

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1: 551.252

# ТИПЫ И СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ФИЛЬТРАЦИОННОМ РЕЖИМЕ ОСНОВАНИЙ БОЛЬШИХ ПЛОТИН

© 2018 г. А. Н. Марчук<sup>1,\*</sup>, Н. А. Марчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123995 Россия

\*E-mail: marchuka@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.2017 г.

После исправления 01.03.2018 г.

Описан опыт распознавания гидрогеодинамических предвестников (ГГД-предвестников) в фильтрационном режиме оснований больших плотин высотой 100 и более метров для прогностических целей. Определены скорости их развития по двум типам графиков. Приведены примеры использования ГГД-предвестников, определены скорости их развития для перенесенных землетрясений различных магнитуд при краткосрочном прогнозировании землетрясений на некоторых плотинах России и Кыргызстана.

**Ключевые слова:** прогноз землетрясений, плотина, вмещающий геоблок, фильтрационный расход, дебит, аномалия, предвестник, скорость, дилатансия, прогнозное время, тектонические напряжения, гидротермальный механизм очага, уровень водохранилища

DOI: 10.1134/S086978031805006X

### ВВЕДЕНИЕ

Задача краткосрочного прогноза землетрясений является неотложной в связи с вводом в действие карты ОСР-97, непроектным состоянием некоторых высоконапорных плотин, работающих на пределе прочности, глобальным потеплением и катастрофическими паводками последних лет, активизирующими сейсмичность. С 1992 г. по инициативе академика Н.П. Лаверова ИФЗ РАН исследует геодинамическое влияние на крупные природно-технические системы “плотина–основание–водохранилище” с целью повышения безопасности больших плотин, прилегающих территорий и разработки практических методов краткосрочного прогнозирования землетрясений с использованием метрологических возможностей развитых измерительных систем плотин.

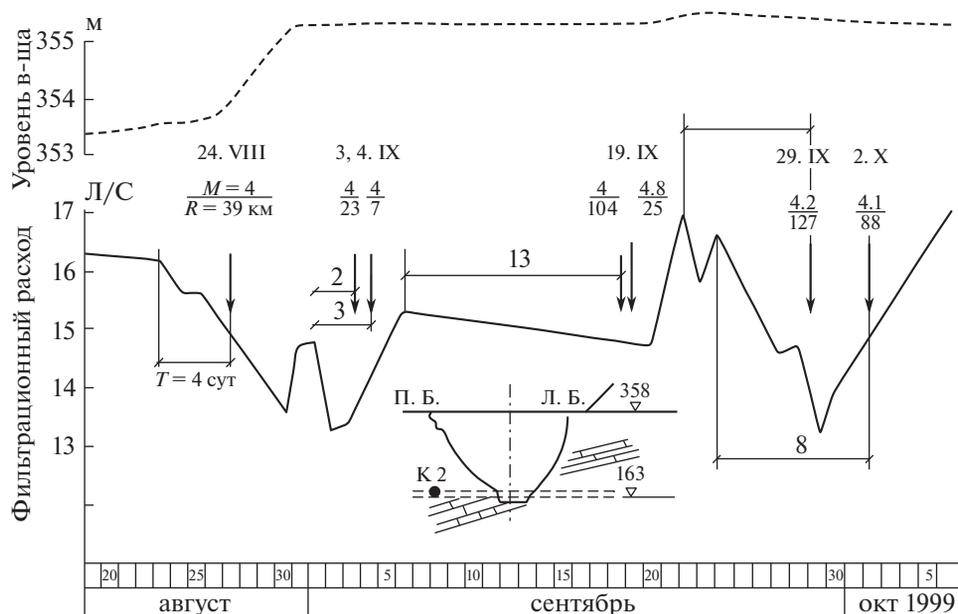
Ретроспективный анализ многолетних рядов натуральных наблюдений на 11 высоконапорных бетонных плотинах РФ и СНГ совместно с региональными каталогами землетрясений показал наличие четкого отклика всех измерительных систем плотин на сейсмособытия энергетического класса  $K = 10$  и выше. Наиболее чувствительными к подготовительному периоду и последствиям землетрясений проявили себя измеряемые параметры фильтрационного режима в основаниях плотин – фильтрационные расходы, дебит дренажей, показания пьезометров, температура и химиче-

ский состав дренажных вод, т.е. гидрогеодинамические (ГГД) предвестники (рис. 1). В результате ретроспективных исследований и полевых работ ИФЗ РАН на плотинах Токтогульской, Курпсайской, Чиркейской, Миатлинской, Саяно-Шушенской и Зейской ГЭС совместно с группами мониторинга этих гидроузлов определены средства измерений, наиболее чувствительные к геодинамическим сигналам. По этим средствам измерений выполнены успешные экспериментальные работы по краткосрочному прогнозированию на основе идентификации ГГД-предвестников с проверкой по другим типам предвестников, зафиксированных в измерительных сетях плотин [4].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В классическом труде Соболева Г.А. [11] указано: “Недостаток опыта прогнозов, отсутствие оперативно работающей автоматизированной системы сбора и обработки данных и не разработанность процедуры для обеспечения эффективности прогнозов при их не абсолютной надежности оставляют такие возможности нереализованными”. Цель нашей работы – попытка реализовать такие возможности, используя для этого потенциал измерительных систем больших плотин и длинные ряды наблюдений [3].

