

ISSN 0034-026X



# РАЗВЕДКА И ОХРАНА ЦЕНТР ПЕДР

ОСНОВАН В 1931 ГОДУ

Институт вулканологии и сейсмологии  
ДВО РАН (СГУ)  
Адрес: №

11 — 2007

ными к слабомагнитным породам, расположенным на глубине до 200–300 м от дневной поверхности. Слабомагнитные породы с перерывом развиты также и на больших глубинах — до 2 км.

Подводя итоги, следует признать, что перспективы Войкаро-Сыннинского массива далеко не исчерпаны. Для их уточнения необходима существенная активизация поисковых и разведочных геологических работ комплексом методов, обеспечивающих изучение и опосредованное обнаружение глубоких горизонтов массива.

Авторы выражают признательность Л.А. Богданову (руководство прогнозными исследованиями), М.В. Пчелкиной и И.К. Тимофеевой (обработка геофизической информации).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С.Н., Пучиков В.Н., Иванов К.С. и др. Формирование земной коры Урала. — М.: Наука, 1986.
2. Перевозчиков Б.В., Кениг В.В., Лукин А.А., Овечкин А.М. Хроми́ты массива Рай-Из на Полярном Урале. «Геология рудных месторождений». — М.: Наука, 2005. — Т. 47. — № 3. — С. 230–248.
3. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. — СПб: Наука, 1999.

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

© Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М., 2007

Копылова Г.Н. (Камчатский филиал Геофизической службы РАН), Куликов Г.В., Тимофеев В.М. (ВСЕГИНГЕО)

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНОВ РОССИИ

Понятие «гидрогеодеформационное поле Земли» (ГГД-поле) было введено в 80-х годах XX века сотрудниками ВСЕГИНГЕО Г.С. Вартаняном и Г.В. Куликовым [1]. В качестве элементов ГГД-поля рассматривались области расширения и сжатия, отражающие напряженное состояние земных недр и определяемые по изменениям уровня воды в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды. Полагалось, что данные мониторинга ГГД-поля (ГГД-мониторинг) могут использоваться для оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений [2]. Мингео СССР в сейсмоактивных районах России были созданы сети скважин и проводились наблюдения за вариациями уровня подземных вод. Методическое руководство работами осуществлялось ВСЕГИНГЕО [12]. Важным достижением настоящего этапа является обеспечение централизованного сбора информации во ВСЕГИНГЕО и регулярное построение карт ГГД-поля крупных регионов.

Одновременно с работами Федерального агентства по недропользованию уровневые наблюдения в скважинах в целях прогноза землетрясений проводились Геофизической службой РАН на Камчатке [6], Геологическими службами США, Японии, Китая [13]. В результате этих работ стало очевидно, что ряд решений ГГД-мониторинга, принятых в Роснедрах и отраженных в Методических указаниях по поведению работ в региональных центрах [12], требует совершенствования в части информативности отдельных скважин и методов обработки данных уровневых наблюдений для выделения деформационной составляющей из вариаций уровня воды.

В 2006 г. ВСЕГИНГЕО и КФ ГС РАН выполнены работы, направленные на развитие метода скважинных уровневых наблюдений для оценки сейсмической опасности. Задачи работ включали:

оценку деформометрических свойств наблюдательных скважин на основе анализа приливного и барометрического влияния на вариации уровня воды;

разработку методики обработки данных уровневых наблюдений с учетом особенностей отдельных скважин при оценке сейсмоструктурной деформации водовмещающих пород;

разработку рекомендаций по совершенствованию системы ГГД-мониторинга в Роснедрах.

Для выполнения работы использовались фрагменты данных часовых наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления на 30 скважинах Роснедр, расположенных на территории Дальнего Востока, Прибайкалья и Северного Кавказа, и на двух скважинах КФ ГС РАН; паспорта скважин и каталоги землетрясений, составленные Камчатским филиалом ГС РАН (<http://www.emsd.iks.ru/seismicity.html#CATALG>), ЦОМЭ Геофизической службы РАН, г. Обнинск (<http://www.ceme.gsras.ru>) и Геологической службой США (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/>).

При выполнении работы использовались программные средства информационной системы POLYGON, разработанные в КФ ГС РАН [10], система приливного анализа временных рядов ETERNA 3.0 [17] и программы кросс-спектрального анализа пары временных рядов, предоставленные сотрудником ИФЗ РАН А.А. Любушиным (мл.).

**Характеристика наблюдательных скважин.** По данным паспортов наблюдательные скважины различаются по глубинам вскрытия и литологическому составу водовмещающих пород, а также по химическому составу порового флюида (табл. 1). Диапазон глубин вскрытия водовмещающих пород изменяется от 22–44 м (скв. 1113) до 1602–1986 м (скв. 3016). Средние глубины контролируемых интервалов по регионам составляют: 50 м в Хабаровском крае (6 скважин), 298 м — на Сахалине (4 скважины), 699 м — на Курильских островах (3 скважины); 239 м — на Камчатке, (4 скважины, Роснедра); 595 м — на Камчатке, (2 скважины, КФ ГС РАН); 263 м — в Прибайкалье (3 скважины), 209 м — на Северном Кавказе (10 скважин). 23 скважины контролируют резервуары подземных вод, расположенные на абсолютных отметках  $\geq 0$  м; 9 скважин —  $\leq -200$  м. Возраст водовмещающих пород изменяется от мела до голоцена. По литологическому составу они представлены в различной степени метаморфизованными терригенными (5 скважин) и вулканогенно-осадочными отложениями (16 скважин), известняками (3) и магматическими породами (3). Большая часть скважин (27) вскрывают пресные и слабоминерализованные воды с величинами минерализации 0,1–3,2 г/л. Для пяти скважин

