

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 627.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДНЕСУТОЧНОГО РАСХОДА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ НА ПРИМЕРЕ ВОДОХРАНИЛИЩА ГИДРОУЗЛА ДЕЗ (ИРАН)

В.И. Елфимов, Хакзад Хамид

Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москве, Россия, 117923

Рассматриваются вопросы математического моделирования среднесуточного расхода взвешенных наносов на примере водохранилища гидроузла Дез (Иран). Полевые исследования по определению концентрации взвешенных наносов показали, что наибольшая концентрация наблюдалась в весенний сезон, а также в плотных потоках. Линейный анализ временных рядов подтвердил, что простое экспоненциальное сглаживание является подходящей моделью для решения данной задачи.

Ключевые слова: мутность потока, концентрация взвешенных наносов, заиление водохранилища, математическое моделирование.

Образование наносов в водохранилищах имеет негативные экономические и экологические последствия. Наносы, которые транспортируются водным потоком, делятся на взвешенные и донные. Взвешенные наносы составляют 90—95% от всего твердого стока, и поэтому этот процесс носит название «заиление». Процесс занесения объема водохранилища донными наносами происходит в основном с образованием в устье реки многорукавного русла и бара и в этой статье рассматриваться не будет.

Отложение наносов в верхнем бьефе на определенном этапе заиления настолько сокращает полезную регулируемую емкость водохранилища, что приводит к нарушению запланированного режима работы водозаборов и всей системы водоподачи. Поэтому прогноз срока заиления необходим для определения параметров водохранилища, своевременной разработки экономически целесообразных

режимов эксплуатации и мероприятий по уменьшению отложения наносов и восстановлению потерянных из-за наносов емкостей водохранилища, а также определения зон интенсивного выпадения наносов и их удаления с помощью земснарядов.

Концентрация взвешенных частиц в потоке, их расход являются ключевыми факторами, влияющими на качество работы водохранилища. Комплексный подход к тенденциям изменения расхода взвешенных наносов необходимых для анализа схем осадки донных отложений и системы заиливания водохранилища, он позволит разработать методику расчета заполнения водохранилища. Существуют различные методы построения прогнозов на практике: от отношения между расходом речного стока и расходом взвешенных наносов до количественных, основанных на математической статистике. Данное исследование осуществлялось с целью моделирования среднесуточного расхода взвешенных наносов в водохранилище гидроузла Дез на основе линейных моделей временных рядов на базе поля измерений, полученных на гидрометрических постах в течение декабря 2001 до июня 2002 г. Применение изучаемых статистических методов рассматривается в программе STATGRAPHICS Plus. Результаты моделирования на основе собранных фактических данных показывают, что наиболее подходящим методом является метод простого экспоненциального сглаживания как одного из видов линейных моделей временных рядов, подходящий для оценки расхода среднесуточных взвешенных наносов.

Сущность и основные методы прогнозирования. Одной из наиболее важных функций в управлении наносами в водохранилище плотины выступает прогнозирование. Главная задача прогнозирования при суточном расходе взвешенных наносов состоит в выявлении существенных закономерностей ее изменения и анализа донных отложений, притока и осаждения в водохранилище плотины Дез. Однако вне зависимости от вида прогноза процесс разработки любого из них включает, как правило, следующие этапы:

- 1) анализ динамики моделируемого показателя и выявление тенденций (тренда) изменения, циклической и сезонной составляющей и случайной компоненты;
- 2) отбор основных факторов, его определяющих, и исследование тенденций в их развитии;
- 3) обоснование метода прогнозирования и формы связи между переменными;
- 4) разработка прогноза и объективизация полученных результатов, то есть расчет ошибок и доверительных интервалов прогнозов;
- 5) содержательная интерпретация полученных результатов и их корректировка.

Для изучения методического аппарата прогностики целесообразно с самого начала детализировать это широкое понятие. Методы прогнозирования разделяются на две подгруппы: 1) простые и 2) комплексные. При этом под простым методом прогнозирования понимается метод, не разложимый на еще более простые методы; под комплексным — метод, состоящий из взаимосвязанной совокупности нескольких простых.