Многие исследователи: Киссин И.Г., Вартамян Г.С., Осика Д.Г. и Черкашин В.И. [1, 2, 9, 10]



**Рис. 1.** Гидрогеодинамические предвестники землетрясений и возможные прогнозные сроки (сут) в дренажной системе основания плотины Чиркейской ГЭС. Коллектор № 2 нисходящих скважин. Стрелками обозначены сейсмические события, в числителе магнитуда, в знаменателе — эпицентрального расстояния.

справедливо считают, что с помощью ГГД-предвестников можно решить проблему краткосрочного прогнозирования землетрясений, если оборудовать охраняемый объект большим числом контрольных скважин со станциями режимных наблюдений. Краткосрочный прогноз — это месяцы, недели, сутки. А как показывает наш опыт, ГГД-предвестник может длиться от суток до 4-х месяцев в зависимости от энергии ожидаемого землетрясения (таблица). Как при этом определить срок до толчка? Где точка отсчета прогнозного времени? Авторы упомянутых работ не указывают, каким образом определяется прогнозный срок при большой продолжительности предвестника. Например, предвестники Кизилюртовского землетрясения в основании плотины Чиркейской ГЭС в Дагестане длились до 75 сут, перед землетрясением Тахоку ГГД предвестники в основании плотины Бурейской ГЭС в Амурской области появились за 90–140 сут до события по разным видам измерений.

В качестве наиболее надежного ГГД-предвестника мы принимали аномалии суммарного фильтрационного расхода в геоблоке основания плотины или на наиболее проницаемом его участке в зоне тектонических нарушений. Теоретической основой идентификации аномалии считалось отклонение расхода от закона Дарси. Однако, поскольку исследование является экспериментальным, в качестве аномалии принималось отклонение фильтрационного расхода или дебита дрен от

реального графика среднестатистической зависимости расхода (дебита) от уровня верхнего бьефа (УВБ) в условиях отсутствия сейсмических и техногенных влияний (рис. 2). Эта зависимость требует периодического уточнения в связи с уменьшением во времени фильтрационного расхода из-за коагуляции основания наносами и засорения дренажных скважин. В момент фиксации аномалии необходимо учитывать также возможное влияние обильных осадков в приводохранилищном районе. В годовом цикле изменений УВБ легко выделяются характерные периоды для наблюдений. Во время наполнения водохранилища проявляются возбужденные землетрясения, вызывающие относительно малые флуктуации в графиках расходов и пьезометрических уровней, а сильные события приурочены к экстремумам УВБ. Большое число наблюдаемых землетрясений, в том числе возбужденных в периоды быстрых изменений УВБ, позволяет выстраивать надежные зависимости между величиной предвестника и энергией ожидаемого землетрясения, между энергией и прогнозируемым временем до толчка [4].

Вариации величины гидрогеодинамического потока вне известной зависимости от УВБ или техногенных причин есть объективный и чувствительный показатель изменения поля тектонических напряжений в массиве основания при подготовке землетрясения. Он выгодно отличается от точечных скважинных измерений [7, 10], поскольку является интегральным по большому

