

МОНИТОРИНГ ГАЗОВОГО СОСТАВА И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кузьмин Ю.Д., Рябинин Г.В.

Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, E-mail: kuzY@emsd.iks.ru

Камчатка является уникальным объектом для изучения природных термоградиентных систем, таких как: вулканы, гидротермальные системы, и сопутствующих им процессов и явлений. Пространственная приуроченность современных термопроявлений к областям молодого и современного вулканизма свидетельствует о тесной связи магматизма и гидротерм. Возможность прямых наблюдений на этих объектах позволяет перейти от лабораторных исследований и моделей к натурным, а многопараметрические наблюдения позволяют провести корреляции между процессами и явлениями внешнего и внутреннего происхождения. Эти наблюдения создают более корректную информативную базу для постановки уточняющих мероприятий в решении таких вопросов, как: прогноза землетрясений, извержений вулканов, изучения режима термоградиентной системы и, следовательно, изменения геофизических и геохимических параметров среды, в зависимости от разнообразных воздействий.

MONITORING OF GAS COMPOSITION AND HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF HYDROTHERMAL-MAGMATIC SYSTEMS

Kuzmin Yu.D. and Raybinin G.V.

Kamchatka Experimental-Methodical Seismological Department of Geophysical Survey Academy of Sciences of Russia, Petropavlovsk - Kamchatksky, E-mail: kuzY@emsd.iks.ru

Kamchatka is a unique object for studying thermogradient systems, such as: volcanos, hydrothermal systems and concomitant processes and events. Spatial accompany modern heat development in areas of young and modern volcanism testifies close connection between magmatism and hydroterm. The opportunity of direct supervision on these objects allows proceeding from laboratory researches and models to natural researches. Multipleparameter supervision allows carrying out correlations between processes and the phenomena of external and internal origin. These supervision create more correct informative base for statement qualifying actions in the decision of such questions as: the forecast of earthquakes and eruptions of volcanos, studying conditions of a thermogradient systems and, hence, changes of geophysical and geochemical parameters of environment depending on various influences.

1. Введение

Магматический очаг и гидротермальная система являются самоорганизующимися, неравновесными, нелинейными, самоизолирующимися динамическими системами. Термодинамическая самоизоляция системы происходит за счет геохимических процессов (перенос газов, солей, растворов и т.д.) и вторичного минералообразования (см. статьи С.Н. Рычагова и В.И. Белоусова с

соавторами в настоящем сборнике). Это позволяет рассматривать данную систему в качестве природного объемного деформографа, изменение параметров которой зависит как от внутренних, так и внешних, изменяющихся во времени, воздействий. К этим воздействиям можно отнести: метеорологические, гравитационные, сейсмические и электромагнитные колебания в широком диапазоне частот, деформационные напряжения, связанные, как с подвижками блоков земной коры, так и с изменяющимся режимом эндогенного теплового потока, величина которого определяется составом и количеством флюидов, растворенных в системе. Изменения флюидо-термодинамических параметров системы будут происходить в виде флуктуаций, которые тем или иным способом модулируются космическими полями и производственной деятельностью (рис 1). Следовательно, в тектонических процессах, в колебаниях величины теплового эндогенного потока и связанных с ними процессах вулканизма и геотермии должны наблюдаться многочисленные ритмы, циклы, периоды, характерные для космо-земных взаимодействий, от часов и суток - до миллионов лет и более.

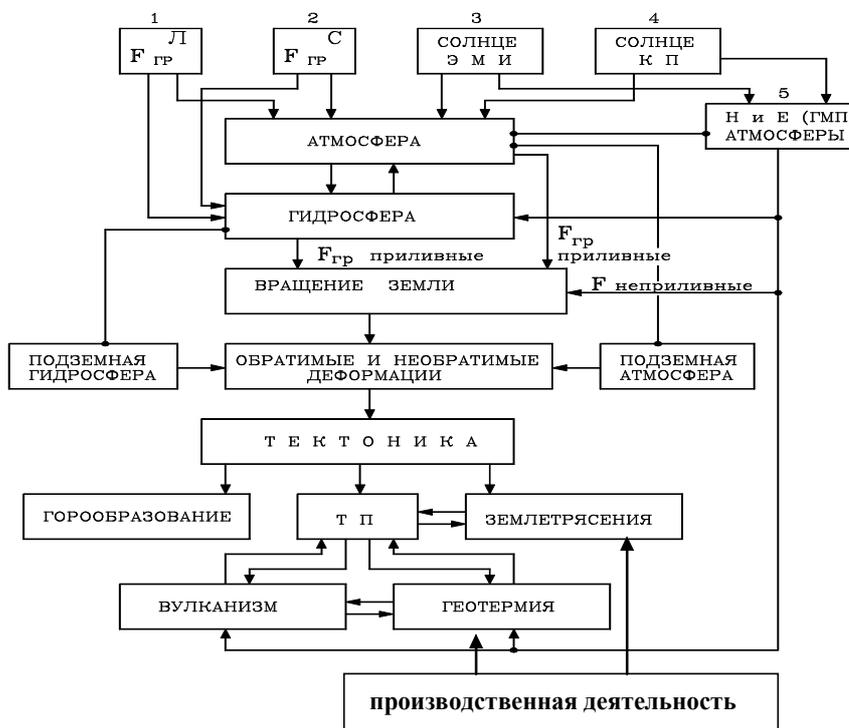


Рис. 1. Блок-схема космо-земных взаимодействий. 1 – гравитационное поле Луны, 2 – гравитационное поле Солнца, 3 – электромагнитное излучение Солнца, 4 – корпускулярные потоки Солнца, 5 – магнитное и электрическое поле атмосферы Земли. ТП – эндогенный тепловой поток Земли.

В вулканическом и гидротермальном процессе общим является эндогенный тепловой поток, величина которого определяет энергетику, состав и свойства вещества, участвующего в конкретном процессе. Практика показывает, что геохимические наблюдения за магматическими очагами вулканических аппаратов, как в предэруптивную, так и эруптивную фазу осуществить сложно. Гидротермальные системы позволяют проводить исследования круглый год и без больших финансовых затрат.

