

УДК 556.114:550.344.37:632.126(282.257.21)

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ КАМЧАТКИ. АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

© 2009 Г.В. Рябинин, Ю.М. Хаткевич

*Камчатский филиал учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский 683006; e-mail: gena@emsd.iks.ru*

На основе данных многолетних наблюдений за режимом подземных вод на Камчатке анализируются гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям (магнитуда $M \geq 6.0$, эпицентрально-расстояние $S \leq 350$ км). Рассмотрены алгоритм предварительной обработки данных и алгоритм ретроспективной идентификации аномальных вариаций в химическом и газовом составе подземных вод. Представлена морфологическая типизация гидрогеохимических эффектов, с учетом которой определены наиболее вероятные прогнозные признаки сильных сейсмических событий.

Ключевые слова: гидрогеохимия, землетрясение, предвестник, классификация.

ВВЕДЕНИЕ

Под гидрогеохимическими эффектами, предшествующими сильным землетрясениям («гидрогеохимическими предвестниками»), обычно понимают аномальные изменения широкого круга показателей и компонентов физико-химического, химического, газового и изотопного состава подземных вод, которые наблюдаются незадолго до сейсмических событий. Приуроченность гидрогеохимических аномалий к конкретным сейсмическим событиям устанавливается, как правило, по их взаимосвязи во времени после процедур компенсации в исходных временных рядах неинформативных факторов (сезонные колебания, тренды, баровариации и т.п.). Во многих случаях такой подход можно считать вполне правомерным, однако утверждать о том, что выделенные с его помощью гидрогеохимические эффекты необходимо рассматривать как предвестники землетрясений вряд ли имеет смысл. Объясняется это, прежде всего, отсутствием общепринятой и проверенной модели, генетически связывающей процесс подготовки тектонического землетрясения и механизм образования гидрогеохимических эффектов — модели, которая могла бы служить основой для выводов относительно объективности

существования гидрогеохимических предвестников.

В представленной работе анализируются среднесрочные гидрогеохимические эффекты длительностью десятки — сотни суток, предшествовавшие наиболее сильным землетрясениям Камчатки. Поскольку их идентификация основана, главным образом, на временных закономерностях между гидрогеохимическими эффектами и сильными сейсмическими событиями, мы не можем однозначно интерпретировать выявленные аномалии как предвестники землетрясений. Скорее их необходимо рассматривать как признаки того, что сильное землетрясение может произойти в определенном временном интервале (прогнозные признаки), отсчитываемом от момента проявления гидрогеохимической аномалии. Из этого следует, что мы признаем вероятностный характер связи между сейсмическими событиями и предшествующими им гидрогеохимическими эффектами. Это означает, что в данных многолетних гидрогеохимических наблюдений, проводимых на Камчатке, имеют место, как ситуации типа «ложных тревог», когда проявление значимого гидрогеохимического эффекта не сопровождается возникновением сильного землетрясения, так и ситуации типа «пропуска цели», когда сильное сейсмическое

событие не предваряется гидрогеохимическими аномалиями. Принимая вероятностный характер проявления гидрогеохимических эффектов перед сейсмическими событиями, мы, тем не менее, считаем возможным, рассматривать подобного рода эффекты в качестве предмета исследований.

Одной из проблем, возникающих при изучении гидрогеохимических эффектов, предшествующих землетрясениям, является проблема их морфологического многообразия. Различный характер изменения гидрогеохимических показателей перед сейсмическими событиями можно рассматривать в качестве одной из причин того, что до сих пор не дано однозначного ответа на вопрос – возможен ли прогноз землетрясений гидрогеохимическими методами, несмотря на огромное количество работ, посвященных данной теме. Опыт наблюдений на Камчатке показывает, что сильным землетрясениям также могут предшествовать аномальные изменения химического и газового состава подземных вод, имеющие различный характер (Хаткевич, Рябинин, 2006). В связи с этим, представляется разумным попытаться систематизировать подобного рода изменения, т.е. выделить из всего их многообразия наиболее характерные морфологические типы. Морфологический анализ может оказаться полезным для решения как минимум двух задач. Первая из них может быть направлена на определение прогнозных признаков сильных землетрясений или, иными словами, характерных вариаций гидрогеохимических показателей, факт наблюдения которых с приемлемой вероятностью может свидетельствовать о подготовке сильного сейсмического события. Вторая задача может быть связана с изучением механизмов формирования гидрогеохимических эффектов, поскольку характер изменения того или иного показателя перед землетрясением является едва ли не единственной информацией, которая может быть использована для понимания генезиса гидрогеохимических аномалий. В рамках второй задачи морфологические типы гидрогеохимических эффектов могут являться основой для создания концептуальных или иного рода моделей формирования аномальных изменений в химическом и газовом составе подземных вод, связанных с процессами, развивающимися на стадии подготовки сильных землетрясений.

СЕТЬ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Представляется очевидным, что морфологический анализ имеет смысл только при наличии достаточно большого массива данных за длительный период, в течение которого происходили сильные сейсмические события.

На Камчатке с 1977 г. проводятся специализированные наблюдения за режимом подземных вод с целью обнаружения и исследования гидрогеохимических предвестников землетрясений. В настоящий момент сеть наблюдений состоит из четырех гидрогеологических станций, включающих в себя, в общей сложности, 11 водопунктов (самоизливающихся скважин и источников). Структура сети наблюдений показана на рисунке 1, а характеристика входящих в ее состав водопунктов представлена в таблице 1. Комплекс режимных наблюдений включает в себя замеры атмосферного давления и температуры воздуха, измерения температуры и дебита самоизливающихся скважин и источников, отбор проб воды и газа для дальнейшего их анализа в лабораторных условиях. В пробах воды определяются pH, 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), 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_{10}) и изобутан (C_4H_{10i}).

Дебит источников и самоизливающихся скважин определяется объёмным способом с использованием емкостей размером от 10 до 20 л, в зависимости от расхода воды. Атмосферное давление фиксируется с помощью барографов М-22Н и портативной цифровой метеостанции SKYWATCH GEOS № 11 (производства Швейцарии). Температура воды и воздуха измеряется

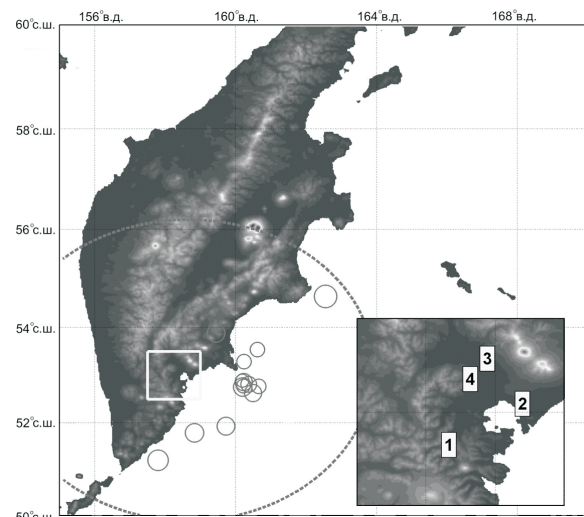


Рис. 1. Схема пространственного местоположения района исследований и эпицентров землетрясений, произошедших в период с 1985 по 2008 гг. Пунктирной линией обозначена область радиусом 350 км с центром в г. Петропавловске-Камчатском. Номера обозначены гидрогеологические станции: 1 – станция Пиначево, 2 – ст. Морозная, 3 – ст. Хлебозавод, 4 – ст. Верхняя Паратунка.

Таблица 1. Краткая характеристика водопунктов специализированной сети гидрогеологических наблюдений.

