

УДК 550.34.06.03.02

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПЕТРОПАВЛОВСКОМ ПОЛИГОНЕ, КАМЧАТКА

© 2000 г. Г. Н. Копылова\*, А. А. Любушин (мл.)\*\*, В. А. Малугин\*\*,  
А. А. Смирнов\*, Л. Н. Таранова\*

\*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006

\*\*Институт экспериментальной геофизики ОИФЗ РАН, Москва, 123810

Поступила в редакцию 21.04.98 г.

Приведено описание системы автоматизированных гидродинамических наблюдений и полученных данных синхронной регистрации изменений уровня воды в скважинах и атмосферного давления в 1996–1998 гг. на двух скважинах Петропавловского полигона, Камчатка. Основное внимание уделено косейсмическим и постсейсмическим изменениям уровня воды в результате землетрясения 5.12.1997 г. с  $M = 7.7$ , произошедшим на расстоянии кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды в скважинах и атмосферного давления, а также данных о поведении уровней воды под влиянием землетрясений позволяет оценить индивидуальную чувствительность скважин к воздействию относительно быстро протекающих изменений напряженно-деформированного состояния водонасыщенных пород.

Наблюдения за вариациями уровня воды в скважинах – традиционный вид геофизических исследований для поиска предвестников землетрясений [2, 3]. Это вызвано тем, что система скважина–напорный водоносный горизонт может быть достаточно чувствительным индикатором низкочастотных ( $\leq 0.01$ – $0.001$  Гц) изменений напряженно-деформированного состояния верхних слоев земной коры под воздействием сейсмо-тектонических процессов.

По данным уровневых наблюдений выявлены многочисленные примеры проявления гидродинамических эффектов под воздействием различных возмущений напряженно-деформированного состояния водонасыщенных пород, в том числе барометрические, приливные, косейсмические колебания уровня [1, 6, 10–12] и колебания уровня вследствие криповых подвижек по разломам [12]. При этом основная задача обработки уровневых данных для выявления сигналов-предвестников землетрясений заключается в применении оптимального способа устранения влияния факторов-помех [10–12].

Разработка и создание в последнее время широкого спектра процедур многомерного статистического анализа данных синхронных геофизических наблюдений позволяет использовать в качестве показателей состояния среды новые синтетические параметры, такие, как эволюция амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня и др. [4, 5]. Применение указанной обработки к данным уровневых наблюдений на

о-ве Шикотан позволило выявить квазипериодический характер поведения во времени амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменению уровня для частот от  $1/2$  до  $1/600$  ч<sup>-1</sup> с характерным периодом  $\sim 1.5$  лет, что может быть следствием проявления медленных тектонических волн в сейсмоактивном регионе [8]. По результатам многомерной обработки данных гидрохимических наблюдений на Петропавловском полигоне (Камчатка) выявлены временные интервалы повышенной синхронизации в поведении отдельных газовых и гидрохимических параметров, соответствующие среднесрочным (месяцы – недели) стадиям подготовки землетрясений с магнитудами 6–7 [9]. Однако общим изъяном гидродинамических и гидрогеохимических наблюдений в сейсмоактивных регионах Востока России является недостаточная частота и чувствительность регистрации параметров, а также их фрагментарный характер.

В целях получения качественных уровневых данных для исследования связей гидродинамического режима скважин с сейсмичностью проведены работы в 1996–1997 гг. по организации непрерывных наблюдений на двух скважинах, расположенных на территории Петропавловского полигона. Положение скважин показано на рис. 1, а их характеристика приведена в табл. 1.

Скважина *Елизовская-1* (скв. *Е-1*) пробурена в 1984 г. до глубины 3 км для изучения геологического разреза и гидрогеотермических условий района. После окончания бурения и проведения ком-

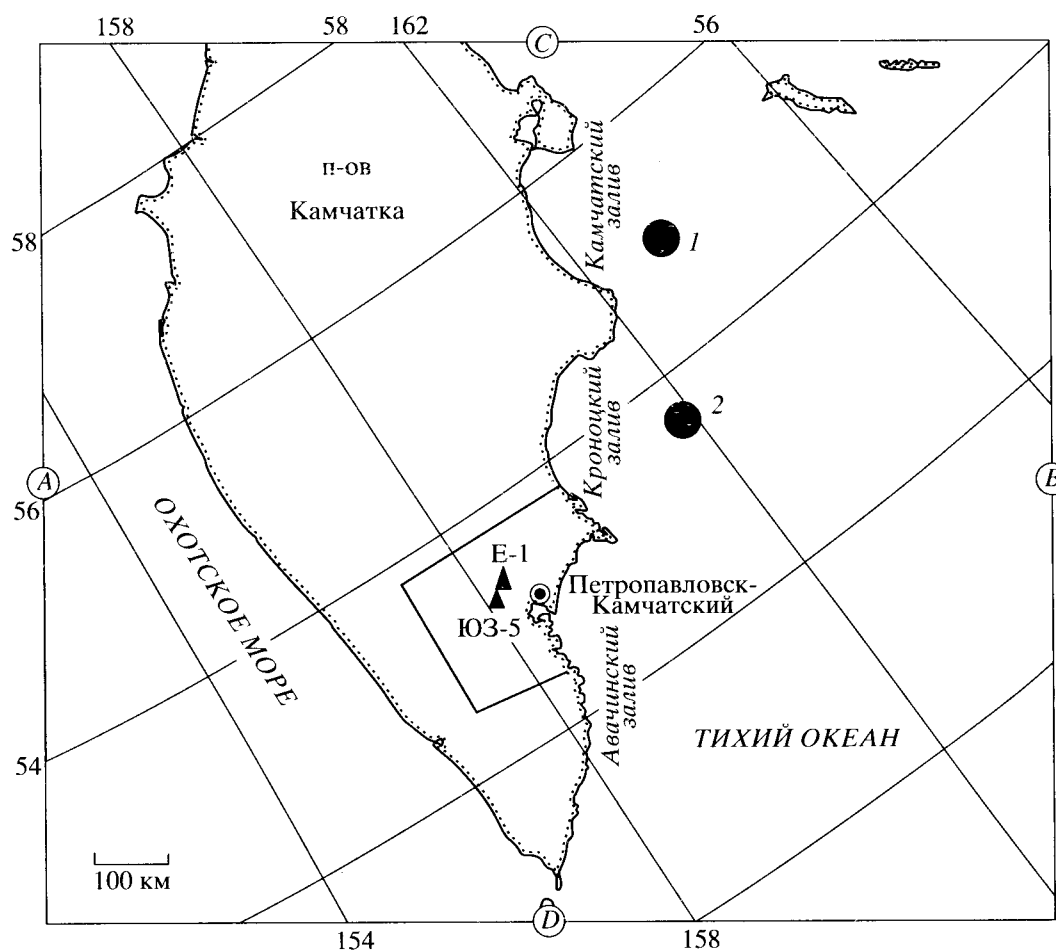


Рис. 1. Расположение наблюдательных скважин на Петропавловском полигоне: Е-1 – Елизовская-1; ЮЗ-5 – скважина ЮЗ-5; 1, 2 – эпицентры землетрясений (табл. 2).

