

УДК 624.131

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРАВОБЕРЕЖНОГО СКЛОНА ТОКТОГУЛЬСКОЙ ГЭС

Сыдыкова А.С., Эмильбеков Б.Э.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Приведена методика обработки данных включающая элементы теории временных рядов и прикладного регрессионного анализа.

Ключевые слова: трехосный щелемер, временные ряды, сезонная компонента, тренд, уравнение регрессии, критерий значимости Фишера.

ТОКТОГУЛ ГЭСИНИН ОҢ ЖЭЭГИНДЕГИ ЭҢКЕЙИШТИН ДЕФОРМАЦИЯСЫНЫН МОНИТОРИНГИНИН МААЛЫМАТТАРЫН ИШТЕТҮҮ МЕТОДИКАСЫ

Сыдыкова А.С., Эмильбеков Б.Э.

КР Улуттук илимдер академиясынын Геомеханика жана жер казынасын өздөштүрүү институту

Убактылуу катарлар теориясынын жана регрессиялык анализдин камтыган маалыматтарды иштетүүнүн техникасы келтирилген.

Баштапкы сөздөр: жарыктын үч аксиалдык өлчөгүчү, убакыт катарлар, сезондук компонент, тренд, регрессия теңдемеси, Фишердин маанилик тести

DATA PROCESSING OF DEFORMATION MONITORING THE TOKTOGUL HPP RIGHT-BANK SLOPE METHODOLOGY

Sydykova A.S., Emilbekov B.E.

Institute of Geomechanics and development of subsoil of the National academy of sciences of the Kyrgyz Republic

A data processing technique including elements of time series theory and applied regression analysis is presented.

Key words: triaxial slit gauge, time series, seasonal component, trend, regression equation, Fisher significance criterion.

Потенциально неустойчивый скальный массив 59-1 расположен на участке правобережного примыкания плотины Токтогульской ГЭС на отметках 920÷990м и представляет собой сформировавшееся оползневое тело (призму обрушения), отчлененное от основной скалы трещиной №715. Величина раскрытия трещины (десятки сантиметров) указывает на имевшие ранее место значительные необратимые подвижки вдоль подсекающей трещины №7. Объем массива составляет около 48 тысяч м³.

Согласно современным представлениям о процессе разрушения, обрушению должны предшествовать дестабилизация состояния массива, начало его смещения и переход смещения в экстремальный режим. Предполагается, что признаки дестабилизации, смещения и перехода смещения в экстремальный режим, могут быть выявлены по результатам инструментальных наблюдений.

Поэтому в 2013 г. на отметках 940 и 970м у основания и в верхней части массива 59-1 по отсекающей трещине 715 были установлены трехосные щелемеры фирмы NARI (КНР) предназначенные для измерения перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Измерения производятся один раз в неделю индикатором часового типа с ценой деления 0,01мм.

Проявлению крупных деформаций и, как следствие, обрушений, как правило, предшествуют микродеформации, развивающиеся в течение длительного времени. Скорости деформаций массивов горных пород на этой скрытой стадии малы и обычно эту стадию называют стабильным или **естественным состоянием** горного склона. Методически деформационный мониторинг массива 59-1 должен выявить это естественное состояние и характеризующие его численные значения параметров деформационного процесса.

Регистрируемые данные мониторинга представляют собой временные ряды, состоящие из детерминированных и случайной компонент. При

анализе данных необходимо различать необратимые и обратимые (упругие) деформации. К необратимым относятся естественные для крутых скальных склонов деформации разгрузки и ползучести, обусловленные постоянным действием гравитационных и тектонических сил. Именно они характеризуют естественное состояние оползневого склона. Сюда же относятся необратимые смещения (подвижки) призмы обрушения по поверхности скольжения при экстремальных динамических воздействиях. Ожидается, что необратимые перемещения призмы обрушения будут происходить вдоль поверхности скольжения, т.е. оползневое тело с течением времени будет смещаться вниз с соответствующим раскрытием трещины отрыва 715.

