

На правах рукописи

Брагин Иван Валерьевич

**ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ СИХОТЭ–АЛИНЯ
(СОСТАВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ)**

Специальность 25.00.07 – «Гидрогеология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого–минералогических наук

Владивосток 2011

Работа выполнена в Дальневосточном геологическом институте
Дальневосточного отделения Российской Академии Наук

Научный руководитель: доктор геолого–минералогических наук,
профессор **Чудаев Олег Васильевич**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Дутова Екатерина Матвеевна**

кандидат геолого-минералогических наук,
доцент **Быкова Валентина Васильевна**

Ведущая организация: Институт водных и экологических
проблем Дальневосточного отделения
Российской Академии Наук, г. Хабаровск,
ул. Ким Ю Чена, д. 65

Защита диссертации состоится «27» декабря 2011 г. в 15⁰⁰ часов на
заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДМ
212.269.03 ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» по адресу: г.Томск, пр. Ленина, 2а, строение
5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан ____ 2011г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
ДМ 212.269.03, кандидат геолого–минералогических наук, доцент

 - О.Е.Лепокурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. По бальнеологическим показателям термальные воды Сихотэ–Алиня не уступают многим известным курортам Европы, Сибири и Юго–Восточной Азии. Изучение термальных вод на рассматриваемой территории продолжается уже около века. Первым этапом изучения был описательный, в этот период были обнаружены и описаны проявления термальных вод, в единичных случаях начато их использование. Второй этап – гидрогеологическое изучение проявлений, выделение месторождений, изучение химического и газового состава, выявление закономерностей условий формирования изучаемых вод. Третий этап связан с разносторонним гидрогеохимическим исследованием вод. Эти исследования позволили получить данные о химическом и газовом составе термальных вод на современном уровне. Работы, интерпретирующие химический состав азотных терм, как результат взаимодействия системы вода–порода, немногочисленны. Оригинальная парадигма о стадийности формирования химического состава вод в результате взаимодействия вода–порода, предложенная С.Л. Шварцевым, позволяет по–новому рассмотреть геохимические процессы формирования азотных терм. Поэтому автором особое внимание уделялось изучению именно этой системы. С другой стороны, в региональном плане для большой территории Сихотэ–Алиня (протяженность с юго–запада на северо–восток более 1000км) детальных работ, выполненных по единой методике, практически нет. Полученный автором уникальный материал по месторождениям термальных вод Сихотэ–Алиня, анализ и обобщение данных предшественников позволили выявить основные геохимические факторы, определяющие формирование месторождений азотных терм.

Актуальность проблемы вызвана не только научным, но и практическим интересом. Результаты работы могут быть использованы при доразведке и расширении минеральной базы действующих санаториев и курортов, осуществлении прогноза изменения химического состава и обеспечении рациональной эксплуатации разрабатываемых месторождений термальных вод. Представляемая работа содержит современные сведения по геологии, гидрогеологии, гидрогеохимии и генезису термальных вод Сихотэ–Алиня.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является определение состава термальных вод Сихотэ–Алиня с использованием новейших достижений аналитической техники и установление условий их формирования. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1. определение состава вод (макро– и микроэлементы) и изотопных отношений в них;
2. проведение геохимической типизации изученных терм;
3. выяснение генезиса термальных вод;

4. установление особенностей формирования химического состава азотных термальных вод Сихотэ–Алиня.

Методы исследования и фактический материал. Данная работа является итогом исследований, выполненных диссертантом в период обучения в аспирантуре. Маршрутные и другие гидрогеологические исследования выполнены непосредственно автором на наиболее известных разведанных месторождениях термальных минеральных вод Сихотэ–Алиня.

Фактический материал получен автором в результате работ, проводимых в качестве аспиранта Дальневосточного Геологического Института ДВО РАН под руководством зав. лабораторией и научного руководителя д.г.–м.н. О.В. Чудаева. В процессе работы также привлекались материалы производственных отчетов В.В. Кулакова, С.И. Батюкова, Н.М. Богаткова и других исследователей. Часть фактического материала получена при совместной работе с В.А. Чудаевой (ТИГ ДВО РАН).

Основные методы исследования:

- полевые маршруты с целью обследования месторождений термальных минеральных вод на территории юга Дальнего Востока (Приморский и Хабаровский края), отбора проб горных пород, гидрогеохимического опробования подземных пресных (фоновых) и минеральных вод;
- определение основных физико–химических параметров вод в полевых условиях (рН, Eh, SEC, DO, T°C, HCO₃⁻ – путем титрования и др.);
- определение концентраций основных ионов методом жидкостной хроматографии;
- установление концентраций микроэлементов, включая редкие земли (РЗЭ), а также содержания изотопов кислорода и водорода методом масс–спектрометрии;
- выявление содержания изотопов трития методом альфа–бета спектрометрии;
- определение содержания газовой компоненты методом газовой хроматографии;
- изучение аншлифов водовмещающих пород методом рентгеноспектрального микрозондового анализа;
- теоретические разработки, включающие установление условий формирования химического состава термальных вод, и компьютерное моделирование с использованием программного обеспечения (HydroGeo, AquaChem, Wateq4f).

Научная новизна. Впервые для группы термальных вод Сихотэ–Алиня, на новом аналитическом уровне, получены данные по микроэлементному и изотопному составу вод, а также содержанию РЗЭ. Основываясь на полученных данных, диссертантом сделаны выводы о происхождении водной и газовой компонент вод, определены условия формирования химического состава термальных вод, выявлены основные процессы, контролирующие поступление химических элементов в воду. Установлены особенности, присущие изученному типу вод, а также построена концептуальная геохимическая модель формирования азотных

термальных вод Сихотэ–Алиня. Проведено сравнение изученных терм с водами сходного геохимического типа Монголо–Охотского пояса, Байкальского рифта, Горного Алтая и др.

Практическая ценность. Результаты работы могут быть использованы при доразведке и расширении минеральной базы действующих санаториев, курортов и бальнеолечебниц, осуществлении прогноза изменения химического состава терм и обеспечении рациональной эксплуатации разрабатываемых месторождений термальных вод.

Апробация работы. Представленная работа была выполнена в лаборатории океанического литогенеза и рудообразования ДВГИ ДВО РАН. Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на Международном совещании в Японии, 2006 (JKASP–5), конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии», Иркутск, 2007; 12–ом международном симпозиуме «Взаимодействие вода–порода» (WRI–12), Китай, 2007; на международном совещании по водным ресурсам и качеству вод стран Азиатско–Тихоокеанского региона (CPC–2008), Владивосток, 2008; на 38–м международном симпозиуме гидрогеологов (IAH–2010), Польша, 2010; а также на 1–ой и 3–ей региональной конференциях молодых ученых «Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России», Владивосток (2006 и 2010 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, среди которых 3 статьи в центральных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья находится в печати.