плексных геофизических и гидрогеохимических испытаний скважина передана для режимных наблюдений. При этом сделаны: обсадка ствола скважины металлической колонной диаметром 219 мм, искусственный забой путем установки цементной пробки с глубины 665 м, перфорация обсадной колонны в интервале 625–647 м.

По данным бурения скв. Е-1 в интервале 0–570 м распространены четвертичные слабосцементированные гравийно-галечниковые отложения андезитобазальтового состава, в интервале 570–665 м залегают мелко-среднепесчистые туфы андезитобазальтового состава алнейской серии неогена ( $N_{al}$ ). Скважина вскрыла зону водопритока в ал-

Таблица 1. Характеристики пунктов гидродинамических наблюдений

Параметр	Скважина	
	Елизовская-1	ЮЗ-5
Координаты, град		
с. ш.	53.23	53.15
в. д.	158.52	158.42
Глубина, м	655	1001
Уровень, м	28	1.5
Фильтр, м	625–647	310–1001
Породы (возраст)	Туфы ( $N_2$ )	Туфоалевриты, сланцы ( $K_1$ )
Температура воды, °С	10	14.5
Минерализация воды, г/л	2.5	0.39
Химический состав воды	Cl/Na	$(HCO_3-SO_4)/(Na-Ca)$

нейских вулканитах на глубине 625–647 м, где проведена перфорация обсадной колонны. Уровень воды в скважине установился на глубине 28 м.

По данным газо-гидрохимического опробования скв. Е-1 с глубиной наблюдается увеличение минерализации подземных вод от 2.5 до 10 г/л и изменение их химического состава от хлоридно-гидрокарбонатного натриево-кальциевого до хлоридного натриевого и кальциево-натриевого. По газовому составу вскрытые подземные воды азотно-метановые, обогащенные гелием (до  $n \times 10^{-2}$  об. %) и углеводородными газами. По-видимому, воды, распространенные в интервале 625–647 м, относятся к водам гидродинамической зоны затрудненного водообмена вследствие структурного положения толщи аллейских вулканитов, слагающей относительно погруженные участки Корякско-Авачинской вулcano-тектонической депрессии. Кроме этого, газо-гидрохимические параметры подземных вод указывают на относительно застойные условия их формирования.

Скважина ЮЗ-5 пробурена в 1994 г. в технических целях до глубины 1000 м. В ее разрезе в интервале 0–270 м присутствуют четвертичные валунно-галечниковые отложения с песчано-супесчаным заполнителем. Ниже до забоя распространены трещиноватые туфоалевролиты и филлитовидные сланцы верхнемелового возраста. Ствол скважины обсажен металлической колонной до глубины 310 м. В интервалах 0–62 и 62–310 м внутренний диаметр обсадной колонны соответственно 245 и 168 мм. Ниже до забоя обсадка отсутствует. Уровень воды находится на 1.5 м ниже поверхности земли.

Скв. ЮЗ-5 контролирует напорный водоносный горизонт трещинно-жильных подземных вод верхнемеловых отложений, находящихся, по-видимому, в условиях относительно активного водообмена. Об этом свидетельствуют незначительная минерализация вод и их смешанный химический состав (табл. 1), а также относительно приподнятое положение водовмещающих меловых пород в пределах северо-западного продолжения Петропавловского горста.

**Система регистрации уровня воды и атмосферного давления.** Скважины Е-1 и ЮЗ-5 оборудованы стандартными комплектами аппаратуры для цифровой регистрации уровня воды и атмосферного давления (рис. 2), помещенными для сохранности в железобетонные будки с металлическими дверями.

Аппаратура включает: регистратор ГИП-3 (геофизический измерительный прибор производства СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино); датчик уровня воды (ДУ), датчик атмосферного давления (ДА), соединительные кабели производства ОКБ ОИФЗ РАН, г. Москва. Датчики ДУ и ДА – однотипные дифференциальные преобразователи давления с

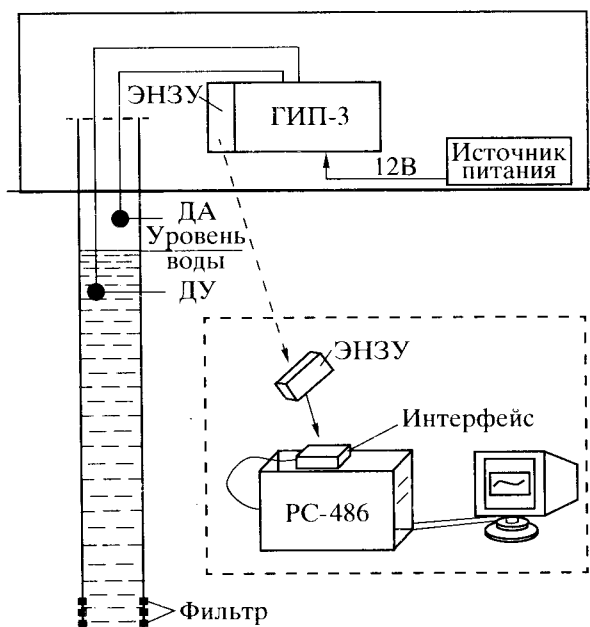


Рис. 2. Схема регистрации уровня и атмосферного давления на наблюдательных скважинах. ГИП-3 – регистратор (геофизический измерительный прибор); ДУ – датчик уровня воды, ДА – датчик атмосферного давления; ЭНЗУ – кассета твердотельной памяти (энергонезависимое запоминающее устройство).

