

УДК 624.127 (575.2) (04)

О СЕЗОННЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ГОРНЫХ СКЛОНОВ В РАЙОНЕ ТОКТОГУЛЬСКОЙ ГЭС

Б.Э. Эмильбеков – канд. физ.-мат. наук,

Б.Ц. Манжиков – докт. физ.-мат. наук,

К. Тилегенов – ст. научн. сотрудник,

А.С. Сыдыкова – научн. сотрудник

Amplitudes of seasonal deformations singled out from temporal series of long-term monitoring are analyzed. The opportunity of getting the coordinated response of a massif to the influence of seasonal loadings is shown.

Одной из составляющих мониторинга крупных промышленных объектов в горных районах являются режимные натурные наблюдения за деформациями примыкающих склонов в связи с необходимостью обеспечения их устойчивости. Наблюдения направлены на изучение динамики деформационных процессов в склонах под влиянием природных и техногенных факторов для обоснования и создания методик оценки и прогноза их состояния.

Наблюдения за смещениями и деформациями левобережного склона в районе Токтогульской ГЭС проводятся ИФимГПИ НАН начиная с 1970 г. Используются методы и измерительная техника (деформографы, наклономеры, гидростатические нивелиры), разработанные для регистрации угловых и линейных деформаций современных движений земной коры с чувствительностью 10^{-8} – 10^{-10} [1, 2]. Для мраморизированных известняков изменению напряжений на $0,01$ – $0,1$ МПа соответствуют деформации порядка 10^{-6} . С учетом этих возможностей системы контроля, базирующиеся на непосредственном измерении деформаций и смещений, позволяют с высокой степенью надежности фиксировать происходящие в массиве изменения.

На наблюдательной станции обычно устанавливают минимальное количество приборов. Деформографы регистрируют изменения рас-

стояния, а нивелиры – вертикальные превышения, между точками массива, охваченными базами приборов. При совместном анализе используют относительные смещения, т.е. регистрируемые абсолютные смещения, отнесенные к базам приборов. Они характеризуют вертикальные и горизонтальные смещения между точками горизонтально расположенного отрезка единичной длины. Можно также говорить об относительном векторе смещения, имеющем компонентами горизонтальные и вертикальные относительные смещения.

Результаты долговременных наблюдений (1970–1991 гг.), полученные на четырех наблюдательных станциях левобережного склона, позволили представить закономерности и динамику развития деформаций склонов [1]. Деформации представлены двумя разновидностями: необратимые (остаточные) и обратимые (упругие). Последние имеют сезонный характер – их период равен одному году. Установлено, что в склонах, в результате развития необратимых деформаций, происходит смещение массива пород в сторону свободной поверхности. При общем медленном движении всего склона в сторону долины реки наблюдаются более интенсивные локальные движения отдельных блоков. Скорости смещений массивов горных пород возрастают по

мере приближения к дневной поверхности, т.е. в зоне разуплотнения пород.

Развитие деформаций и смещений склонов происходило в три этапа: этап естественных деформаций склона, обусловленных разгрузкой и ползучестью скального массива (1970–1971 гг.), этап интенсификации деформаций склонов под влиянием техногенных факторов (1972–1977 гг.) и этап относительной стабилизации после завершения строительства плотины и заполнения водохранилища до 150 м. Стабилизация деформаций и смещений в этот период обусловлена объемным эффектом работы плотины и адаптацией массива пород к новым условиям. На основе анализа скоростей необратимых деформаций предложен критерий устойчивости, согласно которому склон находится в естественном устойчивом состоянии, если скорости необратимых деформаций не превышают 10^{-4} 1/год [1].

Дополнительную информацию о состоянии массива можно получить посредством анализа обратимых деформаций. В данной работе анализируются сезонные деформации, которые могут быть выделены из имеющихся временных рядов. Отметим, что к обратимым, помимо сезонных, относятся также деформации, вызываемые лунно-солнечным приливом и деформации, возникающие при прохождении атмосферных фронтов.

Сезонные деформации регистрируются повсеместно [2]. Их амплитуда и характер изменения в течение года определяются сезонными вариациями температуры и ее градиентом, количеством осадков, свойствами и водопроницаемостью пород, уровнем грунтовых вод, рельефом местности и т.д. Однозначная интерпретация затруднена ввиду многофакторности процесса. Считается, что если сезонные деформации имеют гармонический (синусоидальный) характер, то это является следствием влияния температуры. Если ход деформаций иной, но ярко выражен сезонный характер, то это связано с другими климатическими факторами. Наиболее информативным параметром являются амплитуды сезонных деформаций, которые в различных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях имеют величину $10^{-7} \div 10^{-5}$ [2].