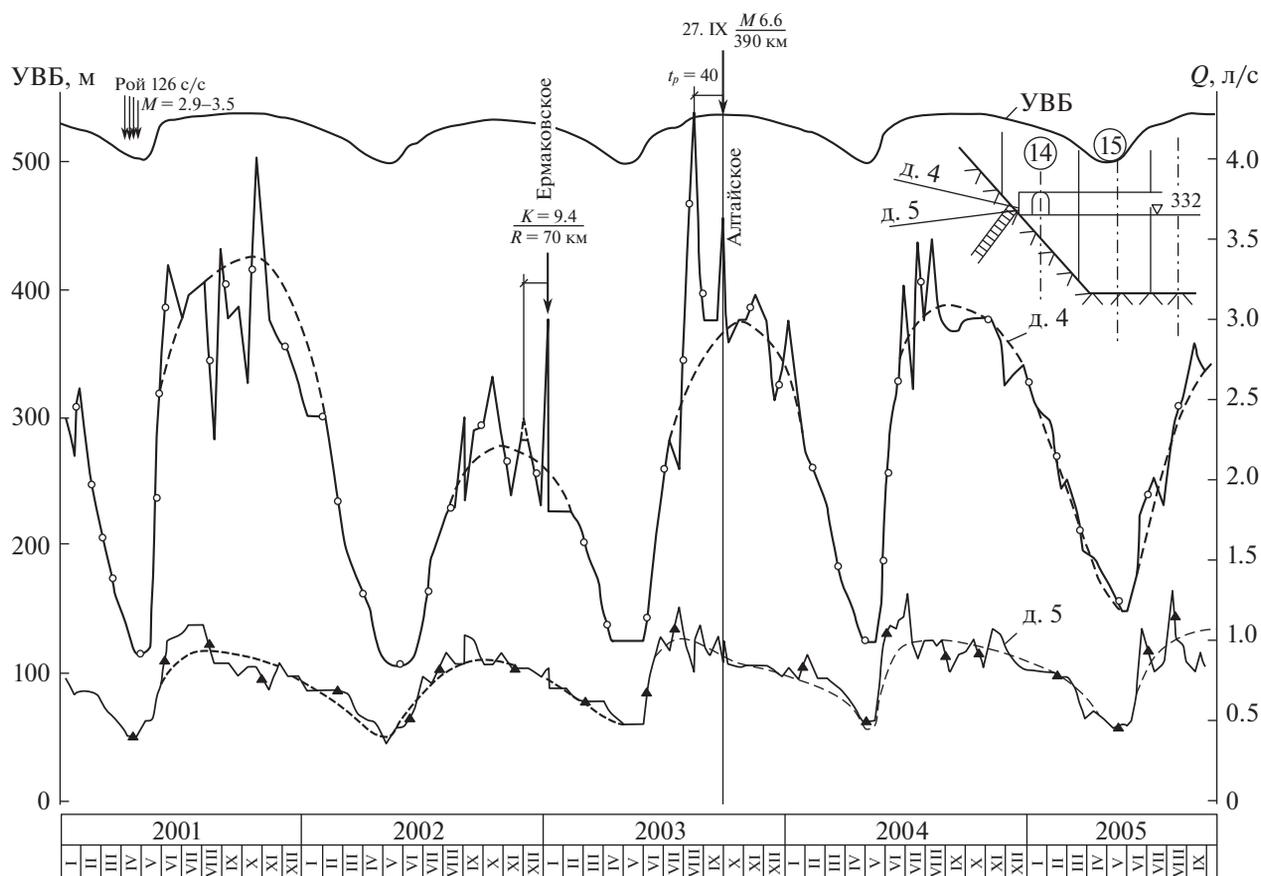
Характеристики временных параметров ГГД-предвестников в фильтрационном режиме оснований больших плотин

Дата землетрясения	Параметры		Эпицентр расст. R, км	Время, сут		Скорость, км/сут		Примечания
	К	М		$t_v$	$t_p$	$V_v$	$V_p$	
Плотина Курпсайской ГЭС на р. Нарын								
18.10.1992		<b>4</b>	<b>106</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>5.9</b>	<b>15.1</b>	Афтершоки Сусамырского землетрясения
17.03.1993	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>76</b>	<b>60</b>	<b>5</b>	<b>1.26</b>	<b>15.0</b>	
Плотина Чиркейской ГЭС на р. Сулак								
31.01.1999	14.3	5.6	25	75	30	0.3	0.8	Кизилюрт
21.02.1999	<b>13.2</b>	<b>5.1</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>1.5</b>	<b>0.75</b>	»
18.03.1999	10.8		12	2	1	6	12	Афтершоки Кизилюрт
26.03.1999	9.1–9.7		15–236	2.5	2	84	105	Рой 5 шт.
17.09.2013		5.3	145	9	4	16.1	36.25	Груз.-Дагест.
Плотина Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисей								
27.10.2000	13.6		325	12	7	27	46	Красноярское
27.09.2003		6.6	390	40	5	9.75	78	Горн. Алтайск
10.02.2011	<b>13.9</b>	<b>5.5</b>	<b>78</b>	<b>11</b>	<b>41</b>	<b>7.2</b>	<b>1.9</b>	Хакасское
27.12.2011	<b>15</b>	<b>6.1</b>	<b>325</b>	<b>53</b>	<b>33</b>	<b>6.1</b>	<b>9.8</b>	Тывинское
26.02.2011	<b>15.6</b>	<b>6.4</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	»
Плотина Бурейской ГЭС на р. Бурее								
11.12.2005		<b>5.8</b>	<b>660</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>66</b>	Курильское
15.04.2009		<b>2.8</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>66</b>	
30.03.2010		3.9	130	15	3	8.6	43	
28.04.2010		2.6	150	5	3	30	50	

объему вмещающего плотину геоблока с развитой дренажной сетью, легко проверяется по всем измерительным системам плотины, например, по дренажным расходам, показаниям пьезометров, обратных отвесов, гидростатических нивелиров, экстензометров на контактах сооружения с основанием (рис. 3). При этом вариации колебаний уровня в пьезометрах могут достигать десятков метров (в отличие от сантиметровых колебаний в отдельных скважинах) из-за высоких градиентов напоров и напряжений в створах плотин (рис. 4). Кроме того, надежность предвестниковых сигналов может быть проверена по приборам на других плотинах каскада, как это делалось на ГЭС Нарынского и Сулакского каскадов [5, 8]. Заметим, что фильтрационный режим контролируется на всех плотинах мира по сходной методике, и наши

эксперименты могут быть проверены и повторены в любой стране.