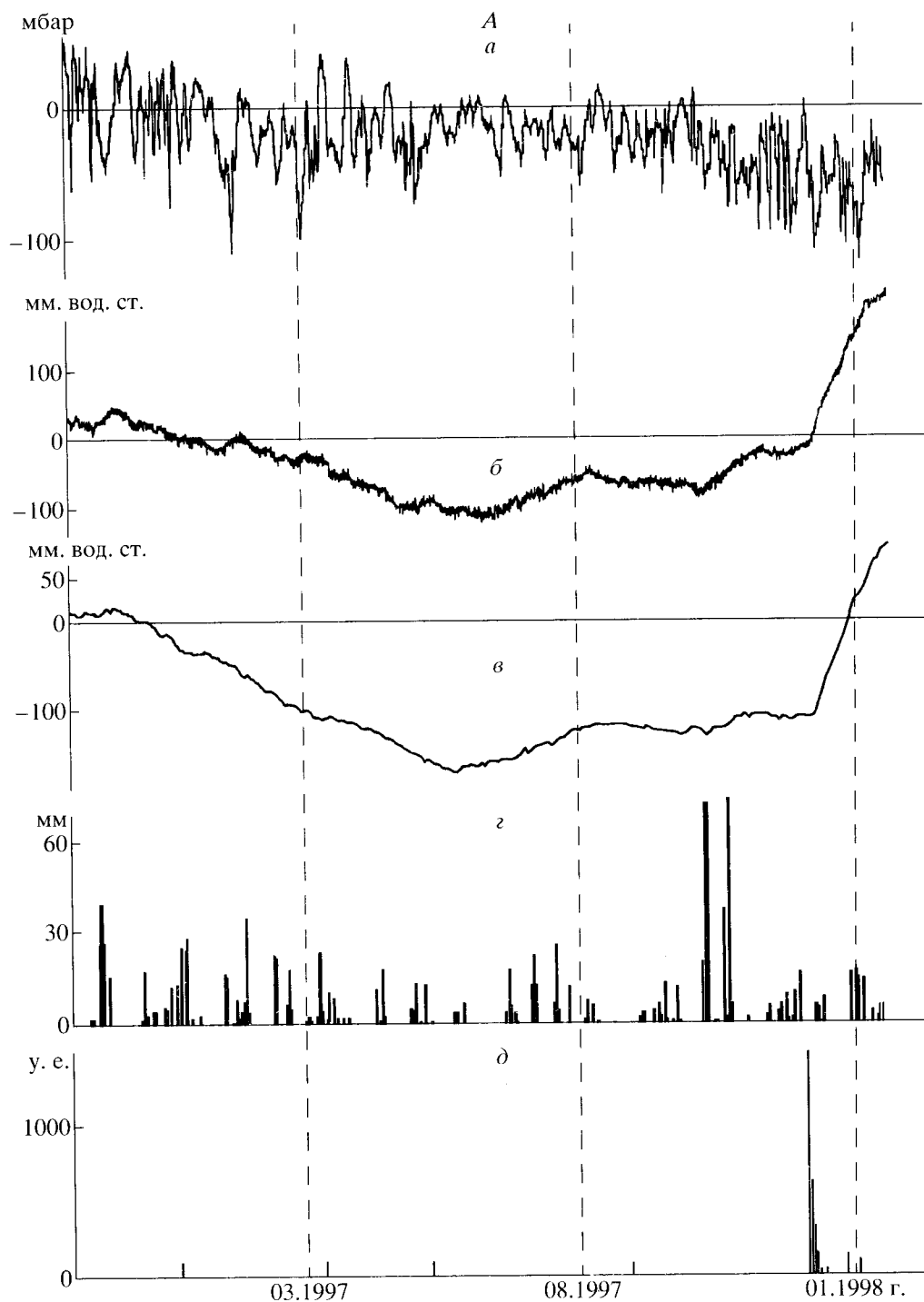
частотным преобразованием и емкостным съемом сигнала [1]. Чувствительность регистрации изменений уровня воды 0.1 мм вод. ст., чувствительность регистрации атмосферного давления 0.05 мбар.

ДУ и ДА опущены на тросах в стволы скважин: ДУ – на глубину ~2.5 м ниже уровня воды, ДА – выше уровня воды. В качестве источников электропитания используют аккумуляторные батареи, обеспечивающие напряжение 12 В.

Данные регистрации уровня воды и атмосферного давления накапливаются на твердотельную память – съемные кассеты ЭНЗУ (энергонезависимые запоминающие устройства) объемом 16 кбайт. Для считывания информации с ЭНЗУ используется интерфейс, соединенный с персональным компьютером, и программные средства.

Постоянные наблюдения на скв. Е-1 проводятся с 21.10.1996 г. на скв. ЮЗ-5 – с 10.09.97 г. Уровень воды и атмосферное давление на обеих скважинах регистрируется одновременно с интервалом измерений 10 мин. Данные наблюдений приводят к стандартному времени (по Гринвичу). Съём и обработка данных – 1 раз в 2 нед.

**Данные наблюдений, влияние землетрясения 5.12.1997 г. на изменение уровня воды в скважинах.** На рис. 3 представлены данные наблюдений за атмосферным давлением и уровнем воды на скважинах Е-1 и ЮЗ-5 в сопоставлении с суточным количеством осадков и моментами наиболее



**Рис. 3.** Данные наблюдений за атмосферным давлением (*a*) и уровнем воды (*б*) на скважинах (*A* и *Б* соответственно) Елизовская-1 (с 21.10.1996 по 21.01.1998 г.) и *v* – компенсированный уровень) в сопоставлении с атмосферными осадками (*z*) и моментами сильных землетрясений (*д*); ЮЗ-5 (с 10.09.1997 по 12.01.1998 г.).

лее сильных землетрясений. Осадки приведены по данным метеостанции Пионерская Камчатского территориального управления по гидрометеорологии и контролю окружающей среды, расположенной в 13–15 км от наблюдательных скважин.

На рис. 3, *v* представлены изменения уровней воды после компенсации влияния атмосферного давления на основе алгоритма [4, 7].

Моменты возникновения землетрясений в радиусе до 400 км от скважин обозначены вертикальными линиями. Высота линий прямо пропорцио-