2. Описание объекта

Для рассмотрения вопроса, связанного с мониторингом газового состава и гидрохимических параметров гидротермально-магматических систем, возьмем Верхне Паратунскую гидротермальную систему по следующей причине. Лабораторией гидросейсмологии КОМСП ГС РАН на данном объекте ведутся наблюдения с 1987 г., накоплен обширный фактический материал, как по газовой, так и по минеральной составляющим термальных вод из самоизливающихся скважин. Кроме этого, имеется подробный геолого-геофизический отчет камчатских гидрогеологов по 45 скважинам Верхне-Паратунской гидротермальной системы, что позволяет иметь полное представление о данной системе. Все 45 скважин в пределах месторождения вскрыли термальные воды, различные по температуре и химическому составу [7]. Верхне-Паратунская гидротермальная система (ВП ГТС) расположена на юго-востоке Камчатки и имеет площадь около 30 км² (рис. 2).

В центре ВП ГТС возвышается липаритовый экструзивный купол – сопка Горячая. Изучение строения экструзии с. Горячей и состава слагающих пород, позволили сделать предположение, что в плиоценовое время в северо-восточном секторе Карымшинского долгоживущего вулканического центра возник коровый магматический очаг [1]. Выжимка пород риолитового состава в месте пересечения двух разнонаправленных разломов, с блоковым нарушением окружающих пород образовала экструзию с. Горячая. Это не противоречит предположению [6], автор которого на основании анализа геоэлектрического разреза интерпретирует вертикальную зону высокой проводимости как восходящий поток гидротерм от теплового очага.

В геолого-структурном плане ВП ГТС относится к вулcano-купольным структурам и расположена в зоне пересечения двух сложно построенных

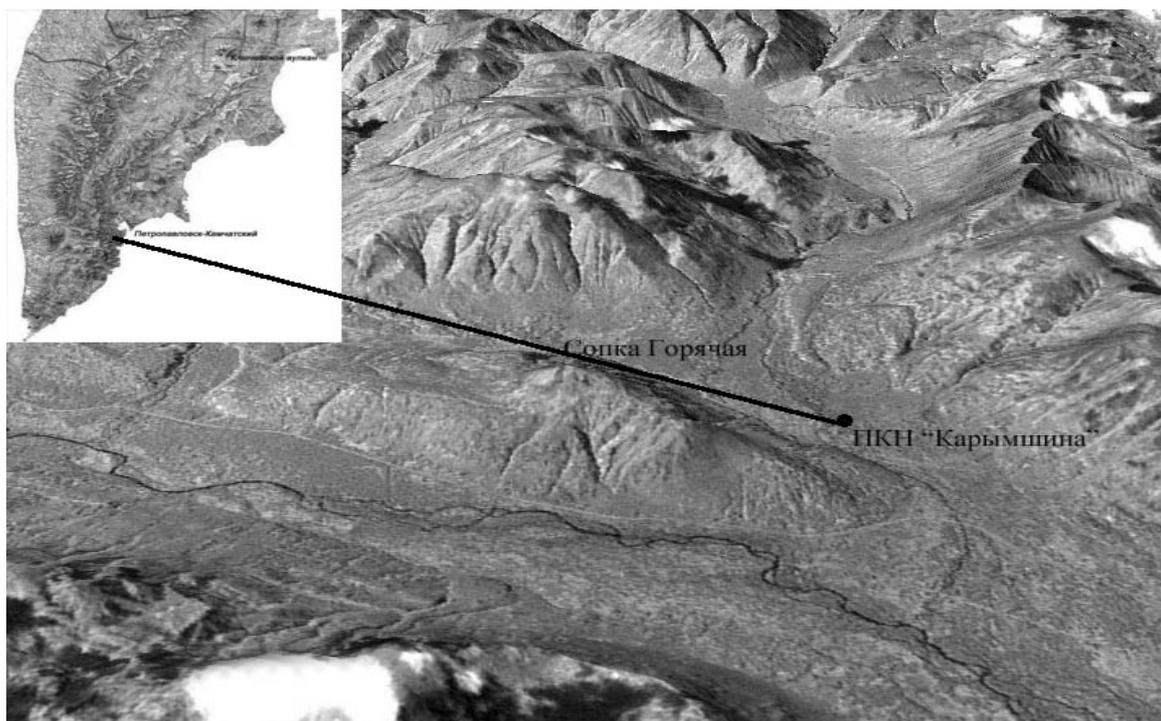


Рис. 2. Космический снимок Верхне-Паратунской гидротермальной системы.

депрессивных структур, получивших название Паратунского и Карымшинского грабенов и образованных блоковыми подвижками в четвертичное время. В геологическом строении ВП ГТС принимают участие в различной степени дислоцированные вулканогенно осадочные эффузивные и интрузивные образования палеоген-неогенового возраста с перекрывающей их толщей четвертичных отложений мощностью до 150 – 190 м. В региональном плане ВП ГТС приурочена к пересечению Паратунско-Асачинской раздвиговой зоны Вилючинским линеamentом и относится к 8-бальной зоне сейсмического районирования. Землетрясения в данном районе относятся к поверхностному типу с глубиной гипоцентров от 50 км и глубже [6]. На **рис 3** для наглядности на топографическую основу нанесено месторасположение скважин и разломов.

