

УДК 550.341.5

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ

Ю. М. Хаткевич, Г. В. Рябинин

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН
г. Петропавловск - Камчатский*

Аннотация. Представлен один из методов, используемых при выдаче экспертных заключений о сейсмической обстановке на Камчатке – гидрогеохимический. Приводится характеристика наблюдательной гидрогеологической сети и основные результаты гидрогеохимических исследований с 1977 г по настоящее время.

HYDROGEOCHEMICAL RESEARCHES ON KAMCHATKA

Yu. M. Khatkevich, G. V. Ryabinin

*Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky*

Abstract. In this paper we introduce one of the most frequently used hydro-geochemical methods that is used by the commission of experts to make their decisions on seismic setting in Kamchatka. Here we present some description of the hydro-geological observation net and main results of hydro-geological surveys conducted in 1977 to present day.

“Трудности и потенциальные перспективы при решении проблемы прогноза уравновешивают друг друга. Прошлые неудачи могут привлечь учёных, которые готовы идти на риск неудачи, зная, что успех будет действительно выдающимся достижением” (Ф. Д. Стейс).

Введение

Сильнейшие землетрясения в ряду природных катастроф по масштабам разрушения и человеческих жертв занимают ведущее место в мире. Не менее значительные последствия вызывают и явления связанные с сильными землетрясениями. К таковым относятся волны цунами, вулканические извержения, оползни, обвалы и т.д. Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ, проведённых учёными в минувшем столетии, проблема прогноза землетрясений остается, и ещё долго будет оставаться одной из ключевых в современной сейсмологии. Важную роль в решении задачи прогноза сильных сейсмических событий играет относительно новое научное направление, развивающееся на стыке гидрогеологии и сейсмологии, которое рядом

авторов называется гидрогеосейсмологией. Основной задачей гидрогеосейсмологии является изучение влияния землетрясений на режим подземных вод, где сейсмичность, как следствие тектонических процессов, выступает в качестве одного из главных режимообразующих факторов. К не менее значимым вопросам, решаемым в рамках данного научного направления, относятся: поиск гидрогеологических предвестников землетрясений и их прогностических признаков, прогнозирование сильных землетрясений по гидрогеологическим предвестникам. Под гидрогеологическими предвестниками понимается широкий круг показателей и компонентов подземных вод. Среди них общие физико-химические показатели (температура, расход скважин и источников, Eh, pH, мутность), вариации концентраций растворённых макро-компонентов и кислот, вариации концентраций свободных и растворённых в воде газов, вариации изотопных соотношений. Исследования, позволяющие определять вышеупомянутые показатели режима подземных вод, мы называем гидрогеохимическими.

Гидрогеологические эффекты в режиме подземных вод, наблюдаемые после сильнейших землетрясений известны очень давно. К примеру, во время разрушительного землетрясения в Древней Греции в 426 г. до н. э. иссякли на три дня горячие источники на острове Эвбея. Крупнейшая сейсмическая катастрофа исторического времени в Западной Европе, Лиссабонское землетрясение, вызвало изменения в режиме источника в г. Теплице (Чехословакия), находящегося на расстоянии более 2200 км от эпицентра [6]. В древнегреческих легендах мы находим даже упоминание о предсказании землетрясений. Одно из таких предсказаний приписывали учителю Пифагора Фрекиду Скросскому, жившему в 6 в. до н. э.: “Отведав воды из колодца, он предсказал, что на третий день случится землетрясение, - и оно случилось” [4].

Впервые в России изменения гидрогеологического режима, предваряющие землетрясения, были обнаружены доктором Мольденгауэром в самом начале прошлого столетия [1]. В 1912 г. Б. Б. Голицын, характеризуя деятельность Центрального бюро Сейсмической комиссии, приводит краткую программу систематических исследований режима источников в зависимости от местных сейсмических явлений. Мотивируя важность подобного рода исследований, Голицын пишет: “Несколько лет тому назад д-р Мольденгауэр (Moldengauer) установил зависимость между нарушениями регулярной периодичности (интермитенций) Екатерининского источника в Боржоме и сейсмическими явлениями на Кавказе; при этом обнаружилось, что часто нарушение интермитенций этого источника наступает за несколько часов до землетрясения. Если этот факт будет подтверждён дальнейшими исследованиями, то он будет иметь очень большое теоретическое и практическое значение, так как он открывает нам новый путь к научному сейсмическому прогнозу” [2]. Таким образом, впервые в мире идея об использовании изменений гидрогеологического режима подземных вод для прогноза землетрясений была высказана русским учёным. К сожалению эта идея сразу не нашла должного развития и воплотилась в реальность лишь спустя полвека.

Началом современного этапа разработки гидрогеологического метода прогноза землетрясений можно считать 1966 г. Именно Ташкентское землетрясение 1966 г., ознаменовалось тем, что перед ним, правда, ретроспективно, удалось выявить гидрохимические аномалии в режиме подземных вод [13]. Подобное явление изменения концентраций радона, гелия, аргона, фторидов, урана, а также изотопного состава элементов, в связи с сильными сейсмическими событиями, было зарегистрировано как открытие [11]. Успех выявления аномальной вариации концентрации радона в водах Ташкентского артезианского бассейна перед Ташкентским землетрясением обусловил бурное развитие исследований, направленных на поиск гидрогеологических предвестников землетрясений, во всех сейсмоопасных регионах бывшего Советского Союза.

На Камчатке изменения в режиме подземных вод под воздействием землетрясений интенсивностью свыше 3 баллов впервые были установлены в результате наблюдений

за режимом термальных вод. Эти наблюдения проводились ПГО Камчатгеология на Пиначевских источниках и, расположенной здесь же, самоизливающейся скважине ГК-1. Землетрясение 25 ноября 1971 г. (6-8 баллов, $M=7,2$, $D=98$ км) вызвало увеличение дебитов источников в 2,5-6 раз и скважины – на 0,14 л/с. Температура воды увеличилась на $0,3 - 2,8^{\circ}\text{C}$ [14].

Землетрясение 25 декабря 1972 г. (4-5 баллов) вызвало увеличение дебита скважины на 0,2 л/с, а источников на $0,03 - 0,78$ л/с. Землетрясения интенсивностью 3-4 балла оказывали влияние только на режим источника № 1.

Таким образом, когда встал вопрос о постановке систематических гидрогеологических исследований по поиску предвестников землетрясений на Камчатке, изначально внимание было сосредоточено на Пиначевских источниках и самоизливающейся скважине ГК-1.

Сеть наблюдений

К настоящему времени наблюдательная сеть состоит из четырёх гидрогеологических станций включающих в себя двенадцать водопунктов (самоизливающиеся скважины и термальные источники). Все станции расположены в различных геологоструктурных условиях (рис. 1).

Станция “Пиначево” состоит из 5 наблюдательных водопунктов (четыре слаботермальных источника и скважина ГК-1). Район расположения станции находится в среднем течении р. Пиначевой, примерно в 35 км от г. Петропавловска – Камчатского и в 14 км от г. Елизово. Термальные воды источников разгружаются из-под восточного склона высоты 202 неподалёку от истоков ручья Светлый ключ.

В геолого-структурном отношении Пиначевские источники приурочены к южной границе большого массива андезито-дацитов плиоценового возраста, слагающего окрестные возвышенности и разгружаются у подошвы высоты 202. Представляется, что, как внедрение андезитов, так и формирование и разгрузка гидротерм, на описываемом участке, отражает существование и развитие глубинного тектонического шва, являющегося, по всей видимости, фрагментом Петропавловского глубинного разлома. По типу режима Пиначевские источники относятся к слаботермальным источникам с ненарушенным режимом.

Скважина ГК-1 пробурена в 1970 г. и находится в 100 м от Пиначевских источников. Скважина прошла в интервале 0 – 151 м прибрежно-морские, дельтовые, ледниковые, водно-ледниковые и озёрные гравийно-галечные отложения нижне-среднеплейстоценового возраста; в интервале 151 – 843 м – вулканогенно-осадочные, пирокластические отложения андезито-базальтового состава алнейской серии неогена. Далее до забоя (на глубине 1261 м) рассланцеванные песчаники с прослойками филлитовых сланцев хозгонской свиты верхнего мела. В интервале 372 – 406 м встречены хорошо окатанные галечниковые отложения Пра-Авачи, к которым приурочен основной приток воды и газа. Температура на забое, измеренная по окончании бурения, составляла $53,5^{\circ}\text{C}$, на изливе $28,7^{\circ}\text{C}$ и в настоящее время понизилась до $16,5^{\circ}\text{C}$. Дебит самоизлива по окончании бурения составлял 2,2 л/с, но постепенно понизился до 0,09 л/с. Наряду с падением расхода, в воде скважины отмечается увеличение содержания глубинной хлор – натриевой составляющей и уменьшение концентрации гидрокарбонат – иона. Это может быть вызвано, с одной стороны, потерей напора в водовмещающих породах, дренируемых скважиной (уменьшение расхода и концентрации гидрокарбоната) и, с другой стороны, перетеканием из нижележащих горизонтов (комплексов) более минерализованных вод за счёт увеличения градиента напора между верхними и нижними горизонтами (увеличение концентраций ионов хлора и натрия). Для облегчения анализа и выявления прогностических аномалий тренды в химическом составе воды скважины ГК-1 компенсируются полиномами 2–3 степеней. Среднемноголетний химический состав воды источников и скважины ГК-1 представлен ниже.