Таблица 1  
Характеристика наблюдательных скважин

Регион	№ скважины	Координаты, град		Абс. отм., м; глубина, м; уровень, м	Открытый интервал, м	Водовмещающие породы	Характеристика флюида				Средства регистрации уровня атмосферного давления	Чувствительность регистрации уровня, см; атмосферного давления, гПа
		с.ш.	в.д.				М, г/л	Хим. состав	Газ	Т, град. С		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Камчатка	1303	53,15	158,35	31; 717; 25	517-717	N <sub>2</sub> -N <sub>1</sub> <sup>2</sup> туфопесчаники	0,67	(HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> )/Na	Нет	14	Кедр А2, Ультразвуковой датчик уровня, датчик атмосферного давления	0,1 см 0,2 гПа
	1306	54,73	158,63	200; 100; 11	28-41	Q <sub>III</sub> гравий, галька	1,5	HCO <sub>3</sub> / (Ca+Mg)	есть? CO <sub>2</sub>	2		
	1309	56,05	158,95	406; 250; 4	223-250	NaI туфы	1,5	SO <sub>4</sub> / (Na+Ca)	Нет	6,6		
	1311	52,79	156,20	20; 80; 12	67-69; 70-73	Q <sub>III</sub> гравий	0,18	(HCO <sub>3</sub> -Cl)/ (Mg-Ca, Na)	Нет	4		
	ЮЗ-5	53,17	158,41	70; 800; 1,5	310-800	K <sub>2</sub> алевролиты	0,4	(HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> )/ (Na-Ca)	Нет	14		
	E1	53,26	158,48	180; 665; 29	625-645	N <sub>2</sub> , туфы	1,5	(Cl-HCO <sub>3</sub> )/ Na	своб, N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	10		
Сахалин	2701	53,60	142,97	19; 465; 22	418-427	N <sub>2</sub> пески, песчаники	3,2	Cl/(Mg-Ca)	Нет данных	Нет данных	Радиус	1 см? 1 гПа?
	2702	50,77	142,63	113; 198; 9	172-185	N <sub>2</sub> песчаники	0,38	HCO <sub>3</sub> / (Na,K,Ca)	Нет данных	Нет данных	Кедр А2	0,1 см 0,2 гПа
	2705	46,97	142,65	53,5; 703; 18	501-657	N <sub>1</sub> алевролиты	0,9	(HCO <sub>3</sub> -Cl)/ Na	Нет данных	Нет данных	ORPHIMEDS, барограф	1 см 1 гПа
	2709	47,05	142,05	89; 80; 9	55-75	N <sub>1</sub> песчаники	0,37	(HCO <sub>3</sub> -Cl)/ Na	Нет данных	Нет данных	Радиус-01	1 см? 0,1 гПа
Курильские о-ва	2721	45,23	147,88	47; 857; 1,3	712-818	N <sub>2</sub> туфоалевролиты, туфопесчаники	2,0	(Cl-HCO <sub>3</sub> )/ Na	Нет	Нет данных	Радиус-01 Валдай барометр	1-0,1 см 1-0,1 гПа
	2722	44,03	145,87	17; 303; 19	266-278	N <sub>2</sub> туфы, песчаники, алевролиты	0,24	Cl/ (Na-Mg)	Нет данных	Нет данных	Радиус-01 Валдай барограф	1-0,1 см 1-0,1 гПа
	2725	50,67	156,10	Н.д.; 1258; 50	888-1234	N <sub>2</sub> туфопесчаники, туфоалевролиты	Нет дан- ных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	ORPHIMEDS, барограф	1 см 1 гПа
Хабаровский край	1112	50,18	137,38	40; 60; 6	35-55	K <sub>2</sub> песчаники	0,19	HCO <sub>3</sub> / (Ca-Na)	Нет данных	5	Кедр А2, барограф	0,1 см 0,2 гПа
	1113	52,77	140,15	60; 50; 1,5	22-26; 31-44	PZ-KZ, туфы, тект, меланж	0,14	HCO <sub>3</sub> / (Ca-Mg)	Нет данных	15	Кедр А2, барограф	0,1 см 0,2 гПа
	1114	48,53	135,22	68; 72; 7	44-53; 60-64	K <sub>1</sub> песчаники	0,38	HCO <sub>3</sub> / (Na-Ca)	Нет данных	0,38	Кедр А2 уровнемер	1-0,1 см 0,2 гПа
	1116	51,02	132,57	340; 100; 43	70-90	K <sub>1</sub> песчаники	0,2	HCO <sub>3</sub> / (Ca-Na)	Нет данных	0,2	Кедр А2 уровнемер	1-0,1 см 0,2 гПа
	1118	48,97	140,30	41; 88; 7	22-49	N, базальт	0,1	(HCO <sub>3</sub> -Cl)/ (Mg-Ca-Na)	Нет данных	0,1	Кедр А2 уровнемер	1-0,1 см 0,2 гПа
	1119	53,13	140,72	25; 80; 24	29-80	P <sub>2</sub> , базальт	0,41	(Cl-HCO <sub>3</sub> )/ (Ca-Mg)	Нет данных	0,41	Кедр А2 уровнемер	1-0,1 см 0,2 гПа
Байкал	0742	51,53	105,10	520; 185; 4	155-172	P-N песчаники, алевролиты	0,39	(HCO <sub>3</sub> -CO <sub>3</sub> )/Na	Нет	11	Кедр А2	1 см? 1 гПа?
	0746	51,53	107,05	530; 504; 3	340-350; 360-380; 445-455	K <sub>1</sub> , песчаники, алевролиты	5,3	SO <sub>4</sub> / (Na-Mg)	Нет	5	Кедр А2	1 см? 1 гПа?
	0761	56,02	110,92	483; 250; 2,5	222-232	PR-MZ граниты трещиноватые	0,07	(HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> )/ (Ca-Mg)	Нет данных	Нет данных	Кедр А2	1 см? 0,2 гПа

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Северный Кавказ	3004	44,43	41,77	410; 310; 4	130-134, 169-178, 187-192	N <sub>1</sub> глина, песчаники	2,2	(SO <sub>4</sub> -Cl)/ (Na-Mg-Ca)	Нет данных	Нет данных	Валдай барограф	0,1 см? 0,1 гПа?
	3005	44,08	42,92	643; 270; 43	126-186	P1 аргиллиты, песчаники	13,7	Cl/Na	Нет данных	Нет данных	Радиус	0,1 см 0,1 гПа
	3012	43,85	40,95	901; 300; 35	132-207	D <sub>2</sub> сланцы, гравелиты	4,5	Cl/Na	Нет данных	Нет данных	Радиус	0,1 см 0,1 гПа
	3013	43,13	47,47	-20; 225; 6	182-188, 208-213	Q <sub>1-III</sub> ?	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Валдай барограф	0,5 см 1 гПа
	3015	44,18	42,63	484; 410; 15,6	361-365	P <sub>1</sub> , песчаник	0,8	(HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> )/ Ca	Нет данных	Нет данных	Радиус	0,1 см 0,1 гПа
	3016	42,97	44,67	750; 1986; 22	1602-1986	K <sub>1</sub> , известняк	5	Cl/Na	H <sub>2</sub> S, 5 г/л	Нет данных	Валдай барограф	0,5 см 1 гПа
	3023	44,03	44,47	157; 320; 10	202-298	Q-N <sub>2</sub> пески, глины	1,1	(SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> )/ (Na-Mg-Ca)	Нет данных	Нет данных	Радиус	0,1 см 0,1 гПа
	3026	45,80	41,70	90; 322; 20	263-322	N <sub>2</sub> глина, песок	1,5	(SO <sub>4</sub> -Cl)/ Na	Нет данных	Нет данных	Валдай барограф	0,5 см 1 гПа
	3055	42,92	47,62	-15; 170; 1	85-94; 124-153	N <sub>1</sub> известняк	6,5	Cl/Na	Нет данных	17,8	Радиус	0,1 см 1 гПа?
3056	40,37	47,92	98; 250; 32	144-151; 202-209	N <sub>1</sub> известняк	1,7	(SO <sub>4</sub> -Cl- HCO <sub>3</sub> )/ (Na-Mg-Ca)	Нет данных	18,8	Радиус	0,1 см 1 гПа?	