Сезонные нагрузки систематически воздействуют на массив горных пород. Отклик массива – характер и амплитуда сезонных деформаций – зависит от его механического состояния. Мож-

но полагать, что амплитуда сезонных деформаций при одинаковых ежегодных метеоусловиях и устойчивом состоянии массива остается постоянной. При ослаблении массива, возникновении новых поверхностей разрушения, амплитуда должна возрасти. Если принять амплитуду периодических смещений в начальный момент времени A_0 , а в любой другой последующий момент – A_t и обозначить $\Delta A(t) = A_t - A_0$, то критерий устойчивости по амплитуде сезонных деформаций будет иметь вид $\Delta A(t) \leq 0$ – массив устойчив, или $\Delta A(t) > 0$ – массив неустойчив [1]. Если же окажется, что амплитуды сезонных деформаций год от года существенно изменяются, то отклик массива должен быть, по крайней мере, коррелированным.

Учитывать такие изменения позволяют модели, построенные на анализе временных рядов [3,4]. В качестве временного ряда рассматривается совокупность измерений горизонтальных деформаций и вертикальных относительных смещений в течение некоторого интервала времени. При разложении ряда на отдельные составляющие (тренд и сезонная компоненты) применима аддитивная модель [5, 6]. Для выделения гладкой компоненты (тренда и краткосрочных колебаний) используем скользящее среднее участка усреднения, равного одному году. Эта процедура не должна сильно повлиять на остаток, поскольку сумма сезонных эффектов за год равна нулю (или, иначе, избыток суммы сезонных эффектов может быть отнесен к тренду) [3, 4].

Таким образом, сезонные деформации левобережного склона, определенные приборами, установленными на разном удалении от дневной поверхности, имеют гармонический характер. Экстремумы каждым прибором фиксируются в одни и те же месяцы, согласуясь с изменением внешней температуры и повторяя ее с некоторым запаздыванием. Однако в пределах одной наблюдательной станции время достижения экстремумов может смещаться на месяц и более. Амплитуды сезонных деформаций не остаются постоянными по величине, испытывая значительные изменения в сторону как увеличения, так и уменьшения. Средние значения амплитуд и стандартные отклонения приведены в таблице 1. Отмечены номера наблюдательных станций, Д – деформограф, Н – гидростатический нивелир.

Таблица 1

Амплитуды сезонных деформаций, $\cdot 10^{-6}$

	Ст2-Д	Ст2-Н	Ст1-Д	Ст1-Н	Ст3-Д	Ст3-Н	Ст4-Д	Ст4-Н
Средняя	14,266	5,363	1,6	12,723	0,468	1,864	5,058	8,897
Ст. откл.	5,003	4,829	0,725	3,754	0,133	0,985	1,674	2,616

Таблица 2

Коэффициенты корреляции сезонных деформаций

	Ст2-Д	Ст2-Н	Ст1-Д	Ст1-Н	Ст3-Д	Ст3-Н	Ст4-Д	Ст4-Н
Ст2-Д		-0,162	0,256	0,545	0,604	-0,401	0,718	-0,001
Ст2-Н	-0,167		0,627	0,506	0,785	0,537	0,922	0,840
Ст1-Д	0,256	0,627		0,700	0,741	0,293	0,725	0,500
Ст1-Н	0,545	0,506	0,700		0,869	0,435	0,936	0,730
Ст3-Д	0,604	0,785	0,741	0,869		0,270	0,955	0,650
Ст3-Н	-0,401	0,537	0,292	0,435	0,270		0,517	0,843
Ст4-Д	0,718	0,922	0,725	0,936	0,955	0,517		0,887
Ст4-Н	-0,001	0,840	0,500	0,730	0,650	0,843	0,887	

Механизм влияния сезонных нагрузок различен. Предполагалось, что при увеличении температуры будет происходить расширение массива и деформографы будут регистрировать растяжение. Фактически же три из четырех деформографов зарегистрировали сжатие в летние месяцы и, соответственно, растяжение – в зимние, следовательно, прямой термический эффект не является определяющим. Относительно высокие значения амплитуд сезонных деформаций, установленных в зоне разгрузки склонов на участке Токтогульской ГЭС, свидетельствуют о сильной раздробленности и высокой подвижности этой зоны под воздействием сил различной природы.