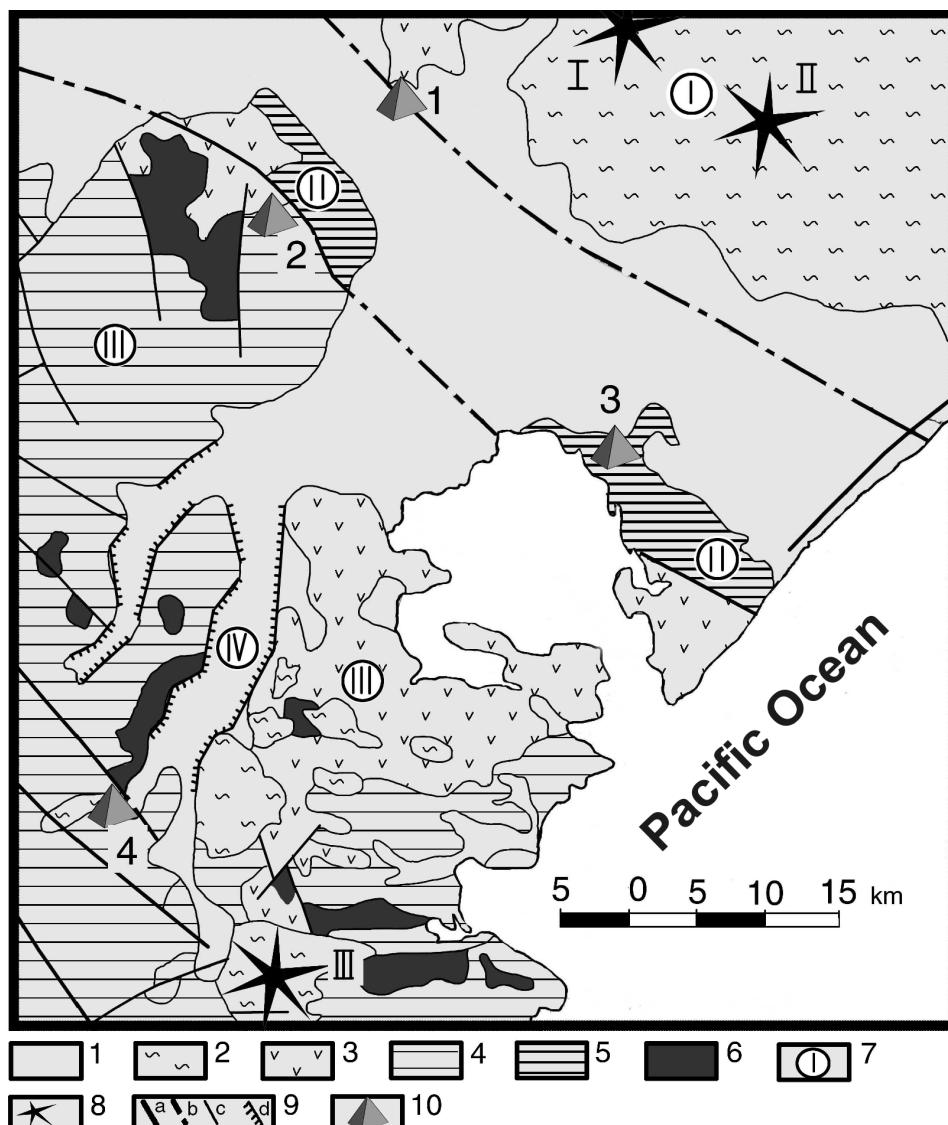


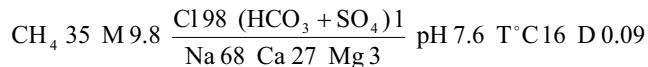
Рис.1. Геолого–тектоническая схема Петропавловского полигона.

Условные обозначения: 1 – рыхлые четвертичные отложения; 2 – вулканогенные отложения среднеплейстоцена – голоценового возраста; 3 - вулканогенные отложения плиоценового возраста; 4 – отложения олигоцен – миоценового возраста; 5 – породы верхнемелового возраста; 6 – миоценовые интрузивные образования; 7 – тектонические структуры: I – Корякско – Авачинская вулканотектоническая депрессия, II – Петропавловский горст, III – Начикинская складчато – глыбовая зона, IV – Паратунский грабен; 8 – вулканы: I – Корякский, II – Авачинский, III – Вилючинский; 9 – тектонические границы: а – крутопадающие главные, б – скрытые под более молодыми образованиями, с – прочие, д – разрывные нарушения с указанием плоскости сместителя; 10 – гидросейсмологические станции: 1 – станция Пиначево, 2 – станция Морозная, 3 – станция Хлебозавод, 4 – станция Верхняя – Паратунка. (Схема составлена на основе карты полезных ископаемых Камчатской области масштаба 1:500000. Ответственные редакторы составители: Фролов Ю. Ф., Коляда А. А., Поздеев А. И., Павлова Л. Е.).

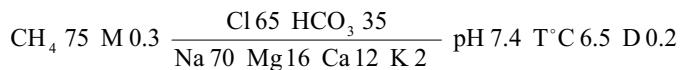
Fig.1. Geotectonic scheme of the Petropavlovsky testing area.

Legend: 1 - loose quaternary sediments; 2 – volcanogenic mid-Pleistocene and Holocene sediments; 3 – volcanogenic Pliocene sediments; 4 – Oligocene – Miocene sediments; 5 – upper Cretaceous rocks; 6 – Miocene intrusive formation; 7 – tectonic structures: I – Koryaksko-Avachinskaya volcano tectonic depression, II – Petropavlovsky horst; III – Nachikinskaya blockwave zone; IV – Paratunsky graben; 8 – volcanoes: I- Koryaksky, II – Avachinsky; III – Vilyuchensky volcano; 9 – tectonic boundaries: a - main, steeply-falling, b - hidden under younger formations, c - the others, d – rapture fault; 10 – hydro seismic stations: 1 – Pinachevo; 2 – Moroznaya, 3- Khlebozavod, 4 – Verkhnaya Paratunka. (Scheme was compiled on the basis of mineral deposit map of Kamchatka Region, scale 1:500000. Editors-in-chief and authors: Frolov Yu.F., Kolyada A.A., Pozdeev A.I., Pavlova L.E.).

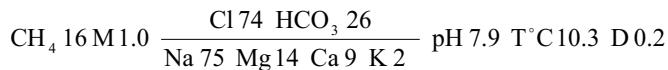
Скважина ГК-1



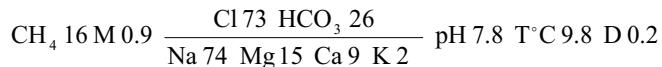
Источник №1



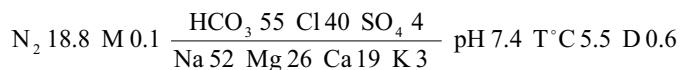
Источник № 2/1



Источник № 2/2

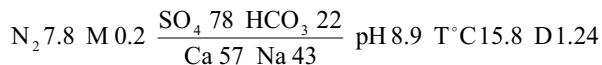


Источник №3



Непрерывные режимные наблюдения на скважине и источниках были начаты в 1977 г.

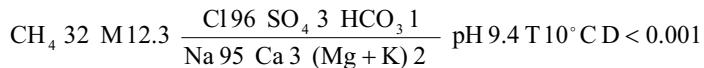
Станция «Морозная» на правом берегу р. Половинки в 6 км от г. Елизово на территории горнолыжной базы г. Морозной. Станция состоит из одной скважины глубиной 600 м. В структурном отношении скважина №1 расположена в зоне глубинного разлома северо-западного простирания, который является левой границей Петропавловского горста (рис. 1). Породы, пройденные скважиной, относятся к туфам берёзовской серии неогена (N₁br). Химический состав воды скважины №1 на настоящее время:



Наблюдения на станции были начаты в 1986 году.

Станция «Хлебозавод» расположена на территории города Петропавловска-Камчатского в пределах Петропавловского горста и находится в районе транспортной развязки пр. Циолковского и ул. Ак. Королёва (кольцо на Хлебозаводе). Состоит из самоизливающейся скважины Г-1 глубиной 2500 м, обсаженной на всю глубину. В основании разреза в пределах вскрытой глубины залегает толща аргиллитов, мощность которой составляет в пределах участка выше 1000 м. На аргиллитах залегает толща чередующихся алевролитов и песчаников. Весь комплекс пород подвергся метаморфизму и зелёномокаменным изменениям (по первичным минералам развиты хлорит, эпидот, кальцит, кварц).