В пределах гидротермальной системы разгрузка термальных вод образует локальные участки термоаномалий, которые контролируются структурно-тектоническими условиями. Для всех термальных вод ВП ГТС характерен трещинно- жильный тип циркуляции. Мощность относительной водоупорной толщи (до появления самоизлива из скважин) составляет 24 – 423 м, преимущественно 100 - 350. Нижняя граница выделенной толщи залегает на глубине 64 – 585 м. В целом, на месторождении до глубин 400 м, реже 600 м и более, отмечается низкая

проницаемость. Расход воды на изливе большинства скважин не более 3 – 6 л/с,

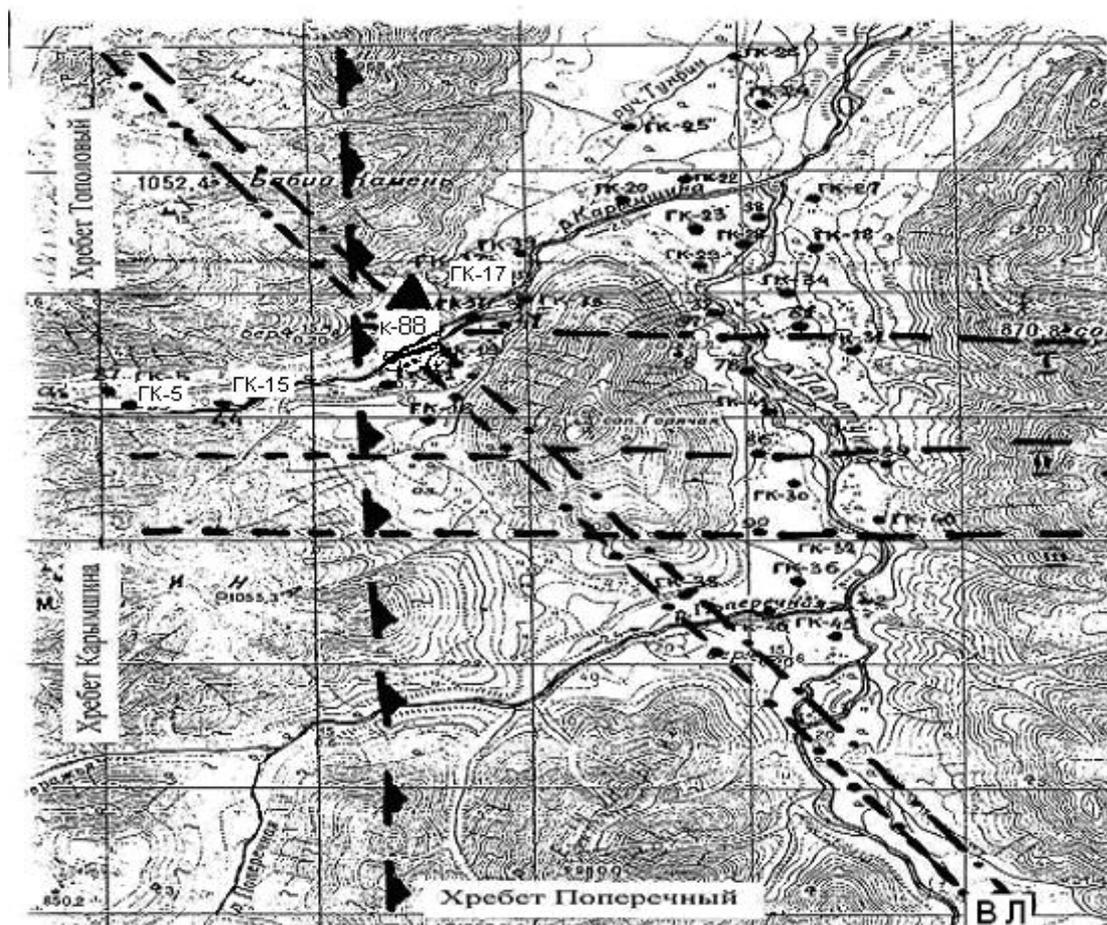
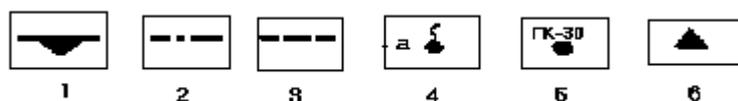


Рис. 3. Расположение Верхне-Паратунской гидротермальной системы, пробуренных скважин, тектонических зон, разломов и нарушений, согласно Тектонической схеме, составленной Ю.А.Касабовым и Т.А.Рябко по материалам Центральной опытно-методической аэрологической партии за 1976 – 1979 гг. и Гореловской геологосъемочной партии за 1979 г.[7]

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



1- левый борт Паратунско-Асачинской раздвиговой зоны. 2- Вилучинский линеймент. 3 - зоны субширотных разломов: 1 – северного субширотного нарушения, 11 – зона центрального субширотного нарушения, 111 – зона южного субширотного нарушения. 4- горячие источники: а – Карымшинские, в- Верхне-Паратунские, г- Поперечные. 5- номера скважин, 6- место расположения ПКН «Карымшина»

температура на изливе меняется от 4 до 41⁰С. Максимальный прирост дебита большинства скважин отмечен в интервале 400 – 1000 м. Суммарное приращение дебита на этих глубинах составило 78%. Следует отметить, что термальные воды с T >70⁰С на изливе вскрываются продуктивными скважинами в интервале 550 – 850 м. Таким образом, в данном интервале глубин (550 – 850м) наблюдается активная

трещинно-жильная циркуляция термальных вод, имеющих разную температуру. С глубин более 1000 м прирост дебита скважин снижается, проницаемость обводненных зон встречается значительно реже. Они локализуются в тектонически ослабленных зонах. Термальные воды характеризуются высоким избыточным напором и сложной конфигурацией пьезометрической поверхности. Минерализация термальных вод ВП ГТС варьирует от 278 мг/л до 2468 мг/л, преобладают значения 1000-1100 мг/л, что намного превышает фоновое, установленное для холодных вод зоны свободного водообмена. Химический состав гидротерм преимущественно сульфатный кальциево-натриевый, в отдельных случаях натриево-кальциевый [7]. Термальные воды относятся к азотным щелочным инфильтрационным водам атмосферного происхождения. Ионно-солевой состав вод формируется в результате выщелачивания разнообразных вулканических и вулканогенно-осадочных пород, а условия циркуляции определяют характерный набор микроэлементов, генетически связанных с глубинными эманациями, поступающими по молодым глубоким тектоническим разломам. Таким образом, гидрохимические особенности терм ВП ГТС увязываются с геологической структурой и динамикой вод в тектонических структурах [4].