Структура и объем работы. Настоящая кандидатская диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературных источников, состоящего из 67 наименований. Работа изложена на 105 страницах, включая 24 рисунка и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору геолого–минералогических наук, профессору О.В.Чудаеву за требовательность, ценные советы, поддержку и помощь в работе. Глубокую признательность автор выражает кандидату геолого–минералогических наук Г.А.Челнокову за постоянную поддержку, советы и замечания при выполнении работ. Автор также признателен за помощь и полезные советы кандидату геолого–минералогических наук Н.А.Харитоновой. За дружескую поддержку и участие автор выражает благодарность кандидату геолого–минералогических наук О.Г.Токаренко. За тесное сотрудничество и за действенную помощь автор благодарит сотрудников аналитического центра ДВГИ ДВО РАН в лице Зарубиной Н.В., Карабцова А.А., Екимовой Н.И., Блохина М.С., Игнатьева А.В.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение. *Изученные минеральные подземные воды, локализованные в Сихотэ–Алинской складчатой области, являются низкоминерализованными, слабощелочными азотными термами. По условиям формирования термальные воды Сихотэ–Алиня делятся на воды,*

формирующиеся в массивах кристаллических пород (месторождения Тумнин, Амгу, Чистоводное) и воды, приуроченные к вулканогенно–осадочным породам (Анненские). Увеличение температуры вод с юга на север вдоль структуры Сихотэ–Алиня обусловлено тектоническими факторами.

Исследованные термальные воды представлены четырьмя группами источников, локализованных в Приморском крае на двух участках: северном (Амгу) и южном (Чистоводное); в Хабаровском крае в юго–восточной части (Тумнин и Анненские) (рис.1). На рисунке видно, что все месторождения относятся к восточной части Сихотэ–Алинской складчатой области.

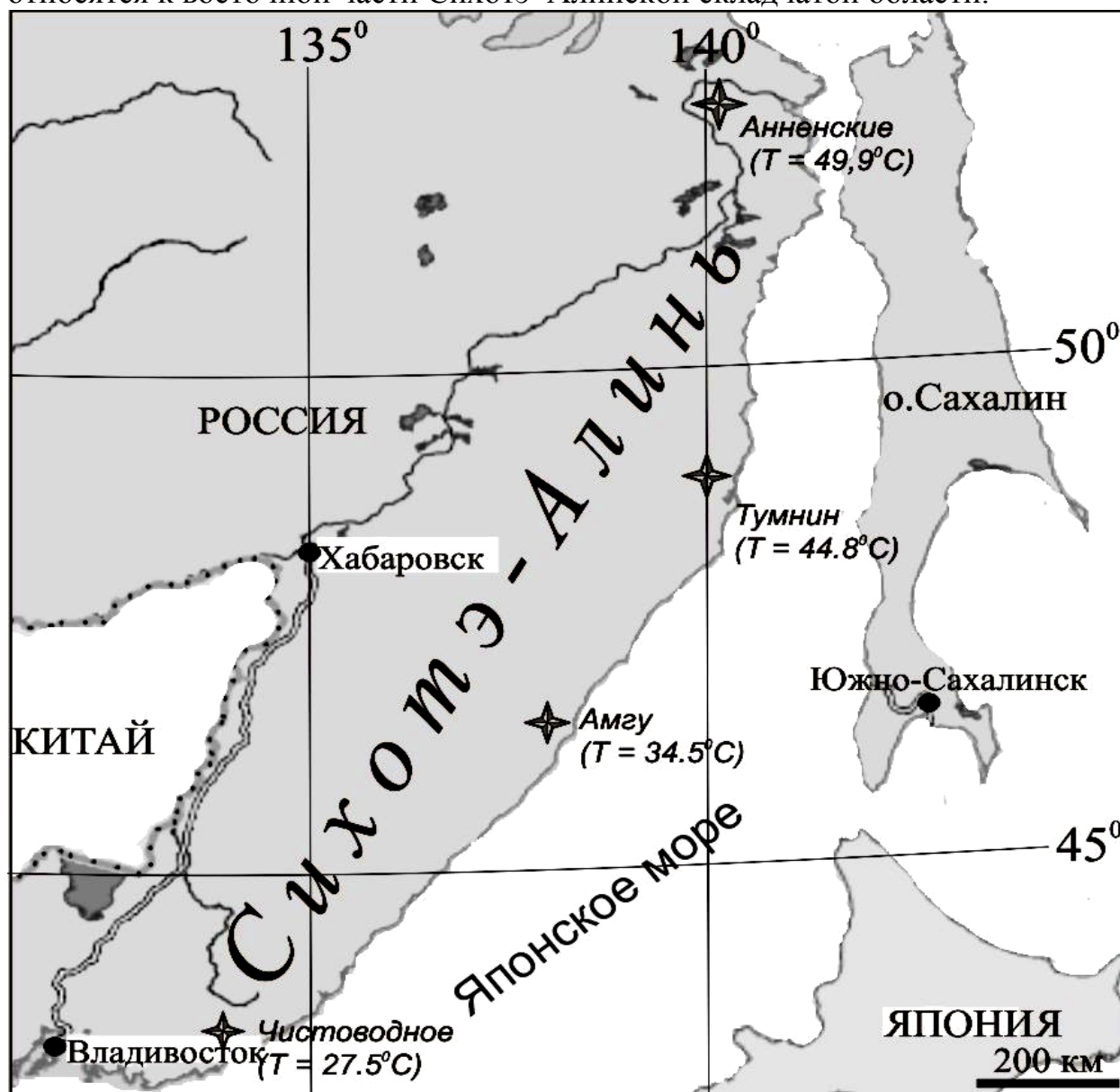


Рисунок 1. Обзорная карта объектов исследования.

Анненские термальные источники расположены в низовьях реки Амур, на правом его берегу, в 120 км вверх по течению от г. Николаевск–на–Амуре. Месторождение сложено переслаивающимися вулканогенно–осадочными породами верхнего мела, представленными туфоконгломератами, туфопесчанниками, туфоалевролитами, порфиритами и их лавобрекчиями. Гидрогеологические условия Анненских терм целиком определяются

тектоническими факторами. Выход термальных вод приурочен к зоне разлома северо–восточного простирания. В пределах зоны мощностью 30–40 м породы сильно раздроблены и почти всюду гидротермально изменены. Трещины и пустоты зоны нарушения являются непосредственными проводниками термальных вод. Они, в большинстве своем, приурочены к туфоконгломератам и тектоническим брекчиям. По химическому составу воды сульфатно–гидрокарбонатные, натриевые, слабощелочные – pH 9,0–9,2. Минерализация – 0,23–0,27 г/л. Среди основных катионов преобладают Na^+ (60–65 мг/л), K^+ (1,1–1,3 мг/л), Ca^{2+} (1,8–2,3 мг/л), а среди анионов – HCO_3^- (125–132 мг/л), SO_4^{2-} (25–27 мг/л). В водах повышено содержание фтора до 2,7 мг/л, кремниевой кислоты – до 115 мг/л. По данным С.И. Батюкова (1986) основным газовым компонентом является азот.

Тумнинский минеральный источник находится в Ванинском районе Хабаровского края, в 9 км от железнодорожной станции Тумнин, в долине ручья Чопэ – правого притока реки Тумнин. В региональном плане участок расположен в прикупольной зоне горы Айча. На Тумнинском участке развиты в равной степени интрузивные умереннокислые породы в западной части (палеогеновые гранодиориты) и основные эффузивные (миоценовые базальты и их туфы) в восточной. Выходы термальных вод приурочены к зонам тектонической трещиноватости на стыке интрузивных и эффузивных пород и характеризуются очаговым распространением. Воды трещинно–жильной системы в границах участка горячие с пластовой температурой до 54°C, температура на изливе 42–27°C. Вода прозрачная, без запаха и вкуса. По химическому составу воды гидрокарбонатные, натриевые, слабощелочные – pH 9,3. Минерализация – 0,2 г/л. Среди основных катионов преобладают Na^+ (45–52 мг/л), K^+ (0,3–0,5 мг/л), Ca^{2+} (2,1–2,3 мг/л), а среди анионов – HCO_3^- (80–95 мг/л), SO_4^{2-} (7,1–8,5 мг/л). В водах повышено содержание фтора до 1,1 мг/л, кремниевой кислоты – до 80 мг/л. По данным С.И. Батюкова (1986) основным газовым компонентом является азот.