При воздействии на массив сезонных нагрузок следует ожидать, что будут зарегистрированы взаимосогласованные смещения, особенно в пределах одной станции. Рассчитанные коэффициенты корреляции приведены в табл. 2. Анализ данных таблицы свидетельствует, что не всегда наблюдается достаточно ясный, однозначно коррелированный отклик на воздействие сезонных напряжений даже по приборам одной станции. Кроме того, величины вертикальных и горизонтальных деформаций, регистрируемых приборами, находящимися на одной станции, могут существенно отличаться по величине. На станциях №1 и №3 преобладают вертикальные деформации, на станции №2, напротив, – горизонтальные.

Для протяженных склонов естественно предположение о наличии плоского деформированного состояния. В этом случае более объективной величиной, отражающей воздействие сезонных нагрузок, необходимо считать полную величину смещений (длина вектора относительных смещений), регистрируемую на каждой станции. Зная горизонтальные и вертикальные относительные смещения, подсчитывали полные относительные смещения (смещения приведенные к базам приборов) для каждого момента времени. На основе полученных таким образом временных рядов определяли сезонные амплитуды.

Приведенные графики дают представление и об амплитудах, регистрируемых отдельными приборами (рис. 1). Длина вектора смещения равна

$$u = \sqrt{u_c^2 + u_g^2} .$$

Амплитуды сезонных колебаний близки по величине и характеру поведения к амплитудам смещений, зарегистрированным отдельными приборами, которые имеют большую абсолютную величину на каждой станции. В частности, на станциях №1 и №3 они почти совпадают с вертикальными смещениями, а на станции №2 – с горизонтальными деформациями. Рассчитанные таким образом средние амплитуды сблизались по величине и составили: $A_1=(12,88\pm 3,50) \cdot 10^{-6}$, $A_2=(15,90\pm 4,52) \cdot 10^{-6}$,

$A_3=(1,789\pm 0,896)\cdot 10^{-6}$, $A_4=(9,88\pm 2,61)\cdot 10^{-6}$.
 Улучшилась их взаимосвязь. Экстремумы сезонных деформаций на каждой станции наблюдаются в одни и те же месяцы – февраль-март и август-сентябрь. Они согласуются с изменением внешней температуры, и повторяют ее с некоторым запаздыванием. По мере удаления от дневной поверхности период запаздывания увеличивается от 15 суток на рас-

стоянии 20÷25 м от поверхности склона до двух месяцев на расстоянии 70÷95 м. Амплитуды сезонных периодических деформаций соответственно уменьшаются по порядку величины от 10^{-5} до 10^{-6} , качественно совпадая с поведением необратимых смещений склона. Коэффициенты корреляции между смещениями и деформациями, зарегистрированными на каждой станции, возросли.