Грунтовые воды, несмотря на интенсивный водообмен и низкую температуру (3 - 5⁰С), не оказывают охлаждающего влияния на термальные воды, циркулирующие под водоупором, поэтому можно полагать, что водоупорные породы выполняют и функцию теплоизолятора. Верхняя зона годовых теплооборотов распространена до глубин 23 м [4].

Газонасыщенность термальных скважин невысокая и варьирует от 0.02 x 10⁻³ до 33.2 x 10⁻³ об.%. Наибольшее количество растворенного газа отмечено в скважинах на периферии месторождения. В **таблице 1** показаны параметры скважин (по [7]) и состав газов в скважинах в об.%. (Данные лаборатории Гидрогеосейсмологии КОМСП ГС РАН)

Таблица 1

№ скв.	Глубина, м	Дебит, л/сек	Темпер., 0С	Пьезо. уровень, м	He	H ₂	O ₂	N ₂	Ar	CO ₂	CH ₄
К 88	815	24.3	88.6	98.8	0.022	0.0017	0.523	97.9	1.51		0.034
ГК-17	1196	1.6	47.0	58.4	0.015	0.0000	1.800	95.2	1.95	0.70	0.070
ГК-15	1209	8.1	30.0	18.4	0.021	0.0090	2.370	94.5	2.21	0.65	0.002
ГК-5	900	8.0	75.2	8.0	0.021	0.0000	1.250	97.8	1.37	0.03	0.024

Гелия в термальных скважинах на 3 порядка выше, чем в атмосфере. Отношения He/Ar наиболее контрастны в краевых зонах и максимальны в северной части сопки Горячей, что, возможно, указывает на местоположение здесь термоподводящих каналов на недоступных для скважин глубинах. Интерпретация газового состава гидротермальной системы позволяет ставить вопрос о том, что формирование химического состава гидротермальной системы тесно связано с наличием глубинного теплоносителя.

3. Методика измерений, аппаратура и результаты

С 1987 г. на Карымшинском участке Верхне-Паратунского геотермального месторождения осуществляются непрерывные наблюдения за режимом подземных вод и газов. В настоящий момент наблюдательная сеть в этом районе состоит из 5 самоизливающихся скважин: ГК-5, ГК-15, ГК-44, К-88 и ГК-17. Комплекс режимных наблюдений, проводящихся с дискретностью 1 раз в 6 дней, включает в себя измерения атмосферного давления и температуры воздуха, измерения температуры и расхода воды самоизливающихся скважин, отбор проб воды и газа для последующего их анализа в лабораторных условиях на базе аналитического центра Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. В пробах воды определяются: рН, концентрация основных растворённых в воде ионов и кислот, концентрация растворённых в воде газов. Всего, 22 параметра.

На графиках (рис. 4 - 11) представлены стандартизированные временные ряды изменений основных показателей химического и газового состава воды скважин ГК-5 и ГК-15. Каждый временной ряд разбит на три составляющие: тренд (Trend), низкочастотную часть (LF part) и высокочастотную часть (HF part). Для разбиения временных рядов на три составляющих применялся нерекурсивный фильтр, в основе которого лежит разностная аппроксимация решения дифференциального уравнения диффузии (диффузионный фильтр) [8]. Разбиение временных рядов на перечисленные составляющие имеет, по нашему мнению, вполне определённый смысл. Так, плавно меняющаяся составляющая "тренд" характеризует длительные (десятки лет) изменения режима подземных вод, которые могут являться следствием трёх причин. Технической, которая обусловлена изменением состояния скважины (например, кальматация фильтра, медленное осыпание ствола скважины). Гидродинамической – изменение режима в результате медленной сработки упругих запасов и прочих процессов, связанных с

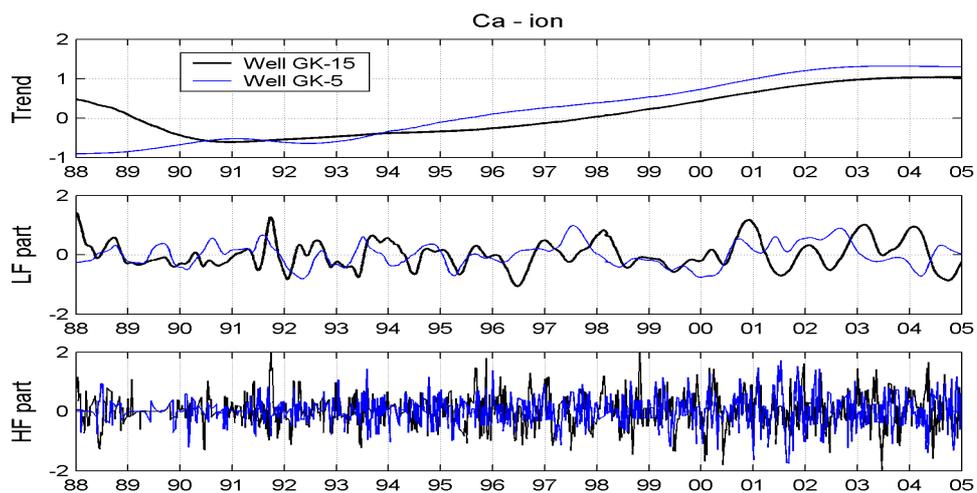


Рис. 4. Изменение концентрации иона кальция в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

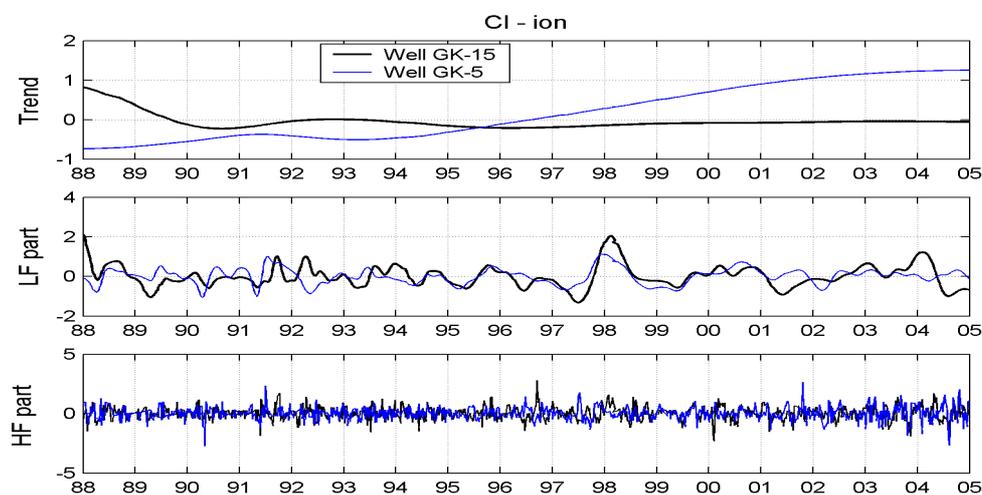


Рис. 5. Изменение концентрации хлор иона в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