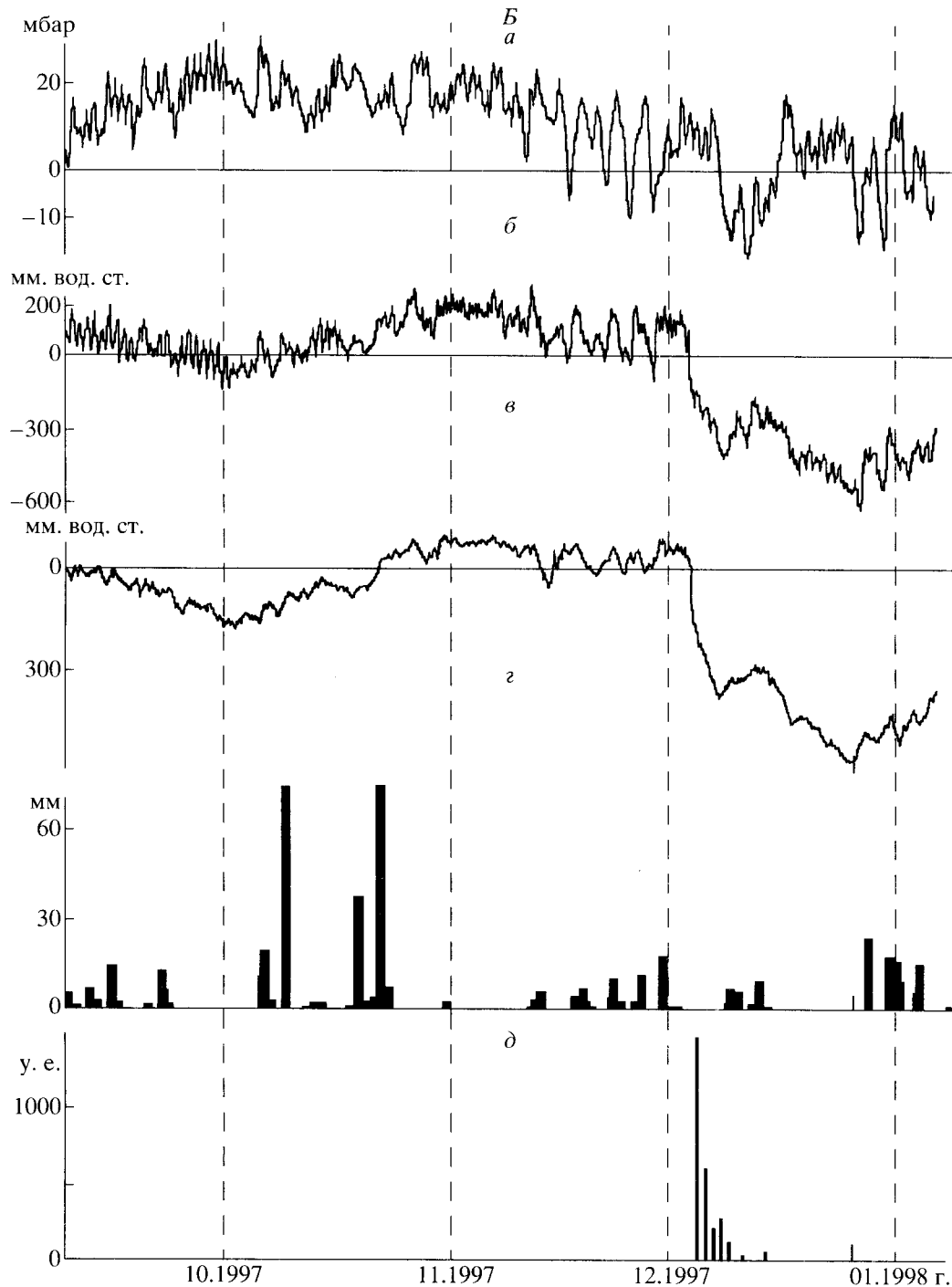


Рис. 3. Окончание.

нальна энергии землетрясений и обратно пропорциональна квадрату гипоцентрального расстояния до скважины и характеризует относительную степень воздействия землетрясения в пункте наблюдений.

Наиболее сильным сейсмическим событием за время наблюдений является землетрясение 5.12.1997 г. с магнитудой 7.7 (№ 1 на рис. 1 и в

табл. 2), произошедшее в южной части Камчатского залива и сопровождавшееся многочисленными афтершоками. Сильнейший афтершок с магнитудой 6.8 (№ 2 на рис. 1 и в табл. 2) располагался в центральной части Кроноцкого залива.

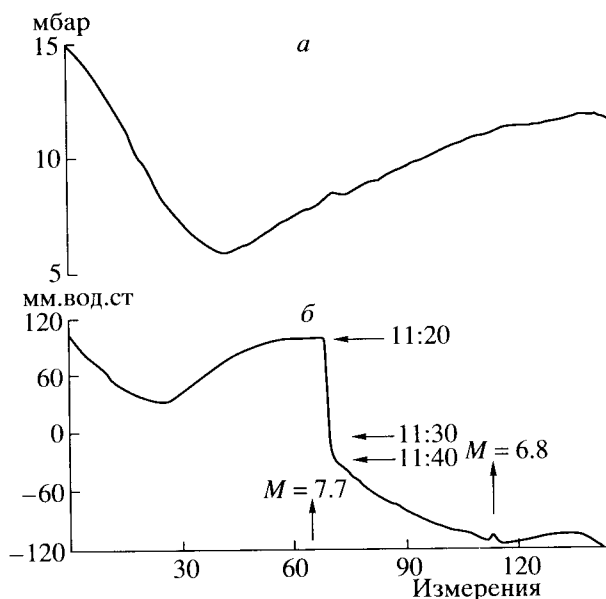
С ноября 1996 г. по май 1997 г. происходило плавное понижение уровня скв. Е-1 (рис. 3, А) с амплитудой ~18 см и средней скоростью -2.6 см/мес.

**Таблица 2.** Данные о сильных землетрясениях, произошедших 05.12.1997 г.

Параметр	Номер землетрясения	
	1	2
Дата	05.12.1997	05.12.1997
Время, ч:мин:с	11:26:43.6	18:48:17
Координаты, град		
с. ш.	54.95	53.60
в. д.	163.23	161.84
Глубина, км	4	0
Магнитуда	7.7	6.8
Балльность	5-6	3-4
Гипоцентральное расстояние, км		
до скв. Е-1	362	224
до скв. ЮЗ-5	372	232

С июня по ноябрь 1997 г. наблюдался подъем уровня с амплитудой 6 см и средней скоростью 1 см/мес. На изменение уровня некоторое влияние оказывают атмосферные осадки. Это проявляется в плавном повышении уровня после выпадения  $\geq 20-40$  мм осадков в сутки (ноябрь 1996 г., октябрь 1997 г.).

Землетрясение 5.12.1997 г. вызвало интенсивное повышение уровня воды в скв. Е-1. С 5.12.1997 г. по 21.01.1998 г. подъем уровня составил 20.2 см. Непосредственно в моменты зем-



**Рис. 4.** Изменение атмосферного давления (а) и уровня воды (б) на скважине ЮЗ-5 5.12.1997 г. с 0 ч 0 мин до 24 ч 0 мин (1 измерение 10 мин).

летрясений 1 и 2 (табл. 2) изменения уровня скв. Е-1 не зарегистрированы.

В колебаниях уровня скв. ЮЗ-3 (рис. 3, Б) четко проявляются баровариации, а также суточные и полусуточные гармоники, возникающие, по-видимому, под воздействием земных и океанических приливов и температурных наводок. В поведении уровня также присутствует долговременный тренд, который, вероятно, формируется сезонными факторами и режимом выпадения атмосферных осадков.