Химический состав воды, выводимой скв. Г-1:



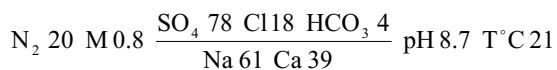
Исследования на станции начаты в 1988 году.

Станция «Верхняя Паратурка» расположена в 20-25 км к юго-западу от посёлка Термальный в долине реки Карымшины в пределах Верхне-Паратурнского месторождения термальных вод. Состоит из пяти самоизливающихся скважин. Три из пяти скважин располагаются в пределах Карымшинского участка месторождения.

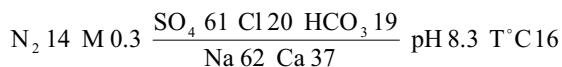
Карымшинский участок Верхне-Паратурнского месторождения термальных вод приурочен к одноимённому блоку, расположенному в пределах субвуликанического массива. Здесь же располагаются Карымшинские источники (T_{max}=76°C, видимый дебит 2-2,5 л/с). Источники находятся в долине р. Карымшины в 6 км от устья. Основной контроль очага разгрузки – тектонически ослабленная зона на пересечении субширотного разлома первого порядка с более молодыми север-северо-западной ориентировкой в приконтактной зоне интрузии диоритов, экструзии липаритов.

Породы, вскрытые скважинами, состоят из туфов, андезитов, туфопесчанников, игнибритов и липаритов берёзовской серии неогена (N_{1br}).

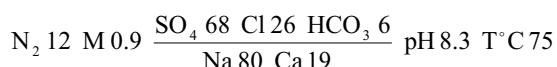
Скважина ГК-15 пробурена в 1971 году. Глубина-1209 м. Обсадка до глубины 125,5 м. Химический состав воды скважины:



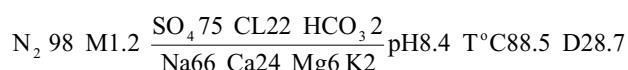
Скважина №44 окончена бурением в 1967 году. Глубина 649 м, обсажена до 28 м. Химический состав воды:



Скважина ГК-5 пробурена в 1967 году. Расположена вблизи выходов Карымшинских источников. Скважина обсажена до глубины 247 м, далее до забоя на глубине 900 м открытый ствол. Искусственный забой скважины находится на глубине 240 м. Химический состав воды:



Скважина № 88 пробурена в 1970 году. Расположена в пределах основного участка месторождения. Обсажена до глубины 254 м, далее до забоя (815 м) открытый ствол. Химический состав воды:



Скважина включена в сеть наблюдений в апреле 2000 года.

Скважина ГК-17 включена в сеть наблюдений в мае 2001 года. Бурение скважины было окончено в 1972 году. Она расположена в пределах основного участка месторождения. Скважина обсажена до глубины 162,5 м, далее до забоя открытый ствол. Забой расположен на глубине 1196 м. Химический состав воды:



Постоянные исследования на станции «Верхняя Паратурка» начаты в 1988 году.

Методика исследований

Наблюдения за режимом подземных вод осуществляются с периодичностью 1 раз в 3 суток для станций Пиначево, Морозная, Хлебозавод и 1 раз в 6 дней для скважин, расположенных на станции Верхняя Паратурка. Режимные наблюдения включают в себя измерения величины атмосферного давления и температуры воздуха, измерения расходов и температуры воды скважин и источников, отбор проб воды и газа для последующего их анализа в лабораторных условиях. В пробах воды определяются pH (отрицательный логарифм концентрации ионов водорода H^+), концентрации ионов хлора (Cl^-), гидрокарбоната (HCO_3^-), сульфата (SO_4^{2-}), натрия (Na^+), калия (K^+), кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}), концентрации борной (H_3BO_3) и кремневой (H_4SiO_4) кислот. В пробах газа определяются метан (CH_4), азот (N_2), кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), аргон (Ar), гелий (He), водород (H_2), углеводородные газы: этан (C_2H_6), этилен (C_2H_4), пропан (C_3H_8), пропилен (C_3H_6), бутан (C_4H_{10n}) и изобутан (C_4H_{10i}).

Дебит источников и самоизливающихся скважин определяется объёмным способом с использованием емкостей размером от 2 до 20 л, в зависимости от расхода воды. Атмосферное давление фиксируется с помощью барографов М-22Н и показывающих барометров-анероидов. Температура воды и воздуха измеряется срочными термометрами.

Химический состав воды и газа определяется в лабораторных условиях на базе Центральной Химической Лаборатории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Na в водных пробах определяется на пламенном фотометре PLAPHO-4. Метод пламенной фотометрии основан на сравнении интенсивности аналитической линии анализируемого элемента с интенсивностью линии проб известного состава. Точность анализа $\pm 10\%$.

K определяется на атомно-абсорбционном спектрофотометре SP-2900 фирмы PYE UNICAM, в режиме пламенной эмиссионной спектрофотометрии. Точность анализа $\pm 10\%$.

pH, HCO₃ и H₃BO₃ определяются на универсальном иономере ЭВ-74 с помощью электродов ЭВЛ-ГМ3 – вспомогательный и ЭСЛ – 43-07 – измерительный. Точность анализа: pH $\pm 5\%$; HCO₃ $\pm 2\%$; H₃BO₃ $\pm 10\%$.

CL-ион определяется объёмным аргентометрическим методом с роданидом. Ошибка анализа $\pm 2\%$.

Ca и **Mg** определяются трилонометрическим методом. Точность анализа $\pm 2,5\%$.

SO₄ анализируется титрованием солями бария с индикатором нитро-хромазо. Ошибка анализа $\pm 6\%$.

H₄SiO₄ определяется методом однолучевого измерения на фотоэлектрическом спектрофотометре «SPECOL». Ошибка $\pm 10\%$.

Химический состав газов также определяется в лабораторных условиях. Для этих целей используются хроматографы: «Газохром 3101» и «ЛХМ-80» блочной конструкции двух модификаций (Л-72 и модель 5), которые включают в себя катарометры, термохимические и пламенно-ионизационные детекторы.

Калибровка аппаратуры проводится ежедневно по следующим компонентам: O₂, N₂, CO₂, Ar, CH₄. Стандартом служит воздух, подаваемый с улицы компрессором. 3-4 раза в год проводится дополнительная калибровка стандартными газовыми смесями заводского производства с компонентами определённой концентрации: O₂-2%; N₂-79,5%; CO₂-18,5%; CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₃H₆-iC₄H₁₀-nC₄H₁₀ с концентрацией от 6×10^{-4} до 20×10^{-4} объёмных.

Смеси заданной концентрации (0,1-0,2% об.) для калибровки по He и H₂ готовятся в лабораторных условиях из чистых газов, получаемых из баллонов с гелием и генератора водорода.

Для извлечения из анализируемой воды растворённого в ней газа используется термовакуумный дегазатор.

По мере надобности заменяются или регенирируются сорбенты колонок.

Определение **He** и **H₂** проводится на лабораторном хроматографе «Газохром 3101». Термохимический детектор с платино-палладиевым катализатором позволяет определять концентрации H₂ - от 3×10^{-4} % об., He - от 2×10^{-3} % об.

На этом же хроматографе определяются концентрации O₂ и N₂. Детектор – катарометр, чувствительность по O₂ - 4×10^{-2} , по N₂ - 1×10^{-1} % об.

Для анализа Ar применяется хроматограф Л-72 с насадочной колонкой. Детектор – катарометр, чувствительность $\sim 3 \times 10^{-3}$ % об.

Определение CO₂ и больших концентраций CH₄ и C₂H₆ проводится на этом же хроматографе. Детектор – катарометр. Чувствительность по всем компонентам - $n \times 10^{-3}$ % об.

На хроматографе ЛХМ-80, модель 5 производится определение малых концентраций CH₄ и углеводородов. Детектор – пламенно-ионизационный (ДИП). Смесь лёгких углеводородов полностью разделяется в последовательности: CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₃H₆-iC₄H₁₀-nC₄H₁₀. Чувствительность - $n \times 10^{-6}$ % об.

Результаты натурных и лабораторных исследований заносятся в память компьютера для их дальнейшей обработки.

Основные результаты наблюдений

Как уже отмечалось ранее, работы по поиску гидрогеологических предвестников землетрясений на Камчатке были начаты в 1977 году на Пиначевских термальных

Таблица 1. Краткая характеристика наиболее сильных сейсмических событий, произошедших за период гидросейсмологических наблюдений (1977 – 2002 гг.)