В данном исследовании мы проанализировали различные линейные модели временных рядов и затем на основе фактических данных выбрали, как мы считаем, подходящие модели — случайного блуждания, средней, линейного тренда, простого экспоненциального сглаживания, линейного экспоненциального сглаживания Брауна, линейного экспоненциального сглаживания Хольта и ARIMA-модель.

Полевые исследования водохранилища гидроузла Дез. Загрос на юго-западе Ирана (рис. 1). Сооружение было построено в 1963 г. с крупным русловым водохранилищем объемом $3,315 \text{ км}^3$. За период эксплуатации (40 лет) объем водохранилища был занесен илом до $0,65 \text{ км}^3$, что составило 19% от полного объема водохранилища и приблизительно равно его мертвому объему. Большая часть взвешенных и практически все донные наносы выпадают в верхней части водохранилища, формируя многорукавные устьевые участки, называемые дельтой. За дельтой образуется мелководный участок, называемый баром и заканчивающийся свалом глин.

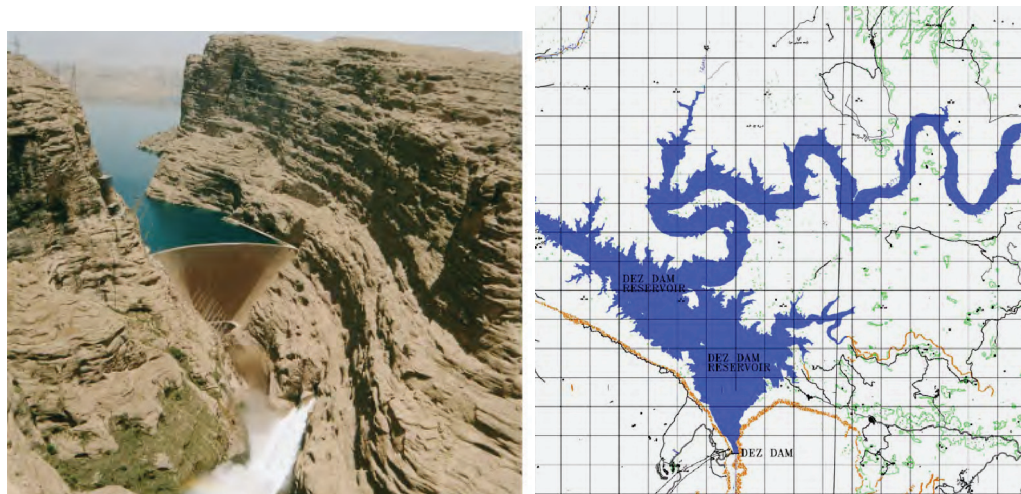


Рис. 1. Гидроузел Дез (Иран)

Гидроузел ДЭЗ комплексного значения (энергетика и ирригация) расположен в горах.

Программа полевых измерений в водохранилище состоит из следующих этапов: 1) с 1955 по 1999 г. измерялся только расход воды; 2) с 26 декабря 2001 г. до 8 июня 2002 г. проводились измерения расхода воды и определялась концентрация взвешенных веществ; 3) с 9 декабря 2002 г. до 24 июня 2003 г. измерялись скорости течения на вертикальных профилях, определялось направление движения потока, температура воды, параметры мутности потока на ежедневной основе для определения концентрации взвешенных наносов. Гидрометрическая станция по измерению мутности потока (концентрации взвешенных наносов), известная как станция Тале Занг, является одной из станций, построенных в верховье гидроузла Дез, она удалена на 20 км от места расположения плотины.

Измерение концентрации взвешенных веществ было сделано в соответствии с методом Американского общества по испытанию материалов (ASTM) — метод D5907. Данные методы испытаний распространяются на определение содержания взвешенных твердых частиц (TSS) в питьевой воде, поверхностных и соленых водах, а также в бытовых и промышленных стоках. Диапазон концентрации взвешенных веществ, который можно измерить с помощью этого метода, составляет 4—20 000 мг/л.

На графике (рис. 2) видно, что концентрация взвешенных наносов увеличивалась ко дну потока и составила наибольшее значение при безразмерной глубине $z/H \approx 0,7—0,9$. Эти значения находятся примерно в пределах 5—8 г/л. Такая концентрация взвешенных наносов наблюдалась в плотных потоках, являлась наибольшей в водохранилище и составила в среднем 7 г/л. Плотный поток переносит около 13% всех взвешенных наносов, поступающих ежегодно в водохранилище.