Момент отклонения величины фильтрационного расхода от нормальной среднестатистической зависимости от УВБ есть аномалия – начало появления ГГД-предвестника dP. В дальнейшем предвестник может развиваться по двум основным формам графика. Первая – по классической форме аналогичной графику “напряжение-деформация” для одноосного сжатия, когда в массиве пород доминирует одно главное напряжение. Вторая – по схеме взрывного проявления аномалии с медленной и длительной диссипацией (рис. 5), характерной для напряженного объемного сжатия в высокомолекулярной среде по всем направлениям тензора [6]. По этим схемам развиваются также аномалии в показаниях пьезометров, дебита дрен, температуры и химического со-



**Рис. 2.** Саяно-Шушенская ГЭС. Совмещенные графики УВБ и дебита контрольных дренажных скважин в основании левобережных секций плотины с предвестниками и прогнозным временем до Ершовского и Алтайского землетрясений (ретроспектива). Показаны только сильные и близкие сейсмособытия (по данным ЛГТС СШГЭС).

става дренажных вод. Наиболее распространенный тип графика (см. рис. 5а) имеет четко выраженное пиковое значение, от которого на основе статистики можно отсчитывать прогнозное время. Более редкий и сложный для прогноза тип графика, представленный на рис. 5б, возникает, вероятно, при глубоких очагах, при гидротермальном механизме очага или при быстрой подвижке в геоблоке основания. Предположительно подобная ситуация имела место по Танлу-Охотской рифтовой зоне в период подготовки землетрясения Тахоку и зафиксирована показаниями всех обратных отвесов плотины Бурейской ГЭС [6]. Гидротермальный механизм очага предположительно имел место при Сусамырском землетрясении, о чем свидетельствовали высокие белые фонтаны, сопровождавшие это событие [4].

Алгоритм применяемой методики исследований по краткосрочному прогнозированию землетрясений представлен структурной схемой на рис. 6. По этой методике на плотинах Токтогульской, Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС вы-

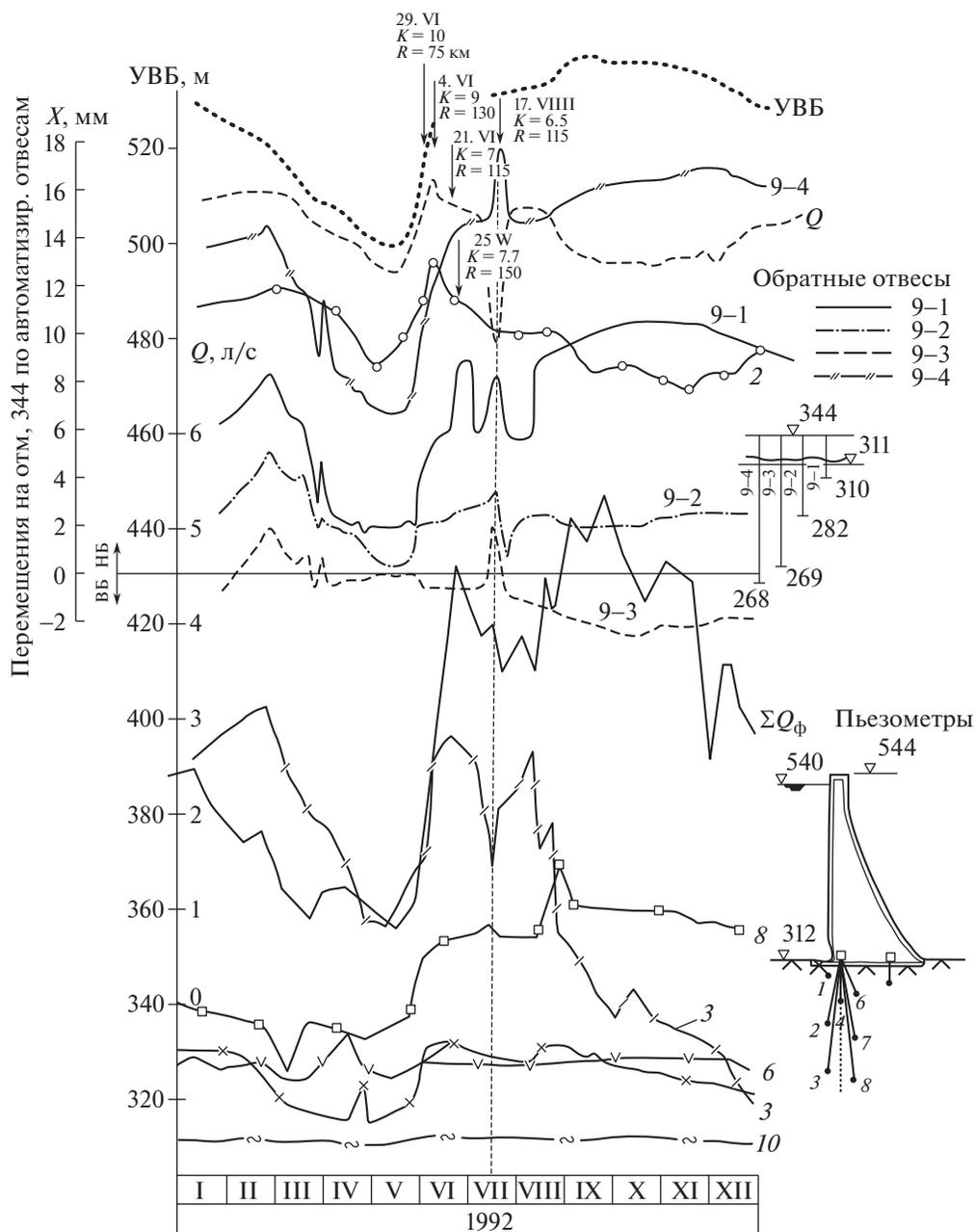
полнено 9 прогнозов (один – не подтвердился). Наиболее значимые – прогноз Курчалойского землетрясения на Северном Кавказе 11 октября 2008 г.  $M = 5.6$  [5] и Грузино-Дагестанского 17 сентября 2013 г.  $M = 5.6$  (совместно с Данияловым М.Г., Рогожиным Е.А. и Славиной Л.Б. по разным методикам).