Амгинское месторождение термальных вод расположено в Тернейском районе, на северо–востоке Приморского края в долине рек Амгу и Максимовка (Кхуцин). Месторождение представлено тремя известными выходами термальных вод (Амгу, Сайон, Кхуцин). Выходы вод локализованы вблизи контактов гранитных интрузий с эффузивами мезо–кайнозойского возраста. Температура воды источников варьируется в пределах 28–34,5°C, а pH вод – в пределах 8,5–9,08. Из основных анионов здесь отмечается HCO_3^- (42,7–74,4 мг/л), SO_4^{2-} (13,6–14,8 мг/л), ионы кремнекислоты (13,7–21,9 мг/л); из катионов – Na^+ (23,7–42 мг/л), K^+ (0,4–2 мг/л), Ca^{2+} (2–4,72 мг/л). Основным газовым компонентом является азот (Чудаев, 2003, Брагин, 2009).

Чистоводненское месторождение азотных терм расположено в Лазовском районе на юге Приморского края в долине р. Чистоводная. Водовмещающие породы состоят из слабо–трещиноватых гранитов верхнемелового возраста, прорванных дайками и жилами аплитов, и диоритовых порфиринов палеогенового возраста. Гранитный массив разбит

параллельными разломами, секущими долину. В долине эти породы перекрыты аллювиальными четвертичными отложениями мощностью 3–7 м. Выходы термальных вод приурочены к зонам разломов и трещин, образующихся на контакте разновозрастных пород. По химическому составу воды гидрокарбонатные, натриевые, слабощелочные – рН 8,9–9,0. Минерализация – 0,14–0,16 г/л. Среди основных катионов преобладают Na^+ (19,3–26,4 мг/л), K^+ (0,25–0,43 мг/л), Ca^{2+} (3,71–5,32 мг/л); а среди анионов – HCO_3^- (56–67,9 мг/л), SO_4^{2-} (4,37–5,91 мг/л). В водах повышено содержание фтора до 4 мг/л, кремниевой кислоты – до 60 мг/л, радона – до 490 Бк/л. Основным газовым компонентом является азот (Юшакин, 1964).

Таким образом, изученные минеральные подземные воды локализованы в восточной части Сихотэ–Алинского вулканогенного пояса и являются низкоминерализованными (минерализация 0,14–0,27 мг/л), слабощелочными (рН 8,0–9,4) азотными термами. По условиям формирования гидрокарбонатные натриевые воды (Тумнин, Амгу, Чистоводное) относятся к трещинно–жильным водам, формирующимся в массивах кристаллических пород, в то время как сульфатно–гидрокарбонатные натриевые (Анненские) располагаются преимущественно в вулканогенно–осадочных породах. Выходы термальных вод приурочены к зонам тектонических нарушений (сдвигам и трещинам). Обращает на себя внимание последовательное увеличение температуры вод с юга на север Сихотэ–Алиня, что может быть связано с увеличением глубины циркуляции вод, а также с повышением термоградиента.

Второе защищаемое положение. *Содержание и поведение химических элементов в изученных термах контролируется скоростью водообмена и формированием вторичных равновесных минералов. Впервые полученные данные по редкоземельным элементам свидетельствуют об их низкой концентрации, близкой к содержанию РЗЭ в атмосферных осадках. Минералом, контролирующим содержания La, Ce, Nd, Sm, Gd в термальных водах является монацит.*

Взаимодействуя в процессе круговорота с разнообразными по составу породами, подземные воды заимствуют из них многочисленные химические элементы. Сохраняя постоянную неравновесность по отношению к первичным алюмосиликатам, воды последовательно удаляют из них те или иные элементы. Образовавшиеся при этом вторичные минералы, в силу их низкой растворимости, практически не участвуют в пополнении ионного состава вод, а, скорее, контролируют его. Благодаря разработкам современных высокочувствительных аналитических методов определения в настоящее время в изученных водах нами обнаружено более 60 химических элементов.

Характерной особенностью изученных азотных термальных вод является преобладание натрия и гидрокарбонат–иона, а также слабощелочной характер вод (табл.1). Для рассматриваемой группы термальных вод характерен рост температуры от южных (Приморских) к северным (Хабаровским) месторождениям (Чудаев, 2008). В этом же

направлении в водах месторождений повышается содержание гидрокарбонат–иона, сульфат–иона и натрия (Брагин, 2007).

Таблица 1. Химический состав термальных вод Сихотэ–Алиня (средние значения)

Источники	Анненские	Тумнин	Амгу	Чистоводное
n–количество проб	4	4	12	16
T, °C (на поверхности)	49.9	44.8	34.5	27.5
T, °C (глубинного резервуара)	98.7	86.1	80.9	60.7
pH	9.2	9.3	9.1	9.0
мг/л				
TDS	235	195	183	167
HCO ₃ [–]	112.8	78.1	70.7	63.4
Si	37.79	28.4	25.1	15
SO ₄ ^{2–}	25.4	7.1	13.6	5.7
Cl [–]	4.0	1.4	3.6	2.4
F [–]	2.7	0.8	0.9	3.9
Na ⁺	61.0	32	33.4	19.62
K ⁺	1.17	0.35	0.7	0.33
Ca ²⁺	2.0	2.11	2.0	5.42
Mg ²⁺	0.01	0.01	0.08	0.007

На основе полученных данных о составе термальных вод был построен ряд графиков зависимостей химических элементов от pH, температуры и общей минерализации (TDS). Так, на диаграммах зависимости карбонат–иона и гидрокарбонат–иона от общей минерализации видно, что при увеличении TDS растет содержание HCO₃[–], в то время как CO₃^{2–} остается неизменным (рис.2).