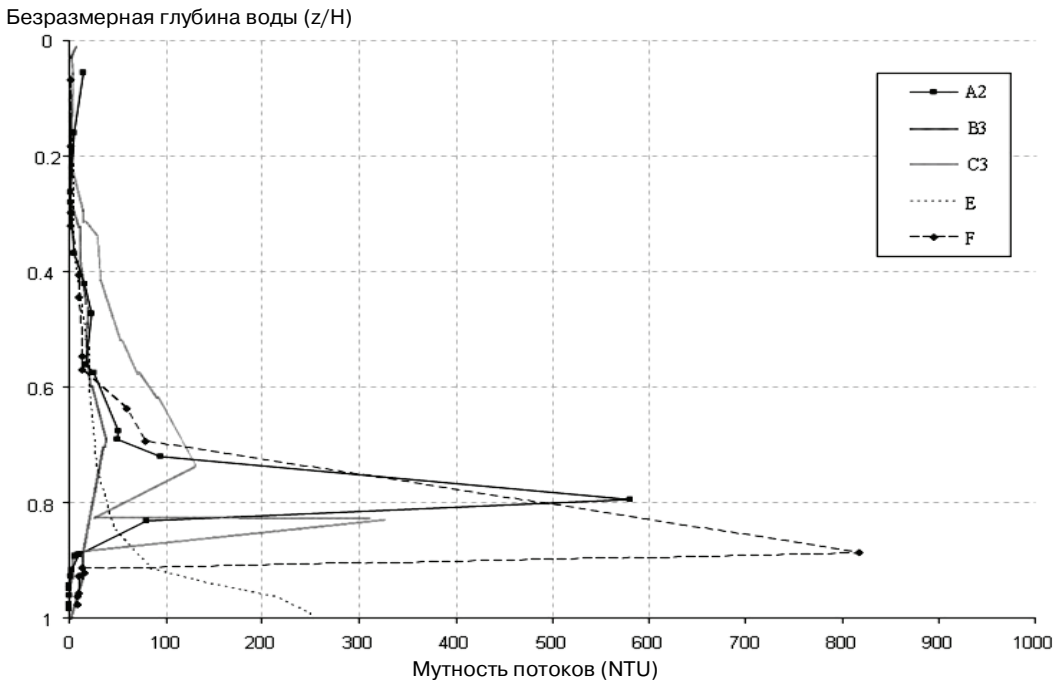


Рис. 2. Мутность потоков (NTU) в 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 от максимальной глубины на станции A2, B3, C3, E и F

Результаты линейного анализа временных рядов. Основное внимание при изучении результатов осуществленных прогнозов следует уделять оценке адекватности построенных моделей. Критериями данной оценки являются следующие показатели: ME — средняя арифметическая ошибка, MSE — средняя квадратическая ошибка, MAE — средняя абсолютная ошибка, MAPE — средняя абсолютная процентная ошибка, MPE — средняя процентная ошибка, RMSE — стандартная ошибка остатков (табл. 1).

Таблица 1

Model	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE	AIC
(A)	41 768.8	18 858.4	43.3169	1.01956E-12	-22.8842	21.2608
(B)	56 080.1	40 539.2	173.613	-1.096E-11	-144.448	21.8691
(C)	55 789.6	39 664.1	166.236	1.38519E-10	-137.915	21.8713
(H)	38 584.1	18 554.1	46.6406	-172.815	-29.6104	21.1212
(I)	40 885.3	21 196.6	53.7452	126.498	-18.894	21.2371
(J)	38 827.1	18 384.7	45.3091	2562.14	-15.7663	21.1464
(M)	38 036.4	19 550.2	62.0896	212.588	-46.9768	21.1306
(N)	37 901.5	19 265.1	60.6623	264.103	-45.4456	21.1361
(O)	37 690.4	19 312.4	61.0463	232.835	-45.4051	21.1376
(P)	38 457.0	18 872.5	48.6562	-230.276	-31.9443	21.1399
(Q)	38 566.7	18 927.0	47.0405	-185.491	-28.3861	21.1456