Скважина, источник	Глубина скважины, м	Химический состав воды	Газовый состав воды	Интервал опробования, сутки
Станция Пиначево				
Скв. ГК-1	1261	Хлоридный, кальциево-натриевый	Метановый	3
Ист. №1	-	Гидрокарбонатно-хлоридный, магниевое-натриевый	Метановый	3
Ист. №2/1	-	Гидрокарбонатно-хлоридный, магниевое-натриевый	Метановый	3
Ист. №2/2	-	Гидрокарбонатно-хлоридный, магниевое-натриевый	Метановый	3
Ист. №3	-	Хлоридно-гидрокарбонатный, магниевое-натриевый	Азотный	3
Станция Морозная				
Скв. №1	600	Гидрокарбонатно-сульфатный, натриево-кальциевый	Азотный	3
Станция Хлебозавод				
Скв. Г-1	2542	Хлоридный, натриевый	Метановый	3
Станция Верхняя Паратунка				
Скв. ГК-5	900	Хлоридно-сульфатный, кальциево-натриевый	Азотный	6
Скв. №44	650	Хлоридно-сульфатный, кальциево-натриевый	Азотный	6
Скв. ГК-15	1208	Хлоридно-сульфатный, кальциево-натриевый	Азотный	6
Скв. ГК-17	1196	Хлоридно-сульфатный, кальциево-натриевый	Азотный	6

срочными термометрами. Химический состав воды и газа определяется в лабораторных условиях на базе Центральной химической лаборатории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Na⁺ и K⁺ ионы определяется на спектрофотометре SP-2900 пламенно-фотометрическим методом (методика РД 52.24.391-95). рН определяется потенциометрическим методом (методика ПНД Ф 14.1:2.3:4.121-97) на универсальном иономере ЭВ-74. HCO₃⁻-ион определяется потенциометрическим титрованием на иономере ЭВ -74 (ПНД Ф 14.2.99-97). H₃BO₃ определяется методом объемного рН-метрического титрования на иономере ЭВ -74 (№ 280 Г). H₄SiO₄ определяется калориметрическим методом с использованием фотокалориметра КФК-3 (РД 52.24.433-95). Cl⁻-ион определяется аргентометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.96-97). Ca²⁺ и Mg²⁺ ионы определяется титриметрическим методом (ГОСТ 23268.5-78). SO₄²⁻-ион определяется титриметрическим методом по методике ГОСТ 23268.4-78. Химический состав газов определяется газохроматографическим методом на хроматографе ЛХМ 8 МД по методикам МП-1ГХ (свободные газы) и МП-2ГХ (растворённые газы), разработанным в Центральной химической лаборатории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Под предварительной обработкой данных понимаются процедуры, направленные на компенсацию или минимизацию во временных рядах неинформативных факторов. В рамках специфики наблюдений, проводящихся с целью выявления среднесрочных гидрогеохимических эффектов предшествующих землетрясениям, к наиболее значимым неинформативным факторам относятся: многолетние изменения (тренды) расхода, температуры, химического и газового состава воды скважин; периодические вариации в узком диапазоне частот спектра, вызываемые атмосферными (сезонные изменения температуры воздуха и атмосферного давления) и космическими (приливные изменения) факторами; неперидические вариации в широком диапазоне частот спектра, вызываемые изменениями несезонной составляющей атмосферного давления и температуры воздуха; одиночные случайные выбросы и эффект квантования результатов измерений.

На рисунке 2 представлена иллюстрация основных этапов предварительной подготовки данных на примере временного ряда изменения концентрации сульфат-иона в воде скважины № 44,

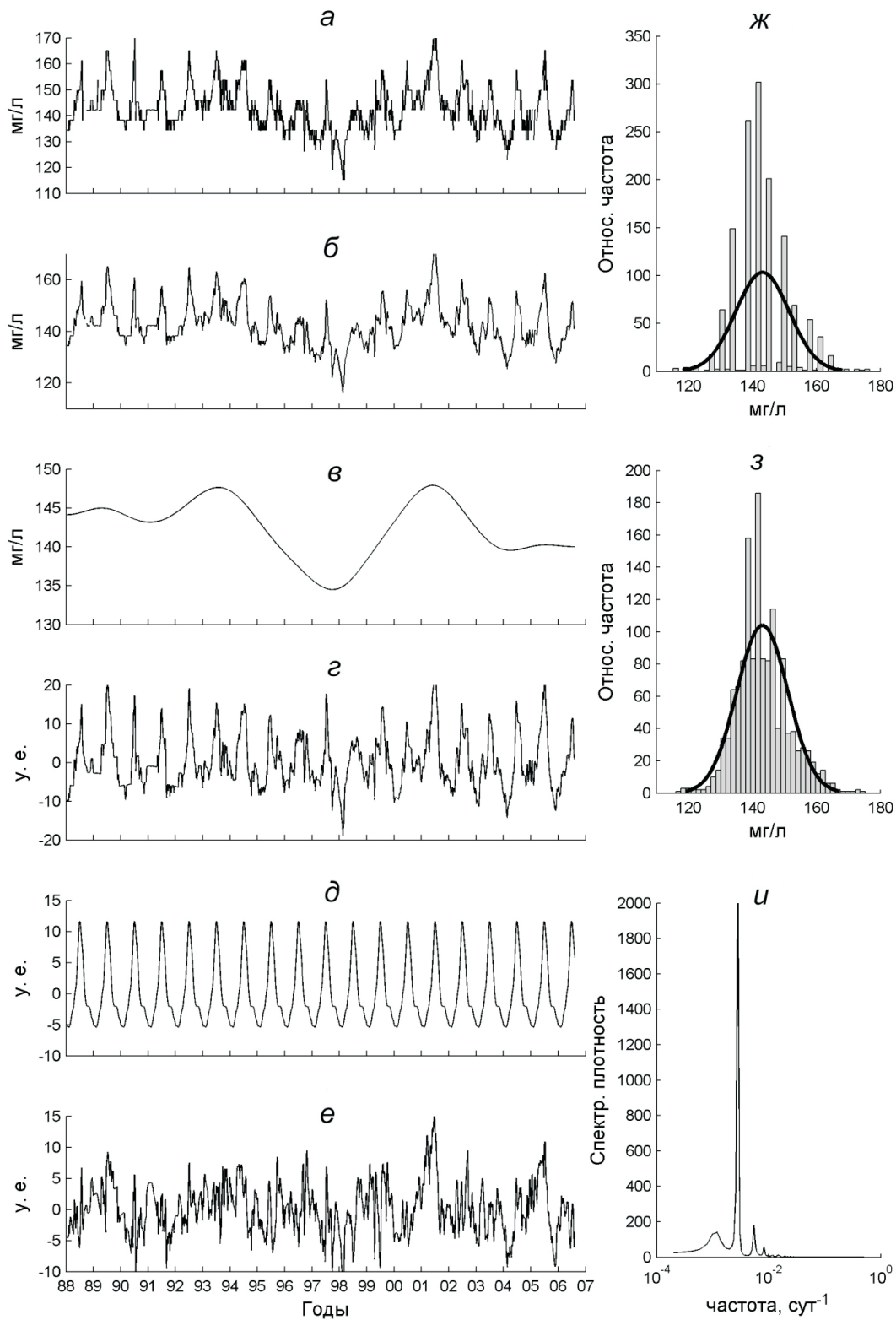


Рис. 2. Иллюстрация основных этапов подготовки данных гидрогеологических наблюдений на примере временного ряда изменения концентрации сульфат-иона в воде скважины № 44: *а* – фактический ряд изменения концентрации сульфат-иона; *б* – временной ряд SO_4 после применения процедур удаления одиночных выбросов и подавления эффекта квантования; *в* – длиннопериодная (трендовая) составляющая ряда SO_4 ; *г* – ряд SO_4 после удаления длиннопериодной составляющей; *д* – сезонная составляющая ряда SO_4 ; *е* – ряд SO_4 после компенсации сезонной составляющей; *ж* – гистограмма распределения фактических значений ряда SO_4 ; *з* – гистограмма распределения значений ряда SO_4 после применения процедур удаления одиночных выбросов и подавления эффекта квантования; *и* – спектр Бурга, рассчитанный для значений ряда, представленного на рисунке 2 (*г*)