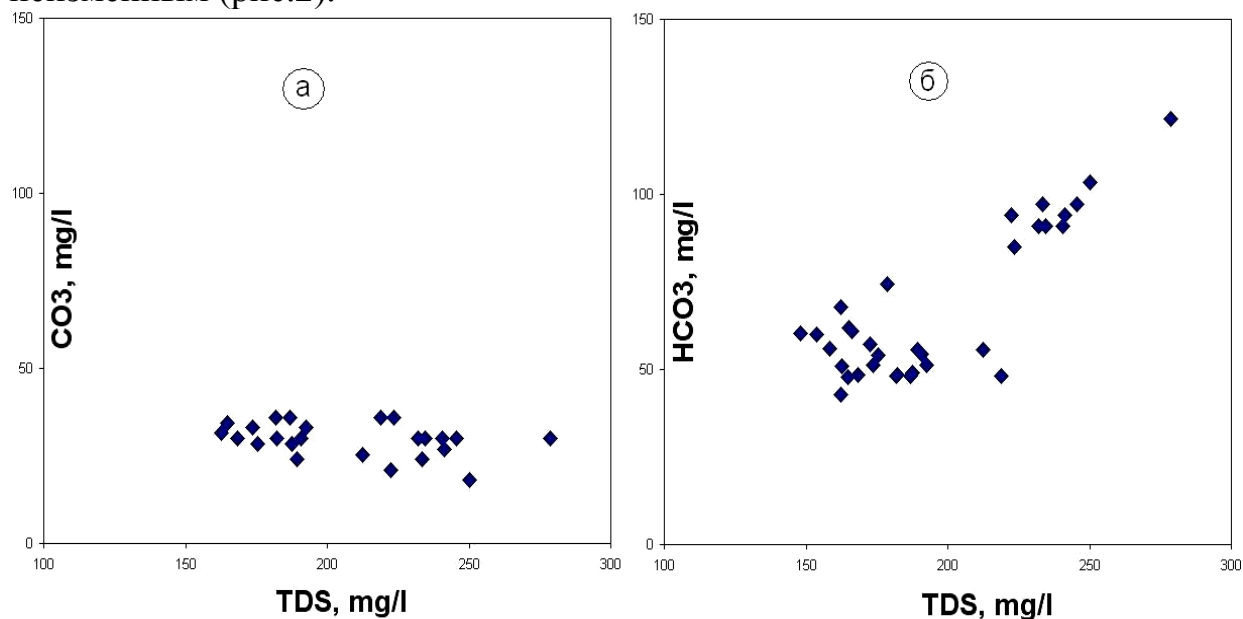


Рисунок 2. Зависимость содержания карбонат– (2а) и гидрокарбонат– (2б) иона от общей минерализации

Это свидетельствует о том, что при увеличении минерализации перестает накапливаться карбонат-ион, который в свою очередь контролируется содержанием в воде кальция, и при появлении в растворе «лишнего» CO_3^{2-} он выпадает в осадок в виде вторичного кальцита.

Сравнение изученных термальных вод с термами аналогичного типа Монголо–Охотского пояса (Кульдур), Байкальского рифта, Горного Алтая (Белокуриха) и других проявлений показало, что основной вклад в общую минерализацию вод (TDS) вносит натрий, гидрокарбонат-ион и отчасти кремний, содержание которых зависит от температуры вод. Также следует отметить увеличение содержания сульфат-иона в областях, где среди водовмещающих пород встречаются осадочные породы, с вкрапленностями сульфидов (Анненские, Амгу, термы Байкальского рифта, Белокуриха). Обратная зависимость между содержанием натрия и кальция объясняется тем, что в процессе формирования химического состава вод натрий имеет преимущество перед кальцием в процессе выщелачивания его из породообразующих минералов. Содержание в водах кальция ограничено карбонатным барьером, который приводит к связыванию кальция во вторичные минералы, например кальцит. Можно сказать, что изученные воды уже прошли этап первичного накопления в них кальция и находятся на стадии накопления натрия. Используя полученные данные, были построены диаграммы равновесия исследованных термальных вод с алюмосиликатными минералами (рис.3).

Анализ полученных результатов говорит о том, что равновесие азотных терм Сихотэ–Алиня относительно алюмосиликатных минералов носит сложный характер. Так, в системе $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}_2 - \text{SiO}_2$ точки состава азотных терм расположены кучно в поле Na–монтмориллонита (рис. 3Б). В системе $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CO}_2 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ видно, что изученные нами воды недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов и расположены в поле устойчивости Са–монтмориллонита (рис. 3А). Достигается равновесие с Na–монтмориллонитом и Са–монтмориллонитом. В системе $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (равновесие азотных терм с калиевыми минералами) установлено, что все точки располагаются в поле устойчивости мусковита и иллита (рис. 3Г). Решающее влияние на результат гидролиза силикатов оказывает содержание в водах соединений кремния. Более низкие концентрации H_4SiO_4 приводят к образованию иллита. Изучение равновесно–неравновесного состояния вод с магниевыми минералами (система $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$) показало плотное расположение точек в направлении образования Mg–монтмориллонита (рис. 3В). Расчет индексов насыщения минералов показал, что изученные термальные воды находятся в равновесии и пересыщены по отношению к глинистым минералам и низкотемпературным цеолитам.

Детальный анализ показал, что взаимоотношения в системе алюмосиликаты – подземные воды являются довольно сложными и носят равновесно–неравновесный характер. По С.Л.Шварцеву (Шварцев, 1996) состав новых образующихся продуктов системы является устойчивым к

агрессивному воздействию подземных вод. При этом, среди вторичных минералов глины занимают исключительное положение: их состав и строение созданы таким образом, чтобы воспрепятствовать разрушающему воздействию той среды, в которой они возникли.

