

УДК 622:620 (575.2) (04)

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ СКЛОНОВ

Б.Ц. Манжиков – докт. физ.-мат. наук

With the purpose of estimation of mountainous slopes stability in the area of Toktogul Hydroelectric Station the values of average quadratic speed deviations σ of horizontal and vertical deformation from average long-term values are analyzed. As criteria value there was used the value of deviation 3σ .

В инструментальных исследованиях устойчивости крутых горных склонов обычно анализируются временные зависимости вертикальных, горизонтальных и угловых деформаций [1–4]. При этом в качестве критериальных показателей принимаются суммарные значения деформаций за определенный интервал наблюдений, например, за один год. Для оценки устойчивости горных склонов на участке основных сооружений Токтогульской ГЭС, по результатам геомеханического мониторинга, В.Я. Степановым [1] предложен скоростной деформационный критерий. Согласно этому критерию, в устойчивом состоянии средняя скорость деформации горных склонов не должна превышать величину 10^{-4} в год. В противном случае, состояние склона полагается неустойчивым. Очевидно, скоростной критерий в данной форме имеет ограниченное, локальное значение и пригоден только для конкретных условий левобережного склона на участке Токтогульской ГЭС. Для другого склона, имеющего отличную геометрию и сложенного другими породами, значение скоростного критерия может быть иным.

Вместе с тем, к оценке устойчивости горных склонов можно подойти с более общих позиций, используя хорошо разработанные статистические методы исследования случайных процессов. Медленные деформации горных склонов в естественном состоянии обу-

словлены в основном статическими нагрузками, и лишь изредка на коротких интервалах времени подвергаются ее относительно быстрым изменениям. Поэтому в общем случае деформационные склоновые процессы могут быть отнесены к стационарным. Под стационарностью процесса в данном случае понимается постоянство во времени его плотности вероятности. Это означает, что стационарный процесс является однородным во времени [5]. Разумеется, во время быстрых изменений условий нагружения, например при проведении взрывных работ или землетрясениях, стационарность деформационного процесса может нарушаться. После их прекращения, как показывает опыт, стационарность склоновых процессов быстро восстанавливается.

С учетом высказанных замечаний, идея оценки устойчивости механической системы, в частности, горного склона, статистическими методами становится вполне очевидной. Она может быть сформулирована как простейшая задача распознавания [6] двух состояний склона – устойчивого и неустойчивого, которым соответствуют стационарный или нестационарный деформационный процесс. Для решения этой задачи необходимо определить допустимые границы изменения плотности вероятности деформационных процессов, отвечающих устойчивому состоянию горного склона и контролировать, чтобы она находи-

лась в пределах этих границ. Мерой неустойчивости системы в этом случае может служить степень отклонения текущих значений процесса от его математического ожидания, соответствующего устойчивому состоянию склона.

Статистически разброс экспериментальных данных может быть представлен такими величинами, как дисперсия и среднее квадратическое отклонение. Для неотрицательных величин можно также использовать коэффициент вариации. В качестве величин, характеризующих устойчивость горного склона, целесообразно использовать значения скоростей деформаций вертикальных и горизонтальных составляющих. Для определенности будем рассматривать ежемесячные значения скоростей деформаций для четырех наблюдательных станций, расположенных в левобережном

склоне р. Нарын на участке основных сооружений Токтогульского гидроузла за период наблюдений 1970–1991 гг. Этот период может рассматриваться как период обучения в процедуре распознавания текущих состояний контролируемого массива. Вначале определим вид распределения этих величин по всей совокупности значений. В дальнейшем статистические оценки устойчивости горного склона на данном участке будем проводить по величинам отклонений текущих скоростей деформаций от их средних значений.

Распределения величин вертикальных и горизонтальных скоростей показаны на рис. 1. Соответствующие плотности вероятности могут быть рассчитаны как отношение статистических частот, отложенных по оси ординат, к общему числу анализируемых значений скоростей.