расположенной на станции Верхняя Паратунка. Данный пример выбран неслучайно, поскольку, и это видно из самого рисунка, представленный временной ряд (рис. 2а) содержит практически все из вышеперечисленных неинформативных факторов. Сама процедура предварительной подготовки данных состоит из следующей последовательности операций. В самом начале исходные временные ряды «отчищаются» от одиночных выбросов (высокоамплитудных вариаций длительностью в одну точку). После удаления выбросов временные ряды подвергаются процедуре подавления эффекта квантования, который возникает вследствие конечной точности измерений и/или округления измеренных значений. Эффект квантования хорошо заметен на гистограмме, которая имеет при этом вид «гребня» с чередованием пустых и заполненных столбцов (рис. 2ж). Подавление эффекта квантования осуществляется простым осреднением данных исходного ряда в скользящем временном окне размером в три значения (метод сглаживания «тройками»), при этом удается достичь заметного выравнивания гистограммы распределения данных (рис. 2з). Результат совместного применения рассмотренных процедур представлен на рисунке 2б. Следующая процедура предварительной подготовки направлена на компенсацию в исследуемых временных рядах многолетних трендов. Выделение трендов осуществляется с помощью цифровых фильтров с полосой пропускания сосредоточенной в сверхнизких частотах, соответствующих периодам 1000 суток и более. При этом полагается, что длительность вероятных гидрогеохимических эффектов, предшествующих землетрясениям, принадлежит более высокочастотному диапазону. Компенсация трендов проводится посредством вычитания результатов низкочастотной фильтрации из фактических временных рядов. Пример применения рассматриваемой процедуры изображен на рисунках 2в и 2г. Интересно заметить (рис. 2в), что в данном примере минимальное значение тренда сопоставляется во времени с Кроноцким землетрясением 5.12.97 г., которое оказалось сильнейшим сейсмическим событием за весь период специализированных гидрогеологических наблюдений на Камчатке. Подобная картина наблюдалась и в вариациях концентраций хлор-, кальций-, и натрий-ионов в воде этой же скважины. Несмотря на это, возможность таких изменений режима подземных вод перед самыми сильными землетрясениями Камчатки пока можно рассматривать только как гипотезу главным образом потому, что совокупность событий типа «сильное землетрясение – значимое изменение тренда», недостаточно многочисленна.

После удаления многолетних трендов данные анализируются на предмет наличия в них сезонных вариаций. Анализ осуществляется методом Берга (Бурга). Для рассматриваемого примера спектр Берга изображен на рис. 2и. Как видно из рисунка, основная доля дисперсии временного ряда изменения концентрации сульфат-иона сосредоточена на частоте, соответствующей периоду один год. Также заметно, что кроме основной гармоники в спектре присутствует пара значимых гармоник меньшей амплитуды, частота которых кратна частоте основной гармонической составляющей. Такая закономерность распределения гармонических составляющих на графике амплитудного спектра хорошо известна и объясняется тем, что реальная форма периодической компоненты сигнала может существенно отличаться от чисто синусоидальной (Дещеревский, Лукк, 2002). Для компенсации сезонных изменений использовался метод, основанный на оценке аддитивной среднесезонной функции (Дещеревский, Сидорин, 1998). Итоговый ряд изменения концентрации сульфат-иона после всех вышеперечисленных преобразований представлен на рисунке 2е.

Выделение приливных эффектов попросту невозможно из-за низкой дискретности наблюдений. Воздействие несезонных составляющих баро- и температурных вариаций не учитывалось, поскольку предполагалось, что они не оказывают существенного влияния на формирование режима термальных вод.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Перед тем как перейти к морфологическому анализу, определим некоторые формальные принципы, на основании которых мы будем относить те или иные вариации гидрогеохимических параметров к эффектам, предшествующим землетрясениям. На этом этапе возникают как минимум три проблемы. Первая проблема заключается в том, чтобы определить те сейсмические события, перед которыми, в силу их пространственных и энергетических характеристик, возможно наличие гидрогеохимических эффектов.

Одним из наиболее широко применяемых соотношений, связывающих магнитуду землетрясения, эпицентрального расстояние и величину деформации на стадии его подготовки (Добровольский, 1984), является выражение вида

$$\varepsilon = \left(\frac{R}{10^{0.413M-2.66}} \right)^3; \quad (1)$$

Здесь R – эпицентрального расстояние, M – маг-

нитуда землетрясения. Значение величины ε порядка 10^{-8} полагается равным приливной деформации. С использованием этого выражения отбор сейсмических событий осуществлялся следующим образом. Сначала отбирались все землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 13$, произошедшие в радиусе $R \leq 350$ км от г. Петропавловска-Камчатского. Для этого использовался региональный каталог Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН (www.emsd.ru). Нижняя граница величины энергетического класса выбиралась исходя из опыта гидрогеохимических наблюдений на Камчатке, в соответствии с которым достоверных эффектов перед землетрясениями с $K_s < 13$ не наблюдалось. По тем же соображениям выбиралась и верхняя граница эпицентрального расстояния, максимальное значение которого, в случае Кроноцкого землетрясения (5.12.1997 г., $M_w = 7.8$), равнялось 308 км. Количество выбранных таким образом сейсмических событий в интервале 1985-2006 гг., получилось равным 59. Далее, для этих событий рассчитывались величины параметра ε . В окончательную выборку включались только те землетрясения, для которых значение параметра ε равнялось или превышало 10^{-7} , что на порядок больше величины приливной деформации. Размер выборки при этом сократился до 17 событий, характеристика которых представлена в таблице 2, а пространственное положение их эпицентров показано на рисунке 1. Если теперь удалить близлежащие во времени события с наименьшим энергетическим классом, то вы-

борка сократится ещё на три землетрясения. В таблице 2 характеристика этих землетрясений показана полужирным шрифтом, а всех остальных – обычным шрифтом. Таким образом, окончательный размер выборки составил 14 сейсмических событий.

Вторая проблема связана с понятием значимости экстремальных вариаций наблюдаемых показателей. Фактически речь идет об определении некоего порогового уровня выход за пределы которого может являться основанием для отнесения данного изменения в разряд аномальных. В работе (Любушин, 2007) справедливо замечено о том, что применительно к данным геофизического мониторинга определение критических порогов является чрезвычайно трудным делом. Тем не менее, определение пороговой величины совершенно необходимо, в противном случае, сама постановка задачи – морфологический анализ аномальных гидрогеохимических вариаций – попросту теряет смысл. Наиболее простой прием оценки порогового уровня заключается в использовании величины среднеквадратического отклонения. В работе (Зубков, 1981), к примеру, для оценки значимости прогнозного признака предлагается использовать величину равную удвоенному среднеквадратическому отклонению, рассчитанному для фоновых вариаций рассматриваемого компонента. В соответствии с этим подходом, значения временного ряда, выходящие за пределы интервала $\pm 2\sigma$ (σ – среднеквадратическое отклонение) считаются аномальными и рассматриваются на

Таблица 2. Краткая характеристика выборки сейсмических событий.

Дата	Широта	Долгота	H, км	S, км	Ks	M _l	$\varepsilon * 10^{-7}$
19.05.1985	53.54	160.62	39	140	13.5	6.0	1.04
06.10.1987	52.86	160.23	33	109	14.1	6.3	5.16
01.03.1990	53.29	160.24	25	108	13.5	6.0	2.26
19.12.1990	52.77	160.65	24	139	13.5	6.0	1.06
02.03.1992	52.76	160.2	20	111	14.6	6.6	10.1
05.03.1992	52.77	159.95	31	95	13.9	6.2	5.96
08.06.1993	51.2	157.8	40	219	15.0	6.8	2.30
13.11.1993	51.79	158.83	40	146	14.6	6.6	4.37
17.11.1993	51.78	158.67	40	147	13.7	6.1	1.20
07.05.1994	52.89	160.19	20	106	13.0	5.8	1.18
01.01.1996	53.88	159.44	0	101	14.3	6.4	8.58
05.12.1997	54.64	162.55	10	308	15.5	7.0	1.69
01.06.1998	52.81	160.37	31	120	13.8	6.2	2.55
08.03.1999	51.93	159.72	7	149	14.3	6.4	2.70
08.10.2001	52.62	160.46	31	133	13.8	6.2	1.87
08.10.2001	52.63	160.49	24	134	14.1	6.3	2.78
26.07.2005	52.78	160.22	29	111	13.3	5.9	1.56

Примечание. H – глубина гипоцентра; S – эпицентрального расстояние; Ks – энергетический класс землетрясения; $M_l = 0.5 * K_s - 0.75$ – локальная магнитуда; ε – величина относительных деформаций (параметр Добровольского). Выборка сейсмических событий осуществлялась с использованием регионального каталога КФ ГС РАН.