№	Дата	Широта	Долгота	Глубина, км	Ks	Расстояние, км
1	17.06.1986	53.78	160.66	40	13.1	153
2	06.10.1987	52.86	160.23	33	14.1	109
3	02.03.1992	52.76	160.2	20	14.6	111
4	08.06.1993	51.2	157.8	40	15.0	219
5	13.11.1993	51.79	158.83	40	14.6	146
6	01.01.1996	53.88	159.44	0	14.3	101
7	21.06.1996	51.27	159.63	2	13.9	214
8	05.12.1997	54.64	162.55	10	15.5	307
9	01.06.1998	52.81	160.37	31	13.8	119
10	08.10.2001	52.65	160.53	22	14.1	136
11	08.05.2002	53.73	160.93	35	13.5	166

источниках и, расположенной здесь же, самоизливающейся скважине ГК-1. К сожалению, на протяжении практически 10 лет (с 1977 по 1986 гг.), в связи с отсутствием в этот период сильных сейсмических событий, не удавалось зафиксировать каких-либо значимых предвестниковых изменений в режиме подземных вод. С другой стороны, это позволило изучить фоновые вариации, оценить их статистические характеристики [3,12]. Первым сейсмическим событием, перед которым удалось наблюдать предвестниковые вариации в режиме подземных вод, было землетрясение 17 июня 1986 г.

Землетрясение 17.06.1986 г. (№ 1 в таблице 1) произошло в центральной части Кроноцкого залива (рис. 2) и ощущалось в г. Петропавловске – Камчатском интенсивностью 4 – 5 баллов. Землетрясению предшествовало снижение концентрации хлориона в воде скважины ГК-1, (рис. 5). Событие сопровождалось увеличением расхода и концентраций отдельных химических компонентов источников №1 (рис. 3) и №2 (рис. 4).

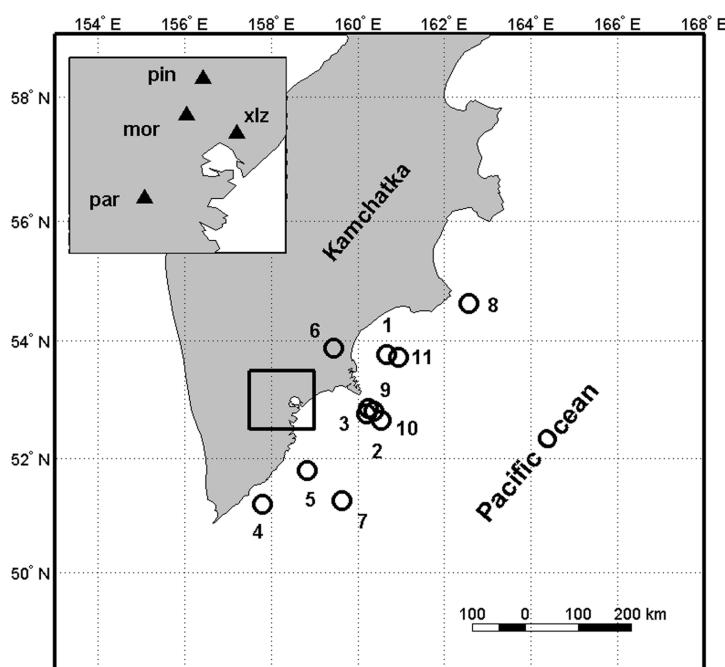


Рис.2. Схема расположения гидрологических станций и эпицентров наиболее сильных землетрясений произошедших в период с 1985 по 2004 гг.

pin – станция Пиначево, **mor** – станция Морозная, **xlz** – станция Хлебозавод, **par** – станция Верхняя Паратунка. Номер эпицентра землетрясения на схеме соответствует номеру землетрясения в таблице 1.

Fig.2. Diagram shows location of hydro-geological stations and epicenters for the largest EQs in 1985-2004.

Stations: **pin** – Pinachevo; **mor** – Moroznaya; **xlz** – Khlebozavod; **par** – Verkhnaya Paratunka. EQ's epicenter number meets the EQ's number given in Table 1.

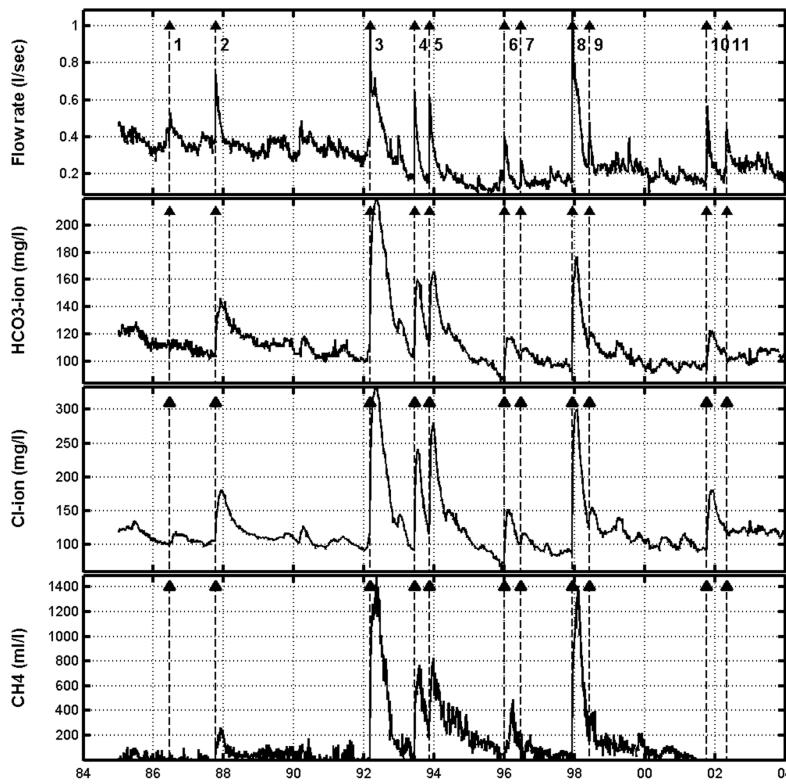


Рис.3. Примеры послесейсмических вариаций режима источника №1, станция Пиначево.

Здесь и далее вертикальными стрелками обозначены моменты землетрясений. Номер у стрелки соответствует номеру землетрясения на рисунке 2 и в таблице 1.

Fig.3. Some examples of regime variations for Spring 1, Pinachevo station.

Vertical arrows (here and further) indicate the time of the EQ. A symbol above the arrow corresponds to the EQ's

Землетрясение 6.10.1987 г. (№ 2 в таблице 1) с эпицентром, расположенным напротив Шипунского полуострова имело интенсивность 4–5 баллов в г. Петропавловске-

Камчатском. Землетрясению предшествовало снижение концентрации хлор – иона в воде скв. ГК-1 и уменьшение концентрации гидрокарбонат – иона, скв. №1 (рис. 6). В режиме Пиначевских источников наблюдались послесейсмические аномальные изменения расхода и макрокомпонентного состава воды. Гидрогеохимические предвестники землетрясений 1986 и 1987 гг. были выявлены ретроспективно [15, 16].

Землетрясение 2.03.1992 г. (№ 3 в таблице 1) Эпицентр этого землетрясения также располагался напротив полуострова Шипунский (рис.2, таблица 1). Перед землетрясением наблюдалось снижение концентрации иона хлора в воде скважины ГК-1 минимальное значение которой, фиксировалось уже после сейсмического толчка. В скважине № 1 (ст. Морозная)

происходило снижение концентрации гидрокарбоната и увеличение концентраций кальция, сульфат – иона, натрия. В воде этой же скважины впервые были обнаружены предвестниковые изменения в составе угле-

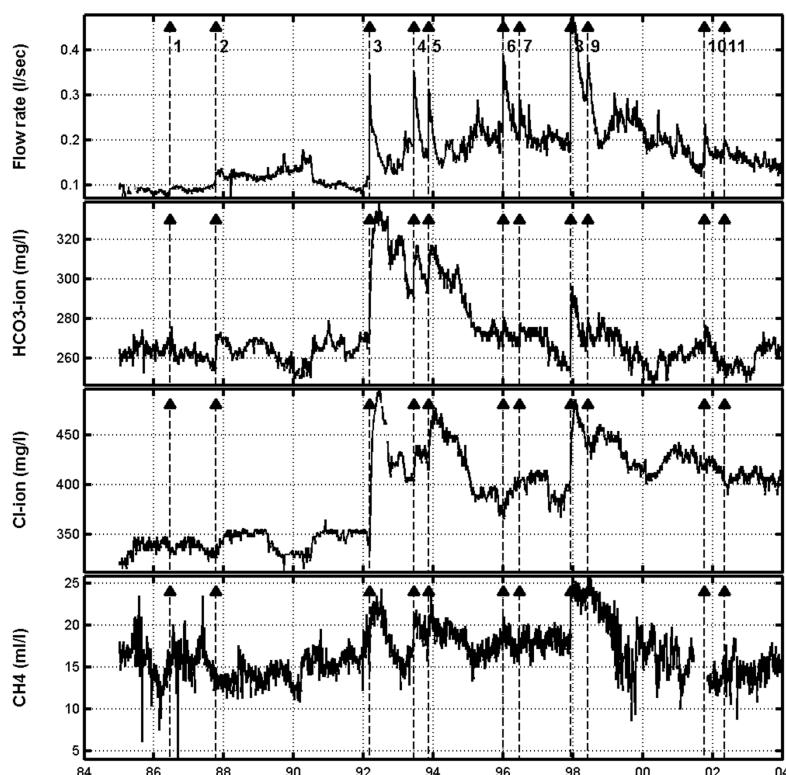


Рис.4. Примеры послесейсмических вариаций режима источника №2, станция Пиначево.