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из анализа наших многочисленных наблюдений на плотинах [4] следует, что общая продолжительность жизни ГГД-предвестника разделяется на два принципиально разных периода (см. рис. 5):

$$T = tv + tp [\text{сут}],$$

где  $tv$  – время движения деформационной волны предвестника от очага до точки наблюдения или время роста тектонических напряжений до критического уровня – начала дилатансии.



**Рис. 3.** Саяно-Шушенская ГЭС. Изменения пьезометрических уровней, фильтрационных расходов, показаний обратных отвесов в основании ключевой секции плотины под влиянием колебаний УВБ и сейсмических событий по данным ЛГТС СШГЭС.

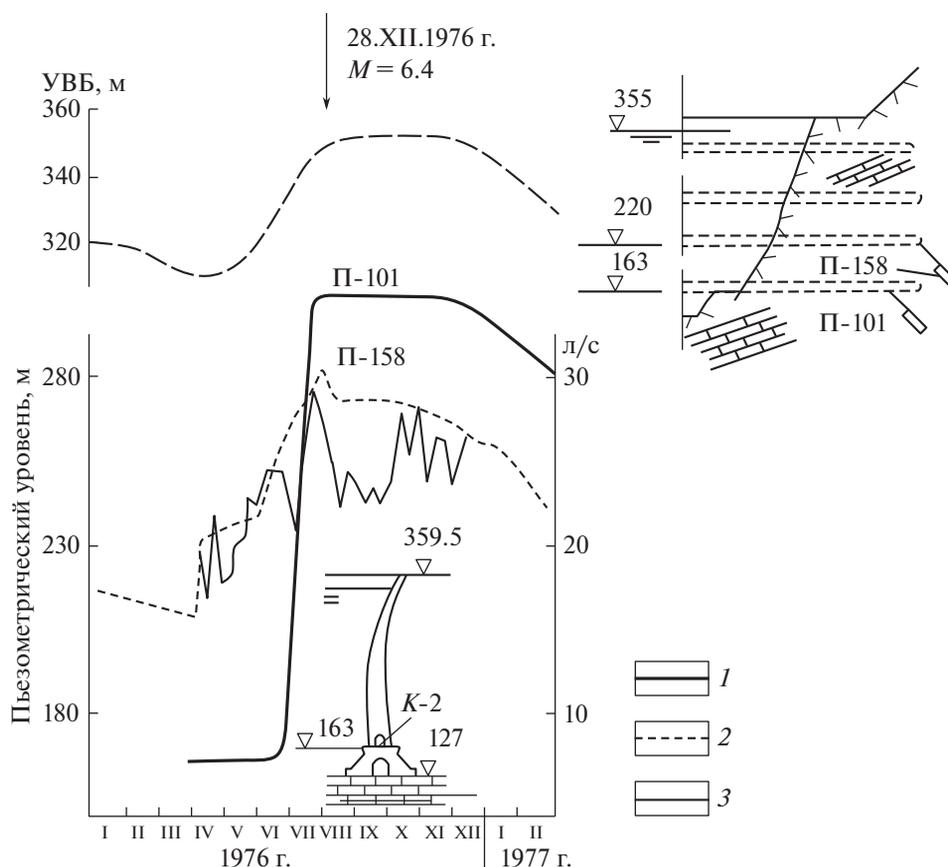
Скорость движения деформационной волны предвестника:

$$V_p = R/t_v \text{ [км/сут],}$$

где  $R$  – эпицентральное расстояние, км;  $t_p$  – время от пикового значения предвестника в точке наблюдения до толчка – период дилатансии до срыва напряжений, до толчка в сутках или прогнозное время:

$$t_p = T - t_v \text{ [сут].}$$

Этот второй период  $t_p$  наиболее важен для краткосрочного прогноза, он определяется по экспериментальному графику, построенному на основе надежной статистики результатов наблюдений на плотине, где имеются длительные ряды наблюдений 35–60 лет. Большое количество состо-



**Рис. 4.** Чиркейская ГЭС. Показания пьезометров и расходомеров в основании плотины в период Черногорского землетрясения. 1 – пьезометр 101, 2 – пьезометр 158, 3 – фильтрационный расход в водосборном коллекторе К-2 (по данным ЧГЭС).

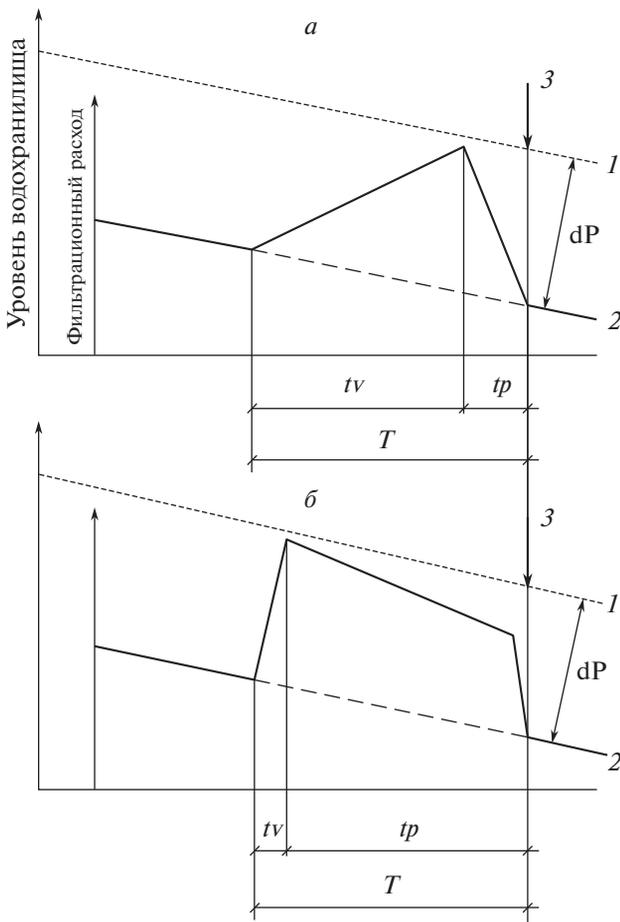
явшихся природных и возбужденных землетрясений предоставляют такую возможность.

Анализ результатов наших экспериментов по краткосрочному прогнозированию и ретроспективная обработка данных натурных наблюдений групп мониторинга ГЭС на четырех больших бетонных плотинах по вышеуказанным параметрам сведены в таблицу. В таблицу включены только репрезентативные землетрясения с четко зафиксированными ГГД-предвестниками, подтвержденными показаниями пьезометров, обратных отвесов и температурой дренажных вод при условии отсутствия техногенных влияний. Из приведенных в таблице данных следует:

- возникновение аномалии и период движения волны предвестника  $t_v$ , означающий время накопления энергии упругих деформаций, могут быть длительными до 60–75 сут. в прямой зависимости от энергии ожидаемого землетрясения и не дают никаких данных для прогноза, а лишь являются сигналом для начала непрерывных наблюдений;

- второй период жизни предвестника  $t_p$  – период неупругих деформаций, время дилатансии и последующего срыва напряжений протекает с более высокой скоростью и является главным прогностическим параметром, ценнейшим материалом статистики;

- отмечены редкие обратные случаи, когда скорости дилатансии существенно ниже скорости проявления предвестниковой аномалии, возникающей скачкообразно. Такие землетрясения произошли в зоне водохранилищ или в непосредственной близости от них на глубинах 5–10 км, характерных для возбужденных землетрясений при интенсивном изменении уровня водохранилища и повышения температуры дренажных вод. Отмеченные жирным шрифтом в таблице Кизилюртовское 21.02.1999 г. и Хакасское 10.02.2011 г. землетрясения можно объяснить быстрой подвижкой в иерархии геоблока или взрывным гидротермальным механизмом очага. В этих случаях краткосрочный прогноз осложняется, поскольку процесс роста тектонических напряжений и ди-



**Рис. 5.** Два типа графических схем ГГД-предвестников в фильтрационном режиме оснований больших плотин: *a* – постепенное развитие предвестника; *б* – скачкообразное проявление предвестника. 1 – уровень водохранилища, 2 – график ГГД-предвестника, 3 – ожидаемое землетрясение.