предмет их возможной связи с сейсмическими событиями. В том случае, если состояние системы не меняется в промежутке между сильными сейсмическими событиями, такой подход выделения экстремальных вариаций, по-видимому, будет вполне правомерным. Если же изучаемые временные ряды имеют нестационарный характер (состояние системы меняется с течением времени) то само разделение временного ряда на участки фоновых и сверхфоновых вариаций становится затруднительным. Безусловно существуют преобразования и методы обработки временных рядов, позволяющие минимизировать данную неопределенность. К примеру, одним из самых элементарных преобразований, с помощью которого можно получить квазистационарный процесс из нестационарного временного ряда, является дифференцирование (вычисление первых разностей). Однако, в этом случае, теряется информация о характере изменения (форме) предвестникового сигнала, что в контексте поставленной задачи – морфологической типизации – является неприемлемым. По этой причине для оценки значимости экстремальных вариаций наблюдаемых параметров в качестве пороговой использовалась та же величина $\pm 2\sigma$, но вычисляемая для всего временного ряда после процедур его предварительной обработки. Здесь необходимо заметить, что использование данной статистики не накладывает никаких ограничений на форму распределения эмпирических данных. Как следует из неравенства Чебышева, отклонение случайной величины с произвольным распределением как минимум в 75% случаев не превышает величины интервала $\pm 2\sigma$ (Бендат, Пирсол, 1989, стр. 68).

И, наконец, третья проблема – проблема времени проявления гидрогеохимического эффекта или, другими словами, максимального отрезка времени, на котором аномальные значения измеряемого параметра можно ассоциировать с конкретным сейсмическим событием. Опыт специализированных гидрогеологических наблюдений на Камчатке показывает, что промежуток времени между началом формирования гидрогеохимической аномалии и последующим землетрясением исчисляется десятками – сотнями суток. Для самых сильных землетрясений эта величина может достигать года и даже более. Исходя из этого, все значимые вариации, наблюдавшиеся за 300–400 суток и менее до рассматриваемых сейсмических событий, мы ассоциировали именно с этими землетрясениями.

В результате использования вышеописанного алгоритма идентификации было выделено 242 эффекта, главным образом, в макрокомпонентном и газовом составе подземных вод по 63 информативным показателям. В качестве

информативных рассматривались временные ряды, в которых было выявлено не менее двух событий типа аномалия – землетрясение. Все остальные временные ряды считались неинформативными и исключались из дальнейшего анализа. Рассматривая только информативные показатели легко подсчитать теоретически возможное количество эффектов при условии, что каждое из представленных в таблице 2 землетрясений (кроме событий выделенных жирным шрифтом) предварялось значимой аномалией. Их число оказывается равным 882. Отсюда относительная частота проявления аномальных эффектов перед землетрясениями составляет $242/882 = 0.27$ или 27%. Из результатов представленной оценки следует очевидный вывод о том, что в среднем только одно из четырех сейсмических событий предваряется значимым эффектом. Очевидным представляется и тот факт, что относительная частота проявления эффектов перед каждым конкретным землетрясением будет отличаться от ее среднего значения. На рисунке 3 представлена диаграмма, иллюстрирующая величину процентного отношения числа выявленных аномалий к теоретически возможному их числу применительно к каждому из сейсмических событий, представленных в таблице 2. Из рисунка видно, что величина $N\%$ меняется в весьма широких пределах от 3%, в случае землетрясения 3.08.1999 г. ($M = 6.4$, $S = 149$ км), до 72% в случае землетрясения 2.03.1992 г. ($M = 6.2$, $S = 95$ км). Последний пример означает, что перед землетрясением 2.03.1992 г. в 72% рассматриваемых временных рядов наблюдались аномальные вариации. Представленная диаграмма не позволяет сделать однозначные выводы о зависимости числа гидрогеохимических эффектов от пространственно-энергетических характеристик землетрясений. Тем не менее она дает основания предполагать, что большое количество аномальных вариаций гидро-газохимического состава, проявляющихся одновременно в различных пунктах наблюдения, может являться дополнительным прогностическим признаком сильного землетрясения.

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Как показывают результаты многочисленных наблюдений за режимом подземных вод в различных сейсмоопасных регионах, большинство предшествующих землетрясениям вариаций имеют бухтообразный характер (Киссин, 1997). Реже встречаются ступенчатые и импульсные изменения. Ранее проведенный анализ формы гидрогеологических эффектов, наблюдавшихся перед сильными камчатскими

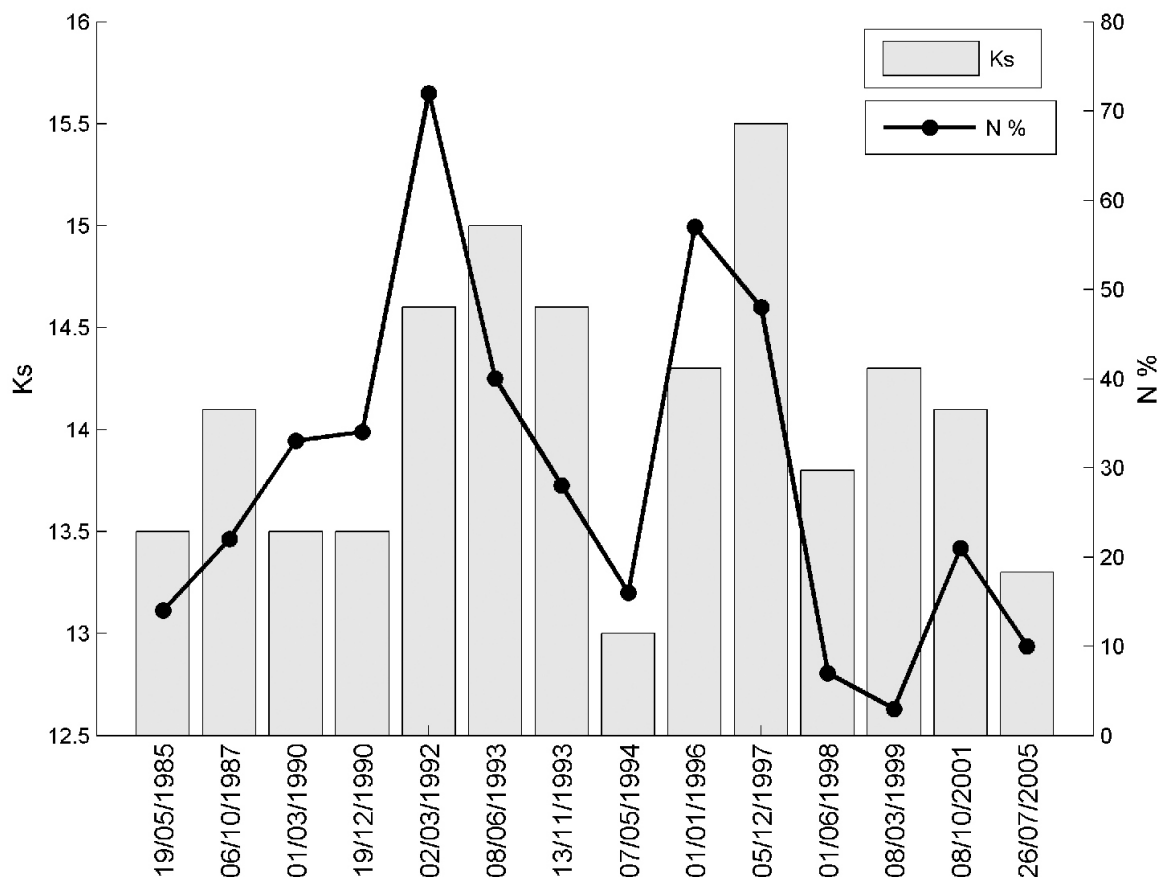


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая величину процентного отношения (N %) числа выявленных гидрогеохимических эффектов, предшествующих наиболее сильным землетрясениям Камчатки, к теоретически возможному их количеству. По оси абсцисс отложены даты сейсмических событий в формате дд/мм/гггг. Ks – величина энергетического класса землетрясений.