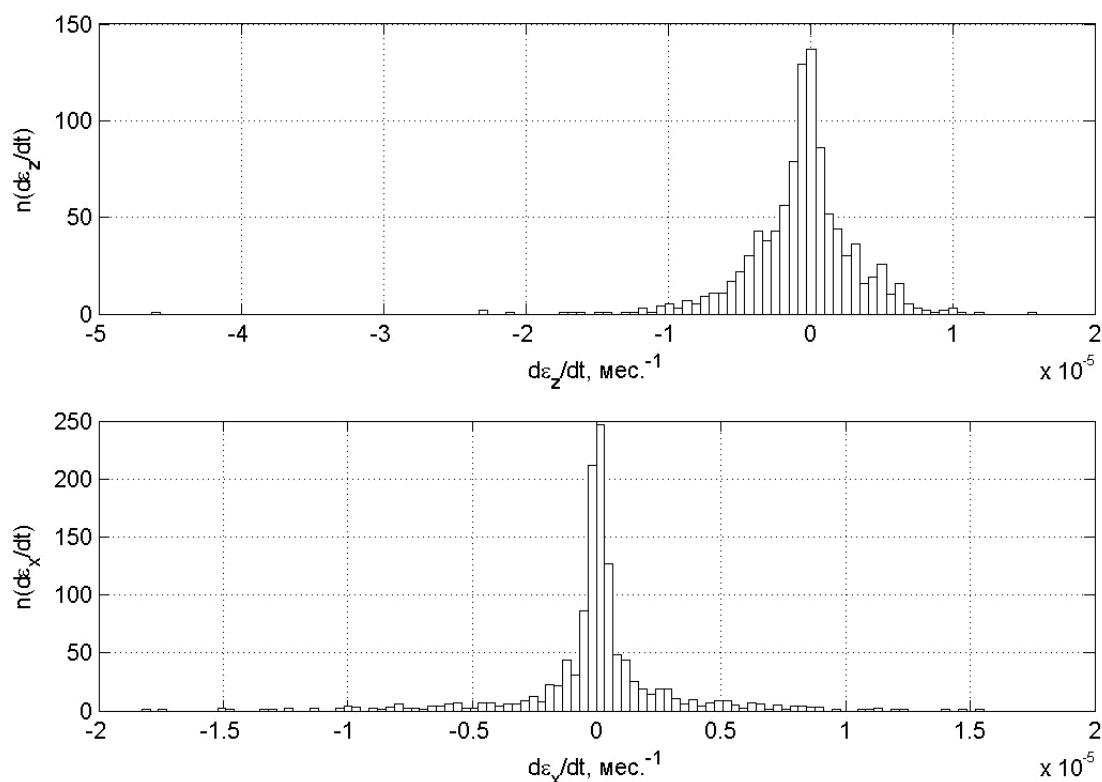


Рис. 1. Распределения (плотности вероятности) величин вертикальных и горизонтальных деформаций по наблюдательным станциям № 1–4, 1970–1991 гг.

Статистический ансамбль вертикальных скоростей (1018 значений) представлен данными измерений по четырем гидростатическим нивелирам, расположенным на горизонтах 814 и 870 м в зонах влияния трещин 69, 995, 995а, а также ненарушенном массиве. В статистический ансамбль величин горизонтальных скоростей (1208 значений) вошли данные измерений по пяти деформометрам, установленным на тех же наблюдательных станциях параллельно гидростатическим нивелирам. Отметим, что горизонтальные смещения по трещине 69 и деформации в зоне ее влияния измерялись двумя деформометрами, имеющими измерительную базу 3 и 11 м, соответственно. Погрешность измерения обеих компонент деформаций составляет 10^{-7} – 10^{-8} в зависимости от длины измерительной базы прибора.

Результаты проведенного анализа показали, что результирующее распределение величин скоростей вертикальных деформаций с 95%-ной вероятностью может быть представ-

лено в виде суммы двух нормальных распределений (рис. 2).