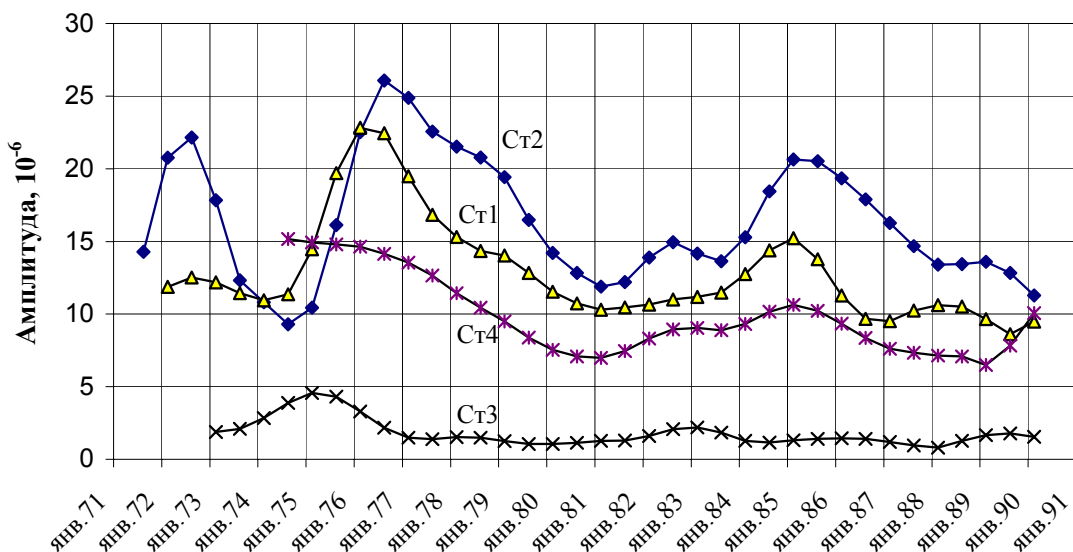


Рис. 1. Амплитуды сезонных смещений левого склона Токтогульской ГЭС

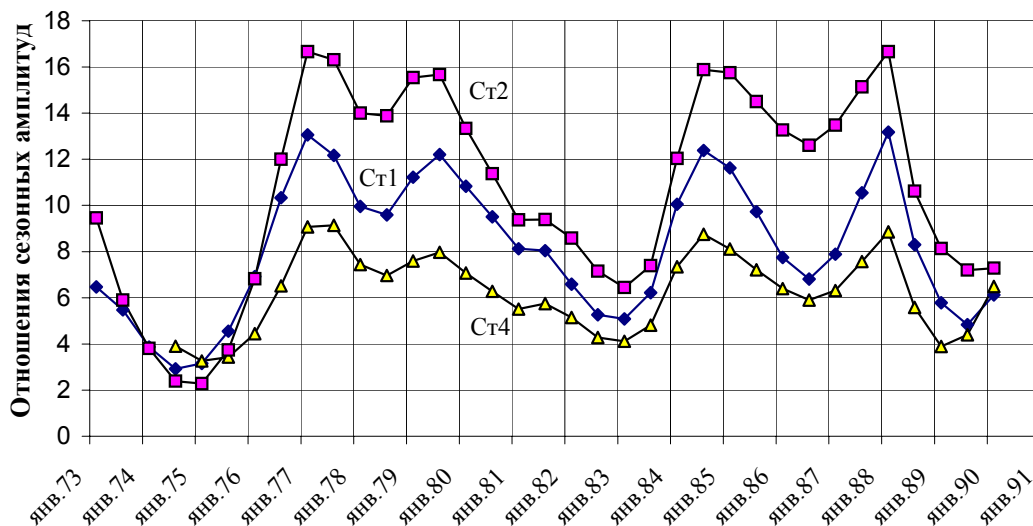


Рис. 2. Амплитуды сезонных смещений, приведенные к станции №3

Дополнительную информацию можно получить, анализируя отношения амплитуд, регистрируемых на каждой станции. Действительно, сезонные деформации обратимы (упруги). Следовательно, между дополнительно приложенной сезонной нагрузкой и регистрируемой деформацией существует связь $\Delta\sigma_i = E\Delta\varepsilon_i$, где E – коэффициент пропорциональности, в частном случае модуль Юнга, i – номер станции. Отсюда

$$\frac{\Delta\varepsilon_i}{\Delta\varepsilon_k} = \frac{E_k}{E_i} \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_k},$$

следовательно, полученные зависимости отношений амплитуд отражают зависимости между дополнительными сезонными нагрузками, действующими на различные станции (участки массива) и механическими свойствами этих участков массива горных пород. Приведем отношения амплитуд полных относительных смещений, полученных на станциях, расположенных в зоне разгрузки склона к амплитудам станции №3, расположенной в ненарушенном массиве, вне зоны влияния трещин бортового отпора (рис. 2). Визуальное наблюдение подтверждает высокую степень коррелированности кривых с повтором мелких деталей. Рассчитанные коэффициенты корреляции по величине составили $0,883 \pm 0,936$.

Дополнительные нагрузки, вызывающие обратимые сезонные смещения, связаны в ос-

новном с воздействиями вариаций годового хода температур и водонасыщенности массива, вследствие выпадения осадков. Эти воздействия сильны в поверхностных слоях, которые к тому же являются более слабыми в механическом плане в связи с процессами разгрузки и выветривания. При переходе в глубь массива, в его ненарушенную часть, они естественно уменьшаются (рис. 1). Все эти годы массив находился в устойчивом состоянии, т.е. заметных ослаблений склона или его частей не происходило. После завершения строительства гидроузла наиболее сильное влияние на состояние примыкающих к плотине склонов мог оказать режим Токтогульского водохранилища. Приведем значения уровня верхнего бьефа водохранилища с момента начала эксплуатации Токтогульской ГЭС (рис. 3). Резкое падение уровня в 1982 г. и увеличение в 1987–1988 гг. практически не отразилось на амплитудах сезонных деформаций. Напротив, более заметные изменения зафиксированы в периоды, когда уровень водохранилища оставался постоянным.