землетрясениями, также показал, что самыми типичными являются бухтообразные и скачкообразные изменения режима подземных вод (Копылова и др., 1994).

Исходя из опыта многолетних гидрогеологических наблюдений на Камчатке, можно констатировать, что из всего набора измеряемых и анализируемых параметров режима подземных вод наиболее многочисленные изменения, которые на основании представленных выше критериев можно идентифицировать как предшествующие землетрясениям, выявлены в вариациях макрокомпонентного и газового состава. Значимые изменения расхода воды, предвещающие сильные сейсмические события, можно выделить лишь по скважинам ГК-1 (ст. Пиначево) и № 1 (ст. Морозная). По скв. Г-1 (ст. Хлебозавод) данные по расходу воды представлены на интервале с ноября 1996 г. по март 1999 г., длительность которого, с учетом времени проявления предвестника (300-400 суток), просто не позволяет делать сколько-нибудь обоснованные выводы относительно наличия или отсутствия значимых эффектов. Что касается скважин, входящих в состав станции Верхняя Паратунка, то данные

по расходу воды здесь вряд ли могут быть информативными в принципе, поскольку все скважины функционируют в крановом режиме, т.е. у них отсутствует свободный самоизлив. Анализ данных вариаций температуры воды самоизливающих скважин также не выявил значимых изменений, предшествующих землетрясениям, которые можно было бы считать достаточно достоверными.

Морфологическую типизацию логично начать с макрокомпонентов, поскольку для них выделены наиболее разнообразные типы вариаций. Так для макрокомпонентного состава воды, в большинстве случаев, наиболее характерными формами изменений являются импульсная и бухтообразная формы. Значительно реже отмечаются эффекты скачкообразной и ступенчатой формы (рис. 4).

Наибольший интерес, с точки зрения задачи определения прогнозных признаков землетрясений, представляют бухтообразные вариации, для которых можно достаточно уверенно определить начало изменения и экстремальное значение. По мнению И.Г. Киссина (1997) каждую из таких точек перегиба можно рассматривать как

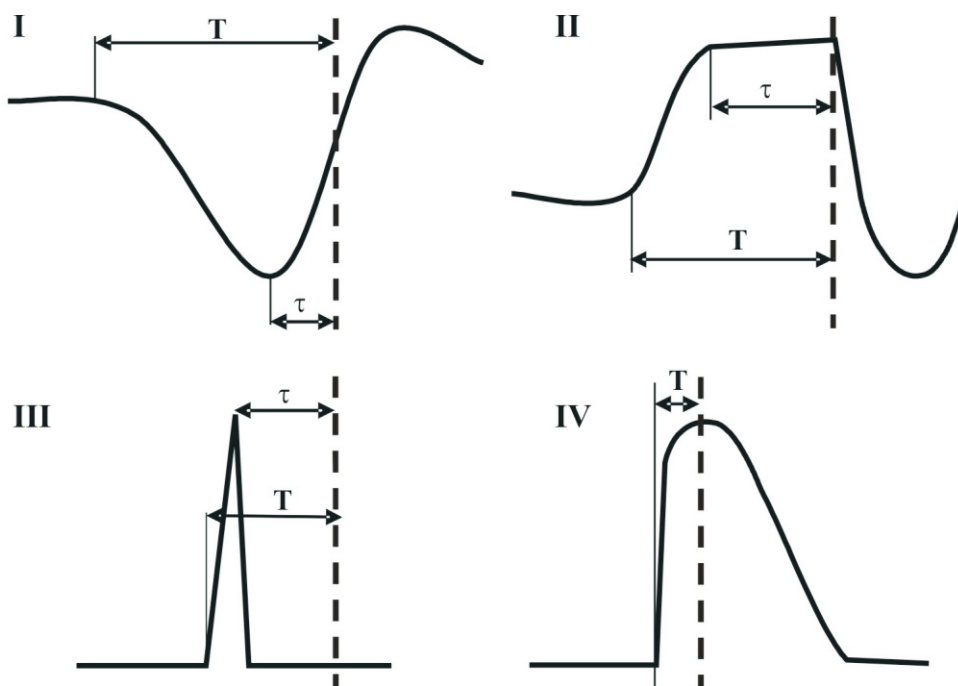


Рис. 4. Идеализированные образы основных типов гидрогеохимических эффектов, предшествующих сильным землетрясениям Камчатки: I – бухтообразные, II – ступенчатые, III – импульсные, IV – скачкообразные. T – время предвестника, τ – время экстремума. Время предвестника и время экстремума для первого и второго типов эффектов обозначены по (Киссин, 1997).

наступление новой стадии в процессе подготовки сейсмического события. Между тем, сами бухтообразные изменения оказываются весьма разнообразными. Наиболее распространены отрицательные асимметричные формы с более пологим левым фронтом (рис. 5). Правый фронт у таких бухтообразных изменений нередко представляет собой достаточно быстрое, иногда скачкообразное восстановление концентрации, переходящее в постсейсмическую фазу. Реже встречаются бухты с обратной симметрией и, совсем в немногочисленных случаях, бухтообразные вариации, которые можно было бы считать вполне симметричными. Для бухтообразных изменений также свойственно наличие небольших по амплитуде отрицательных и положительных импульсных вариаций. Такие, осложненные импульсами, «бухты» наблюдаются в режиме скважин, расположенных на станции Верхняя Паратунка. Общим свойством для эффектов бухтообразной формы является то, что момент землетрясения оказывается заключенным в интервале между экстремальным значением концентрации и моментом, когда концентрация восстанавливается до фонового уровня. Длительность бухтообразных вариаций составляет десятки – сотни суток.

Импульсные и скачкообразные эффекты представляют собой относительно краткосрочные, продолжительностью до нескольких десятков суток, изменения концентрации макрокомпонентов, имеющие в большинстве случаев

положительный характер (рис. 6, 7). Отличие между ними заключается в том, что для импульсной вариации можно уверенно выделить экстремальное значение, для скачкообразной же вариации достоверно выделяется только начало изменения. Естественно, что речь идет о «реальном времени». Иными словами, наблюдая развитие скачкообразной аномалии или скачкообразной фазы бухтообразной аномалии нельзя точно определить ее экстремальное значение в связи с отсутствием у таких изменений выраженной фазы восстановления, которая бы проявлялась до сейсмического события. Имеются примеры, когда вместо фазы восстановления у скачкообразных эффектов отмечается постсейсмическая реакция на землетрясения.

Ступенчатые изменения выделены лишь в вариациях гидрокарбонат-иона, содержащегося в воде скважины ГК-1 (рис. 7). Характерной их особенностью является быстрый рост концентрации, наблюдающийся за сто и более суток до землетрясения, с последующей стабилизацией вплоть до момента сейсмического толчка. После землетрясения концентрация резко падает, а время ее восстановления превышает длительность самой предсейсмической фазы. По форме постсейсмическая стадия изменения содержания гидрокарбонат-иона подобна «ложкообразным» постсейсмическим изменениям удельной электропроводности воды, описанных в работе (Wang et al., 2004).