отмечается повышенная минерализация 4,5–13,7 г/л. В составе поровых флюидов четырех скважин присутствует свободный газ или предполагается его наличие. Химический состав воды пестрый и отражает локальные особенности формирования подземных вод. Все скважины вскрывают напорные подземные воды.

Краткость информации в паспортах не позволяет с необходимой детальностью оценить гидрогеологические условия и гидрогеодинамические особенности формирования режима отдельных скважин, а также возможность влияния техногенных и природных факторов на изменения уровня воды. Это показывает необходимость совершенствования информационного обеспечения системы ГГД-мониторинга. Вместе с тем, можно предположить, что большая часть скважин контролирует подземные воды в гидродинамической зоне активного водообмена с сезонным и многолетним изменением напоров, обусловленным режимом пополнения и расхода водных ресурсов.

Регистрация уровня воды в наблюдательных скважинах производилась с использованием цифровой аппаратуры Кедр А2, Радиус, ORPHIMEDES и механическими поплавковыми самописцами. Регистрация атмосферного давления выполнялась цифровыми средствами и барографами. Обеспечивалась чувствительность регистрации уровня воды 0,1–1 см, атмосферного давления 0,1–1 гПа.

Было обнаружено различное качество записей уровня воды по скважинам. На рис. 1а приводятся примеры хороших данных, для которых обеспечивается чувствительность регистрации уровня воды 0,1 см. На рис. 1б приводится пример грубых данных, полученных при чувствительности регистрации 1 см, а также пример записи, представляющей технический брак. Всего для 9 скважин установлено хорошее качество записей уровня воды и атмосферного давления (чувствительность регистрации

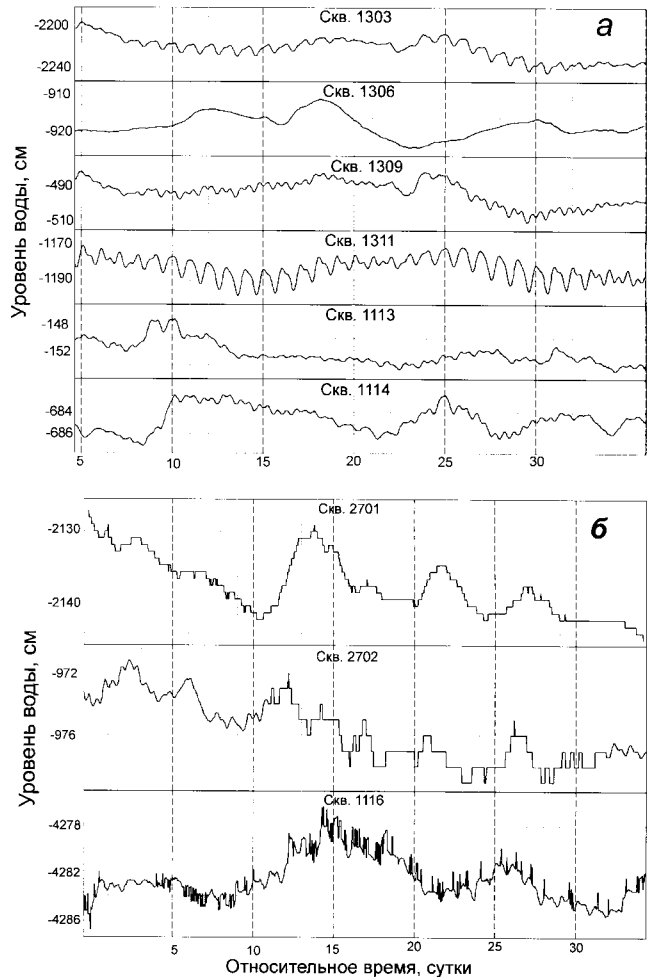


Рис. 1. Примеры качественных записей уровня воды (а), грубых записей и записей, представляющих технический брак (б)

0,1 см, 0,1 гПа), для 16 скважин — среднее качество записей (1 см, 1 гПа). В записях уровня воды на 7 скважинах обнаружен технический брак. Анализ записей уровня воды и атмосферного давления на отдельных скважинах показывает необходимость унификации используемых технических средств для обеспечения чувствительности регистрации уровня воды не хуже 0,1 см, атмосферного давления — не хуже 0,1 гПа и для обеспечения контроля качества записей уровня воды и атмосферного давления в региональных центрах.

#### Методика оценки деформометрических свойств скважин.

По отклику уровня воды в скважине на атмосферную нагрузку и земные приливы можно оценить деформометрические свойства системы скважина-резервуар, характеризующие способность уровня воды реагировать на деформацию водовмещающих пород [7–9, 13–16]. Оценка деформометрических свойств скважин проводилась путем кросс-спектрального и приливного анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления. Кросс-спектральный анализ позволяет получить параметры барометрического отклика уровня воды — квадрат модуля спектра когерентности  $|\chi|^2$ , амплитудно-частотную передаточную функцию от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (АЧПФ), разность фаз между изменениями уровня воды и атмосферного давления  $\Delta\varphi$ , их зависимость от периода вариаций.

Приливной анализ по программе ETERNA 3.0 позволяет получить параметры приливного отклика уровня

воды: амплитуды приливных волн в изменениях уровня воды и амплитудные факторы по отношению к величинам теоретической приливной деформации, разности фаз между приливными волнами в изменениях уровня воды и волнами теоретического приливного потенциала.

Результатом такого анализа является установление наличия или искажения статически изолированного барометрического отклика в некотором диапазоне периодов и величины приливной чувствительности уровня воды  $A_3$ , представляющей отношение приливных амплитуд в изменениях уровня воды к соответствующим величинам приливной деформации водовмещающих пород [15].

Обнаружение статически изолированного барометрического отклика и приливной чувствительности показывает, что в данной скважине вариации уровня воды могут прямо отражать деформацию водовмещающих пород в некотором диапазоне периодов. Если такой отклик отсутствует или сильно искажен, то выделение деформационной составляющей из вариаций уровня воды становится проблематичным.