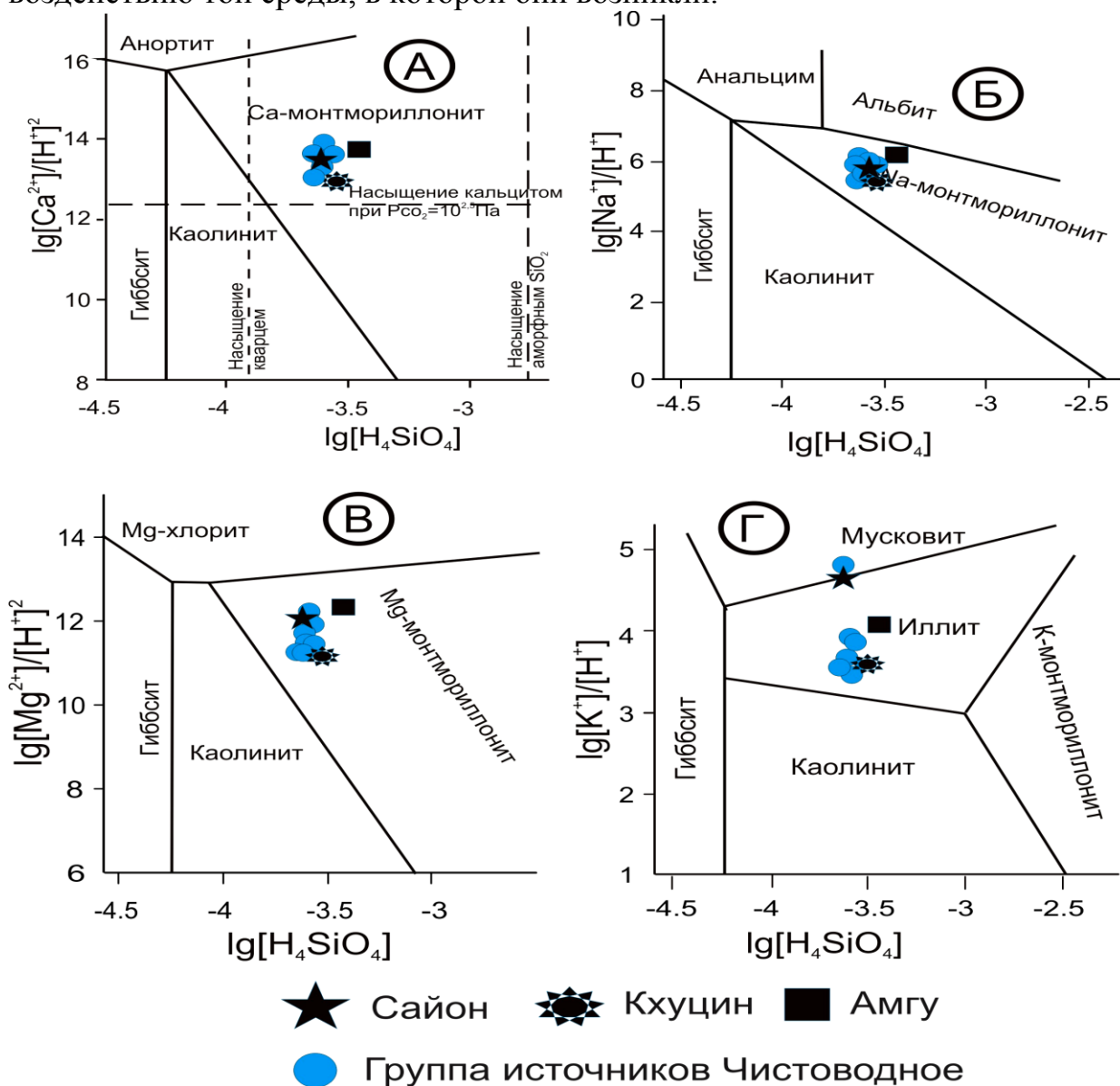


Рисунок 3. Равновесие термальных вод юга Сихотэ–Алиня с алюмосиликатными минералами при 25°C и $P=1\text{ атм}$: А – система $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CO}_2 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$; Б – система $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}_2 - \text{SiO}_2$; В – система $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{SiO}_2$; Г – система $\text{HCl} - \text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$

Образовавшись вследствие развития неравновесной системы «вода – первичные алюмосиликаты», глины оказались не только наиболее приспособленными к среде своего существования, но и имеют определенный «запас прочности» на случай изменения этой среды. С другой стороны, причиной неравновесного состояния вод с первичными алюмосиликатами является формирование вторичных минералов, которые на данном этапе развития системы находятся в равновесном состоянии с подземными водами и тем самым ограничивают рост катионов в растворе. Наблюдения в аншлифах показали, что породообразующие минералы водовмещающих

пород претерпевают существенное вторичное изменение, выражающееся в формировании глинистых минералов и цеолитов (рис.4).

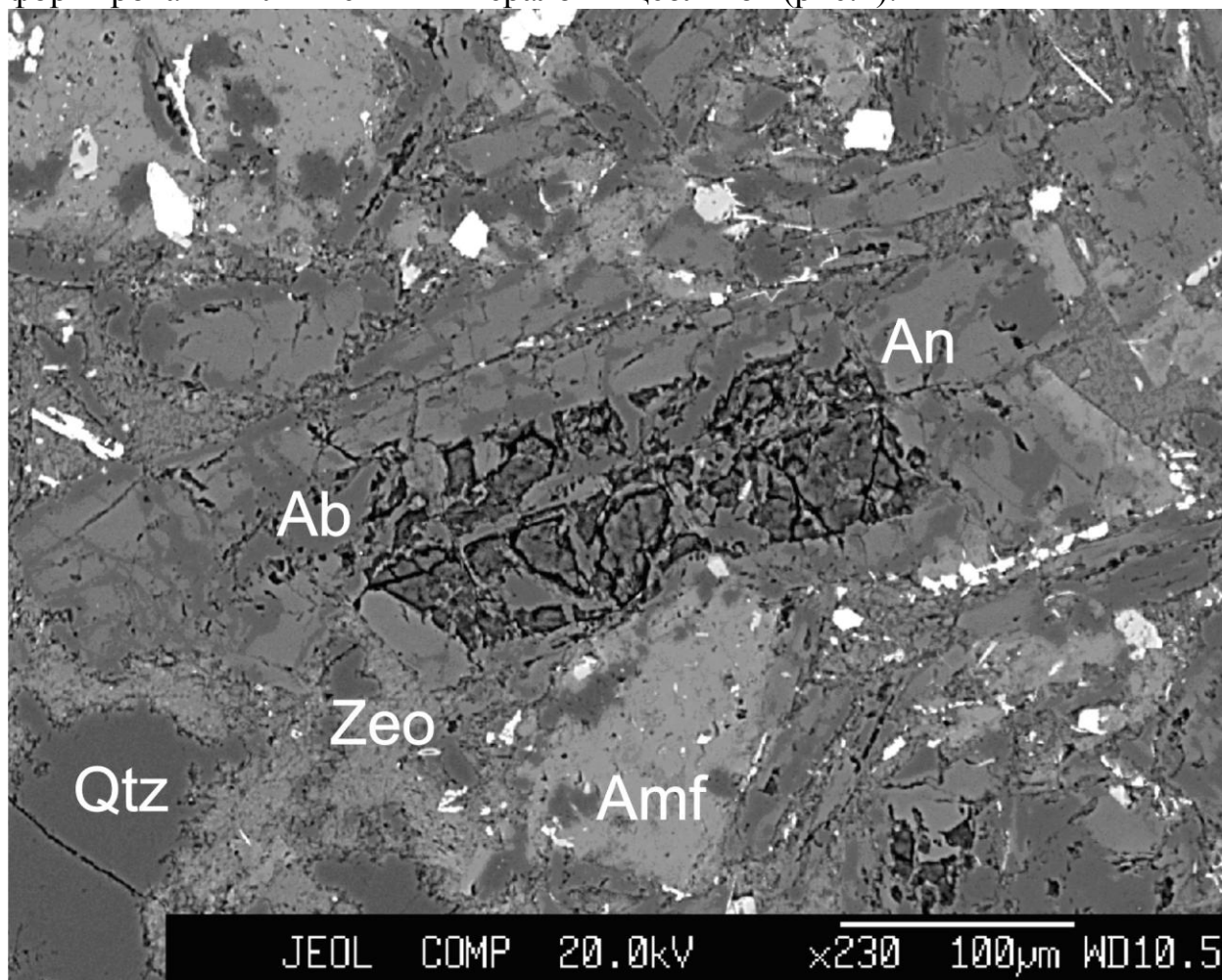


Рисунок 4. Фото аншлифа (Амгу) в отраженных электронах. Увеличение $\times 230$. Аналитик Екимова Н.И. (Qtz – кварц, Amf – амфибол, Ab – альбит, An – анортит, Zeo – цеолиты)

На фото в центре видно зерно зонального плагиоклаза, подвергнувшегося воздействию вод, что привело к частичному его растворению. Установлено, что новообразованные формы вторичных алюмосиликатных минералов (по краям зерна, в трещинах, в пустотах) относятся к цеолитам (Чудаев 2003). В итоге, равновесно–неравновесный характер системы «вода–алюмосиликаты» определяет, с одной стороны, принципиальную возможность растворения минералов водой, а с другой – постоянное закономерное образование вторичных минеральных фаз, состав которых должен меняться (усложняться) по мере эволюции состава водного раствора (Шварцев, 1998).

Пристальное внимание исследователей в последние годы, в связи с новыми аналитическими возможностями, привлекают редкоземельные элементы, как возможные индикаторы геохимических процессов, происходящих в системе вода–порода. Данные по РЗЭ, нормированные к северо–американскому сланцу, представленные на рисунке 5, показывают схожий слабо возрастающий тренд в сторону увеличения группы тяжелых элементов, вызванный их лучшей растворимостью, что может

свидетельствовать, на наш взгляд, о достаточно высокой скорости водообмена. Замедление скорости водообмена приводит к более резко выраженному тренду и сглаженному характеру кривых (Чудаев, 2003). По сравнению с другими типами подземных вод, например, углекислыми водами Приморья (Ласточка) (Tcherkaya, 2007), содержания РЗЭ в исследованных термах на порядок меньше, в силу щелочного характера азотных термальных вод по сравнению со слабокислым – в углекислых.