Отдельного рассмотрения заслуживают из-

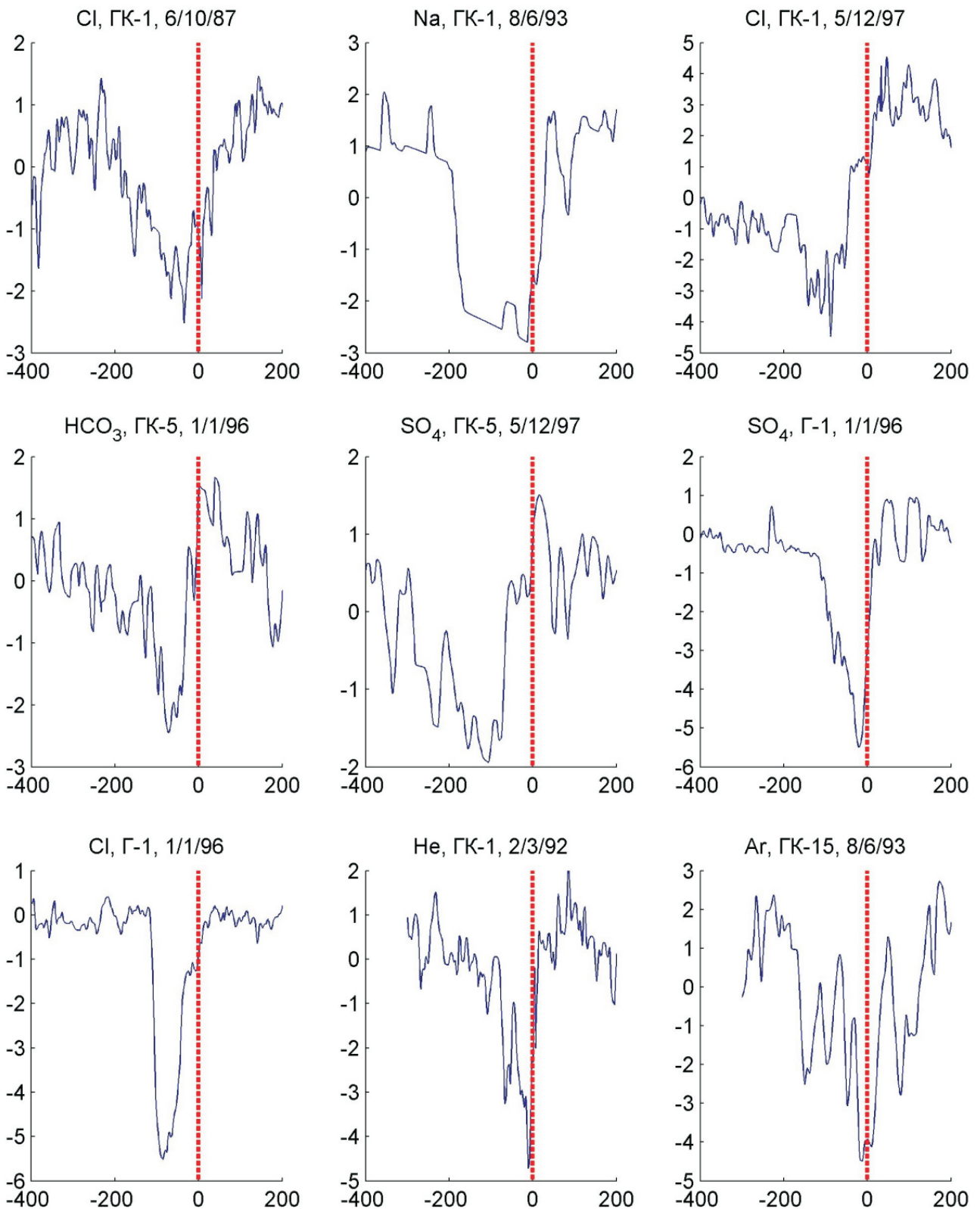


Рис. 5. Примеры гидрогеохимических эффектов бухтообразной формы. Сверху, над каждым графиком через запятую представлены: анализируемый параметр (например, Cl – хлор-ион), номер скважины (ГК-1), дата сейсмического события в формате дд/мм/гг, с которым ассоциируется данное изменение. По оси абсцисс отложено время в сутках относительно момента землетрясения, обозначенного символом «ноль». По оси ординат отложено среднеквадратическое отклонение относительно среднего значения, рассчитанного для всего временного ряда. Вертикальной пунктирной линией обозначен момент землетрясения.

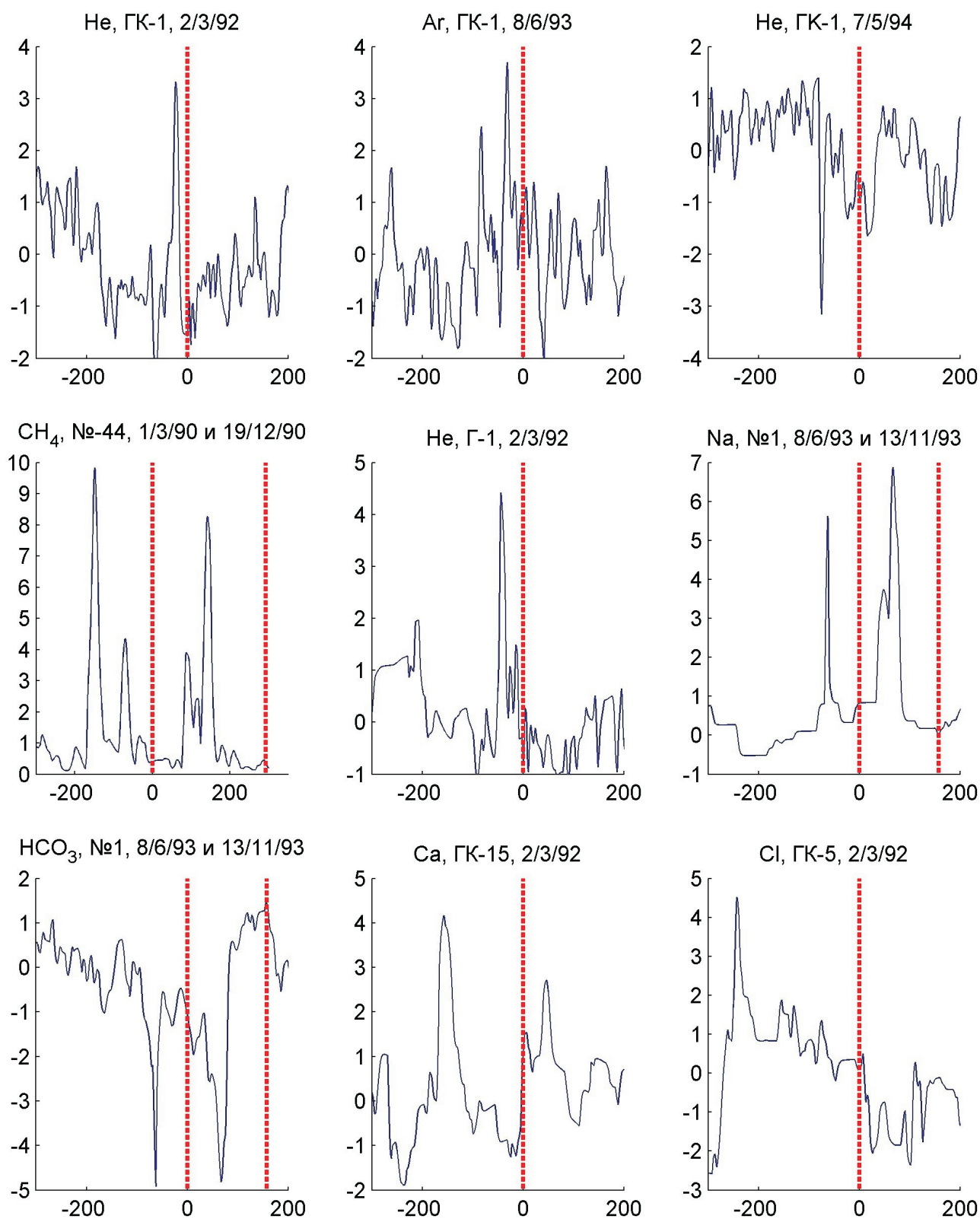


Рис. 6. Примеры гидрогеохимических эффектов импульсной формы. Обозначения представлены на рисунке 5.