Таблица 2

Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скв. 1303 и 1306 по программе ETERNA 3.0 [17]

Волна	Период волны, ч	Амплитуда, см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/10 <sup>-9</sup>	Фазовый сдвиг, град
Скважина 1303					
Q1	26,87	0,347	7,0	0,165±0,024	-159±8
<b>O1</b>	<b>25,82</b>	<b>1,850</b>	<b>37,4</b>	<b>0,169±0,004</b>	<b>-154±2</b>
M1	24,83	0,063	1,3	0,074±0,057	-170±45
P1S1	23,93	1,586	32,0	0,103±0,003	-158±2
J1	23,10	0,218	4,4	0,253±0,057	-142±13
OO1	22,31	0,120	2,4	0,253±0,105	-160±24
2N2	12,87	0,066	3,8	0,213±0,056	-155±15
<b>N2</b>	<b>12,66</b>	<b>0,285</b>	<b>16,2</b>	<b>0,146±0,009</b>	<b>-154±4</b>
<b>M2</b>	<b>12,42</b>	<b>1,095</b>	<b>62,3</b>	<b>0,108±0,002</b>	<b>-165±1</b>
L2	12,19	0,006	0,3	0,020±0,061	-67±172
<b>S2K2</b>	<b>12,00</b>	<b>0,657</b>	<b>37,4</b>	<b>0,139±0,004</b>	<b>-176±2</b>
Скважина 1306					
Q1	26,87	0,020	1,8	0,009±0,005	174±32
O1	25,82	0,033	3,0	0,003±0,001	116±19
M1	24,83	0,007	0,6	0,008±0,013	-141±88
P1S1	23,93	0,074	6,7	0,005±0,001	151±8
J1	23,10	0,008	0,7	0,009±0,013	126±84
OO1	22,31	0,009	0,8	0,018±0,023	-148±75
2N2	12,87	0,003	0,9	0,012±0,012	141±61
N2	12,66	0,002	0,7	0,001±0,002	74±84
M2	12,42	0,029	8,2	0,003±0,0003	107±7
L2	12,19	0,002	0,7	0,009±0,014	-177±83
S2K2	12,00	0,027	7,6	0,006±0,001	82±8

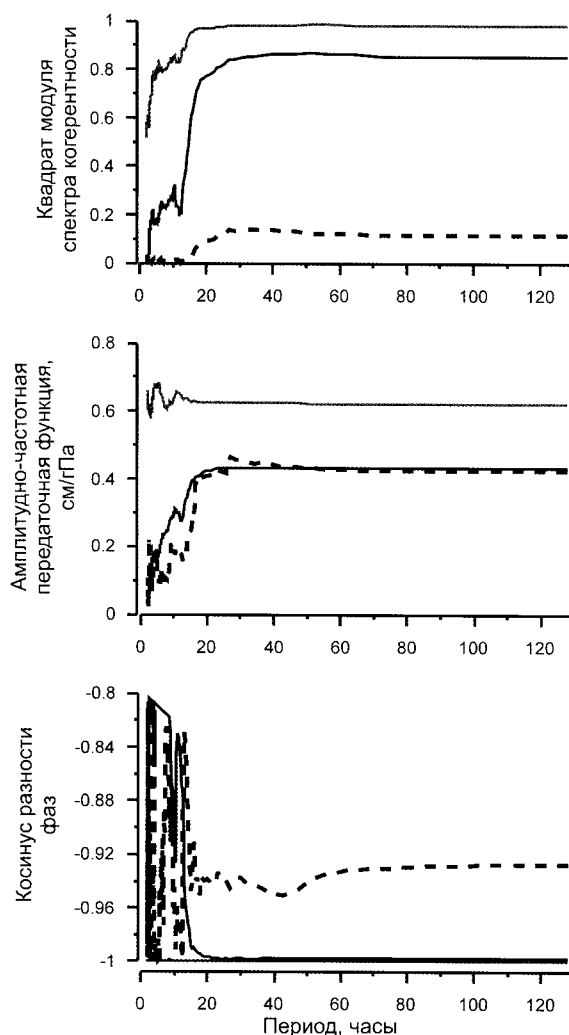


Рис. 2. Результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления в скв. 1303 (сплошная линия), 1112 (черная пунктирная линия) и 2721 (серая линия). Расчет проводился для временных рядов первых разностей с подавлением частот в интервалах 11–13 и 23–27 ч в окне 500 ч, радиус частотного усреднения периодограмм — 25

На рис. 2 приводятся результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня и атмосферного давления для трех скважин. Для скважин 1303 и 2721 величины когерентности близки к 1, разность фаз близка к  $180^\circ$ . Для этих скважин принимается гипотеза о наличии статического барометрического отклика уровня воды на периодах  $>20$  ч при величинах барометрической эффективности 0,40 и 0,60 см/гПа, которые определяются по прямолинейным участкам АЧПФ. Для скв. 1112 величина квадрата модуля спектра когерентности составляет 0,1, разность фаз не превышает  $160^\circ$ . Для этой скважины барометрический отклик уровня воды сильно искажен и гипотеза о статически изолированных условиях отвергается.

Оценка барометрического отклика уровня воды для отдельных скважин проводилась по формальным критериям:

- 1)  $|\gamma|^2 \geq 0,80$ ,  $\Delta\varphi \geq 170^\circ$  — есть статически изолированный барометрический отклик;
- 2)  $0,8 > |\gamma|^2 \geq 0,3$ ,  $170^\circ > \Delta\varphi > 160^\circ$  — статически изолированный отклик искажен факторами-помехами;
- 3)  $|\gamma|^2 \leq 0,3$ ,  $\Delta\varphi \leq 160^\circ$  — барометрический отклик сильно искажен факторами-помехами.

В табл. 2 приводятся результаты приливного анализа вариаций уровня воды по программе ETERNA 3.0 для двух скважин. Выделение отдельных волн считалось надежным, если отношение сигнал/шум составляло не менее 10. В изменениях уровня воды в скв. 1303 выделены четыре волны (показаны жирным шрифтом). В изменениях уровня воды в скв. 1306 приливные волны надежно не выделяются. Приливные волны в изменениях уровня воды в количестве не менее трех определены для 13 из 32 скважин.

По результатам приливного анализа оценивались зависимости амплитуд выделенных волн в изменениях уровня воды от соответствующих величин приливной деформации (рис. 3). Наклон графиков этих зависимостей характеризует величины деформометрической чувствительности уровня воды в диапазоне приливных перио-

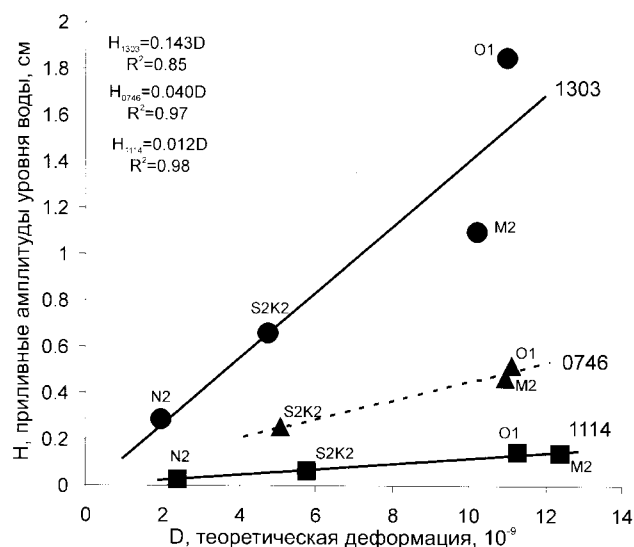


Рис. 3. Зависимость амплитуд выделенных приливных волн в изменениях уровня воды (H) от соответствующих величин теоретической деформации (D) по данным наблюдений в скважинах. Кружки — скв. 1303, треугольники — скв. 0746, квадраты — скв. 1114. O1, N2, M2, S2K2 — приливные волны

дов. Видно, что приливная чувствительность уровня воды в скв. 1303 является максимальной ( $0,143 \text{ см}/10^{-9}$ ), а в скв. 1114 — минимальной ( $0,012 \text{ см}/10^{-9}$ ). Определенные по наклону величины  $A_s$  находятся в диапазоне  $0,010-0,193 \text{ см}/10^{-9}$ .