латансии связан с ростом температурных напряжений, и их разрядка наступает также скачком. В этом случае при непрерывном наблюдении прогноз может быть сделан только на основе статистики аналогов и температурного контроля фильтра;

- равные скорости дилатансии при афтершоках Сусамырского, при Курильских и Тывинских землетрясениях (выделены в таблице жирным шрифтом) при разных их параметрах, возможно, не являются случайными, а характеризуют волнопроводящие и деформационные свойства среды в направлении на очаг, что подлежит дальнейшим исследованиям.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на актуальность предлагаемого метода прогноза землетрясений [3], который может

уменьшить ущерб при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ), сохраняется его дискуссионный характер. Без возражений по существу, высказываются мнения об его региональном значении. Однако, отклик пьезометров и обратных отвесов в основании Бурейской ГЭС на Курильские и Япономорские землетрясения [6] на расстояниях 1600–1800 км от плотин опровергает это мнение. Вызывает также сомнения точность прогнозов, которая прямо зависит от дискретности измерений. При ежедневных ручных измерениях она составляет одни сутки, при еженедельных 7 суток. При автоматизированных измерениях точность повышается, но степень автоматизации измерений на отечественных высоких плотинах в настоящее время недостаточна. Точность будет повышаться с устранением этого недостатка и с накоплением статистического материала [7].

При оценке метода следует иметь в виду, что ни одна из наших высоконапорных плотин еще не испытала максимального расчетного землетрясения, а практические альтернативы отсутствуют. Более того, существует мнение о невозможности краткосрочного прогноза, с чем по отношению к высоконапорным плотинам с большими водохранилищами согласиться нельзя. Опыт перенесенного Сусамырского землетрясения на Токтогульской и Курпсайской ГЭС в 1992 г. и техногенной аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. показал невозможность быстрой эвакуации персонала, полное отсутствие подготовительных мер. Прогноз позволит сократить до минимума численность дежурного персонала при ожидании МРЗ и провести необходимые мероприятия по снижению ущерба на территориях нижних бьефов гидроузлов.

### ВЫВОДЫ

1. Наблюдения за фильтрационным режимом в основании больших плотин предоставляют широкие возможности для отработки практических методов краткосрочного прогноза землетрясений по гидрогеодинамическим предвестникам с опорой на длинные ряды наблюдений.

2. При определении прогнозного времени необходимо учитывать графическую форму предвестников, выделять пиковое значение графика как точку отсчета и в интересах накопления статистических данных вычислять скорости развития упругих деформаций до пикового значения напряжений и скорости дилатансии до срыва напряжений.

3. В поисках методов краткосрочного прогнозирования землетрясений использование существующих развитых измерительных систем больших плотин, их автоматизация, особенно совершенствование измерений параметров фильтрационного ре-



**Рис. 6.** Алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений с помощью измерительных систем плотин. Цифрами обозначена очередность операций.

жима, представляется наиболее перспективным. Кроме того, существует возможность комплексирования предвестников по другим типам приборов и каскадам плотин для проверки надежности прогнозов.

4. Необходимо ретроспективно обработать уже накопленные материалы за весь срок эксплуатации высоких отечественных плотин в сеймоопасных районах для увеличения объема статистических данных по форме приведенной таблицы для проверки полученных результатов и возможной в перспективе их математической интерпретации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вартамян Г.С., Куликов Г.В.* Гидрогеодеформационное поле Земли // Известия Академии наук СССР. 1982. Вып. 262. № 2. С. 310–314.
2. *Киссин И.Г.* Высокоамплитудные предвестники землетрясений и чувствительные зоны земной коры // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 6. С. 3–13.
3. *Марчук А.Н., Дурчева В.Н., Савич А.И. и др.* Способ прогноза землетрясений. Пат. RU №268185// Бюл. изобр. 1996. № 29. С. 45–48.
4. *Марчук А.Н., Марчук Н.А.* Плотины и геодинамика. М.: ИФЗ РАН, 2006. 156 с.
5. *Марчук А.Н., Марчук Н.А.* Прогноз землетрясения 11 октября 2008 г. на Северном Кавказе с помощью измерительных систем Чиркейской и Миатлинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 3. С. 47–50.
6. *Марчук А.Н., Марчук Н.А., Николаев А.В.* Гиперчувствительность измерительных систем Бурейской ГЭС к геодинамическим влияниям // Геоэкология. 2013. № 3. С. 252–258.
7. *Марчук А.Н., Марчук Н.А.* Два подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений по гидрогеодинамическим предвестникам // Гидротехническое строительство. 2016. № 12. С. 9–14.
8. *Марчук А.Н., Умралин К.Б.* Реакция плотин Токтогульской и Курпсайской ГЭС на многократные землетрясения // Гидротехническое строительство. 1994. № 5. С. 26–30.
9. *Осика Д.Г.* Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 202 с.
10. *Осика Д.Г., Черкашин В.И.* Энергетика и флюидодинамика сейсмичности. М.: Наука, 2008. 243 с.
11. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