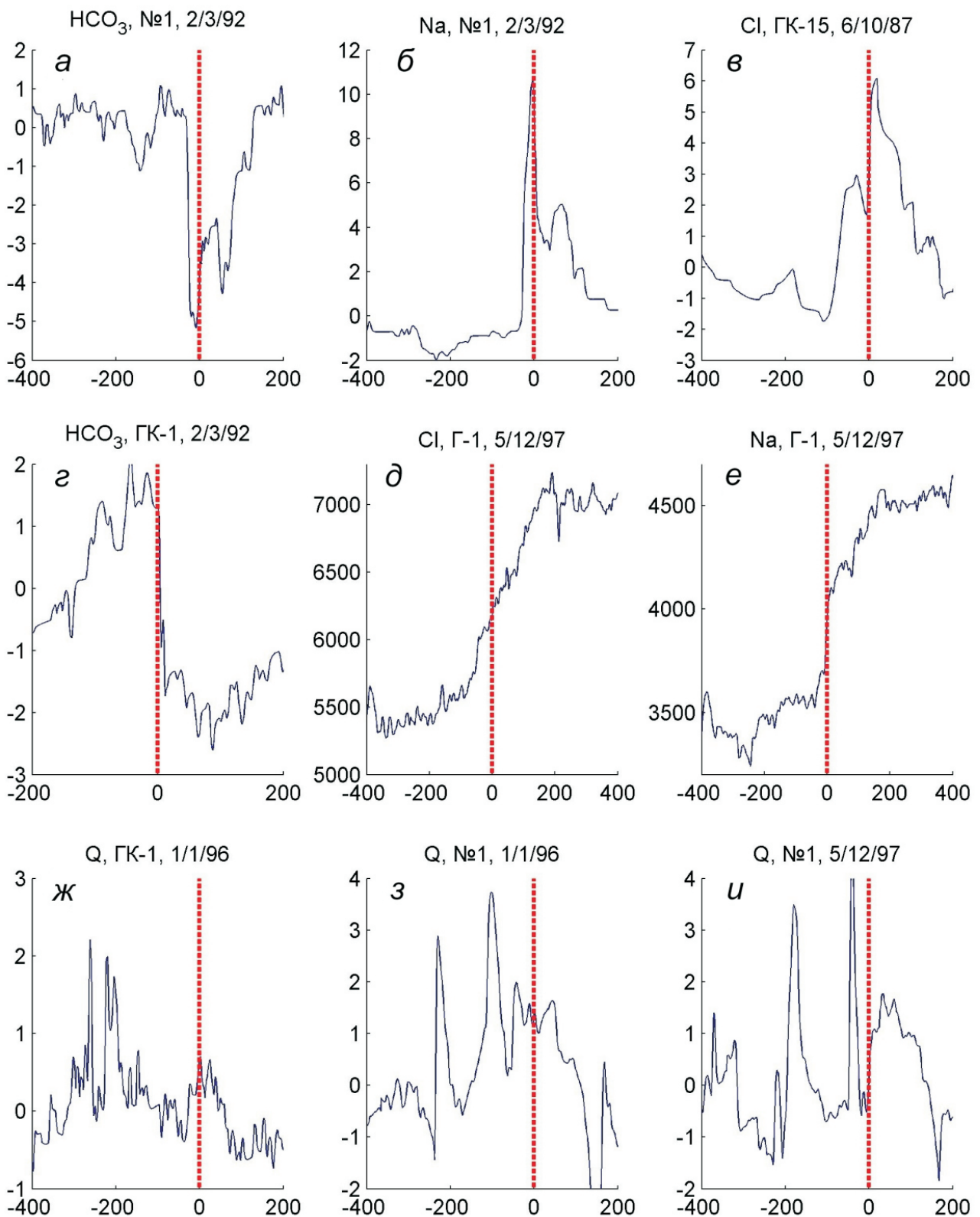


Рис. 7. Примеры гидрогеохимических эффектов скачкообразной (а, б, в) и ступенчатой (г) форм; д, е – примеры необратимых изменений концентраций ионов хлора и натрия в связи с землетрясением 5.12.1997 г. Для этих графиков по оси ординат отложены единицы концентрации в миллиграммах на литр; ж, з, и – примеры импульсных вариаций расхода воды скважин перед землетрясениями.

менения концентраций хлор- и натрий-ионов (скв. Г-1, ст. Хлебозавод) в связи с Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г. (рис. 7). Здесь, примерно за 100 суток до этого сейсмического события, наблюдалось заметное увеличение содержания этих ионов в воде скважины. При этом скорость изменения концентрации последовательно увеличивалась. После землетрясения также продолжался рост концентрации, которая по прошествии примерно 200 суток установилась на более высоких значениях. В этом случае имеются все основания говорить о необратимых изменениях режима системы «пласт – скважина», инициированных Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г. Примеры таких необратимых изменений режима подземных вод весьма немногочисленны и связаны, как правило, с сильнейшими сейсмическими событиями (Киссин, 1982).

Гидрогеохимические эффекты, наблюдающиеся в вариациях газового состава подземных вод, также как и в случае макрокомпонентов, часто имеют форму бухт (рис. 6) и импульсов (рис. 7). Отличие от изменений в макрокомпонентном составе подземных вод заключается лишь в том, что бухтообразные вариации имеют подчиненное значение относительно импульсных форм. Бухтообразные формы, как правило, имеют отрицательный знак, т.е. концентрация свободных и растворенных газов перед сейсмическими событиями плавно уменьшается. Импульсы же, напротив, в большинстве своем положительны, а амплитуда их в отдельных случаях превышает величину равную пяти среднеквадратическим отклонениям.

Относительно данных по расходу воды с учетом того, что возможность анализа ограничена всего двумя временными рядами (скважины ГК-1 и № 1), можно лишь предположить, что форма их проявления представляет собой преимущественно положительные импульсы или последовательность положительных импульсов подобно тем, которые изображены на рис. 7.

Результаты морфологического анализа позволяют сформулировать следующие выводы. Во-первых, наиболее характерными формами эффектов, наблюдающихся в вариациях макрокомпонентного и газового состава подземных вод перед землетрясениями, являются импульсная и бухтообразная формы. При этом доля импульсных форм в общем количестве составляет: для макрокомпонентов – 61%, для газов – 81%. Из них доля положительных и отрицательных изменений составляет, соответственно, для макрокомпонентов – 48%÷13%, а для газов – 63%÷18%. Общая доля бухтообразных форм для макрокомпонентов – 37%, а для газов – 16%. Из них доля положительных и отрицательных форм: для макрокомпонен-

тов – 4%÷33%, а для газов – 5%÷11%. В остальных случаях наблюдаются, в основном, скачкообразные изменения. Из приведенных данных следует, что бухтообразные вариации в подавляющем большинстве случаев представляют собой достаточно длительное уменьшение концентраций растворенных веществ и газов. Импульсные же формы, напротив, выглядят как относительно быстрое увеличение и такое же быстрое восстановление концентраций компонентов солевого и газового состава. Другими словами, есть основания предполагать, что медленные бухтообразные изменения и быстрые импульсные вариации в большинстве случаев имеют разные знаки. Во-вторых, можно отметить, что относительная доля импульсных и бухтообразных изменений для разных скважин оказывается неодинаковой. Например, для скважины ГК-1 (ст. Пиначево) наиболее характерной формой гидрогеохимических эффектов является отрицательная бухтообразная форма. Для скважин, расположенных на станции Верхняя Паратунка, напротив, наиболее типичной формой изменения концентраций основных ионов является положительная импульсная. Что касается форм гидрогеохимических эффектов в составе растворенных в воде и свободных газов, то здесь, для всех скважин, однозначно преобладает импульсная форма. Таким образом, можно сделать вывод, что преобладающая форма (морфологический тип) проявления гидрогеохимического эффекта оказывается различной для разных пунктов наблюдения.