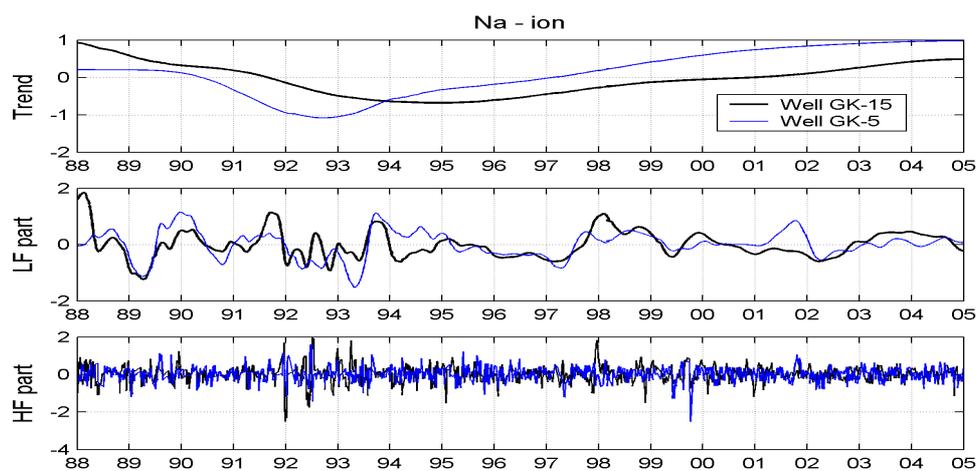


Рис. 6. Изменение концентрации иона натрия в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

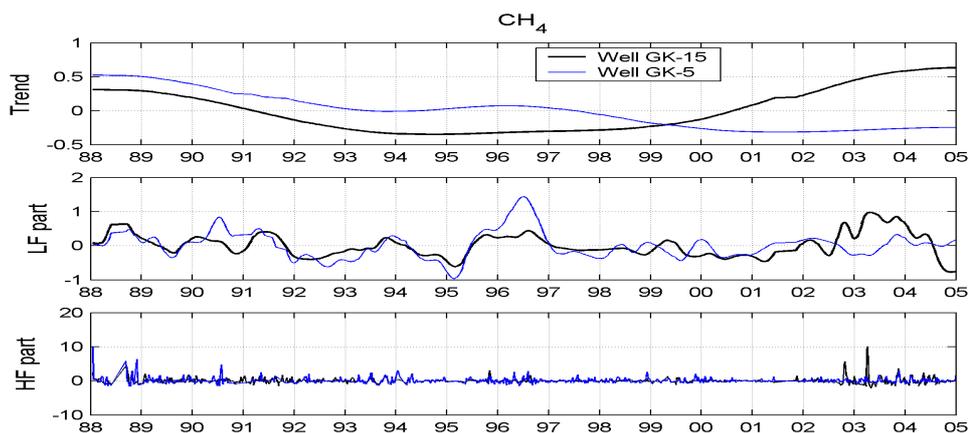


Рис. 7. Изменение концентрации метана в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

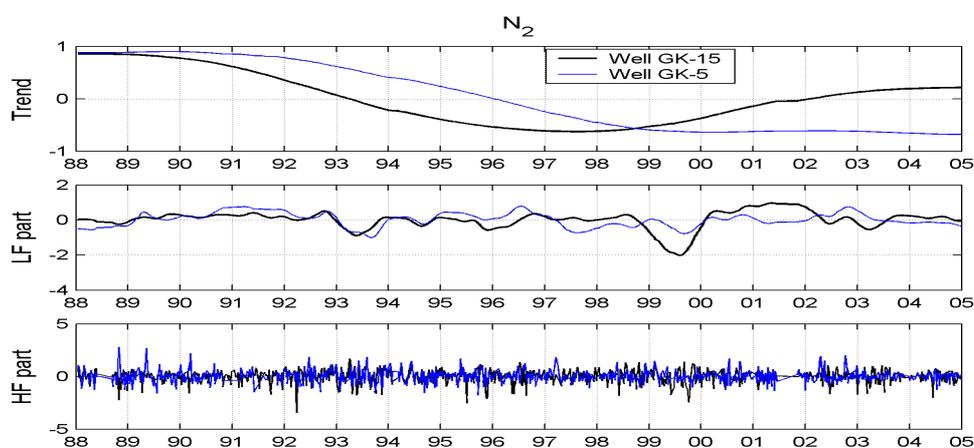


Рис. 8. Изменение концентрации азота в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

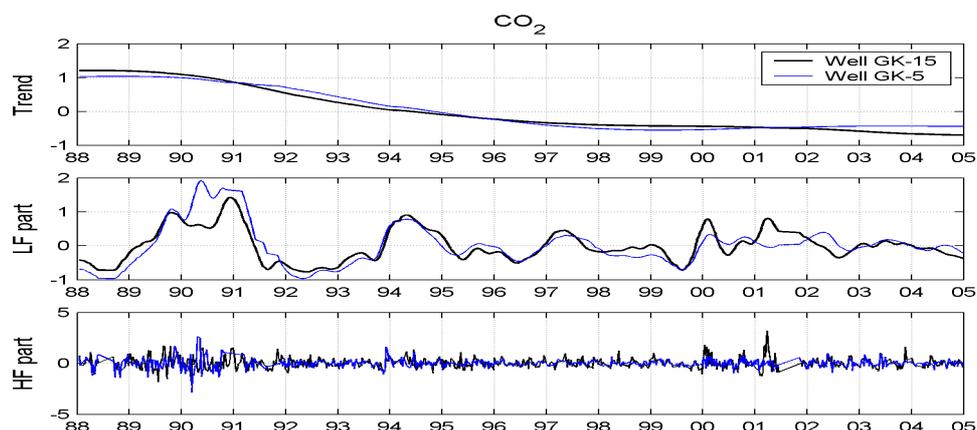


Рис. 9. Изменение концентрации углекислого газа в воде скважин ГК – 15 и ГК-5.