После землетрясения 5.12.1997 г. на скв. ЮЗ-5 произошло понижение уровня с амплитудой 57.8 см, продолжавшееся до 27 декабря. Наиболее интенсивное понижение уровня на 38.8 см происходило с 5 по 8 декабря. Затем понижение уровня продолжалось с замедленной скоростью, и его амплитуда с 8 по 27 декабря составила 19 см.

На рис. 4 представлен график изменения уровня и атмосферного давления на скв. ЮЗ-5 5.12.1997 г. по данным 10-минутных регистраций. В момент землетрясения с  $M = 7.7$  (11 ч 27 мин) фиксируется резкое понижение уровня воды в течение 20 мин (с 11 ч 20 мин до 11 ч 40 мин) с амплитудой 12.2 см. В интервале времени с 11 ч 20 мин до 11 ч 30 мин понижение уровня составило 10 см; в интервале с 11 ч 30 мин до 11 ч 40 мин понижение уровня составило 2.2 см, а затем приобрело плавный характер. В 18 ч 48 мин произошло землетрясение с  $M = 6.8$  (рис. 1, табл. 2), вызвавшее обратимое повышение уровня (с 18 ч 40 мин до 19 ч 00 мин) с амплитудой 0.7 см.

Таким образом, в результате землетрясения 5.12.1997 г. в изменениях уровня скв. ЮЗ-5 проявился эффект понижения пластового давления в водоносном горизонте, в котором выделяются косейсмическая и постсейсмическая фазы. Косейсмическая фаза резкого понижения пластового давления соответствовала моменту прохождения сейсмических волн от землетрясения 5.12.1997 г. и сравнительно быстрого сброса тектонических напряжений в районе скважины. Постсейсмическая фаза, соответствующая по времени наиболее активному периоду развития афтершокового роя (в районах Камчатского и Кроноцкого заливов произошло более 50 землетрясений с  $M = 5.0...6.8$ ), по-видимому, отражает процесс продолжавшегося сброса напряжений. Характер изменения скорости снижения уровня с 5-го по 27-е декабря соответствует общему характеру понижения интенсивности афтершокового роя в районе очага землетрясения 5.12.1997 г. Слабая косейсмическая реакция на землетрясение с  $M = 6.8$  и отсутствие откликов уровня на другие сильные ощутимые землетрясения афтершоковой серии также может указывать на то, что понижение уровня на скв. ЮЗ-5 вызвано тектоническими, а не динамическими причинами (напри-

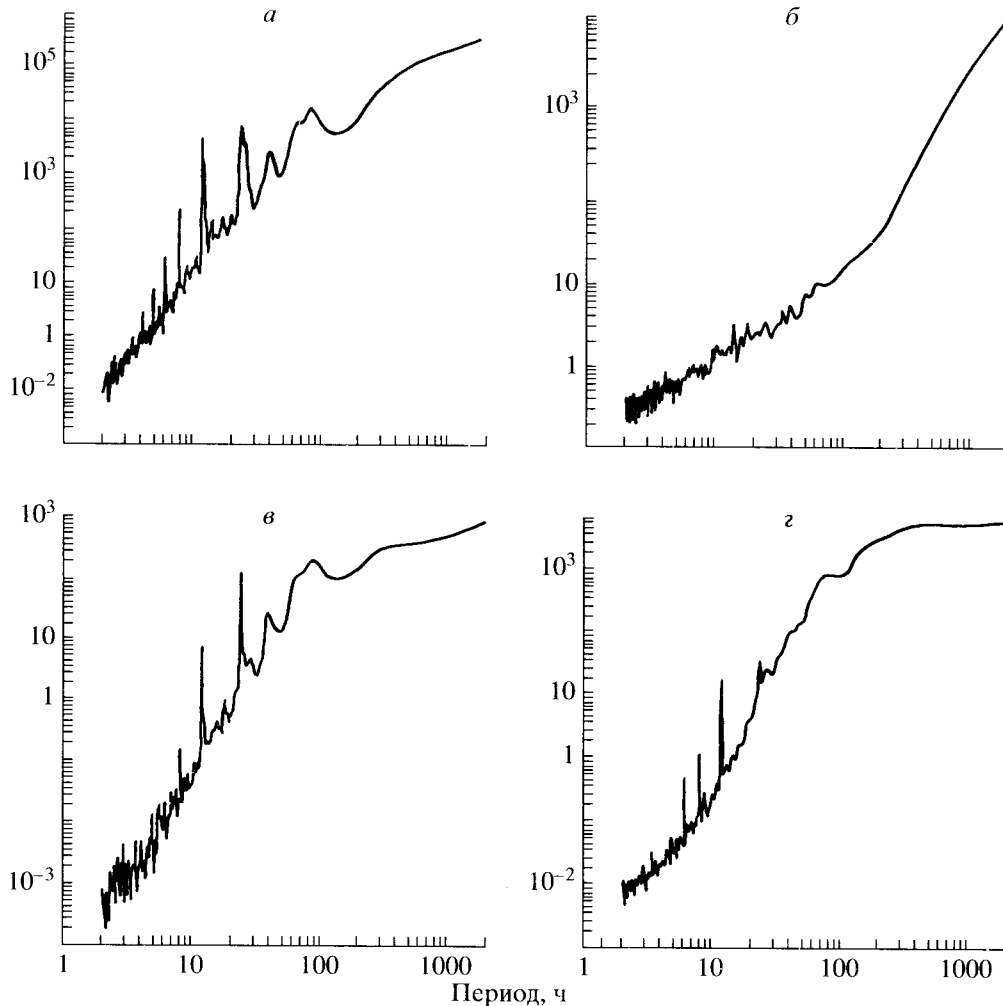


Рис. 5. Спектры мощности вариации уровня в скв. ЮЗ-5 (а) и в скв. Е-1 (б), а также атмосферного давления по данным регистрации на скв. ЮЗ-5 и Е-1 (в и г соответственно).

мер, прохождением сейсмических волн и соответствующими колебаниями грунта и водяного столба в скважине).