Вид аппроксимирующей зависимости:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-(x-b1)/c1)^2 + a2 \cdot \exp(-(x-b2)/c2)^2$$

Параметры этого распределения равны постоянным коэффициентам (95% доверительный интервал), приведенным ниже.

$$a1=0,09014 \quad (0,08548; 0,09481);$$

$$b1=74,6 \quad (74,55; 74,66);$$

$$c1=1,474 \quad (1,377; 1,57);$$

$$a2=0,05092 \quad (0,04789; 0,05394);$$

$$b2=74,09 \quad (73,86; 74,33);$$

$$c2=8,197 \quad (7,798; 8,595).$$

Результирующее распределение величин скоростей горизонтальной деформации с 95%-ной вероятностью может быть представлено суммой трех нормальных распределений (рис. 3).

Вид аппроксимирующей зависимости:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-(x-b1).c1)^2 + a2 \cdot \exp(-(x-b2).c2)^2 + a3 \cdot \exp(-(x-b3).c3)^2.$$

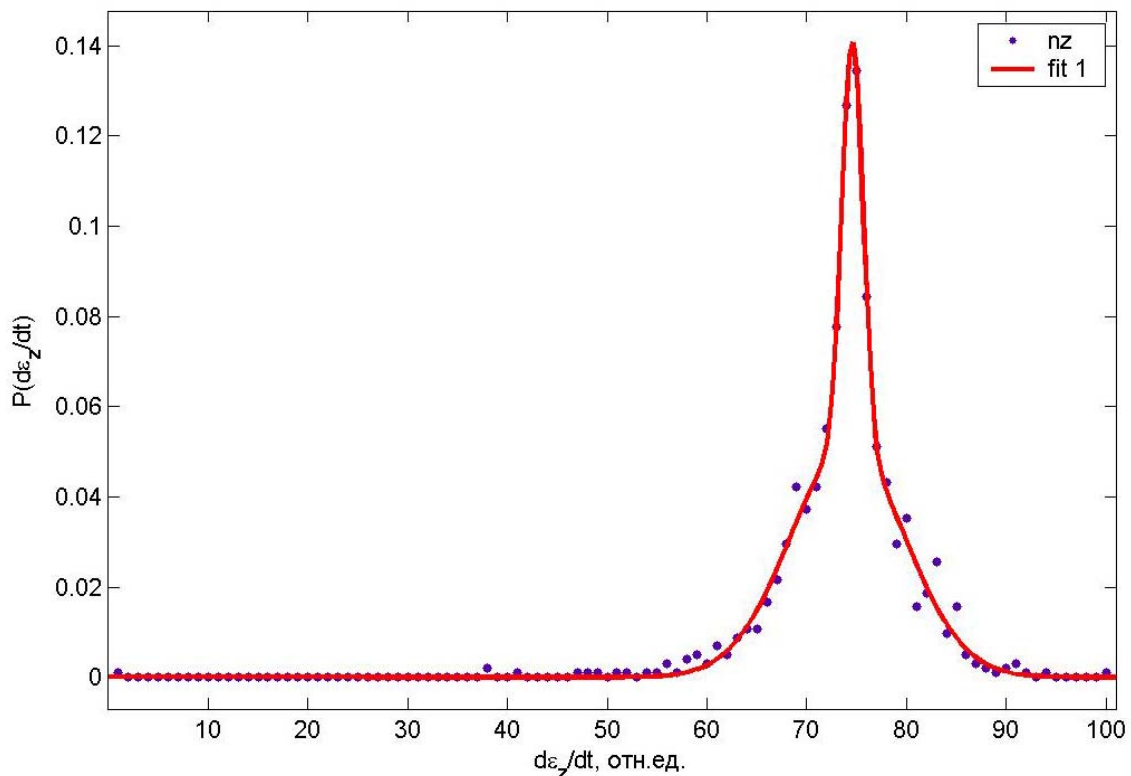


Рис. 2. Результирующее распределение скоростей вертикальных деформаций

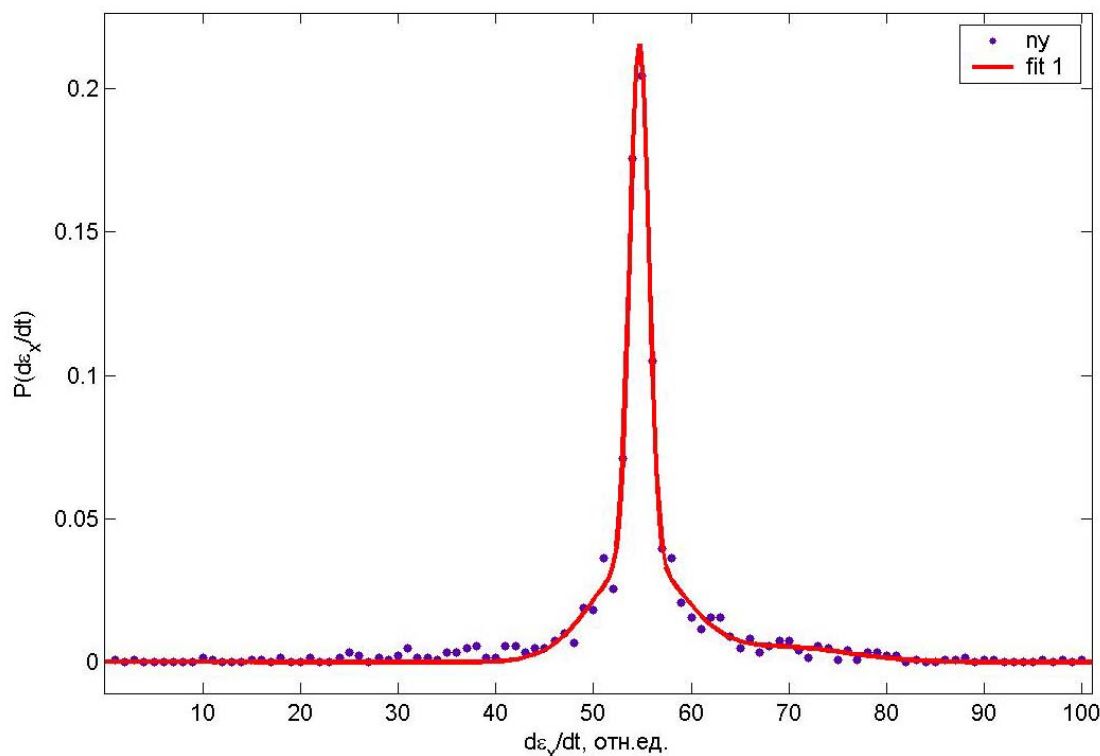


Рис. 3. Результирующее распределение скоростей горизонтальных деформаций

Параметры этого распределения равны постоянным коэффициентам (95% доверительный интервал), приведенным ниже.

$a1 = 0,1802$ (0,1739; 0,1865);
 $b1 = 54,68$ (54,65; 54,72);
 $c1 = 1,346$ (1,288; 1,405);
 $a2 = 0,03492$ (0,02976; 0,04007);
 $b2 = 54,59$ (53,81; 55,37);
 $c2 = 6,62$ (5,598; 7,643);
 $a3 = 0,005279$ (0,003213; 0,007345);
 $b3 = 69,2$ (62,08; 76,32);
 $c3 = 9,614$ (1,073; 18,16).

Поскольку результирующие распределения величин скоростей подчиняются нормальному закону, для него справедливы закономерности, установленные для этого вида распределения. Это позволяет сделать некоторые важные заключения относительно склоновых процессов, представленных величинами скоростей деформаций.

Известно, что физическая величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения подвержена влиянию множества слабых слу-

чайных факторов с равной вероятностью принимающих как положительные, так и отрицательные значения [5–7]. В нашем случае, величины и направления скоростей деформаций горного склона подвержены влиянию множества факторов природного и техногенного происхождения, среди которых можно отметить такие, как напряженное состояние склона, свойства горных пород, климатические условия, сейсмичность, уровень водохранилища, импульсные и вибрационные воздействия технологического оборудования. Строгий учет влияния всех этих факторов невозможен. Однако важно иметь в виду, что если по какой-то причине степень влияния какого-либо одного или нескольких из перечисленных факторов усилится, это приведет к нарушению стационарности склонового процесса и непременно отразится на параметрах распределения скоростей деформации, в частности, его ширине и разбросе значений.