Fig.4. Examples of post-seismic regime variations in Spring 2, Pinachevo station.

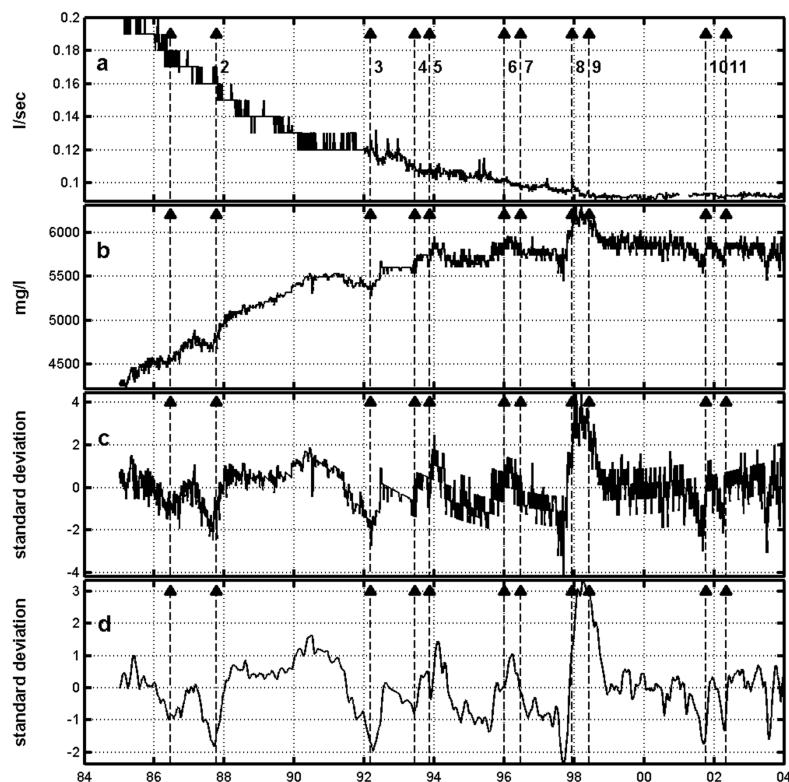


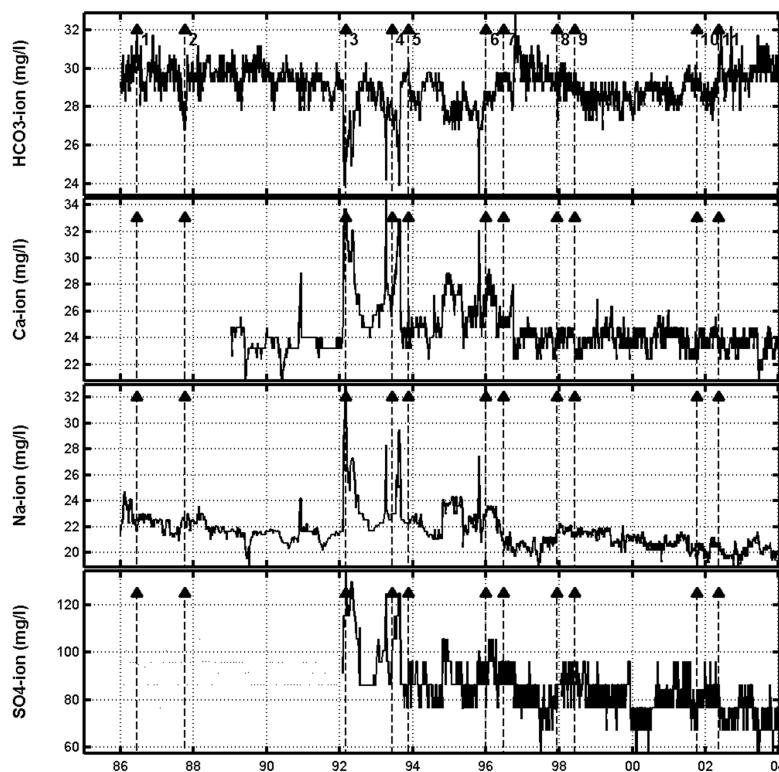
Рис.5. Изменение расхода воды скважины ГК-1 (станция Пиначево) и содержания в ней иона хлора.
a – изменение расхода воды,
b – изменение концентрации иона хлора, **c** – изменение концентрации иона хлора после компенсации тренда, **d** – изменение концентрации иона хлора после фильтрации низкочастотным фильтром Баттерворда.

Fig.5. Water discharge variations in GK-1 well (Pinachevo station) and its Cl-ion content.

a- water discharge variation;
b – change in Cl-ion concentration; **c** – change in Cl-ion concentration after trend compensation; **d** - change in Cl-ion concentration after low-pass Butterword filtering.

водородных газов (рис. 8). Все предвестниковые изменения идентифицировались с подготовкой землетрясения в текущем времени [5, 7]. Как и в случае предыдущих землетрясений, в режиме Пиначевских источников наблюдались ярко выраженные послесейсмические аномалии.

Землетрясения 1993 г. (№ 4, 5 в таблице 1) В 1993 г. на юге Камчатки произошло два значительных сейсмических события. Первое из них произошло 8 июня, второе 13 ноября. Оба этих землетрясения предварялись снижением концентрации гидрокарбонат – иона и увеличением концентраций кальция, сульфата, натрия в воде скважины №1. На всех станциях, в связи с этими землетрясениями, практически одновременно фиксировались предвестниковые вариации в составе углеводородных газов (рис. 8). В режиме скв. ГК-1, незадолго до сейсмических событий, отмечалось падение концентрации хлора, но амплитуда



карбонат – иона и увеличением концентраций кальция, сульфата, натрия в воде скважины №1. На всех станциях, в связи с этими землетрясениями, практически одновременно фиксировались предвестниковые вариации в составе углеводородных газов (рис. 8). В режиме скв. ГК-1, незадолго до сейсмических событий, отмечалось падение концентрации хлора, но амплитуда

Рис.6. Изменения некоторых характеристик макрокомпонентного состава воды скважины №1, станция Морозная.

Fig.6. Some changes in the groundwater ion content in well №1 (Moroznaya station).

Рис.7. Изменения некоторых характеристик макрокомпонентного состава воды скважины Г-1, станция Хлебозавод.

Fig.7. Some changes in the groundwater ion content in G-1 (Khlebozavod station).

вариаций была незначительна. Идентификация аномальных изменений режима подземных вод с подготовкой двух южных землетрясений произведена ретроспективно.

Землетрясение 1.01.1996 г. (№ 6 в таблице 1) произошло в пределах Карымского вулканического центра. Практически в это же время началось извержение вулканов Карымский и Академии Наук. Этому вулканотектоническому событию предшествовало снижение концентрации хлор - иона в воде скв. ГК-1. На станции Морозная отмечено снижение концентрации гидрокарбонат – иона и увеличение концентраций кальция, сульфат – иона и натрия. На некоторых станциях перед землетрясением наблюдалось незначительное увеличение содержания УВГ. Отличительной чертой Карымского вулканотектонического события явились высокоамплитудные предсейсмические изменения макрокомпонентного состава воды