# TYPES AND RATES OF HYDROGEODYNAMIC PRECURSORS DEVELOPMENT IN DRAINAGE REGIME OF HIGH DAM FOUNDATIONS

A. N. Marchuk<sup>a,#</sup> and N. A. Marchuk<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya ul. 10, Moscow, 123995 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: marchuka@mail.ru*

Short-term earthquake prediction using hydrogeodynamic (HGD) precursors at large dam is necessary for ensuring safety; and it is available with the existing measurement systems in the dam and in its foundation. The most rational prediction method, different from that suggested by Vartanyan, Kissin and Osika, is the use of the drainage systems in the dam and in its foundation. Measuring the seepage conditions provides five HDG-precursors: (1) the total seepage flow as an integral indicator of change in the stress field in the enclosing block; (2) the flow of the most sensitive drainage wells in the regions of known faults and fractures; (3) piezometric levels in hydraulic communication with fractures; (4) drainage temperature; (5) geochemical analysis of drainage water. Drainage systems of large dams can detect HGD-precursors, from which the energy and time of an anticipated earthquake can be determined. HGD-precursors are validated against synchronous readings of other measurement devices of the dam. Examples are presented of the successful experimental earthquake predictions at the dams of Dagestan and Sayno-Shushenskaya hydroelectric power plant. Our experiments can be validated for any high dam; there are about 50 thousand such dams all over the world.

**Key words:** *earthquake prediction, dam, enclosing geological block, filtration discharge, debit, anomaly, precursor, rate, dilatancy, prediction time, tectonic stress, hydrothermal focus mechanism, water reservoir level*

## REFERENCES

- Vartanyan, G.S., Kulikov, G.V. *Gidrogeoinformatsionnoe pole Zemli* [Hydrogeodeformational field of the Earth]. *Inzvestiya Akademii nauk SSSR*, 1982, issue 262, no. 2, pp. 310–314. (in Russian).
- Kissin, I.G. *Vysokoamplitudnye predvestniki zemletryasenii i chuvstvitel'nye zony zemnoi kory* [High-amplitude earthquake precursors and sensitive zones of the Earth's crust]. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli*, 1988, no. 6, pp. 3–13. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Durcheva, V.N., Savich A.I. et al. *Sposob prognoza zemletryasenii* [An Earthquake Prediction Method] RF Invention certificate no. 2068185, 1996. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Marchuk, N.A. *Plotiny i geodinamika* [Dams and Geodynamics], Moscow, IFZ RAN Publ., 2006, 156 p. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Marchuk, N.A. *Prognoz zemletryaseniya 11 okt. 2008 na Severnom Kavkaze s pomochsh'yu izmeritel'nykh sistem Chirkeiskoi i Miatlinskoi GES*. [Earthquake prediction on 11 October, 2008 in North Caucasus using the dam measuring devices at Chirkeiskaya and Miatlinskaya hydropower stations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2009, no. 3, pp. 47–50. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Marchuk, N.A., Nikolaev, A.V. *Giperchuvstvitel'nost' izmeritel'nykh sistem Bureiskoi GES k geodinamicheskim vliyaniyam*. [Hypersensitivity of the measuring systems at the Bureiskaya dam to geodynamic effects]. *Geoekologiya*, 2013, no. 3, pp. 252–258. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Marchuk, N.A., *Dva podkhoda k kratkosrochnomy prognozy zemletryasenii po gidrogeodinamicheskim predvestnikam* [Two approaches to short-term earthquake prediction by hydrogeodynamic precursors], *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2016, no. 12, pp. 9–15. (in Russian)
- Marchuk, A.N., Umralin, K.B. et al. *Reaktsiya plotin Toktogul'skoi i Kurpsaiskoi GES na mnogokratnye zemletryaseniya* [Response of Toktogul and Kurpsai hydropower dams to frequent earthquakes], *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1994, no. 5, pp. 26–30 (in Russian).
- Osika, D.G. *Fluidnyi rezhim seismicheskii aktivnykh oblastei* [Fluid conditions in seismic areas], 1981, Moscow, Nauka, 202 p. (in Russian).
- Osika, D.G., Cherkashin, V.I. *Energetika i fluidodinamika seismichnosti* [Energy and fluid dynamics of seismicity], Moscow, Nauka, 2008, 243 p. (in Russian).
- Sobolev, G.A. *Osnovy prognoza zemletryasenii* [Fundamentals of earthquake prediction], Moscow, Nauka, 1993, 312 p. (in Russian).