Основной контроль содержания РЗЭ в воде осуществляет pH. Как правило, увеличение pH приводит к уменьшению количества РЗЭ (Sholkovitz, 1995). Поэтому термальные воды Сихотэ–Алиня содержат низкие концентрации РЗЭ. Уровень концентраций РЗЭ в термальных водах близок атмосферным осадкам (Чудаева, 2001, Bragin, 2010).

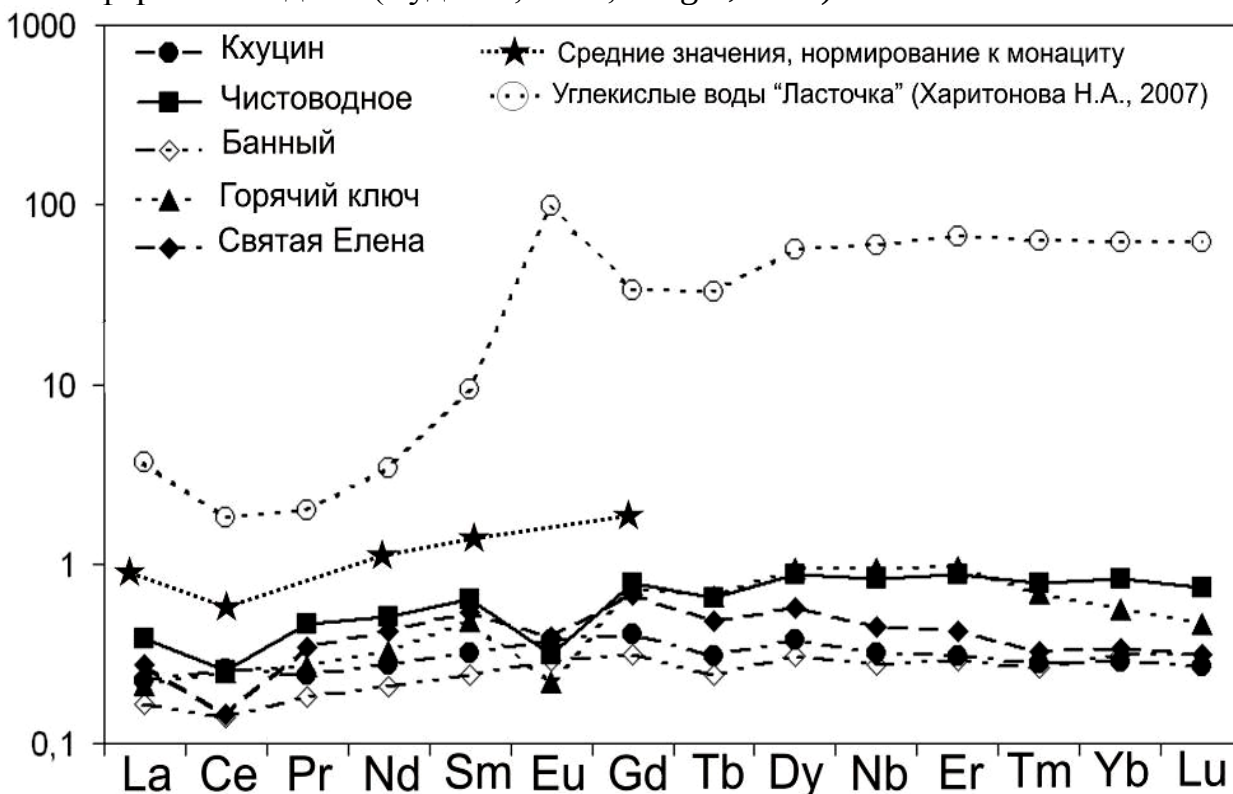


Рисунок 5. Распределение РЗЭ в термальных и углекислых водах Приморского края. Значения концентраций РЗЭ нормированы к значениям РЗЭ в северо–американском сланце (NASC) и представлены на логарифмической шкале.

Стоит отметить, что в речных водах Приморья (Чудаева, 2011) концентрация элементов редкоземельной группы выше, чем в термальных щелочных водах, что вполне объяснимо, так как речные воды имеют более низкое значение pH. Кроме того, процессы десорбции (перехода в раствор из взвеси) для речных вод играют достаточно существенную роль. Также на диаграмме видны европиевые и цериевые минимумы. Eu–аномалия может быть вызвана наличием деплетированного плагиоклаза в водовмещающих породах, в то время как причиной Ce–аномалии могло стать окисление Ce^{2+} до формы Ce^{4+} и, соответственно, осаждение последнего в окислительных условиях.

В горных породах наибольшие концентрации РЗЭ отмечаются в акцессорных минералах (монацит, сфен, циркон и т.д.), однако из–за их

малой растворимости, принято считать, что основное количество РЗЭ переходит в водный раствор при выщелачивании плагиоклазов, калиевых полевых шпатов, пироксенов и других (Чудаев, 2003).

В ходе изучения аншлифов пород, вмещающих изученные термы, были найдены вкрапления монацита и определены содержания в нем РЗЭ. Полученные данные по РЗЭ в термальных водах, нормированные к найденному в водовмещающих породах монациту, представлены также на рисунке 5. На рисунке видны схожие профили распределения La, Ce, Nd, Sm и Gd. Следовательно, можно сделать предположение о монаците, как об основном минерале, контролирующем содержание La, Ce, Nd, Sm и Gd в термальных водах Сихотэ–Алиня.

Таким образом, содержание и поведение химических элементов в изученных термальных водах контролируется скоростью водообмена и формированием вторичных равновесных минералов. Впервые полученные данные по редкоземельным элементам свидетельствуют об их низкой концентрации, близкой к содержанию РЗЭ в атмосферных осадках. Минералом, контролирующим содержание La, Ce, Nd, Sm, Gd в изученных термах является монацит.

Третье защищаемое положение. *По результатам анализов изотопов дейтерия, трития и кислорода–18, изученные термальные воды являются молодыми инфильтрационными водами метеорного происхождения. Состав газовой фазы представлен, в основном, азотом атмосферного происхождения.*

В ходе изучения вод получены новые данные по изотопному составу кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) в термальных водах Хабаровского края, которые хорошо коррелируют с данными О.В.Чудаева (Чудаев, 2003) по изотопному составу термальных источников Приморского края (рис.6).

Согласно нашим данным точки ложатся близко к Мировой линии метеорных вод, выведенной Крэйгом (Craig 1961), что говорит о метеорном происхождении исследуемых вод, причем выявлена четкая широтная корреляция по изотопам кислорода и водорода. Так, для южных Чистоводненских источников $\delta^{18}\text{O}=(-10,8)$ промилле, $\delta^2\text{H}=(-70)$ промилле. При движении на север происходит «облегчение» кислорода и водорода. Для северной Анненской группы $\delta^{18}\text{O}=(-18,8)$ промилле, а $\delta^2\text{H}=(-136,1)$ промилле. Полученные данные подтверждают точку зрения о значительном участии метеорных вод в питании гидротермальных систем, формирующихся в различных геолого–тектонических обстановках, включая зоны современного вулканизма (Ellis, 1977, Чудаев, 2003 и др.).

Определение концентрации трития в воде позволяет оценить ее возраст, так как, при отсутствии взаимодействия воды с атмосферным воздухом, содержащийся в ней тритий постепенно распадается, и концентрация его уменьшается со временем. Некоторые данные о содержании трития в термальных водах юга Сихотэ–Алиня, а также в реках их водосборов представлены в таблице 2.