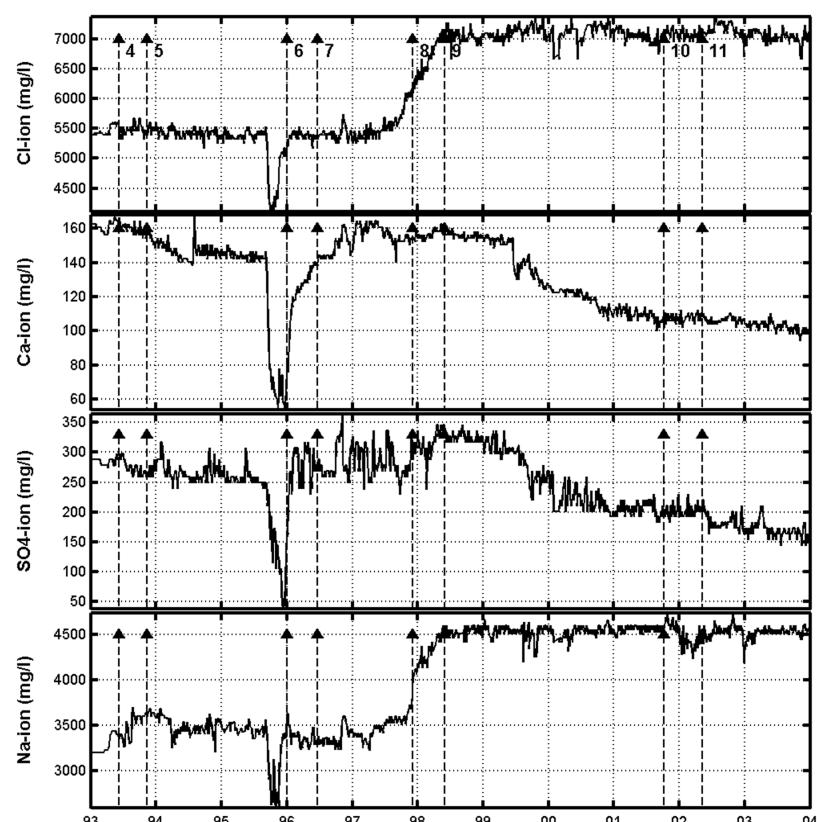
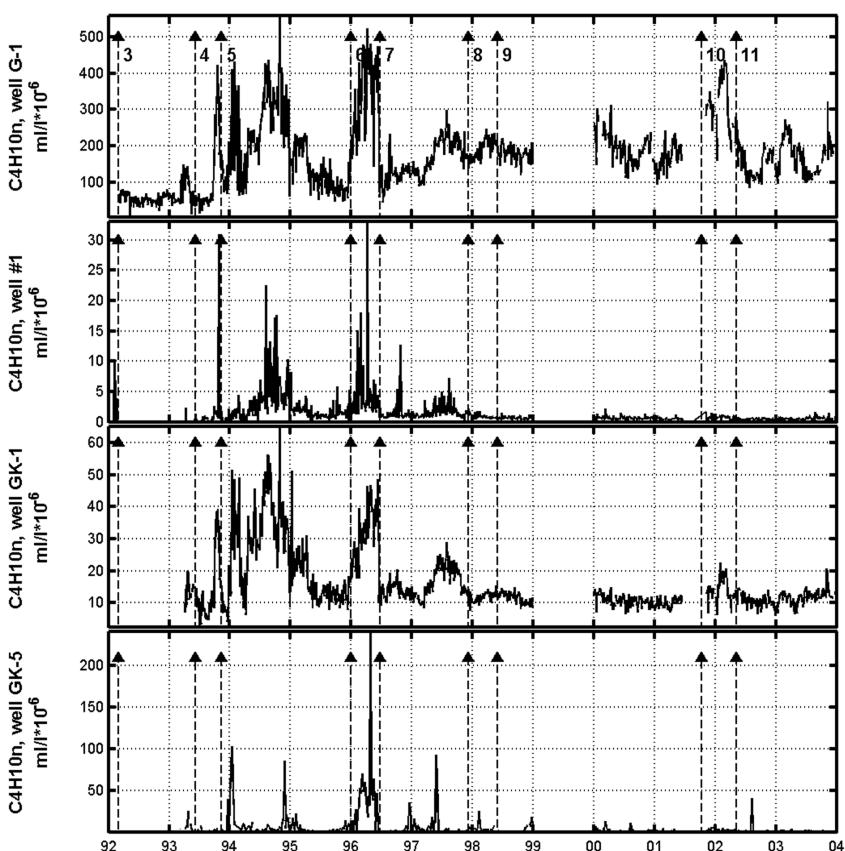


Рис.8. Изменение концентрации нормального бутана в воде: скважины Г-1 (ст. Хлебозавод), скв. №1 (ст. Морозная), скв. ГК-1 (ст. Пиначево), скв. ГК-5 (ст. Верхняя Паратурка).

Fig.8. Changes in normal butane concentration in water:

G-1 well (Khlebozavod station), well №1 (Moroznaya station), GK-1 (Pinachevo station), GK-5 well (Verkhnaya Paratunka station).



скважины Г-1 расположенной на станции Хлебозавод. Таких вариаций не отмечалось ни до, ни после землетрясения 1.01.1996 г. Нет, также, оснований считать, что эти вариации химического состава связаны с какими-либо атмосферными или техногенными факторами. Пример вышеописанных аномальных изменений приведён на рисунке 7. Все аномальные изменения, предшествующие вулканотектоническому событию идентифицировались в реальном времени [17].

Землетрясение 21.06.1996 г. (№ 7 в таблице 1) Изменения в режиме подземных вод перед этим сейсмическим событием фиксировались лишь в газовом составе, но достойны упоминания, поскольку носили ярко выраженный характер (рис. 8). Из рисунка видно, что практически одновременно, на всех водопунктах наблюдались высокоамплитудные аномалии в составе углеводородных газов. Кроме того, на скважинах №1 (ст. Морозная) и ГК-44 (ст. Верхняя Паратурка) фиксировалось увеличение концентраций растворённых в воде азота и аргона. На Пиначевских источниках в связи с этим землетрясением отмечались незначительные послесейсмические вариации.

Землетрясение 5.12.1997 г. (№ 8 в таблице 1) явилось самым сильным сейсмическим событием за весь период наблюдений. Эпицентр его располагался напротив северной оконечности Кроноцкого полуострова, в более чем трехстах километрах от г. Петропавловска – Камчатского. Землетрясение оказалось самым удалённым из сейсмических событий, для которых были зарегистрированы гидрогеохимические предвестники.

Наиболее ярко аномальные изменения макрокомпонентного состава подземных вод перед Кроноцким землетрясением наблюдались на станциях Пиначево и Хлебозавод. Так в воде скважины ГК-1, за несколько месяцев до землетрясения, отмечалось снижение концентрации иона хлора, амплитуда которого превысила 4 среднеквадратических отклонения. Такое же по форме изменение содержания хлора, но несколько меньшей амплитуды, наблюдалось и на скважинах расположенных на станции Верхняя Паратурка. В воде скважины Г-1 в течение трёх месяцев до землетрясения наблюдалось увеличение содержания хлор-натриевой составляющей. В режиме всех наблюдательных скважин фиксировались положительные аномалии в составе углеводородных газов. Яркие послесейсмические вариации гидродинамического и гидрогеохимического режимов отмечались на Пиначевских источниках [18].

Особо хотелось бы отметить изменения, зарегистрированные на станции Хлебозавод. Как видно из рисунка 7, увеличение концентрации иона хлора, а также натрия происходило как до, так и после сейсмического события и носило необратимый характер. Подобные эффекты, а именно необратимые изменения режима, для гидрогеологических объектов наблюдаются достаточно редко и связаны, как правило, с наиболее сильными или катастрофическими землетрясениями.

Землетрясение 8.10.2001 г. (№ 10 в таблице 1) Эпицентр этого землетрясение располагался в акватории Тихого Океана напротив полуострова Шипунский. Интенсивность его, в районе г. Петропавловска – Камчатского, составила 4 – 5 баллов. Землетрясению предшествовало снижение концентрации хлор – иона в воде скважины ГК-1. Подготовка землетрясения отслеживалась в текущем времени с августа 2001 года.

Землетрясение 8.05.2002 г. (№ 11 в таблице 1) в ряду отмеченных выше, явилось относительно слабым сейсмическим событием. Тем не менее, ему также предшествовало уменьшение концентрации хлора (скв. ГК-1, ст. Пиначево) и увеличение концентрации углеводородных газов в воде скважины Г-1 (ст. Хлебозавод).

В июле 2003 г. началось аномальное снижение концентрации хлор – иона в воде скважины ГК-1 (рис. 5), что является прогностическим признаком. 7 августа в Камчатское отделение ФЦПЗ и объединённый Совет по прогнозу землетрясений был подан прогноз о том, что в период с 7 августа по 7 сентября 2003 года существует повышенная вероятность возникновения землетрясения с интенсивностью в г.Петропавловске – Камчатском от 3 до 5 баллов включительно. Прогноз продлевался дважды и 19.09.2003 г. был снят. Это был первый случай за двадцатипятилетнюю историю гидрогеохимических исследований, когда столь ярко выраженная аномалия не

закончилась значительным сейсмическим событием. Были аномалии, амплитуды которых не соответствовали энергии землетрясений, которым они предшествовали, но все они проявлялись на фоне релаксационных процессов от предыдущих сильных сейсмических событий.