Третья особенность, о которой необходимо упомянуть, заключается в том, что последовательность гидрогеохимических эффектов того или иного типа является уникальной для каждой конкретной скважины. Иными словами, тип гидрогеохимического эффекта, проявляющегося в вариациях одинаковых компонентов, но в разных пунктах наблюдений перед одним и тем же сейсмическим событием оказывается различным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе рассматриваются две проблемы гидрогеохимических эффектов, предшествующих сильным землетрясениям. Одна из них – проблема идентификации. Конечно, предложенный здесь алгоритм выявления гидрогеохимических аномалий не может рассматриваться как наиболее эффективный, если, в данном случае, вообще можно говорить об эффективных алгоритмах. Наша задача в этой части работы заключалась в том, чтобы, на сколько это возможно, формализовать процедуру идентификации гидрогеохимических эффектов на основе эмпирического опыта по их

выявлению (в том числе и в реальном времени), полученного за период многолетних специализированных наблюдений на Камчатке (Хаткевич, Рябинин, 2006). По результатам идентификации можно сделать предположение о том, что одновременное проявление большого числа гидро-газохимических аномалий различного морфологического типа в пространственно разнесенных пунктах наблюдения может являться дополнительным прогнозным признаком сильного землетрясения.

Вторая проблема, как уже отмечалось во вводной части работы, связана с морфологическим многообразием гидрогеохимических эффектов. Подводя итоги морфологического анализа можно заметить следующее. С одной стороны, все многообразие гидрогеохимических эффектов, наблюдавшихся в режиме подземных вод перед наиболее сильными землетрясениями Камчатки, удалось свести к ограниченному количеству морфологических типов. Кроме того, исходя из результатов морфологической типизации, напрашивается вывод о том, что наиболее надежными прогнозными признаками сильного сейсмического события являются либо медленное бухтообразное уменьшение, либо быстрое импульсное увеличение концентрации растворенного в воде вещества и газа. С другой стороны, та последовательность, с которой проявляются гидрогеохимические эффекты разного морфологического типа, как в одной точке наблюдения, так и в разных пунктах, не обнаруживает никаких, по крайней мере, явных закономерностей с пространственно-энергетическими характеристиками землетрясений. К примеру, в воде одной и той же скважины, в одних случаях, перед землетрясениями может наблюдаться бухтообразное снижение концентрации гидрогеохимических показателей, в других случаях — ее импульсное или скачкообразное увеличение. В пространственно разнесенных пунктах перед одним и тем же сейсмическим событием также могут наблюдаться гидрогеохимические эффекты разного морфологического типа. Такое «морфологическое непостоянство» достаточно трудно объяснить. Если принимать наиболее распространенную концепцию, согласно которой на стадии подготовки землетрясения происходит изменение напряженно-деформированного состояния горных пород, что, в свою очередь, может приводить к изменению условий смешивания контрастных по химическому и газовому составу подземных вод (Барсуков и др., 1985; Киссин, 1979; Копылова, 2006), то, вероятно, следует ожидать однонаправленных изменений, по крайней мере, в вариациях одних и тех же гидрогеохимических показателей. Такие эффекты действительно имеют место и идентифицируют-

ся как явление коллективного поведения гидрогеохимических показателей в пространственно разнесенных пунктах наблюдения (Любушин и др., 1996; Любушин и др., 1997; Хаткевич, Рябинин, 2000). Однако подобного рода явления отмечаются далеко не всегда и не на всех наблюдательных пунктах, о чем и свидетельствуют результаты морфологического анализа. Исходя из этого, можно сделать вывод, что помимо общего механизма, предполагающего изменение условий смешивания контрастных по химическому и газовому составу подземных вод, необходимо рассматривать другие механизмы, отвечающие за массоперенос в подземной гидросфере, имеющие более локальный пространственно-временной характер и не являющиеся прямым следствием процесса изменения напряженно-деформированного состояния среды.

ВЫВОДЫ

1. На основе большого массива многолетних данных наблюдений рассмотрены алгоритмы предварительной обработки временных рядов гидрогеохимических параметров и ретроспективной идентификации аномальных гидрогеохимических эффектов, предшествующих сильным сейсмическим событиям юго-восточной части полуострова Камчатка. Указано на проблемы, возникающие, как на этапе выявления аномальных эффектов, так и на этапе их ассоциации с конкретными сейсмическими событиями. Предложены возможные варианты решения этих проблем с учетом эмпирического опыта, полученного за длительный период наблюдений на Камчатке.

2. Разработана морфологическая типизация гидрогеохимических эффектов, предшествовавших сильным землетрясениям Камчатки в период с 1985 по 2007 гг. Показано, что наиболее вероятными прогнозными признаками сильного сейсмического события являются, либо относительно кратковременное импульсное увеличение концентрации растворенного в воде вещества и газа, либо относительно медленное бухтообразное ее уменьшение. Выделенные морфологические типы гидрогеохимических эффектов могут служить основой для изучения механизмов их формирования.

Список литературы

- Барсуков В.Л., Варшал А.В., Гаранин Н. С. и др.* Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 3–16.
- Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ слу-

- чайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
- Дещеревский А.В., Лукк А.А.* Выделение регулярных составляющих во временных вариациях геофизических параметров методом разложения на негармонические компоненты // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 65–78.
- Дещеревский А.В., Сидорин А.Я.* Аддитивная и мультипликативная модели сезонных вариаций геофизических полей. М.: Российская академия наук. Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, 1998. 24 с.
- Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 1984. 188 с.
- Зубков С.И.* Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.
- Киссин И.Г.* Актуальные вопросы гидрогеологических и геохимических исследований для прогноза землетрясений // Геохимия. 1979. № 3. С. 338–344.
- Киссин И.Г.* Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
- Киссин И.Г.* О соотношении между предвестниками землетрясений и постсейсмическими эффектами // ДАН. 1997. Т. 354. № 6. С. 804–808.
- Копылова Г.Н.* Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2006. Вып. 7. № 1. С. 50–66.
- 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.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- 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.
- Любушин А.А. (мл.), Копылова Г.Н., Хаткевич Ю.М.* Анализ спектральных матриц данных гидрогеологических наблюдений на Петропавловском геодинамическом полигоне, Камчатка, в сопоставлении с сейсмическим режимом // Физика Земли. 1997. № 6. С. 79–90.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Особенности поведения отдельных показателей химического состава воды в режиме наблюдательных скважин, как индикатор изменения геодинамической обстановки. // Материалы конф. Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский, 2000. С. 136–145.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42.
- Wang R., Woith H., Zschau J.* Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. 157. P. 717–726.

РЯБИНИН, ХАТКЕВИЧ

**HYDROGEOCHEMICAL FACTORS PRECEDED LARGE EARTHQUAKES IN
KAMCHATKA: IDENTIFICATION ALGORITHM AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS**

G.V. Ryabinin, Yu.M. Khatkevich

*Kamchatka Branch of the Russian Academy of Sciences, Geophysical Survey RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006; e-mail: gena@emsd.iks.ru*

The long-term data obtained from observations of the dynamics of underground water in Kamchatka permits conducting analyses of hydrological and geochemical factors preceded large earthquakes (magnitude $M \geq 6.0$, epicentral distance $S \leq 350$ км). The paper considers methods of data pre-processing and retrospective identification of anomalous variations in chemical and gas composition of underground water. Morphological analysis of the hydrogeochemical effects revealed the most likely precursors of large seismic events.

Keywords: hydrogeochemistry, earthquake, precursor, classification.