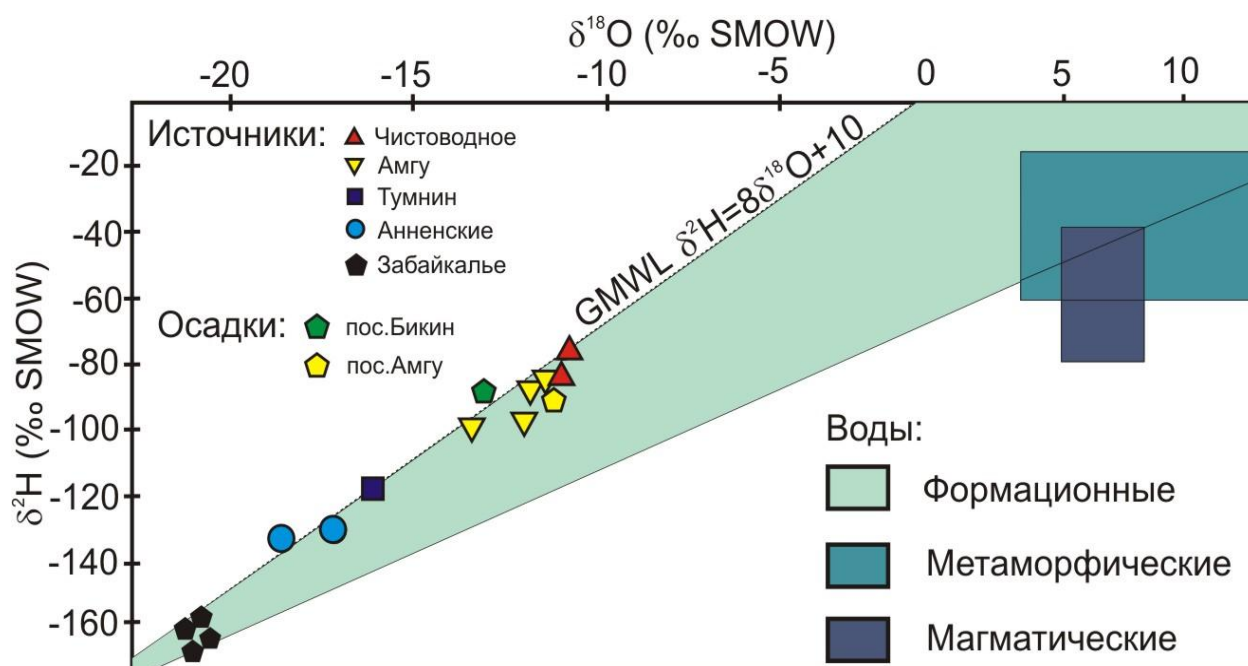


Рисунок 6. Содержание изотопов кислорода–18 и дейтерия в термальных водах Сихотэ–Алиня и Забайкалья, а также в атмосферных осадках поселков Бикин и Амгу.

Данные анализов термальных вод юга Сихотэ–Алиня на содержание трития показали, что во всех исследованных водах активность трития больше величины фоновой концентрации (MDC), то есть больше, чем 0,3 ТЕ. Однако содержание трития в реках водосборов, в которых локализуются проявления термальных вод, в 4–12 раз выше, чем в самих термальных водах. Это может свидетельствовать о том, что термальные воды смешиваются с водами зоны гипергенеза в околоповерхностных горизонтах. Учитывая различия в общей минерализации вод (возрастание ее на север Сихотэ–Алиня), а также данные бурения, скорость водообмена в изученных термах Приморского края выше, чем Хабаровского.

Таблица 2. Содержание трития в термальных водах юга Сихотэ–Алиня, а также в реках их водосборов.

Название источника/река водосбора	Содержание трития в термальной воде/в реке водосбора, ТЕ
Чистоводное/р.Чистоводная	2,1/9,5
Банний/р.Амгу	1,2/11
Кхуцин/р.Живописная	0,8/10
Святая Елена/р.Максимовка	3,1/11,6

Растворенные и спонтанные газы рассматриваемых терм представлены в основном азотом с примесью редких газов (табл. 3). Примеси других газов (CH_4 , CO_2 , O_2), как правило, незначительны. Если присутствие CH_4 и CO_2 можно объяснить глубинными процессами, метаморфизмом органики и др., то присутствие кислорода в пробах, видимо, является результатом смешения исследуемых терм с водами гипергенной зоны, насыщенными газами атмосферы (Барабанов, 1968), что также подтверждается представленными выше данными по содержаниям трития в изученных термах.

Таблица 3. Состав газа термальных вод Сихотэ–Алиня, %.

Место отбора	Вид пробы	Кол-во газа, мл/л	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄
Чистоводное,	растворенный газ	15,74	19,6	79,93	0,47	0,0001
Банний (Амгу)	–//–	14,68	12,17	86,76	1,02	0,06
Кхуцин (Амгу)	спонтанный газ	–	1,88	98,11	0,01	0,01
Кхуцин (Амгу)	растворенный газ	10,43	7,57	91,3	1,12	0,01
Тумнин	–//–	15,43	13,6	86,37	0,04	0,009
Анненские	–//–	15,61	17,96	82,31	0,03	0,003

Исследованные растворенные и спонтанно выделяющиеся газы имеют атмосферное происхождение. Отсутствие влияния ювенильных газов подтверждается и низким отношением содержания изотопов ³He/⁴He (0,1–0,24)*10⁻⁶ для термальных вод месторождения Чистоводное (Боголюбов, 1984). На основании данных, приведенных в работе (Кирюхин, 1962), отношение Ar¹⁰⁰/N₂ в спонтанно выделяющемся газе в Приморских термальных водах изменяется соответственно 1,26; 1,27; 1,15, что очень близко к аналогичному отношению в атмосфере (1,18).

Таким образом, изученные термальные воды являются молодыми инфильтрационными водами метеорного происхождения. Состав газовой фазы представлен, в основном, азотом атмосферного происхождения.

Основываясь на полученных данных, диссертантом была построена концептуальная модель формирования термальных вод Сихотэ–Алиня (рис.7). Вода выпадает в виде осадков на поверхность земли, где имеет смешанный Na–Ca–Cl–HCO₃ состав для прибрежной части Сихотэ–Алиня и температуру порядка 7°C (Чудаева, 2001). Далее через систему глубоких разломов и трещин вода проникает на глубину ориентировочно до 2,5–3 км, где нагревается за счет термического градиента Земли. Вода на своем пути вступает во взаимодействие с вмещающими породами, как изменяя породы, так и преобразуясь сама. Во время подъема нагретая вода смешивается с водами зоны гипергенеза, температура её понижается, происходит осаждение вторичных минералов (кальцит, низкотемпературные цеолиты). Достигая поверхности, разгружается в виде самоизлива, либо откачивается из глубины при помощи насосов (при наличии скважины). Данная модель хорошо согласуется с расчетами Б.Н. Рыженко и др. (1996) для системы вода–гранит при последовательном возрастании температуры. Результаты расчетов показали, что на начальном этапе взаимодействия при соотношении вода/порода >>1 происходит формирование Na–Ca–HCO₃ термальных вод.

Таким образом, формирование геохимического облика термальных вод Сихотэ–Алиня – довольно сложный процесс. Изученные термальные воды представляют собой молодые инфильтрационные воды.