25 сентября 2003 г. в Японии, близ о. Хоккайдо произошло землетрясение с $M = 8.1 - 8.3$ по разным оценкам. Эпицентр землетрясения располагался у южной границы Северо – Американской тектонической плиты, здесь же проходит Курило – Камчатский глубоководный желоб. Нам бы очень хотелось увязать аномалию по хлор – иону с этим землетрясением, в пользу чего говорит местоположение его эпицентра, однако расстояние до пунктов наблюдений (примерно 2000 км) говорит не в пользу данного предположения. Мы не знаем примеров такой “ дальновидности” гидро-геохимических предвестников. Второе предположение о природе этой аномалии – криповье подвижки в зоне “ответственности”. Подвижки или “медленные события” отличаются от обычного землетрясения “затянутой” фазой выделения сейсмической энергии, без толчка и характерны для некоторых зон тектонической активности (Центрально – Сахалинский разлом, зона разлома Сан – Андреас и пр.). Однако инструментального подтверждения о развитии в это время в исследуемой зоне деформаций мы не имеем. Не имеем мы и косвенных подтверждений, таких как: усиление движения подземных вод, ведущее к разуплотнению пород и, как следствие, усилию оползневых процессов; растрескиванию фундаментов крупных сооружений и пр. Кроме того, усиление движения подземных вод может приводить к выносу на поверхность радиоактивных веществ. Ничего подобного, как нам известно, в пределах Камчатского геодинамического полигона в это время не происходило. По всей вероятности энергетика события для того, чтобы произошли описанные выше подтверждения, оказалась недостаточной. Амплитуда аномалии по хлор – иону, исходя из опыта двадцатипятилетних наблюдений, соответствовала накопленной энергии, достаточной для возникновения в зоне “ответственности” землетрясения, которое проявилось бы в г. Петропавловске – Камчатском интенсивностью около 5 баллов.

Мы не отдаём предпочтения ни одной из выдвинутых гипотез. Любая из них, в той или иной степени, имеет право на существование. Возможно, существует и какая – то третья причина, о которой мы не знаем.

Общая характеристика предвестниковых аномалий

Поскольку данная статья носит, в большей степени, описательный характер, основное внимание, по нашему мнению, справедливо было бы сосредоточить на фактических данных без рассмотрения широко используемых сейчас математико-статистических методов обработки натурных наблюдений. Нисколько не умаляя достоинств последних, позволим себе указать на очевидный факт, что даже при использовании самых передовых методов математической статистики невозможно выделить предвестник землетрясения там, где его нет. Под предвестником землетрясения в рамках настоящей работы следует понимать вариации гидрогеологического режима подземных вод, модуль значений амплитуды которых, превосходит доверительный интервал равный двум среднеквадратическим отклонениям. Понятно, что сам термин “предвестник” обязывает подобные вариации обнаруживать себя до сейсмического события. Таким образом, с практической точки зрения, наибольший интерес представляют две основные характеристики предвестника: его амплитуда ($A_{\text{пр}}$) и время от его экстремального значения до землетрясения ($T_{\text{пр}}$). Не менее важным является устойчивость или стабильность проявления предвестника перед землетрясениями определённого энергетического класса, что характеризует его прогностическую ценность.

Из всего набора компонентов наблюдаемых и анализируемых в лаборатории Гидросейсмологии КОМСП ГС РАН, наиболее надёжные предвестники обнаружены в вариациях макрокомпонентного состава и в составе растворённых в воде углеводо-

родных газов. Для показателей макрокомпонентного состава характерным предвестниковым признаком является уменьшение или увеличение среднего значения их концентраций, экстремумы которого фиксируются за сутки – месяцы до землетрясения. Типичным примером таких изменений является уменьшение концентрации хлор – иона в воде скв. ГК-1 (ст. Пиначево). Из одиннадцати рассмотренных сейсмических событий девяти, кроме землетрясений 21.06.96 и 1.06.98 г. которые произошли на спаде постсейсмических возмущений имевших место после землетрясений 1.01.69 и 5.12.97 г., предшествовало такое снижение. Среднее значение периода между экстремальным значением аномалии по хлору и землетрясением (Тпр) составляет 56 суток. В воде скважины №1, в пяти случаях, перед землетрясениями наблюдалось уменьшение концентраций гидрокарбонат – иона и увеличение концентраций натрия, сульфата, кальция. Среднее значение Тпр для этих компонентов составило 52 дня. Характерным предвестниковым признаком для углеводородных газов, в отличие от макрокомпонентного состава, является резкое увеличение дисперсии изменения их концентрации. Такое поведение УВГ фиксировалось практически перед всеми крупными сейсмическими событиями, начиная с 1992 г. Среднее значение Тпр для УВГ составляет 55 суток. Обращает на себя внимание синхронный характер предвестниковых вариаций УВГ, несмотря на то, что все скважины находятся в различных геологоструктурных условиях. Вообще, синхронность поведения компонентов – предвестников в пространственно разнесённых пунктах наблюдений является важным дополнительным аргументом в пользу того, что сильное землетрясение произойдёт. Примеры применения методов многомерного анализа для выявления периодов коллективного поведения различных параметров режима подземных вод Камчатской гидросейсмологической сети, можно найти в работах [8, 9, 10, 19]. Справедливости ради, следует заметить, что ни анализ отдельных временных рядов, ни их многомерных аналогов, не позволяет избежать ситуаций типа “ложной тревоги”. Такие ситуации возникают, когда яркие, статистически значимые аномальные изменения, наблюдаемые по целому ряду компонентов, во времени, оказываются не связанными с каким либо сейсмическим событием. Примером могут служить вариации в составе углеводородных газов в период с начала 1994 по середину 1995 гг. Отсутствие сильных землетрясений на фоне аномальных возмущений геофизических полей зачастую объясняется явлением крипа, когда накопившиеся напряжения снимаются за счёт пластических деформаций.

Общая характеристика послесейсмических аномалий

Изменения режима подземных вод, наряду с остаточными явлениями в грунтах, фигурируют в шкале интенсивности землетрясений как один из её показателей. Гидрогеологические эффекты, регистрируемые после крупных сейсмических событий, чрезвычайно разнообразны и могут проявляться на огромных расстояниях, вплоть до нескольких тысяч километров от эпицентра. К ним относятся: изменения уровня воды в колодцах и скважинах, изменения дебитов источников и самоизливающихся скважин, изменения давления нефти в нефтедобывающих скважинах, изменения химического и газового состава подземных вод. Известны случаи исчезновения источников и появления новых очагов разгрузки, образования грязевых вулканов и т. д. [6]. Даже этот, далеко не полный список примеров говорит о том, что сейсмичность необходимо рассматривать как один из главных режимообразующих факторов подземных вод. Это подтверждают и наши многолетние наблюдения, краткие результаты которых, изложены выше. Установлено, что все землетрясения, проявляющиеся в г. Петропавловске – Камчатском интенсивностью три балла и более, вызывают послесейсмические изменения в режиме подземных вод Пиначевских источников (увеличение расхода воды и концентрации макрокомпонентного и газового состава). После землетрясений интенсивностью 5 и более баллов наблюдаются изменения макрокомпонентного состава воды самоизливающихся скважин. Такой эффект впервые был обнаружен в связи с Кроноцким

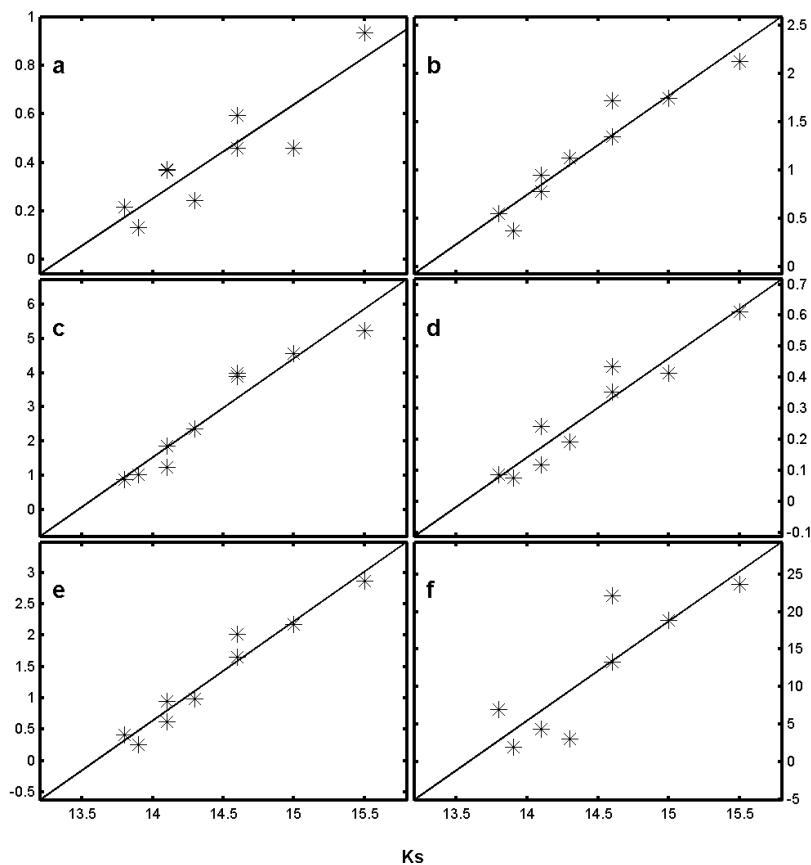


Рис.9. Графики регрессионных зависимостей от энергетического класса землетрясений K_s :

a – амплитуды изменения расхода воды, **b** – скорость изменения концентрации гидрокарбонат-иона, **c** – хлор-иона, **d** – иона кальция, **e** – иона натрия, **f** – метана.