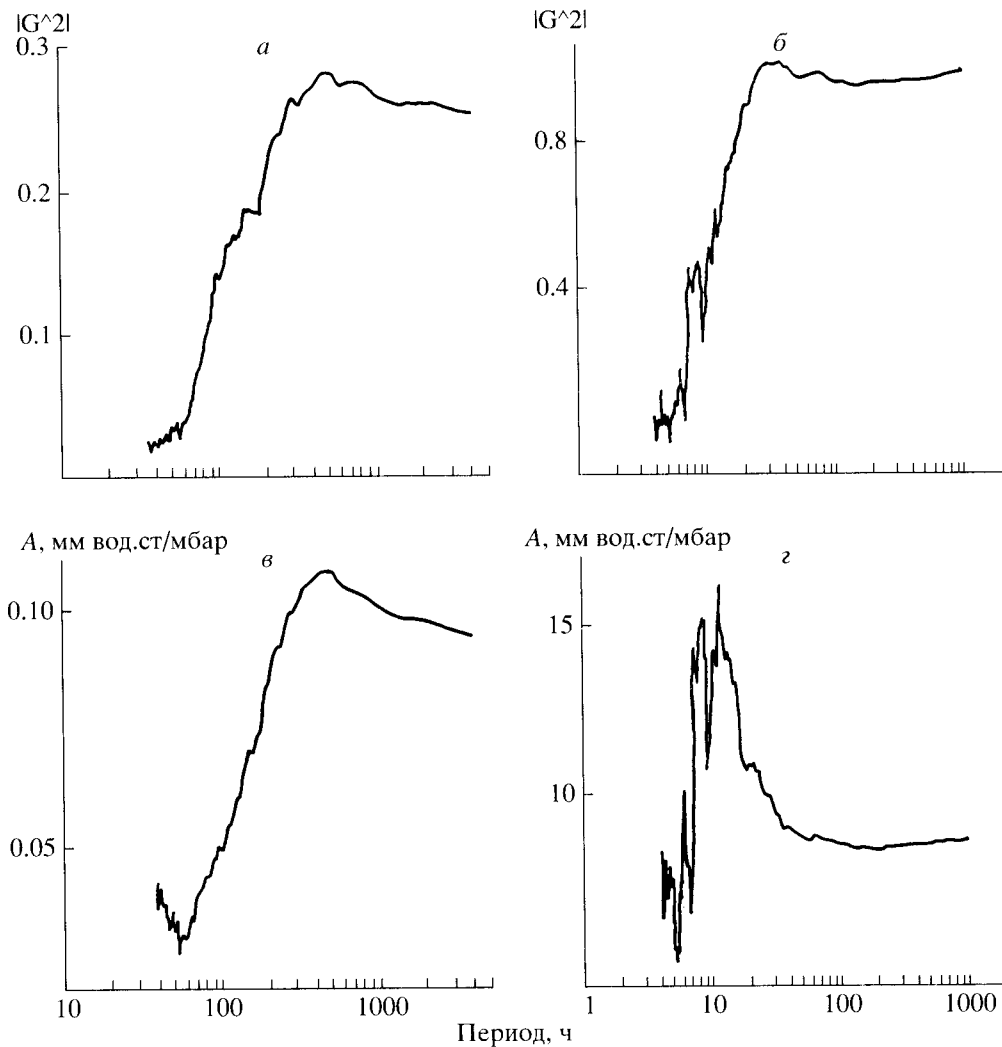
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для прояснения особенностей гидродинамического режима наблюдательных скважин использованы кросс-спектральные оценки вариаций уровня и атмосферного давления, так как атмосферное давление является постоянно воздействующим на уровень и на систему скважина–водоносный горизонт фактором с известной амплитудной частотной характеристикой [6].

На рис. 5 приведены спектры мощности вариаций атмосферного давления и уровня по данным наблюдений на скв. ЮЗ-5 и Е-1. Для обоих пунктов наблюдается устойчивое увеличение амплитуд вариаций уровней и атмосферного давления с ростом периодов, указывающее на преимущест-

венно низкочастотный характер исследуемых временных рядов. В спектрах атмосферного давления, а также в спектре уровня скв. ЮЗ-5, выделяются на периодах 12 и 24 ч интенсивные максимумы. В то же время в изменениях уровня скв. Е-1 12- и 24-часовые компоненты не обнаруживаются. Это однозначно указывает на отсутствие земноприливных и прочих короткопериодных эффектов в поведении уровня скв. Е-1, а также на то, что на указанном пункте система скважина–водоносный горизонт недостаточно чувствительна для регистрации изменений пластового давления под воздействием деформаций  $\sim 10^{-8}$  с характерными периодами менее первых сут. В то же время в изменениях уровня воды скв. ЮЗ-5 можно предполагать проявление внутрисуточных вариаций пластового давления.

На рис. 6 приведены оценки квадрата модуля спектра когерентности  $|G^2|$  и амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмо-



**Рис. 6.** Оценки квадрата модуля спектра когерентности ( $G^2$ ) и амплитудной частотной передаточной функции ( $A$ ) от атмосферного давления к вариациям уровня на скв. Елизовская-1 (*а, в*) и на скв. ЮЗ-5 (*б, г*).

сферного давления к изменениям уровня на наблюдательных скважинах ( $A$ ). На скв. ЮЗ-5 (рис. 6, б и г) когерентность или степень связности изменений уровня и атмосферного давления возрастает от 0.1 до 0.9 в диапазоне периодов от 4 до первых десятков ч. Значения амплитудной частотной передаточной функции также возрастают в данном диапазоне периодов. При этом максимальная величина отклика уровня воды на вариации атмосферного давления достигает 16 мм вод.ст./мбар для периода 12 ч.

На скв. Е-1 когерентность изменений уровня и атмосферного давления начинает слабо проявляться на периодах 40–50 ч и возрастает до максимального значения 0.3 на периодах 400–500 ч (~20 сут). Амплитудная частотная передаточная функция также слабо возрастает в диапазоне периодов от 50 до 400–500 ч. Максимальная величина барометрического отклика уровня не более 0.11 мм вод.

ст./мбар, т.е. более чем на два порядка меньше, чем для скв. ЮЗ-5.

По приведенным данным можно объяснить отсутствие косейсмического скачка уровня скв. Е-1 в результате землетрясения 5.12.1997 г. Для пункта скв. Е-1 система скважина–водоносный горизонт в силу индивидуальных гидродинамических особенностей (возможно, наличие сопротивления в области фильтра из-за недостаточного количества отверстий в металлической колонне (12 отверстий на погонный метр) или их засорения глинистым материалом не способна реагировать на относительно быстрые изменения напряженно-деформированного состояния контролируемого объема водонасыщенных пород. Однако это обстоятельство не исключает возможности проявления низкочастотных и высокоамплитудных вариаций пластового давления в поведении уровня скв. Е-1. Показателем этого может быть синхрон-