Параметры барометрического и приливного отклика для всех скважин и заключения о наличии или искажении статически изолированных условий представлены в табл. 3. Для 12 скважин установлен статически изолированный барометрический отклик уровня воды, для 6 скважин — он искажен, для 14 скважин — сильно искажен. Приливный отклик уровня воды был обнаружен в 13 скважинах.

Обнаружение статически изолированного барометрического отклика и приливной чувствительности для 13 скважин прямо указывает на возможность их использования для построения количественных карт ГГД-поля (в отличие от традиционного построения качественных карт ГГД-поля, отражающих изменения уровня воды в скважинах при совокупном воздействии экзогенных и эндогенных факторов). Если для скважины установлен статически изолированный отклик уровня воды в некотором диапазоне периодов, то по амплитуде аномального изменения уровня воды  $\Delta H$  и приливной чувствительности  $A_s$  можно количественно оценивать деформацию D водовмещающих пород в этом диапазоне по формуле  $D = -\Delta H/A_s$ .

Кроме этого, по величинам  $A_s$  и чувствительности регистрации уровня воды можно оценить порядок величин деформации водовмещающих пород, который можно регистрировать по изменениям уровня воды в наблюдательной скважине. Например, при величине  $A_s = 0,1 \text{ см}/10^{-9}$  и чувствительности регистрации 0,1 см в изменениях уровня воды могут быть зарегистрированы деформации с первых единиц  $10^{-9}$  и больше. При той же величине  $A_s$  и чувствительности регистрации 1 см могут быть выявлены деформации лишь не менее первых единиц  $10^{-8}$ .

Важным результатом работы является установление роста величины приливной чувствительности  $A_s$  с глубиной вскрытого интервала водовмещающих пород (рис. 4).

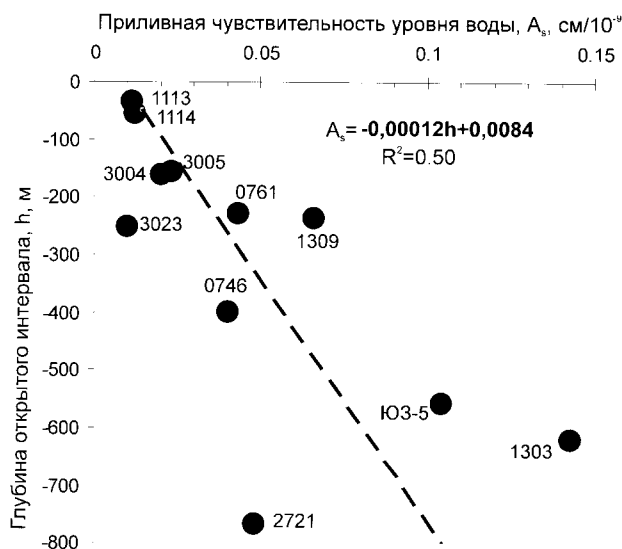


Рис. 4. Зависимость величин приливной деформометрической чувствительности уровня воды ( $A_s$ ) от средней глубины открытого интервала водовмещающих пород (h). Пунктирной линией показана средняя зависимость  $A_s = -0,00012h + 0,0084$

Таблица 3

Результаты барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления по данным наблюдений на скважинах; оценка статически изолированного барометрического отклика и приливной чувствительности уровня воды

Регион	Скважина	Барометрический анализ				Приливной анализ			
		Квадрат модуля спектра когерентности, $ \gamma ^2$	Барометрическая эффективность, см/гПа	Разность фаз, $\Delta\varphi$ , град	Статически изолированный барометрический отклик уровня воды	Выделенные волны	Амплитудный фактор по волне M2, см/10 <sup>-9</sup>	A <sub>с</sub> , см/10 <sup>-9</sup>	Приливной отклик уровня воды
Хабаровский край	1112	0,10	0,41	160	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	1113	0,10	0,12	176	Сильно искажен	O1, N2, M2, S2K2	0,016	0,011	Есть
	1114	0,80	0,13	169	Искажен (?)	O1, N2, M2, S2K2	0,011	0,012	Есть
	1116	0,30	0,21	154	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	1118	0,98	0,90	176	Есть	-	-	-	Нет
	1119	0,95	0,54	179	Есть	O1	-	-	Нет?
Камчатка	1303	0,85	0,43	178	Есть	O1, N2, M2, S2K2	0,108	0,143	Есть
	1306	0,80	0,20	162	Искажен	-	-	-	Нет
	1309	0,79	0,45	166	Искажен	O1, N2, M2, S2K2	0,127	0,066	Есть
	1311	0,14	0,18	170	Сильно искажен	O1, N2, M2, S2K2	0,171	0,200	Искажен
	ЮЗ-5	0,92	0,39	179	Есть	Q1, O1, 2N2, N2, M2, S2K2	0,090	0,105	Есть
	E1	0,50	0,01	106	Сильно искажен	-	-	-	Нет
Курилы	2721	0,97	0,62	179	Есть	O1, M2, S2K2	0,042	0,048	Есть
	2722	0,89	0,53	178	Есть	O1, M2, S2K2	0,222	0,193	Есть?
	2725	0,90	0,43	156	Искажен	-	-	-	Нет?
Сахалин	2701	0,85	0,31	172	Есть	-	-	-	Нет?
	2702	0,22	0,11	160	Сильно искажен	M2, S2K2	0,014	-	Есть?
	2705	0,73	0,26	148	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	2709	0,13	0,13	115	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
Прибайкалье	0742	0,70	0,13	172	Искажен (?)	-	-	-	Нет?
	0746	0,90	0,37	176	Есть	O1, M2, S2K2	0,042	0,040	Есть
	0761	0,77	0,20	150	Сильно искажен	O1, M2, S2K2	0,044	0,043	Есть
Северный Кавказ	3004	0,95	0,40	180	Есть	O1, M2, S2K2	0,020	0,015	Есть
	3005	0,83	0,26	168	Искажен	O1, M2, S2K2	0,026	0,023	Есть
	3012	1,00	1,02	180	Есть?	-	-	-	Нет?
	3013	0,10	0,20	172	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	3015	0,01	0,01	171	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	3016	0,03	0,06	105	Сильно искажен	-	-	-	Нет
	3023	0,84	0,18	179	Есть	O1, M2, S2K2	0,009	0,010	Есть
	3026	0,65	0,11	126	Сильно искажен	-	-	-	Нет?
	3055	0,94	0,78	179	Есть	-	-	-	Нет?
	3056	0,67	0,33	149	Сильно искажен	M2, S2K2	0,007	-	Есть?