Обратимые деформации имеют самую разнообразную природу. Наиболее важными и значимыми среди них являются сезонные деформации с периодом в один год. Они связаны с годовым температурным и климатическим воздействием. Методически естественное состояние состоит из тренда и сезонной компоненты плюс возмущающие воздействия случайной компоненты: $y_t = x_t + s_t + z_t$. При этом делаются предположения, что сезонная компонента s_t повторяется из года в год, а случайная компонента z_t нормально распределена, равноточна (одинаковые дисперсии), имеет математическое ожидание равное нулю и некоррелирована. Оценка этих компонент осуществляется статистическими методами и, как следствие, появляется возможность прогноза временных рядов данных мониторинга. Отклонения текущих данных от прогнозируемых может служить признаком дестабилизации состояния массива.

Первым этапом анализа является выделение сезонной компоненты. В /1/ было выявлено, что естественное стабильное состояние передовой части блока 59-1 суть состояние покоя, $x_t = 0$. Поэтому временной ряд принимает вид суммы $y_t = s_t + z_t$ и сезонную компоненту можно выявить непосредственно /2/. Год состоит из 52 недель и сезонная компонента получается при суммировании всех данных мониторинга по каждой неделе.

Суть заключается в том, что, несмотря на большой разброс данных, исходные данные должны содержать в себе полезный сигнал. При суммировании $\sum z_t \rightarrow 0$ (математическое ожидание случайной компоненты равно нулю) и влияние случайного разброса существенно уменьшается. Поскольку оценки сезонных компонент для шести временных рядов статистические, то надо к ним добавить доверительные интервалы.

Сезонная компонента важна как для понимания регистрируемых деформационных процессов, так и, в первую очередь, возможностью прогнозирования численных значений временного ряда в будущем и, соответственно, построения методики оперативной (например, ежемесячной) оценке устойчивости по текущим данным. Как и следовало ожидать, сезонные компоненты оказались по форме близки к синусоидам, т.е. повторяют годовой ход температуры. Их удобно представить в виде таблиц, включающих номер недели года, величины сезонных деформаций и их доверительные интервалы.

Далее, отнимая из исходного ряда сезонную компоненту, получаем временной ряд содержащий тренд и случайную компоненту. Для выявления тренда и дальнейшего анализа используются методы прикладного регрессионного анализа. Расчеты можно проводить статистическими функциями приложения Microsoft Excel используя пакет «Анализ данных» или функцию ЛИНЕЙН. Здесь нам потребуются некоторые пояснения.

Напомним основные положения прикладного регрессионного анализа [3]. Уравнение регрессии должно обеспечить наилучшее соответствие аналитического выражения имеющимся экспериментальным данным, подверженным случайным воздействиям. В нашем случае, исходя из предположения, что наиболее вероятным видом необратимых медленных (тренд) движений призмы обрушения будут медленные перемещения вдоль поверхности скольжения, выбирается линейная модель $y = mx + b$, где x – время в неделях, y – показания щелемера. Неизвестные коэффициенты уравнения регрессии оцениваются на основе метода наименьших

квадратов. Точность аппроксимации с помощью прямой линии зависит от разброса данных, поэтому подсчитываются доверительные интервалы, в пределах которых находятся угловой коэффициент m и постоянный член b . Далее для каждой точки вычисляется квадрат разности между прогнозируемым значением y и фактическим значением y_i . Сумма этих квадратов разностей называется остаточной суммой квадратов $SS_{\text{ост}}$. Затем подсчитывается общая сумма квадратов $SS_{\text{общ}}$ и регрессионная сумма квадратов $SS_{\text{рег}} = SS_{\text{общ}} - SS_{\text{ост}}$. Чем меньше остаточная сумма квадратов, тем больше значение коэффициента детерминированности $R^2 = SS_{\text{рег}} / SS_{\text{общ}}$, который показывает насколько хорошо уравнение, полученное с помощью регрессионного анализа, объясняет взаимосвязи между переменными. В случае линейной регрессии корень квадратный из коэффициента детерминированности R^2 равняется коэффициенту корреляции r .