(A) случайное блуждание, (B) постоянная средняя = 49 091.3, (C) линейный тренд = $-2.97122E6 + 158.409 t$, (H) простое экспоненциальное сглаживание с Альфа = 0.5228, (I) линейного экспоненциального сглаживания Брауна с Альфа = 0.2568, (J) линейного экспоненциального сглаживания Хольта = 0.5115 и бета = 0.0013, (M) авторегрессионное интегрированное скользящее среднее (autoregressive integrated moving average, ARIMA) -ARIMA(1,0,1) с постоянным (N) ARIMA(1,0,2) с постоянным (O) ARIMA(2,0,2) с постоянным (P) ARIMA(0,1,2) (Q) ARIMA(2,1,0)

В дополнение к вышеперечисленным параметрам адекватности оценивания моделей проводятся следующие тесты: RUNS — тест на чрезмерное количество пиков и впадин в последовательности анализируемого ряда: RUNM — тест на чрезмерное количество отклонений от медианы, AUTO — тест на чрезмерную автокорреляцию, MEAN — тест на существенность разностей средних, определяющий тенденцию среднего значения, VAR — тест на существенность разностей дисперсий, позволяющий установить тенденцию вариабельности (табл. 2).

Таблица 2

Model	RMSE	RUNS	RUNM	AUTO	MEAN	VAR
(A)	41768.8	OK	OK	*	OK	***
(B)	56080.1	***	***	***	***	***
(C)	55789.6	***	***	***	***	***
(H)	38584.1	***	***	OK	OK	**
(I)	40885.3	***	***	OK	OK	*
(J)	38827.1	***	***	OK	OK	**
(M)	38036.4	***	***	OK	OK	**
(N)	37901.5	*	***	OK	OK	***
(O)	37690.4	OK	OK	OK	OK	**
(P)	38457.0	OK	***	OK	OK	**
(Q)	38566.7	OK	*	OK	OK	**

OK = недостоверно ($p \geq 0.05$)

* незначительно достоверно ($0.01 < p \leq 0.05$)

** достоверно ($0.001 < p \leq 0.01$)

*** значительно достоверно ($p \leq 0.001$)

В качестве информационного критерия для построения прогноза исследуемого временного ряда был выбран байесовский критерий Акайке (AIC).

Как видно из табл. 2, моделью, имеющей наименьшее значение информационного критерия Акайке (AIC), является модель простого экспоненциального сглаживания с Альфа = 0.5228.

Более адекватной является модель простого экспоненциального сглаживания с Альфа = 0.5228. Эта модель имеет наименьшие значения RMSE (стандартная ошибка остатков) = 38584.1, MAE (средняя абсолютная ошибка) = 18 554.1 и MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) = 46.6406. Также эта модель обладает достаточно низкими значениями средней арифметической ошибки (ME = 172.815) и средней процентной ошибки (MPE = -29.6104).

Первые три статистики измеряют тенденцию величины ошибок у лучшей модели — наименьшее значение этих статистик. Последние два параметра отражают смещение остатков, здесь лучшим результатом являются значения, максимально приближенные к нулю. Как видно из параметров модели квадратического тренда, данная модель является оптимальной относительно вышперечисленных параметров и имеет достаточно низкий критерий Акайке (21.1212), что также является важным условием при выборе оптимальной модели для прогнозирования. Более того, как было сказано ранее, эта модель проходит все пять тестов на адекватность — RUNS, RUNM, AUTO, MEAN и VAR.

Экспоненциальная средняя вычисляется по рекуррентной формуле

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha)S_{t-1},$$

где S_t — значение экспоненциальной средней в момент t ; S_{t-1} — значение экспоненциальной средней в момент $(t = 1)$; Y_t — значение экспоненциального процесса в момент t ; α — вес t -го значения ряда динамики (или параметр сглаживания).

Что касается начального параметра S_0 , то в задачах его берут или равным значению первого уровня ряда y_1 , или равным средней арифметической нескольких первых членов ряда.