Поэтому отношения $\Delta\varepsilon_i/\Delta\varepsilon_k$ по существу ($E_k/E_i \approx const$) представляют собой отношения $\Delta\sigma_i/\Delta\sigma_k$, показывая, во сколько раз сезонные воздействия в поверхностных слоях превышают воздействия на глубинные участки склона в его ненарушенной части. Это подтверждают и

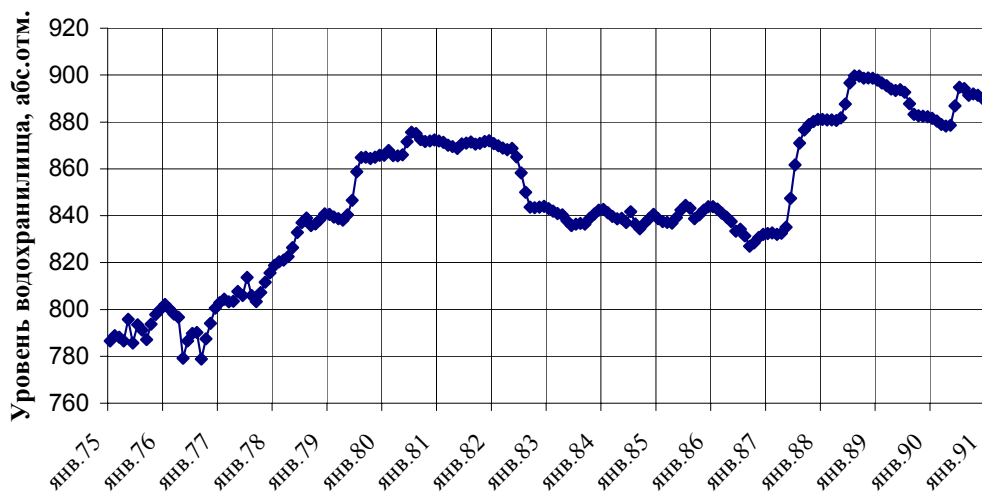


Рис. 3. Уровень водохранилища с начала эксплуатации Токтогульской ГЭС

данные анализа отношений амплитуд полных сезонных смещений, полученных на различных станциях, расположенных в зоне разгрузки. Они представляют собой практически постоянные величины: $A_2/A_1=1,252\pm 0,256$, $A_2/A_4=1,678\pm 0,408$, $A_2/A_1=1,326\pm 0,192$.

Таким образом, сезонные деформации, регистрируемые каждым прибором, имеют квазигармонический характер. Характер сезонных деформаций не постоянен, амплитуды меняются ежегодно и различны для разных приборов и станций. Высокая степень корреляции характерна для сезонных амплитуд (длин векторов) относительных смещений и, в особенности, для отношений амплитуд в зоне разгрузки к амплитудам в ненарушенном массиве. Отношения амплитуд сезонных деформаций, получаемых на станциях, расположенных в зоне разгрузки склона, имеют в естественном устойчивом состоянии постоянное значение. Полученные результаты указывают на возможность выявления взаимосогласованного отклика массива на сезонные нагрузки, которые после соответствующей доработки могут быть предложены в качестве одного из критериев устойчивости высоких скальных склонов.

В связи с этим представляет интерес проведение аналогичного исследования для лунно-солнечных приливов и деформаций земной коры при прохождении атмосферных фронтов. В обоих этих случаях величина возмущающего воздействия известна, что является положительным моментом, поскольку механизм возникновения сезонных нагрузок, как свидетельствуют полученные результаты, достаточно сложен, зависит от многих факторов и в настоящее время недостаточно изучен.

В результате исследования установлено, что мониторинг левобережного склона, на

участке основных сооружений Токтогульской ГЭС, в связи с известными событиями, был фактически прекращен в 1991 г. Начиная с 2000 г. ИФиМГП НАН приступил к восстановлению наблюдательных станций. К настоящему времени не на всех станциях проводятся исследования в полном объеме. Временные ряды после возобновления наблюдений на восстановленных станциях пока мало представительны. Несмотря на это, в целом результаты наблюдений деформаций, полученные в последние годы, согласуются с результатами наблюдений, проведенных до 1991 г. Необратимые деформации близки по порядку величины к смещениям, имевшим место на этапе стабилизации, после завершения строительства ГЭС и наполнения водохранилища, что свидетельствует об устойчивости контролируемого массива.

Литература

1. Степанов В.Я. Механика горных склонов. – Бишкек: Илим, 1992. – 192 с.
2. Латынина Л.А., Кармалева Р.М. Деформографические измерения. – М.: Наука, 1978. – 154 с.
3. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 757 с.
4. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
5. Децеровский А.В., Журавлев В.И., Сидорин А.Я. Некоторые алгоритмы фильтрации для геофизических временных рядов // Физика Земли. – 1996. – № 2. – С. 56–67.
6. Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Две модели сезонных вариаций геофизических полей // Физика Земли. – 2000. – № 6. – С. 14–25.