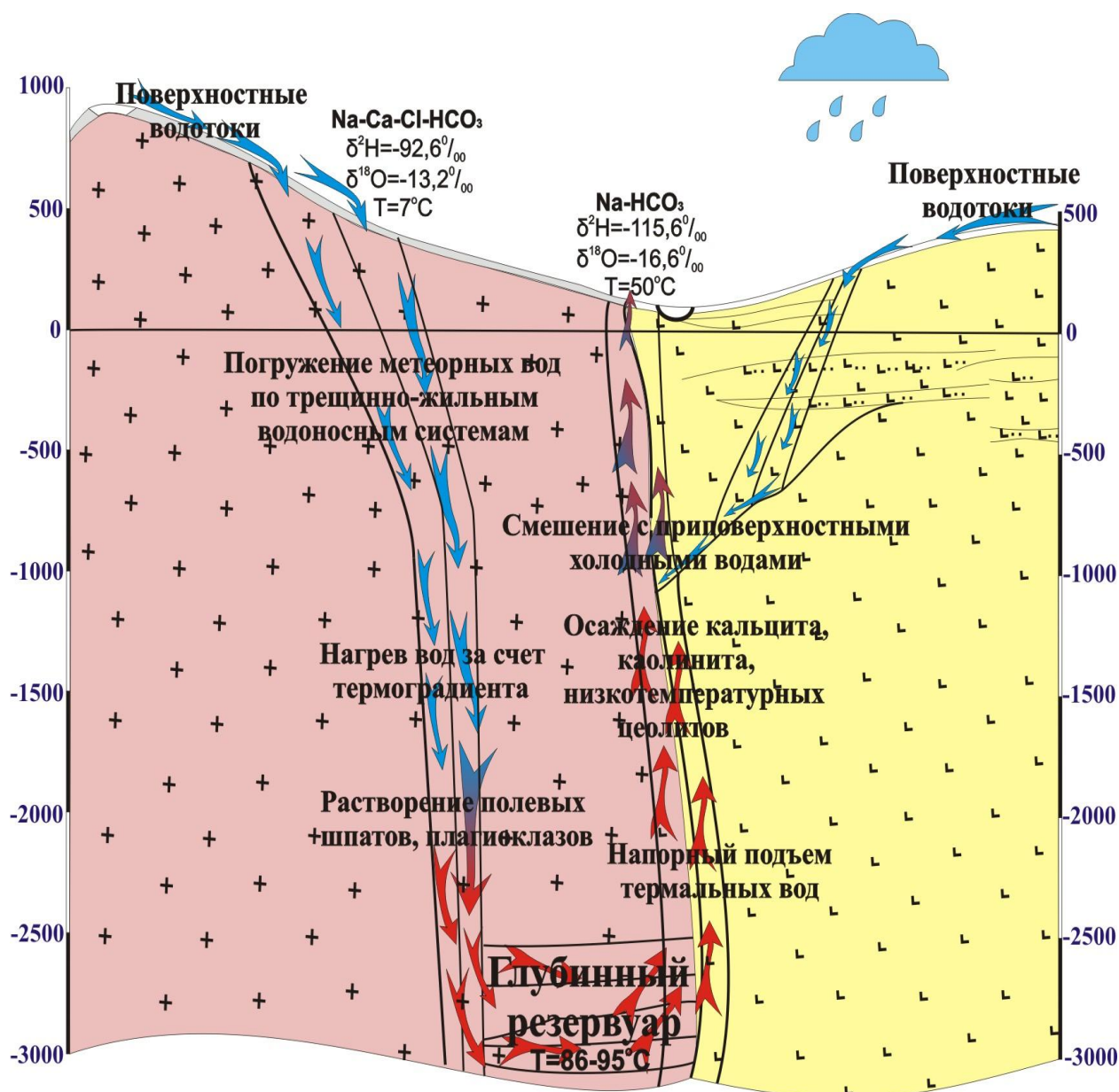


Рисунок 7. Концептуальная модель формирования термальных вод Сихотэ–Алиня.

Геохимический облик воды формируется в результате активного взаимодействия с вмещающими породами, в силу его равновесно–неравновесного характера. Перед выходом на дневную поверхность термальные воды смешиваются с водами зоны гипергенеза, окончательно формируя свой химический состав. Газовая составляющая терм имеет атмосферное происхождение и не оказывает существенного влияния на химический состав вод, поскольку представлена, в основном, инертным азотом.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК:

Чудаев О.В., Чудаева В.А., Брагин И.В. Геохимия термальных вод Сихотэ–Алиня // Тихоокеанская геология. – 2008. – том 27. – №6. – С. 73–81.

Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод Сихотэ–Алиня. Газовый аспект // Вестник ДВО РАН. – 2009. – №4. – С. 147–151.

Замана Л.В., Аскарлов Ш.А., Борзенко С.В., Чудаев О.В., **Брагин И.В.** Изотопы сульфидной и сульфатной серы в азотных термах баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Доклады РАН. – 2010. – том 435. – № 3. – С. 369–371.

Работы, опубликованные в других изданиях:

Bragin I.V. Geochemistry of nitric thermal waters of the Far East of Russia // Subduction Processes emphasizing the Japan–Kuril–Kamchatka–Aleutian arcs: proceeding book on the 5th Biennial Workshop, Sapporo, Japan, 6–11 July 2006. – Sapporo: Sapporo State University publ., 2006. – pp. 77–79.

Челноков Г.А., Чепкая Н.А., **Брагин И.В.** Взаимодействие в системе вода–порода–газ на примере месторождений приморской провинции углекислых вод // Подземная гидросфера: материалы совещания по подземным водам Сибири и дальнего Востока, Иркутск, 11–15 апреля 2006г. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 123–127.

Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод юга Дальнего Востока // Современные проблемы геохимии: материалы конференции молодых ученых, Иркутск, 4–7 апреля 2007г. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 87–90.

Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Chudaeva V.A. Low-temperature geothermal waters of continental margin of Far East of Russia // Water-rock interaction: proceedings of the 12th international symposium, Kunming, China, 3-7 august 2007. – London: A.Balkema Publishers, 2007. – pp. 481–484.

Брагин И.В., Челноков Г.А., Чудаев О.В. Новые данные по геохимии низкотемпературных термальных вод Приморского и Хабаровского краев // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России: материалы докладов региональной конференции молодых ученых, Владивосток, 26–30 августа 2008г. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – С 211–213.

Chudaev O.V., Chudaeva V.A., **Bragin I.V.**, Elovskii E.V., Kulakov V.V., Plysnin A.M. Geochemistry of the thermal waters of the Far East Russia and Siberia // Water-rock interaction: proceedings of the 13th international symposium, Guanajuato, Mexico, 16–20 august 2010. – London: A.Balkema Publishers, 2010. – pp. 153–156.

Bragin Ivan V., Chelnokov George A., Blokhin Maksim G. Geochemistry of thermal waters of Sikhote–Alin Ridge, Russia //XXXVIII IAH Congress: abstract book, Krakow, Poland, 12–17 september. Krakow: Publ. of University of science and technology, 2010. – Vol.2. – pp. 649–651.

Chudaev O.V. Chudaeva V.A., **Bragin I.V.** Chemical Composition and Origin of the Coastal Zone Thermal Springs in Far East Russia // Management and Sustainable Development of Coastal Zone Environments. – India, New Delhi: Springer, 2010. – pp. 162–174.