Это указывает на то, что для ГГД-мониторинга и построения количественных карт ГГД-поля предпочтительно использовать скважины, вскрывающие подземные воды на глубинах не менее первых сотен метров.

В качестве причин искажения барометрического отклика и отсутствия приливного отклика уровня воды для 16 скважин (табл. 3, отмечены знаком «?») можно рассматривать неудовлетворительное качество исходных данных. В таких случаях после решения технических вопросов регистрации необходимо произвести повторное переопределение параметров приливного и барометрического отклика уровня воды и уже после этого выносить заключение о пригодности соответствующих скважин для ГГД-мониторинга.

Сильное искажение барометрического отклика и отсутствие приливного отклика уровня воды в скв. E1, 3016 (возможно, 1306) обусловлено присутствием свободного газа в составе поровой жидкости и ее повышенной сжимаемостью. В таких случаях реакция уровня воды на приливное воздействие отсутствует, а барометрические вариации проявляются с запаздыванием, в основном, в области суточных периодов [4]. Очевидно, что такие скважины не могут использоваться для оценки сейсмоструктурной деформации водовмещающих пород и построения количественных карт ГГД-поля. Вместе с тем, результаты многолетних наблюдений на скв. E1, Камчатка, показывают регулярное проявление «тревожного признака» в форме увеличения скорости понижения уровня воды



в течение недель — первых месяцев перед землетрясениями при высокой вероятности (0,87) его связи с событиями с магнитудами  $\geq 6,6$  [4]. По-видимому, механизм формирования такого вида гидрогеодинамических предвестников связан с повышенной динамичностью процессов в системе порода-вода-газ на стадиях подготовки сильных землетрясений, которые находят отражение в изменениях уровня воды.

**Методика обработки данных урвнмерных наблюдений для выделения аномальных изменений уровня воды.** Выделение сигналов изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород из вариаций уровня воды представляет сложную задачу для любой скважины. Объективными причинами этого являются различия условий формирования гидродинамического режима и особенностей проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважинах, а также неопределенность диапазона периодов и амплитуд изменения деформации водовмещающих пород на стадиях подготовки землетрясений. Проявление статически изолированного отклика уровня воды и его чувствительность к изменению деформации определяется упругими свойствами и пористостью водовмещающих пород, строением скважины, искажающими эффектами водообмена между скважиной и резервуаром, течениями воды в резервуаре. Важную роль в формировании статически изолированного отклика уровня воды играет степень изолированности вскрытого резервуара подземных вод от грунтовых вод со свободной поверхностью и влияние природных и техногенных факторов-помех.

В изменениях уровня воды в скважинах сигналы сейсмотектонической деформации водовмещающих пород могут проявляться только в случае ее достаточно большой амплитуды (не менее  $10^{-9}$ – $10^{-8}$ ) и ее развития в течение времени, не превышающего по периоду верхнюю границу статически изолированного отклика. Верхняя граница статически изолированного отклика уровня воды определяется в основном скоростью диссипации импульса порового давления за счет течения воды в резервуаре и сезонного формирования гидростатического напора (обычно, сутки — первые десятки суток; реже — часы).

Воздействие на гидродинамический режим скважин комплекса эндогенных и экзогенных режимобразующих факторов вызывает соответствующие отклики (или сигналы) в изменениях уровня воды. При проведении ГГД-мониторинга обработка данных наблюдений должна быть направлена на изучение, учет и компенсацию воздействия факторов несейсмической природы (факторов-помех) на изменения уровня воды в скважине и на выделение аномальных сигналов, вызванных процессами подготовки землетрясений. Эффективный учет и компенсация факторов-помех могут проводиться при наличии представительных данных наблюдений за факторами-помехами.

Для обработки данных наблюдений на скважинах с целью выделения аномальных изменений уровня воды ( $\Delta H$ ) использовалась методика, созданная в КФ ГС РАН и представленная в работах [4–8]. Эта методика предполагает учет и компенсацию факторов-помех в изменениях уровня воды, выделение информативных сигналов и их анализ в сопоставлении с режимом выпадения атмосферных осадков и сейсмичностью. В качестве факторов-помех рассматриваются атмосферное давление и приливы, осад-

ки, сезонность питания подземных вод, техногенное и иное воздействие. В качестве информативных сигналов рассматриваются тренд уровня воды, очищенный от влияния факторов-помех, скорость его изменения, высокочастотная составляющая вариаций уровня воды.

Рассмотрим основные этапы стандартной обработки данных урвнмерных наблюдений на примере скв. ЮЗ-5 (рис. 5). Введем обозначения временных рядов, которые обычно используются для характеристики различных сигналов в изменениях данных урвнмерных наблюдений:  $A(t)$  — временной ряд атмосферного давления;  $U(t)$  — временной ряд уровня воды в скважине;  $U_k(t)$  — временной ряд изменений уровня воды с компенсированными баровариациями;  $U_b(t)$  — временной ряд барометрических вариаций уровня воды;  $U_{k,b}(t)$  — временной ряд низкочастотного тренда в изменениях уровня воды;  $U_{k,b}(t)$  — временной ряд высокочастотной составляющей вариаций уровня воды, содержащий приливные вариации и шум различного происхождения. Между этими временными рядами выполняются соотношения:  $U_b(t) = U(t) - U_k(t)$  и  $U_{k,b}(t) = U_k(t) - U_{k,b}(t)$ . Программа ETERNA 3.0 позволяет получить ряд высокочастотного остатка с компенсированными барометрическими и приливными вариациями  $U_{k,b}(t)_{ETERNA}$  (рис. 5).