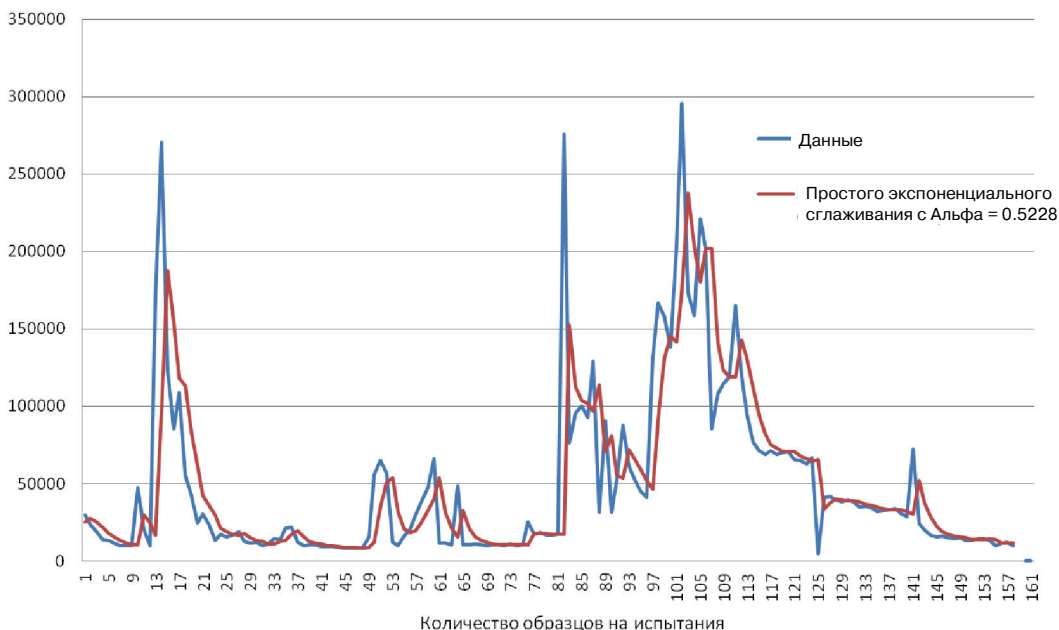


Рис. 4. Расход взвешенных наносов (т/сут.) в водохранилище Дез с 26.12.2001 (1) по 14.07.2002 (161)

Широкое использование разнообразных методов прогнозирования является перспективным направлением совершенствования расчетов поступления взвешенных наносов в водохранилища. Данная работа выявила, что простое экспоненциальное сглаживание является подходящей моделью для моделирования среднесуточного расхода взвешенных наносов в водохранилище гидроузла Дез. Таким образом, на основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1) результаты сопоставления, полученные с помощью простого экспоненциального сглаживания всех данных для сухого и влажного периодов с фактическими данными, в основном похожи;

2) большая часть расхода взвешенных наносов приходится на штормовые дни и согласно метеорологическим данным станции Дез наилучшим временем для подобного исследования является ноябрь текущего года по май следующего;

3) концентрация взвешенных твердых частичек связана с сезонными колебаниями. Наносов было значительно больше в течение весны и меньше в другие времена, особенно в период падения уровня воды. Сезонность изменения концентраций взвешенных наносов в потоке непосредственно связано с сезонностью изменения стока.

MODELING OF THE AVERAGE DAILY TOTAL SUSPENDEDE SOLIDS (TSS), ENTERING DEZ DAM RESERVOIR (IRAN)

V. Elfimov, Hamid Khakzad

Departments of hydraulic structures
Engineering faculty

Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 117923

One part of water quality, total suspended solids (TSS), is a reliable indicator of other pollutants, particularly nutrients and metals that carried on the surfaces of sediment in suspension. In practice, there are various models are used for modeling and prediction TSS entering reservoirs; model from: a relationship between water discharge and TSS, to a use complex statistical models. In this study, the performances of linear time series models for forecasting TSS entering Dez dam reservoir, were investigated. Many studies in recent years show that this type of model is an appropriate approach to predict TSS (Huixin. C, Dyk. P. 1996, 1998, Owens S. A etd. 2013). A random study conducted from Jan 2002 to July 2003 in Dez dam reservoir. STATGRAPHICS Plus software, are used for modeling and analyzing data to determine the best possible linear time series models. Results indicate that the simple exponential smoothing model, is the most efficient novel approach with an acceptable range of error, can be used successfully for forecasting TSS entering Dez dam reservoir.

Key words: the turbidity, flow, concentration of suspended sediment, sedimentation reservoir, mathematical modeling.