Разброс величин, имеющих нормальное распределение, удобно оценивать в долях его среднего квадратического отклонения σ . Веро-

ятность P того, что истинное значение $x-x_0$ находится внутри некоторого интервала от $\bar{x}-\Delta x$ до $\bar{x}+\Delta x$ называется доверительной вероятностью (коэффициентом надежности, надежностью), а интервал – доверительным интервалом. При достаточно большом значении n доверительному интервалу $\bar{x} \pm \sigma$ соответствует вероятность $P=0,68$, интервалу

$\bar{x} \pm 2\sigma$, $P=0,95$ и интервалу $\bar{x} \pm 3\sigma$, $P=0,997$. Значение случайной величины, подчиняющейся нормальному закону распределения, изредка выходит за пределы интервала $\bar{x} \pm 3\sigma$, но в большинстве случаев можно считать, что они укладываются в этот интервал. Это правило носит название “правило 3σ ”.

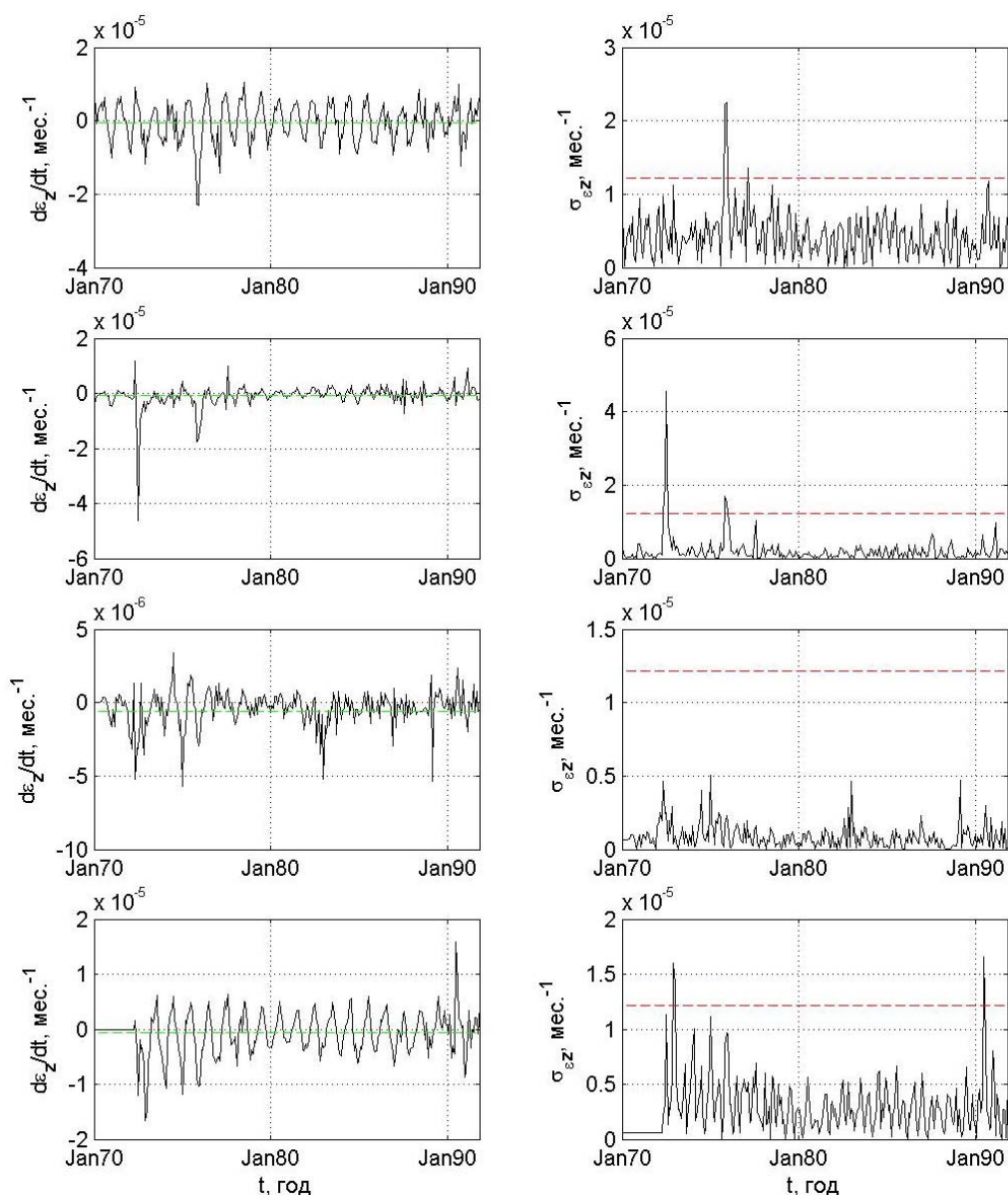


Рис. 4. Оценка устойчивости левобережного склона на участке Токтогульской ГЭС по правилу 3σ для скоростей вертикальных деформаций