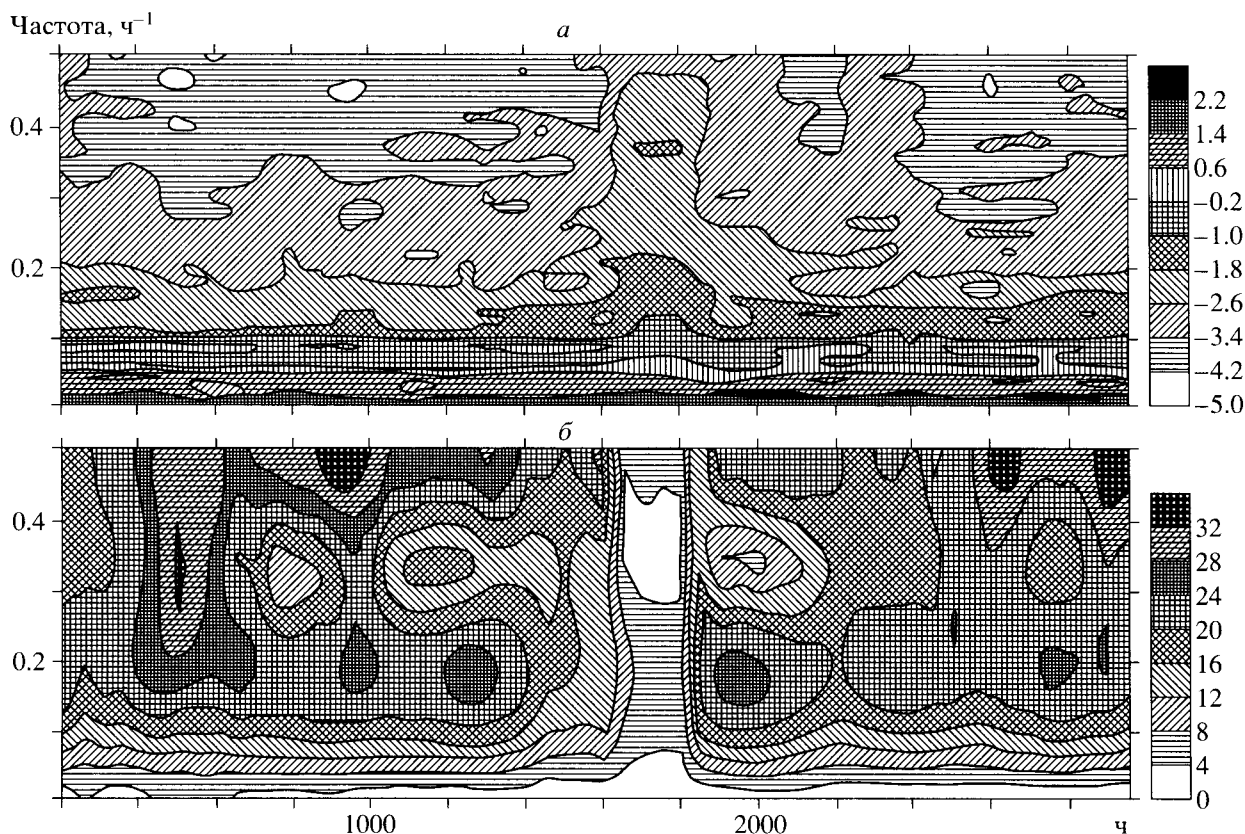


Рис. 7. Оценка эволюции логарифма спектра мощности баровариаций (а) и параллельная диаграмма эволюции амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к уровню воды в скважине ЮЗ-5 (б). Оценки в скользящем временном окне длиной 200 ч со смещением 50 ч.

ность изменения ее уровня с изменением уровня скв. ЮЗ-5 в сентябре–ноябре 1997 г. (рис. 3). Возможной причиной такой синхронизации в поведении трендов уровней может быть воздействие на пластовое давление однонаправленного геодинамического процесса, вызывающего изменение консолидированного состояния и упругих свойств водонасыщенных пород обширного региона.

На рис. 7 представлены две параллельные частотно-временные диаграммы эволюции логарифма спектра мощности баровариаций (рис. 7, а) и амплитудной частотной передаточной функции от баровариаций к уровню подземных вод в скважине ЮЗ-5 (рис. 7, б). Обе оценки построены в скользящем временном окне длиной 200 ч, взятом со смещением 50 ч. Для оценки эволюции функции отклика использована регрессионная модель третьего порядка [6, 8]. По временной оси отложен правый конец скользящего временного окна, что удобно для поиска прогностических эффектов.

Обращает на себя внимание резкая аномалия уменьшения отклика уровня на баровариации (рис. 7, б) длительность ~400 ч, соответствующая значениям правого конца временного окна 1600–1800 ч от начала регистрации. При вычислении

длительности аномалии необходимо прибавлять длину временного окна, равную 200 ч. Этот интервал выпадает на 07.11–23.11.1997 г. Локальные “пятна” уменьшения отклика уровня на баровариации на частотах  $\sim 0.3 \text{ ч}^{-1}$  (на временных интервалах  $\sim 800, 1200$  и  $2000$  ч) возникали после выпадения осадков  $> 20 \text{ мм}$  в 1 сут.

Характерно совпадение интервала аномально-го уменьшения функции отклика в диапазоне частот  $0.5\text{--}0.1 \text{ ч}^{-1}$  с интервалом увеличения интенсивности высокочастотных пульсаций атмосферного давления (рис. 7, а). Подобное совпадение неоднократно отмечалось при анализе равномерных данных как в сейсмоактивных, так и в асейсмических регионах, причем оно отсутствует при аналогичном анализе, например, деформометрических данных. Заметим, что столь же ярких аномалий, как представленной на рис. 7, б, авторам еще не удавалось наблюдать.

Как отмечено в работе [6], подобная аномалия может быть вызвана разупрочняющим воздействием высокоамплитудных пульсаций атмосферного давления на прочность верхних слоев земной коры. Формирование барометрического отклика уровня происходит под воздействием двух

процессов: с одной стороны, увеличение атмосферного давления “заталкивает” столб жидкости через открытое устье скважины, а с другой – “выдавливает” его при воздействии, подобно прессу, на слои пород, лежащие выше рассматриваемого водоносного горизонта. В случае напорных горизонтов в образовании отклика преобладает первый процесс. При уменьшении прочностных свойств пород, залегающих выше водоносного горизонта, вклад двух разнонаправленных процессов может становиться сопоставимым и величина отклика будет уменьшаться.

Таким образом, специфика формирования отклика уровня воды в скважине на баровариации делает оценку эволюции функции отклика весьма чувствительным индикатором временных интервалов изменения прочностных свойств верхних слоев земной коры. В связи с этим аномалия на рис. 7, б представляет особый интерес как яркое отражение изменения напряженного состояния среды перед сильнейшим землетрясением 05.12.1997 г. (2089-й час на рис. 7), а тем самым и как его возможный предвестник.