Компенсация баровариаций осуществляется на основе оценки комплексной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скользящем временном окне по алгоритму [11]. Ряд  $U_k(t)$  определяется как среднее значение  $U_k(t)$  в скользящем временном окне с заданным шагом по времени. Размер окна усреднения принимается таким, чтобы осуществлялось подавление суточных и полусуточных земноприливных вариаций (диапазон их периодов составляет 12–27 ч) и не происходило искажение более низкочастотных вариаций уровня. При интервале регистрации уровня воды и атмосферного давления 1 ч оценка тренда производилась в скользящем временном окне длиной 48 ч с шагом 1 ч. Текущее значение  $U_k(t)$  относится на правый край временного окна для диагностики предвестниковых сигналов, не затухающих возможными ко- и постсейсмическими эффектами. В качестве информативных сигналов рассматриваются временные ряды тренда и высокочастотной составляющей вариаций уровня воды. Такой подход позволяет выделить информативные сигналы в изменениях уровня воды, частично очищенные от влияния факторов-помех, и производить их анализ в сопоставлении с режимом выпадения атмосферных осадков и сейсмическими событиями.

В изменениях тренда уровня воды могут проявляться: 1 — внутригодовые вариации, связанные с сезонным характером питания подземных вод; 2 — эффекты осадков; 3 — пост- и предсейсмические изменения. Наиболее сложным моментом в анализе рядов тренда уровня воды является выделение деформационных сигналов из сигналов водного питания, т. к. последние, как правило, имеют характер длительных переходных процессов. В зависимости от условий залегания резервуара его изолированности слабопроницаемой толщей и гидравлической связи с грунтовыми водами, другими водоносными горизонтами и областями формирования напора и разгрузки эффекты водного питания и формирования гидростатического напора в изменениях тренда уровня воды могут быть различными — от их практического отсутствия до очень длительных и амплитудных вариаций.



Как правило, изменение давления в резервуаре контролируется сезонностью поступления инфильтрационных вод в областях питания и режимом выпадения жидких осадков. Повышение уровня воды в весенне-летнее время обусловлено передачей возрастающего давления из области питания за счет поступления инфильтрационных вод при таянии снега и выпадении обильных осадков; понижение уровня в зимнее время связано со сработкой водных запасов за счет подземного стока. При наличии многолетних рядов уровня воды и метеорологических наблюдений становится возможным выделение сигналов сейсмоструктурного происхождения из сезонных вариаций низкочастотного тренда.

Особенностью отклика уровня воды на выпадение осадков является его зависимость от сезона и запаздывание по времени, которое зависит от мощности и проницаемости перекрывающей толщи, а также от расстояния скважины до области питания. Дополнительно к запаздывающему подъему уровня, вызванному повышением давления в области питания, одновременно с выпадением осадков может появляться короткопериодное повышение уровня воды, связанное с увеличением давления на кровлю резервуара непосредственно в районе скважины. Подъемы уровня воды с амплитудами 1–2 см наблюдаются в скв. ЮЗ-5 (рис. 5) во время и после выпадения обильных (не менее 10–20 мм/сут) твердых и жидких осадков [5]. Поэтому данные о режиме выпадения атмосферных осадков, как текущих, так и за многолетний период, являются необходимым элементом уровневых наблюдений и обработки данных при проведении ГГД-мониторинга.

Развитие сейсмоструктурной деформации в водовмещающих породах может вызывать различные нестационарные вариации тренда уровня — ступеньки, изменение скорости тренда или его знака, «бухты». Примеры возможных форм проявления гидрогеодинамических предвестников приводятся в [3]. Поэтому анализ тренда уровня воды с целью выявления эффектов сейсмоструктурной деформации должен быть направлен на выделение интервалов времени его нестационарного поведения. Для этого проводился анализ временных рядов скорости изменения тренда уровня воды на временном интервале 1 сут. Для скважин КФ ГС РАН эмпирически установлены фоновые скорости изменения тренда уровня воды и их пороговые

значения, составляющие  $-0,05$ – $0,1$  см/сут для скважины Е1 и  $\pm 1$ – $2$  см/сут для скв. ЮЗ-5. Эти значения определяются в основном фоновыми вариациями скорости изменения уровня воды в течение года.

Анализ тренда для диагностики аномальных изменений уровня воды выполнялся совместно с данными о режиме выпадения осадков и был направлен на выделение интервалов времени, в течение которых происходит понижение или повышение уровня воды с повышенной скоростью, с оценкой соответствующих амплитуд  $\pm \Delta H$ . В общем случае понижение уровня воды показывает обстановку снижения пластового давления вследствие развития деформации расширения водовмещающих пород. Повышение уровня воды показывает обстановку роста пластового давления за счет развития деформации сжатия.

Анализ временных рядов  $U_{kh}$  направлен на выделение интервалов времени, в течение которых наблюдается увеличение амплитуды высокочастотной составляющей вариаций уровней воды, фиксирующих короткопериодные изменения пластового давления, не связанных с питанием