Далее, т.к. y_i – случайные величины, любая функция от них также будет случайной величиной. В частности, эти две функции $SS_{\text{рег}}$ – средний квадрат обусловленный регрессией и $SS_{\text{ост}}$ – средний квадрат, обусловленный остаточной вариацией, тоже будут случайными. Эти функции имеют свои собственные распределения, средние, дисперсии и моменты. В математической статистике доказывается, что отношение $F = SS_{\text{рег}} / SS_{\text{ост}}$ подчиняется F-распределению Фишера с (в случае линейной регрессии) одной и $(n-2)$ степенями свободы при условии нуль-гипотезы, что $\beta_1 = 0$. Этот факт можно теперь использовать как критерий выполнимости равенства $\beta_1 = 0$, путем сравнения вычисленного фактического значения F с табличной точкой $F(1, n-2)$ – распределения Фишера, т.е. производит оценку значимости этих параметров с использованием F – статистики Фишера. Статистический смысл термина значимость означает, что выявленная регрессионная зависимость проявляется сильнее, чем это можно было бы ожидать в случае чисто случайного временного ряда. Таким образом, основой статистических выводов прикладного регрессионного анализа является выделение и подсчет квадратов ошибок.

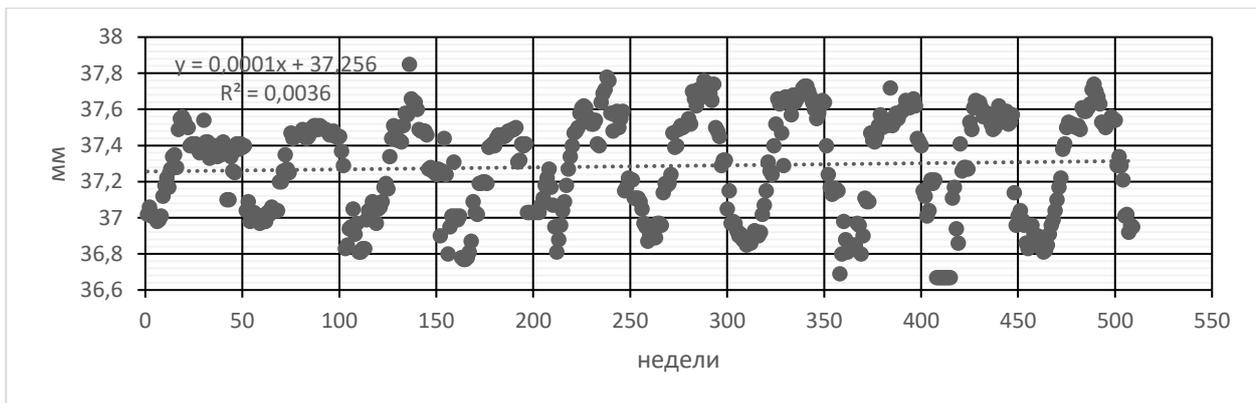


Рис.1 Перемещения поперек трещины, отметка 940м.

На рис.1 приведен временной ряд показаний щелемера перемещений поперек трещины №715 на отметке 940 м. Видно, что временной ряд содержит линейный тренд, сезонную и случайную компоненты. При этом случайная компонента автоматически входит в разброс данных относительно уравнения регрессии и в квадраты ошибок, уменьшая тем самым численное значение F – критерия Фишера. Поэтому сезонная компонента обязательно должна выявляться и исключаться из регрессионного анализа.