Косейсмическое падение уровня воды в скв. ЮЗ-5 на 12.2 см в течение 20 мин соответствует характеру изменений уровня во время сильных землетрясений в других сейсмоактивных регионах [10, 11] и указывает на то, что в результате землетрясения 5.12.1997 г. произошло понижение пластового давления в водоносном горизонте.

Постсейсмическая фаза в изменении уровней после землетрясения 5.12.1997 г. четко прослеживается на обеих скважинах. На скв. ЮЗ-5 в течение постсейсмической фазы наблюдается преемственность вариаций косейсмической фазы, т.е. продолжение снижения уровня в течение  $\geq 22$  сут. Амплитуда понижения уровня 57.8 см с 5 по 27 декабря может характеризовать общую величину снижения пластового давления в водоносном горизонте вследствие сброса тектонических напряжений под воздействием совокупности сейсмических событий в Камчатском и Кроноцком заливах, главным из которых было землетрясение № 1 (рис. 1, табл. 1).

На скв. Е-1 постсейсмическая фаза проявляется в длительном повышении уровня. Различия характеров изменения уровней скв. ЮЗ-5 и Е-1 в результате сейсмической активизации может предполагать различные гидродинамические механизмы их формирования.

По данным многолетних наблюдений на Пиначевских источниках, Петропавловский полигон, Камчатка [9], в результате сильных землетрясений в изменении их дебитов проявляется однотипный постсейсмический эффект – резкое увеличение дебитов с последующим продолжительным (1 нед.–6 мес.) возвращением их величин к первоначальным значениям. После землетрясения

5.12.1997 г. также наблюдалось увеличение дебитов Пиначевских источников (устное сообщение Ю.М. Хаткевича и др., 1998 г.). По-видимому, увеличение дебитов источников и повышение уровня воды в скв. Е-1 происходит из-за улучшения фильтрационных свойств в водоподводящих каналах источников и в системе скв. Е-1 – водоносный горизонт, которое приводит к увеличению дебитов источников и к дополнительному притоку воды в ствол скважины.

**Выводы.** 1. В 1996–1997 гг. на Петропавловском полигоне создана и функционирует система цифровой регистрации уровня и атмосферного давления с частотой 10 мин на скважинах Елизовская-1 и ЮЗ-5. По данным гидродинамических наблюдений на обеих скважинах зарегистрированы аномальные изменения уровня воды в результате сейсмической активизации в районах Камчатского и Кроноцкого заливов в декабре 1997 г. с главным событием 5.12.1997 г.,  $M = 7.7$ . На скв. ЮЗ-5 в результате землетрясения 5.12.1997 г. в течение 20 мин наблюдалось косейсмическое падение уровня воды на 12.2 см. Общая амплитуда понижения уровня воды с 5 по 27 декабря составила 58.7 см. На скв. Е-1 сейсмическая активизация вызвала долговременное повышение уровня. Полученные данные по изменению уровней наблюдательных скважин в период подготовки и реализации сильнейшего сейсмического события с  $M = 7.7$  могут быть основой разработки и создания моделей формирования гидродинамического режима пьезометрических скважин в сейсмоактивном регионе.

2. Применение некоторых кросс-спектральных оценок к исследованию синхронных вариаций уровня и атмосферного давления в совокупности с данными о косейсмическом характере изменения уровня во время сильных землетрясений позволяет охарактеризовать достаточную чувствительность системы скв. ЮЗ-5 – контролируемый водоносный горизонт к воздействию относительно быстро протекающих изменений напряженно-деформированного состояния среды с характерными периодами от минут – первых часов до первых сотен часов. В то же время система скв. Е-1 – водоносный горизонт не обладает необходимой чувствительностью для регистрации изменений напряженного состояния среды под воздействием внешних возмущений с периодами  $< 1-3$  сут.

3. Выявленная в результате оценки эволюции функции отклика на баровариации резкая аномалия уменьшения отклика вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 длительностью  $\sim 2$  нед. может быть индикатором сложных нелинейных процессов взаимодействия воздушной и твердой оболочки Земли перед последовавшим через 12 сут после окончания этой аномалии сильнейшим землетрясением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 97-05-96577, 97-05-64170, 97-05-96635) и при финансовой поддержке Администрации Камчатской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине "Обнинск" // Физика Земли. 1989. № 11. С. 84–95.
2. Вартамян Г.С., Попов Е.А., Волейшо В.О. и др. Методические указания по организации и проведению гидрогеологических наблюдений на специализированной сети в целях прогноза сильных землетрясений. М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. 41 с.
3. Киссин И.Г., Савин И.В. Методические рекомендации по наблюдениям для выявления гидродинамических предвестников землетрясений. М.: ИФЗ РАН, 1986. 51 с.
4. Любушин А.А. (мл.). Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.
5. Любушин А.А. (мл.). Классификация состояний низкочастотных систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 135–141.
6. Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. 1993. № 12. С. 74–80.
7. Любушин А.А. (мл.), Латынина Л.А. Компенсация метеорологических помех в деформометрических наблюдениях // Физика Земли. 1993. № 12. С. 98–102.
8. Любушин А.А. (мл.), Лежнев М.Ю. Анализ изменчивости отклика уровня подземных вод на баровариации на Южных Курилах (о. Шикотан) // Физика Земли. 1995. № 8. С. 79–84.
9. 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. 79–89.
10. Igarashi G., Wakita H. Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B3. P. 4269–4278.
11. Kitagawa G., Matsumoto N. Detection of coseismic changes of underground water level // J. Amer. Statist. Assoc. 1996. V. 91. № 434. P. 521–528.
12. Roeloffs E.A., Burford S.S., Riley F.S., Records A.W. Hydrologic effects on water level changes associated with episodic fault creep near Parkfield, California // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № B9. P. 12.387–12.402.

## Groundwater Observations at the Petropavlovsk Test Site, Kamchatka

G. N. Kopylova\*, A. A. Lyubushin (Jr.)\*\*, V. A. Malugin\*\*,  
A. A. Smirnov\*, L. N. Taranova\*

\*Kamchatkan Technique Testing Seismological Team, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

\*\*United Institute of Physics of the Earth, Moscow, 123810, Russia

An automatic system for groundwater observations is described along with synchronous recordings of changes in groundwater level at wells and of atmospheric pressure obtained in 1996–1998 at two wells of the Petropavlovsk Test Site, Kamchatka. Attention is focused on coseismic and postseismic water level changes in relation to the December 5, 1997 magnitude 7.7 earthquake which took place at distances of 360–370 km from the observing wells. Cross-spectral analysis of water level variations and atmospheric pressure changes together with an analysis of earthquake-related water level behavior can be used to estimate individual sensitivity of wells to rapid changes in the stress and strain of water-saturated rocks.