перераспределением напоров в водовмещающих горных породах вследствие функционирования самой скважины. Геодинамической – медленные изменения напряжённо-деформационного состояния пород под воздействием современных

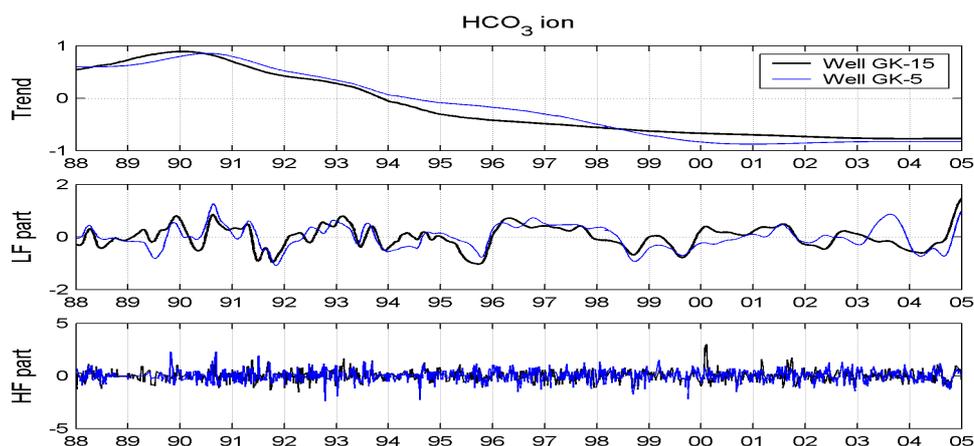


Рис. 10. Изменение концентрации гидрокарбонат иона в воде скважин ГК–15 и ГК-5

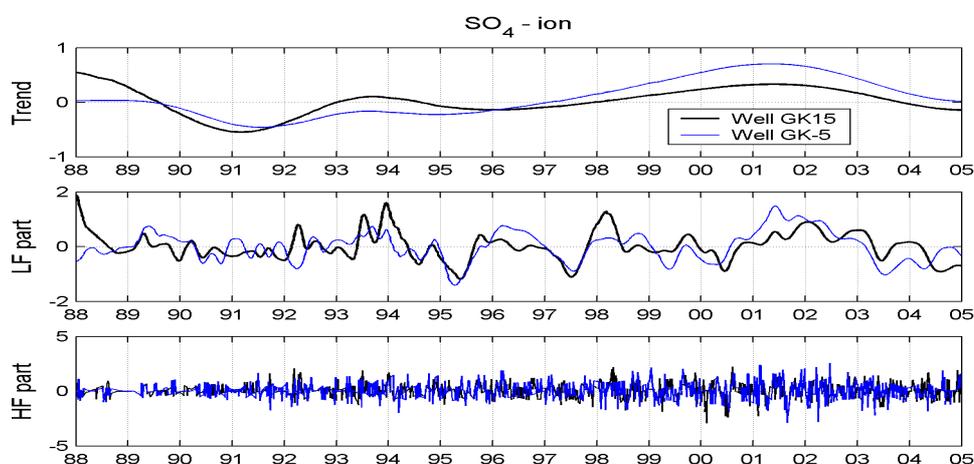


Рис. 11. Изменение концентрации сульфат иона в воде скважин ГК – 15 и ГК 5.

региональных геодинамических процессов. Низкочастотная составляющая (LF part) характеризует изменения режима подземных вод длительностью от месяцев до нескольких лет. Её изменения могут отражать протекание более быстрых геодинамических процессов и, исходя из опыта наших наблюдений, зачастую связаны с процессами подготовки сильных землетрясений. Кроме того, этот частотный диапазон включает в себя сезонные вариации режима подземных вод. Высокочастотная составляющая (HF part) состоит, прежде всего, из ошибки анализа, а также из суперпозиции откликов системы «пласт – скважина» на быстрые вариации атмосферных (давление и температура воздуха), гравитационных (лунно-солнечные приливы) и других воздействий. Сюда же следует отнести и возможность формирования краткосрочных, длительностью до нескольких суток, вариаций режима подземных вод, связанных с современными геодинамическими процессами. Такие эффекты могут быть обусловлены неравномерным влиянием деформаций

среды на фильтрационные связи различных водоносных горизонтов или трещинных систем со стволом скважины [3].