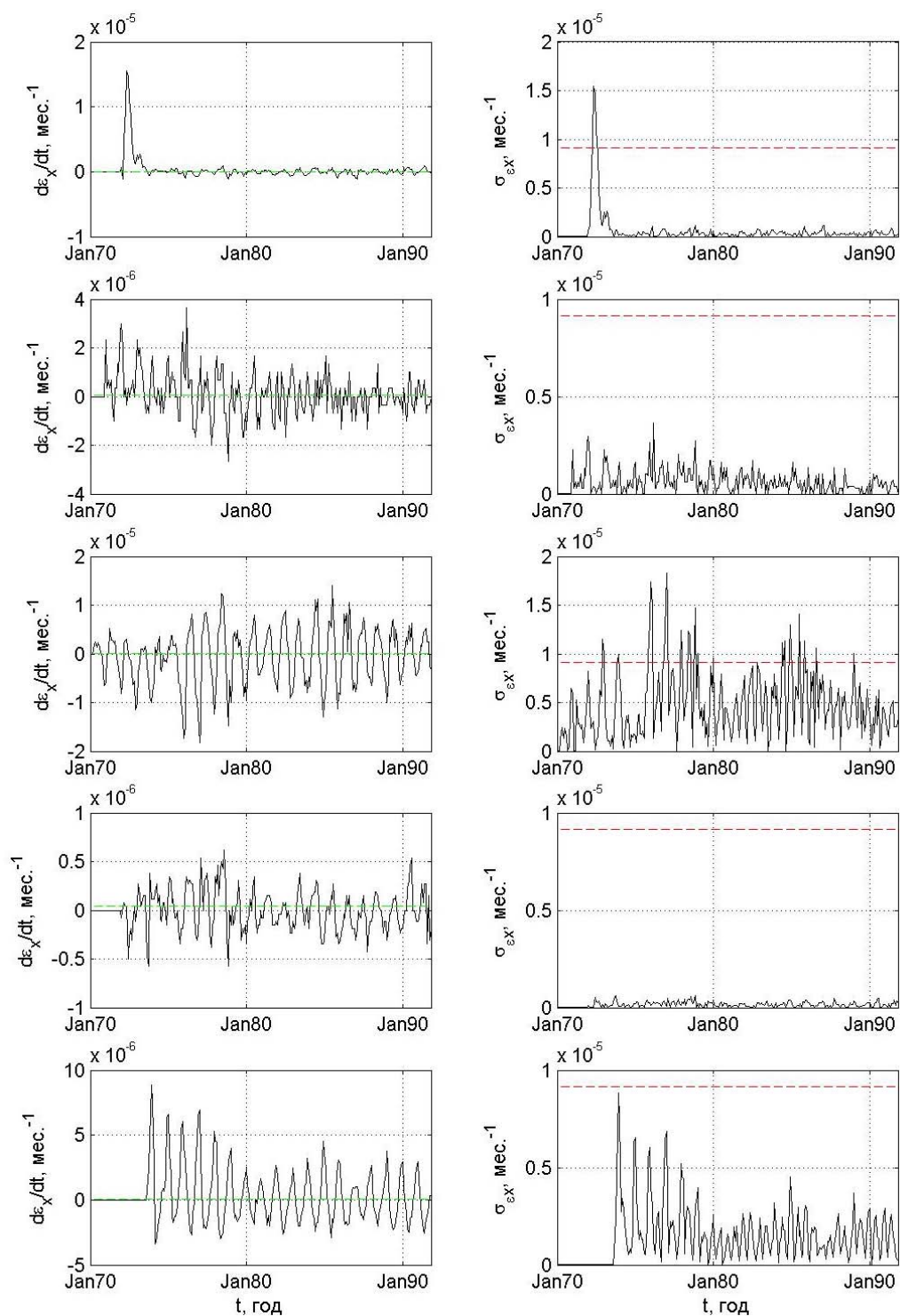


Рис. 5. Оценка устойчивости левобережного склона на участке Токтогульской ГЭС по правилу 3σ для скоростей горизонтальных деформаций

Если значение измеряемой величины оказалось за пределами интервала $\bar{x} \pm 3\sigma$, это означает, что имеет место нарушение закона распределения измеряемой величины. Справедливо предположить, что это произошло вследствие усиления влияния одного или нескольких факторов, определяющих ее значение. В нашем случае, значения скоростей деформации, соответствующих устойчивому состоянию массива горных пород находятся в пределах $\pm 3\sigma$. В противном случае, если отклонение скорости деформации от центра распределения превышает эту величину, можно предполагать, что контролируемый породный массив по какой-либо причине теряет устойчивость. Это должно служить сигналом для усиления внимания или принятия срочных профилактических мер по повышению устойчивости участка склона, на котором среднеквадратические значения скорости деформации превысили критическую величину 3σ .

На рис. 4 и 5 слева показаны временные зависимости ежемесячных скоростей деформаций, справа – временные зависимости соответствующих величин средних квадратических скоростей деформаций по наблюдательным станциям №1–№4. Математическое ожидание скоростей на левых и уровень 3σ на правых зависимостях отмечены пунктирной линией. Как можно видеть, среднеквадратические значения скоростей как для вертикальных, так и для горизонтальных компонент деформаций, лишь изредка превышают уровень 3σ . Это может свидетельствовать о стационарности склонового деформационного процесса и общем устойчивом состоянии контролируемого породного массива.

Нарушения устойчивости склона, имевшие место в рассматриваемый период времени, вероятнее всего, происходили вследствие землетрясений, взрывов и резких изменений уровня водохранилищ. В частности, действием взрывов объясняется возрастание скорости деформаций во время активной фазы строительства Токтогульского гидроузла в начале 70-х годов, когда осуществлялась проходка туннелей большого сечения буровзрывным способом [1].