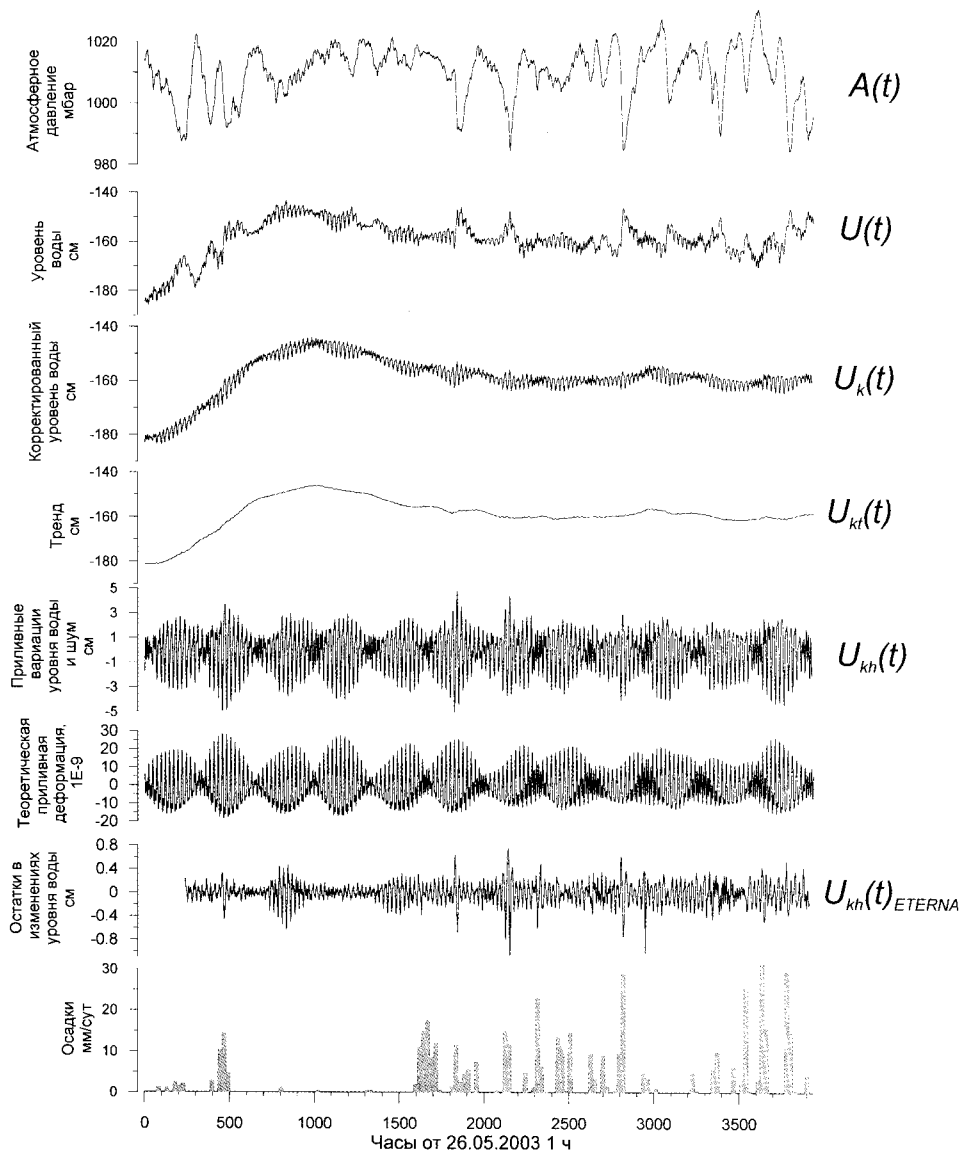


Рис. 5. Результаты обработки данных уровневых наблюдений на скв. ЮЗ-5 с 26 мая по 6 ноября 2003 г. Все обозначения описаны в тексте

резервуара или техническими причинами. Увеличение амплитуды высокочастотных вариаций уровня воды может наблюдаться при выпадении обильных атмосферных осадков (рис. 5), косейсмичных скачках пластового давления, прохождении низкочастотных поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений и от других эффектов резкого изменения напряженно-деформированного состояния среды [5].

Поведение временного ряда  $U_{kh}$  в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 (рис. 5) определяется в основном приливными эффектами. Его изменения зеркально повторяют изменения теоретической приливной объемной деформации в районе скважины. Двойная амплитуда изменения  $U_{kh}$  составляет 2–8 см.

Все этапы обработки данных уровневых наблюдений и построение информативных сигналов в изменениях уровня воды проводились в среде программы DIAGNOS 2.0, разработанной в КФ ГС РАН [10]. Программа DIAGNOS 2.0 является компонентом информационной системы POLIGON, включающей базу данных и комплекс программных средств, позволяющих пополнять базу данных, обрабатывать, графически представлять и анализировать вариации временных рядов данных геофизического мониторинга. Данные метеорологических наблюдений входят в состав базы данных и представлены на рис. 5 (скв. ЮЗ-5) для соответствующего периода. В работе [9] представлены примеры выделения предсейсмического и постсейсмических вариаций уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г. ( $M=7,6$ ).

#### Выводы.

1. По единой методике оценены деформометрические свойства 32 наблюдательных скважин Роснедр и КФ ГС РАН. Для 13 скважин установлен статически-изолированный барометрический отклик и оценены величины приливной чувствительности уровня воды ( $A_s=0,010-0,193$  см/10<sup>-9</sup>). Такие скважины могут использоваться для количественной оценки сейсмотектонической деформации водовмещающих пород при построении карт ГГД-поля.

2. Установлен рост величин приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  с увеличением глубины контролируемого интервала водовмещающих пород. Методическими следствиями такой зависимости является предпочтительное использование для ГГД-мониторинга скважин, вскрывающих подземные воды на глубинах не менее первых сотен метров.

3. Представлена методика обработки данных уровневых наблюдений, учитывающая локальные особенности гидродинамического режима наблюдательных скважин. Эта методика может использоваться для обоснованного выделения аномальных изменений уровня воды в отдельных скважинах и рекомендуется для ее внедрения в региональных центрах Роснедра.

Необходимыми условиями эффективного применения методики являются: обеспечение качественной регистрации уровня воды и атмосферного давления в течение всего времени наблюдений; обеспечение оперативной гидрометеорологической информации в районах наблюдательных скважин (данные об осадках и температуре воздуха); выявление закономерности сезонного изменения уровня воды; исходные данные, организованные в электронную базу данных.

4. Выполненный анализ состояния системы ГГД-мониторинга (Роснедра) позволяет определить первоочередные мероприятия по его развитию:

совершенствование информационного гидрогеологического обеспечения ГГД-мониторинга (ВСЕГИНГЕО, региональные центры);

унификация используемых технических средств и обеспечение регистрации уровня воды с точностью не хуже 0,1 см, атмосферного давления — 0,1 гПа (Роснедра, региональные центры);

обеспечение контроля качества записей уровня воды и атмосферного давления (региональные центры, ВСЕГИНГЕО);

разработка нового варианта Методических указаний по ведению ГГД-мониторинга для целей сейсмопрогноза (ВСЕГИНГЕО).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вартамян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеодеформационное поле Земли // ДАН СССР. — 1982. — Т. 262. — № 2. — С. 310–314.
2. Вартамян Г.С., Бредехоефт Дж. Д., Роузлоффс Э. Гидрогеологические методы исследования тектонических напряжений // Сов. геология. — 1991. — № 9. — С. 3–12.
3. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. — 1993. — № 8. — С. 58–69.
4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2001. — №2. — С.39–52.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2006. — № 6. — С. 53–63.
6. Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. — 2000. — № 4. — С. 69–79.
7. Копылова Г.Н., Бормотов В.А. Эффекты сейсмичности в изменениях уровня воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер / Матер. VI междунар. междисциплинар. научн. симпозиум. — Хабаровск: ДВО РАН, 2004. — С. 134 — 149.
8. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. — 2006. — № 2. — С. 17–28.
9. Копылова Г.Н., Смолина Н.Н. Вариации уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г.,  $M=7,6$  / Тез. докл. Девятого геофиз. чтений им. В.В. Федынского. — Тверь: Герс, 2007. — С. 15.
10. Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Пантюхин Е.А. Информационная система «Полигон»: комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений / Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. / Матер. междунар. геофиз. конф. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. — С. 393 — 399.
11. Любушин А.А. (мл.) Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. — 1993. — № 3. — С. 103–108.
12. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STEPS) / Сост.: Г.С. Вартамян, В.С. Гончаров, В.П. Кривошеев и др. — М.: Геоинформмарк, 2000.
13. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // Pure Appl. Geophys., 1988. V. 126. — P. 177–209.
14. Rojstaczer S. Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // J. Geophys. Res., 1988. V. 93. — P. 13619–13634.
15. Rojstaczer S., Agnew D.S. The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading // J. Geophys. Res., 1989. V. 94. — P. 12403–12411.
16. Van der Kamp G., Gale L.E. Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // Water Resour. Res., 1983. V. 19. — P. 538–544.
17. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM, 1994. № 118. — P. 8719–8721.