Сезонная компонента с периодом один год или 52 недели близка к синусоиде. Если обрабатываются ряды с кратным числом периодов, то математическое ожидание синусоиды остается постоянным и линейный коэффициент регрессии равен нулю, т.е. тренд отсутствует. При других объемах данных он появляется, причем его величина зависит от длины ряда. Кроме того, он появляется при наличии пропусков, возникающих из-за труднодоступности мест установки щелемеров, особенно на отметке 970м в зимнее время. При этом удаляется часть синусоиды с определенными весами, что приводит к появлению тренда (появлению линейного коэффициента регрессии) в сезонной компоненте. Поэтому необходимо убедиться, что процедура удаления сезонной компоненты не влияет на действительный тренд.

В уравнении линейной регрессии $y = mx + b$ угловой коэффициент m и свободный член b вычисляются по формулам:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}$$

Предположим, что наш временной ряд y состоит из двух компонент $y = y_1 + (y - y_1) = y_1 + y_2$, т.е. сезонной компоненты y_1 и остатка y_2 . Подставляя в формулы для коэффициентов регрессии получаем доказательство верности разложений $m = m_1 + m_2$ и $b = b_1 + b_2$. Отсюда следует, что сезонную компоненту действительно надо исключать при оценках тренда. Для наглядности и оценки ошибок округлений возникающих при массовых вычислениях /3/, приведем уравнения регрессий подсчитанных по данным временного ряда, сезонной компоненты и остатка, например, для перемещений поперек трещины на отметке 940 м :

временной ряд	$y = 0,000131022 \cdot x + 37,25320945$
сезон	$y = 0,000115251 x + 37,26088956$
остаток	$y = 1,5771E-5 x - 0,07680101$
ошибки округлений	$y - (y_1 + y_2) = 7,7927E-20 \cdot x - 3,92412E-14$

Видно, что Microsoft Excel производит вычисления практически без округлений, различия в оценках m появляются в двадцатом знаке после запятой, а в оценках b в четырнадцатом. Такой же порядок возникающих ошибок имеет место во всех временных рядах. Точность вычислений более чем достаточная.

Таким образом, целью деформационного мониторинга передовой части массива 59-1 является оценка его стабильного естественного состояния и методика обработки данных начинается с выделения сезонной компоненты. Затем, путем вычитания сезонной компоненты из исходных временных рядов получаем остатки. Эта процедура не вносит каких-либо ошибок в оценки присутствующего в рядах действительного тренда. Дальнейшая статистическая обработка производится над остатками, состоящими из тренда и случайной компоненты по методикам прикладного регрессионного анализа /3/. Оцениваются параметры уравнения регрессии, их стандартные отклонения, доверительные интервалы с

использованием распределения Стьюдента и производится оценки значимости уравнений регрессии с использованием F – статистики Фишера. Знание параметров тренда (уравнения регрессии) и обратимых сезонных деформаций позволяет прогнозировать поведение склона в стабильном естественном состоянии. Отклонения от прогноза в получаемых текущих данных могут быть признаком дестабилизации и потребуют в качестве первоочередной задачи по крайней мере увеличения частоты опроса.

Отнимая из остатка y_2 выявленный тренд выделяем случайную компоненту, которая используется для проверки его случайного характера, например, наиболее простым критерием случайности – подсчетом поворотных точек /2/, стандартных оценок характеристик описательной статистики, дисперсий, коэффициентов взаимных корреляций и автокорреляционных функций. Результаты анализа сезонной и случайной компонент, присутствующих в получаемых временных рядах и представляющих несомненный интерес с точки зрения понимания происходящих деформационных процессов и модернизации системы мониторинга значительны по объему и будут освещены в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыдыкова А.С., Эмильбеков Б.Э. Деформационный мониторинг правобережного склона Токтогульской ГЭС /Современные проблемы механики, вып. 41(3), 2020г, С.349-355
2. Кендал М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика, 1981, - 199с
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга1. М.: Мир, 1986 – 366с