды на Камчатке*. М.: Наука, 1965. С. 76-118.
8. Русинов В.Л. Метасоматические процессы в вулканических толщах. М.: Наука, 1989. 213 с.
9. Рычагов С.Н. Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: модель геологической структуры // *Вулканология и сейсмология*, 1993. № 2. С. 59-74.
10. Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф. и др. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минералорудообразования в ее недрах // *Вулканология и сейсмология*, 2002. № 4. С. 3-21.
11. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др. Температурная и минералогическая характеристика геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) // *Геология рудных месторождений*, 1993. Т. 35. № 5. С. 405-418.
12. Структура гидротермальной системы (Рычагов С.Н., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д. и др.). М.: Наука, 1993. 298 с.
13. Трухин Ю.П., Петрова В.В. Некоторые закономерности современного гидротермального процесса. М.: Наука, 1976. 173 с.
14. Elders W.A., Hoagland I.J.R., Williams A.E. Distribution of hydrothermal mineral zones in the Cerro Prieto geothermal field of Baja California, Mexico // *Geothermics*. 1981. V. 10. N 3/4. Pp. 245-253.
15. Reyes A.G. Petrology of Philippine geothermal systems and application of alteration mineralogy to their assessment // *J. Vol. Geotherm. Res.* 1990. N 43. Pp. 279-309.