Природные газы – обязательная составляющая часть гидротерм, их состав и количество отражают характер и масштаб геологических процессов, формирующих гидротермы. Газы значительно мобильнее и динамичнее, чем минеральная составляющая термальных вод. Для наблюдений за газовой составляющей на пункте комплексных наблюдений ПКН «Карымшина», с финансовой поддержкой РФФИ (грант 02-05-64237а), был организован пункт газодинамических наблюдений. Для выяснения роли взаимодействия глубинной газовой составляющей ГТС с подпочвенными газами используются две скважины: К-88 и специально пробуренная скважина глубиной 4 м. Из скважины К-88 термальная вода самоизливом по трубам подается на геохимический пункт наблюдений, где в барботере происходит выделение растворенных газов из потока термальной воды в свободную фазу, который затем подается в газоанализатор или радиометр. Вторая скважина имеет глубину 4 м, обсажена пластиковой трубой-фильтром и служит для наблюдений за изменениями концентрации подпочвенных газов. Для наблюдений за газодинамическими процессами, происходящими в гидротермальной системе и подпочвенном воздухе были выбраны водород и радон, т.е. самый легкий и самый тяжелый газ, имеющие различные физические свойства. Водород анализируется с помощью водородного газоанализатора, разработанного В.М.Лупатовым в ГЕОХИ РАН, а радон и торон - с помощью автономного автоматизированного радиометра РРА-03-01 (МИФИ МТМ «Защита»). Ежеминутные измерения концентрации водорода, с чувствительностью не хуже 5×10^{-5} об %, из двух скважин, с помощью радиотелеметрической системы передаются на приемный пункт в г. Петропавловск-Камчатский. Измерения и регистрация концентрации радона и торона проводятся 1 раз в час. Информация сохраняется в памяти радиометра, затем, по мере посещения ПКН, переписывается на переносной компьютер и доставляется в г. Петропавловск-Камчатский. Совместно с НИИЯФ МГУ проводятся наблюдения за потоком нейтронов в приземном слое. Достоинством ПКН «Карымшина» является цифровая автоматизированная метеостанция, что позволяет корректно проводить корреляции измеряемых параметров с метеоданными района.

За время наблюдений за газодинамическими параметрами ВП ГТС были отработаны методики, техника измерений и показана перспективность данного вида наблюдений. Замечено, что в спокойные периоды в подпочвенной и глубинной

водородной составляющей регистрируются суточные приливные колебания. При появлении возмущения в ГТС суточный ход в глубинной составляющей нарушается. Примером может служить землетрясение, которое произошло в районе Южной Камчатки 18.12.2002г в 11:09:22 UT с координатами 52.19 СШ, 160.47 ВД, глубина = 42 км, $M=5.0$ (рис. 12).

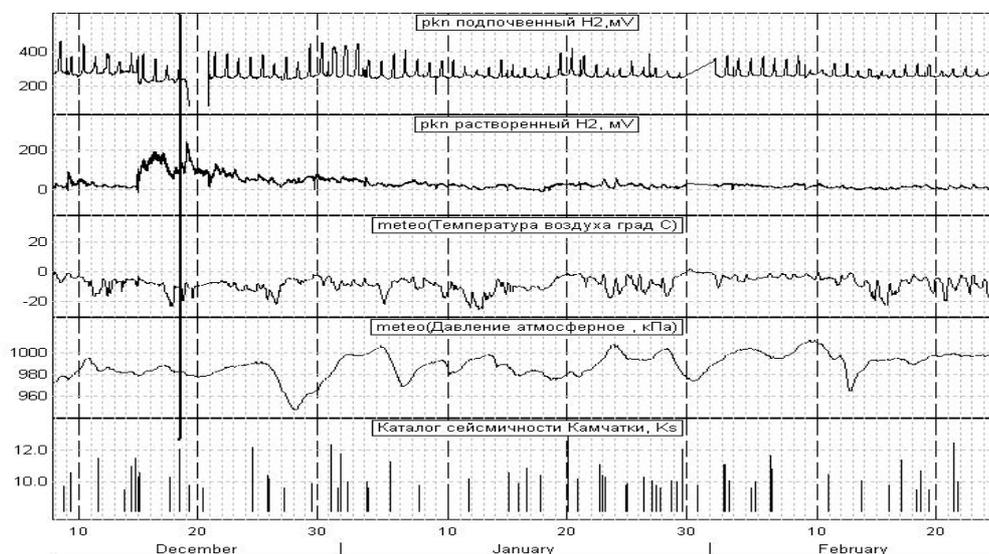


Рис. 12. Пример синхронной записи подпочвенного и глубинного водорода, метеопараметров и сейсмической обстановки Камчатки в 2002 – 2003 гг. Вертикальная линия – время землетрясения, которое произошло 18 декабря 2002 г.

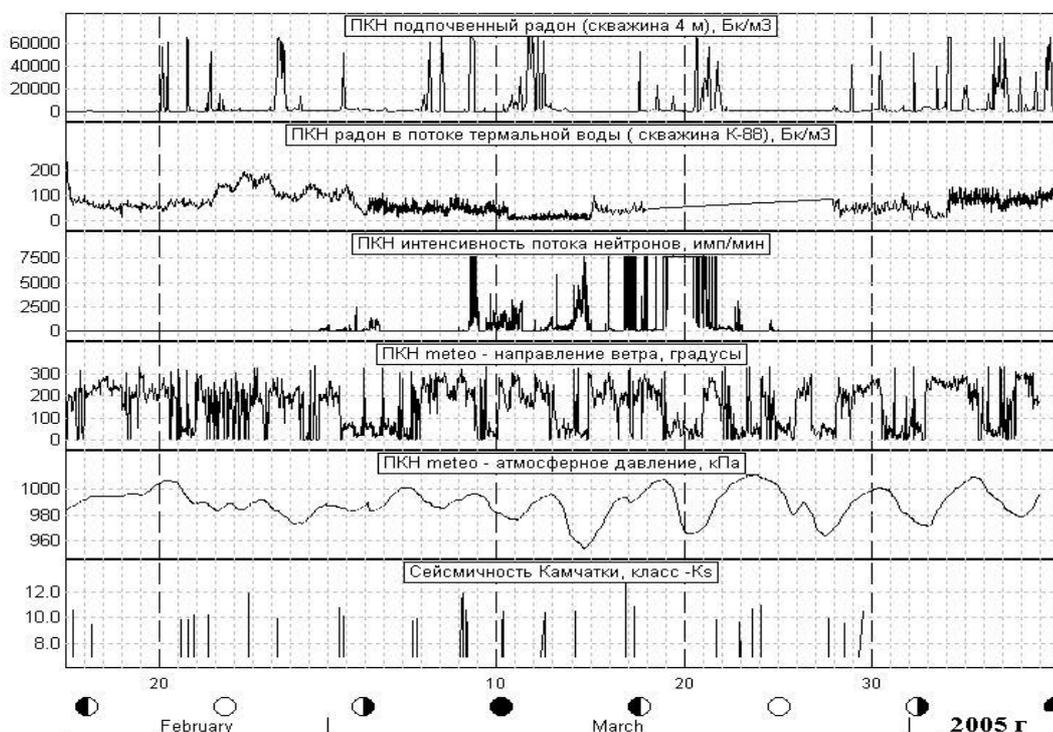


Рис. 13. Пример записи растворенного и подпочвенного радона, потока нейтронов, метеопараметров на ПКН в зависимости от сейсмичности Камчатки и лунных фаз в 2005 г. Время UT.