Fig.9. Diagrams of regressive dependence on K_s :

a – amplitude of water discharge variations; **b** – rate of change in hydrocarbonate-ion concentration; **c** – Cl-ion; **d** – Ca-ion; **e** – Na-ion; **f** – methane.

землетрясением (рис. 5). С этим же землетрясением связана и послесейсмическая реакция макрокомпонентного состава воды скважины Г – 1, которая, как уже отмечалось выше, носила необратимый характер (рис. 7).

Наиболее яркие послесейсмические аномалии (иногда, также, называемые косеисмами) наблюдаются в режиме источника № 1, ст. Пинчево (рис. 3). Первая фаза аномального возмущения состоит из быстрого, скачкообразного увеличения значений расхода, температуры и концентрации растворённого вещества и газа. К сожалению, из-за достаточно низкой дискретности опробования (1 раз в трое суток), точный период времени, от момента землетрясения до начала возмущения неизвестен. Однако есть все основания предполагать, что этот временной интервал не превосходит нескольких часов. Если принимать за начало возмущения – момент землетрясения, то время, прошедшее с этого момента до экстремального значения аномалии, в среднем, составляет: для расхода – 4 дня, для гидрокарбонат иона – 36 дней, хлора – 42 дня, кальция – 40 дней, натрия – 44 дня, метана – 54 дня. Вторая фаза аномального возмущения характеризуется относительно медленным восстановлением значений параметров, которое происходит по экспоненциальному закону. Полное время существования аномалии может достигать полугода и более.

На рисунке 9 приведены графики зависимости некоторых характеристик послесейсмических возмущений режима источника № 1, от логарифма энергии землетрясений. При построении диаграмм использовались только те сейсмические события, для которых можно было выделить “чистые” косеисмы, т. е. такие, в которых чётко фиксировался момент начала аномалии и её экстремум (землетрясения с $K_s > 13.5$, №2 – №10, таблица 1). Хорошо видно наличие прямой корреляционной связи между амплитудой изменения расхода воды источника, скоростью изменения концентраций макрокомпонентов, газа и величиной K_s . Это говорит о том, что послесейсмические аномалии режима подземных вод, в перспективе, могут использоваться не только как качественные, но и как количественные характеристики интенсивности землетрясений.

Заключение

С момента начала исследований (1977 г) в лаборатории Гидросейсмологии накоплен уникальный фактический материал по наблюдению за целым комплексом показателей режима подземных вод юго-востока полуострова Камчатка. Результаты его анализа доказывают, что подземная гидросфера является одним из наиболее чувствительных индикаторов напряжённо-деформационного состояния недр, изменение которого зачастую связано с процессами подготовки и реализации землетрясений. За время исследований удалось выделить практически все типы аномальных возмущений в подземных водах так или иначе связанные с сейсмическим процессом. Сюда, прежде всего, относятся послесейсмические аномалии характеризующие последствия (интенсивность) землетрясений. Показано существование прямой корреляционной связи между амплитудой, скоростью возмущения и логарифмом сейсмической энергии. Приведены многочисленные примеры предвестниковых изменений, которые по времени своего проявления классифицируются как среднесрочные. Установлено, что наиболее информативными, с позиции задачи прогноза землетрясений, являются вариации макрокомпонентного и углеводородного состава подземных вод. В целом, все аномальные возмущения, регистрируемые как на стадии подготовки, так и на стадии реализации землетрясений, имеют обратимый характер. Исключение составляет изменение макрокомпонентного состава воды скважины Г-1, расположенной на станции Хлебозавод в связи с Кроноцким землетрясением. Обращено внимание на возможность возникновения ситуаций типа “ложной тревоги”, когда значительные по величине вариации целого ряда компонентов – предвестников не сопровождаются сейсмическим событием.

В статье сознательно не рассматриваются математико - статистические методы обработки фактических данных, поскольку одно их перечисление могло бы занять непозволительно много места. Тем не менее, использование их оказывается совершенно необходимым как на стадии предварительной обработки (отчистка временных рядов от различного рода шумовых и неинформативных факторов), так и на стадии прогноза. Последнее особенно актуально в тех случаях, когда предвестниковые признаки носят латентный характер.

Всё выше сказанное позволяет сделать вывод о том, что наблюдения за режимом подземных вод, наряду с другими методами, являются одной из важнейших составляющих мониторинга сейсмической активности Камчатского полуострова. Оценки “сейсмической опасности”, основанные на данных гидросейсмологических наблюдений, еженедельно представляются на совете КамО ФЦПЗ и объединённом совете Института Вулканологии и сейсмологии и Камчатской опытно-методической сейсмологической партии по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.

Литература

1. Бюс Е. И. О предвестниках землетрясений по наблюдениям Мольденгауэра над режимом Екатерининского источника в Боржоми. Сообщ. АН Груз ССР, 1942. Т3. №10. С. 1013-1017.
2. Голицын Б. Б. Новая организация сейсмической службы в России. В кн. Избранные труды. Сейсмология, том 2. Изд-во АН СССР, 1960. С. 425-426.
3. Гриц Г. Н., Сугробов В. М., Хаткевич Ю. М. Некоторые результаты наблюдений за режимом подземных вод на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений. Вулканология и сейсмология, 1983. №4. С. 62 – 72.
4. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. М.: Мысль, 1979. С. 620

5. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Левина В. И., Бахтияров В. Ф., Гусева Е. М., Дроздин Д. В., Иванова Е. И., Левин В. Е., Петухин А. Г., Хаткевич Ю. М., Чиркова В. Н. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда MLH = 7.1) в Авачинском заливе и связанные с ним явления. Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48 – 61.
7. Киссин И. Г. Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
8. Копылова Г. Н., Сугробов В. М., Хаткевич Ю. М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений. Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53-70.
9. Любушин А. А. (мл.), Копылова Г. Н., Хаткевич Ю. М. Применение многомерного анализа для обработки данных гидрогеологических наблюдений на Петропавловском полигоне (Камчатка) с целью поиска предвестников землетрясений. Вулканология и сейсмология. 1996. № 1. С. 79-97.
10. Любушин А. А. (мл.). Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга. Физика земли. 1998. № 1. С. 59-67.
11. Любушин А. А. (мл.). Вейвлет - агрегированный сигнал и синхронные всплески в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений. Физика земли. 2000. № 3. С. 20-31.
12. Мавлянов Г. А., Султанходжаев А. Н., и др. Явление изменения химического состава подземных вод при землетрясении. – Диплом № 129 по заявке № 01 – 7928 от 14 апреля 1971 г. Бюл. № 42, 1973.
13. Сугробов В. М., Гриц Г. Н., Хаткевич Ю. М. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатском геодинамическом полигоне. Динамические процессы в дискретных геофизических системах. Владивосток. 1986. С. 48 – 58.
14. Уломов В. И., Мавашев Б. З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения ДАН, 1967. Т176. № 2. С. 319-321.
15. Манухин Ю.Ф. Влияние землетрясений на динамику термальных вод Камчатки. – В кн.: Тезисы докладов IX совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск – Петропавловск – Камчатский, 1979, с.35.
16. Хаткевич Ю. М., Гриц Г. Н., Васькин В. С. Гидрохимические вариации в режиме термальных источников и скважин Камчатского геодинамического полигона в связи с землетрясением 6 октября 1987 г. Развитие сейсмологических и геофизических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке. Иркутск. 1988. С. 72 – 73.
17. Хаткевич Ю. М. О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше 5 баллов, проявляющихся в городе Петропавловске – Камчатском. Вулканология и сейсмология. 1994. №1. С. 63-67.
18. Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В. Особенности аномальных изменений в гидрогеологическом режиме водопунктов Камчатской гидросейсмологической сети в период подготовки и реализации вулканотектонического события района вулкана Карымский 1.01.96 г. Современный вулканизм Курило – Камчатской и Алеутско – Аляскинской островных дуг. Петропавловск – Камчатский. 1998 г. С. 24 – 25.
19. Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В. Гидродинамические и гидrogазохимические вариации параметров режима подземных вод в период подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97. Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Петропавловск – Камчатский. 1998. С. 134 – 147.
20. Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В. Синхронность поведения отдельных показателей химического состава воды в режиме наблюдательных скважин, как индикатор изменения геодинамической обстановки. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск – Камчатский. 2000. С. 136 – 146.