Вполне закономерно оказалось, что скорости деформаций, превысивших пределы $\pm 3\sigma$, превосходили по абсолютной величине и значение скоростного критерия 10^{-4} в год. Подобная согласованность статистического критерия “3-х сигма” и скоростного деформационного критерия представляется неслучайной, поскольку оба критерия сформулированы на основе одних и тех же экспериментальных данных. Вместе с тем, можно полагать, что критерий 3σ является более универсальным критерием устойчивости, поскольку основывается не просто на оценке абсолютных величин скоростей деформаций конкретного участка горного склона, а исходит из более общих представлений о стационарности склоновых процессов и анализа статистических распределений, полученных за длительный период наблюдений.

В заключении отметим, что согласно обоим рассмотренным критериям, состояние контролируемого массива левобережного склона на участке Токтогульской ГЭС с 2000 г. по настоящее время оценивается как устойчивое.

Литература

1. Степанов В.Я. Механика горных склонов – Бишкек: Илим, 1992. – 192 с.
2. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М. Деформографические измерения. – М.: Наука, 1978. – С. 154.
3. Гисс Р.Е., Жаринов Н.А., Латынина Л.А., Степанов В.Я. Измерения деформаций земной коры на Токтогульской ГЭС // Современные движения земной коры на геодинамических полигонах. – Алма-Ата, 1973. – С. 38–54.
4. Болотин В.В. О понятии устойчивости в строительной механике // Проблемы устойчивости в строительной механике. – М.: 1965. – С. 6–27.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио. 1966. – 678 с.
6. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколов А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984. – 119 с.
7. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле / Московский институт радиоэлектроники и горной электромеханики. – М., 1965. – 185 с.