На **рисунке 13** показан пример записи растворенного и подпочвенного радона, интенсивности потока нейтронов, метеопараметров на ПКН в зависимости от сейсмичности Камчатки и от лунных фаз в 2005 г. Время UT.

4. Обсуждение результатов

Анализ графиков, представленных на рисунках 4-11, позволяет, весьма формально, выделить 3 случая. В первом, наблюдается совпадение трендов и несовпадение низкочастотных составляющих (Ca ион). Во втором – несовпадение трендов и совпадение низкочастотных составляющих (CH₄, Cl ион, N₂, Na ион). И в третьем – совпадение трендов и низкочастотных составляющих (CO₂, HCO₃ и SO₄ ионы). Высокочастотная составляющая в данном контексте не рассматривается, поскольку её вариации будут существенным образом определяться каждой конкретной системой «пласт – скважина». Наиболее интересным из рассмотренных случаев является тот, в котором наблюдается совпадение и трендов, и низкочастотных составляющих. По всей видимости, такая синхронизация в изменении концентраций растворённых в воде веществ отражает общие процессы эволюции гидротермальной системы, а также воздействие на неё современных геодинамических процессов. Различие в поведении трендов, скорее всего, связано с процессами перераспределения напоров в водовмещающих породах в результате функционирования каждой отдельно взятой скважины. В качестве индикатора таких процессов удобно рассматривать изменения доли глубинной составляющей химического состава воды в общем балансе растворённого вещества.

Анализ газодинамических наблюдений позволяет высказать предположение о том, что:

- глубинная и подпочвенная газовые составляющие гидротермальной системы практически независимы, что подтверждает вывод гидрогеологов о независимости термальных вод от метеорных для ВП ГТС и позволяет использовать данную гидротермальную систему в качестве природного объемного деформографа;
- подпочвенная и глубинная водородные составляющие являются независимыми, но в обоих параметрах наблюдаются суточные колебания. Если в ВП ГТС нарушается спокойный режим, например, происходит сейсмическое воздействие, то суточные колебания в глубинной составляющей исчезают, в подпочвенной составляющей таких изменений не наблюдается;
- в изменениях концентрации растворенного водорода, в потоке термальной воды из

скважины К-88 (глубинная составляющая) иногда появляются пики, где величина концентрации водорода увеличивается на порядок и более. Продолжительность пика разная, от 1.5 часа до 4 часов. В подпочвенной составляющей этого не наблюдается.

При этом возникают вопросы, на которые пока нет ответов:

- непонятно появление и исчезновение суточных колебаний в ходе изменения концентрации радона и торона в потоке термальной воды из скважины К-88;
- не наблюдается зависимости всплесков нейтронного потока от сейсмической активности Камчатки, полнолуний и новолуний, которые отмечаются в [2, 5]. Но отмечается зависимость всплесков нейтронного потока от мощности циклонов, направления и времени прихода их на Камчатку.

5. Выводы

Наблюдения за газодинамическими и гидрохимическими параметрами показывают, что ВП ГТС является чувствительной геологической средой (природным объемным деформографом), реагирующей на внутренние и внешние воздействия. Результаты полученных наблюдений позволяют значительно расширить уровень наших знаний о процессах, происходящих в природных термоградиентных системах и процессах, вызывающих эти изменения. Необходимо отметить, что для получения более полной картины происходящих процессов в природных термоградиентных системах необходимо в реальном времени проводить наблюдения за всем спектром газов, растворенных в гидротермальной системе. Это можно решить с помощью автоматизированных масс-спектрометрических измерений и передачей данных по радиотелеметрическому каналу на приемный пункт, с последующим хранением и обработкой результатов наблюдений.

Организация пункта газодинамических наблюдений на ПКН «Карымшина» выполнена при поддержке РФФИ, гранты 02-05-64237а и 05-05-64837а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова С.П.. Экструзия сопки Горячей в долине р. Паратунки и ее роль в образовании Верхне-Паратунских термальных источников. // Тезисы докладов 6 Всесоюзного вулканологического совещания. сентябрь 1985. Вулканизм и связанные с ним процессы. Вып №3, ИВ ДВНЦ АН СССР, Петропавловск-Камчатский, стр 18-20.
2. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И.. Явления возникновения всплесков нейтронов во время фаз новолуний и полнолуний .Космические исследования, 1997, т.35, №2, с.144-154
3. Киссин И. Г., Беликов В. Н., Ишанкулиев Г. А. Краткосрочные гидрогеологические эффекты как

- показатель геодинамической активности зоны передового Копетдагского разлома. ДАН. 1992 Т322. №1. 69-75.
4. **Манухин Ю.Ф., Ворожейкина Л.А.** Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия ее формирования. // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. ИВ ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1976, с.143 -178.
 5. **Остапенко В.Ф., Красноперов В.А.** Аномальные вариации естественного нейтронного потока в сейсмически активной зоне. <http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/495.html>
 6. **Охапкин В.Г.** Пакет геологической информации по Верхне-Паратунскому месторождению термальных вод. 1997. Петропавловск-Камчатский, Камчатгеолком.
 7. **Смирнова Н.Ф. и др.** Сводный отчет о результатах поисково-разведочных работ на Верхне-Паратунском месторождении термальных вод, проведенных в 1966 – 1980 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 17 мая 1980г. КТГУ, 1980.
 8. **Luciano Telesca, Vincenzo Lapenna, Serge Timashev, Grigory Vstovsky, Giovanni Martinelli.** Flicker-noise spectroscopy: a new approach to investigate the time dynamics of geoelectrical signals measured in seismic areas. *Physics and Chemistry of the Earth* 29 (2004) 389–395.