

УДК 555.06+556.555.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕРА АРПИ

А. А. БАТМАЗОВА *

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

Работа посвящена моделированию уровня озера-водохранилища Арпи. Используется аппарат множественной линейной регрессии, с помощью пошагового исключения предикторов подбирается статистически адекватная и физически обоснованная модель. В статье описывается возможность замены атмосферных осадков как функции влияния на уровень воды на косвенные факторы, такие как, например, относительную влажность воздуха. Модель выводится по стандартизированным данным с месячной дискретностью, приводится оценка эффективности модели на зависимом и независимом материале.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.175>

Keywords: Lake Arpi, water level regime, regression analysis, air humidity, probabilistic model.

Введение. Озеро Арпи расположено в Ширакской области и является вторым по величине пресноводным озером Армении. В него впадает большое количество рек, стекающих со склонов окрестных гор. Вытекает из озера р. Ахурян. В окрестностях озера выклинивается много родников [1]. В период 1946–1950 гг. объем озера был искусственно увеличен и оз. Арпи стало водохранилищем с плотиной у истока р. Ахурян. Создание водохранилища поспособствовало увеличению орошаемых территорий. Воду получают земли Ширакской равнины, Верхнеахурянской котловины, а также Талинский и Армавирский каналы, обеспечивается нормальная работа Гюмрийской ГЭС [2], развивается рыбоводство. Однако, существенное изменение с течением лет гидрологического режима озера [3], возможные засухи, вызывающие пересыхание питающих озеро рек [4], и сейсмическая активность рассматриваемого региона [5, 6], сказывающиеся на уровне озера-речных систем и, как следствие, на функционировании предприятий-потребителей воды, заставляют задуматься о необходимости моделирования уровня озера-водохранилища Арпи.

Цель исследования. Уровень режим водоемов и водотоков напрямую связан с метеорологическими процессами, а именно, с выпадением

* E-mail: batmazovaa@mail.ru

осадков. Ввиду сложности прогнозирования последнего, что связано с особенностями орографии региона, в статье исследуется взаимосвязь уровней воды с метеорологическими величинами, являющимися причиной образования осадков, чтобы в дальнейшем была возможность представить вероятностный прогноз возникновения атмосферных процессов (циклонов), приводящих к осадковпадению [7, 8].

Материалы и методы исследования. Исходным материалом послужили ретроспективные данные гидрометеорологической сети Республики Армения. На рис. 1 представлена карта-схема речных гидрологических постов (ГП), озерных гидрологических постов (ОГП) и метеорологических станций (МС), задействованных в исследовании. По представленным на рис. 1 ОГП, ГП и МС были собраны данные наблюдений с месячной дискретностью за период 1961–1962 гг.

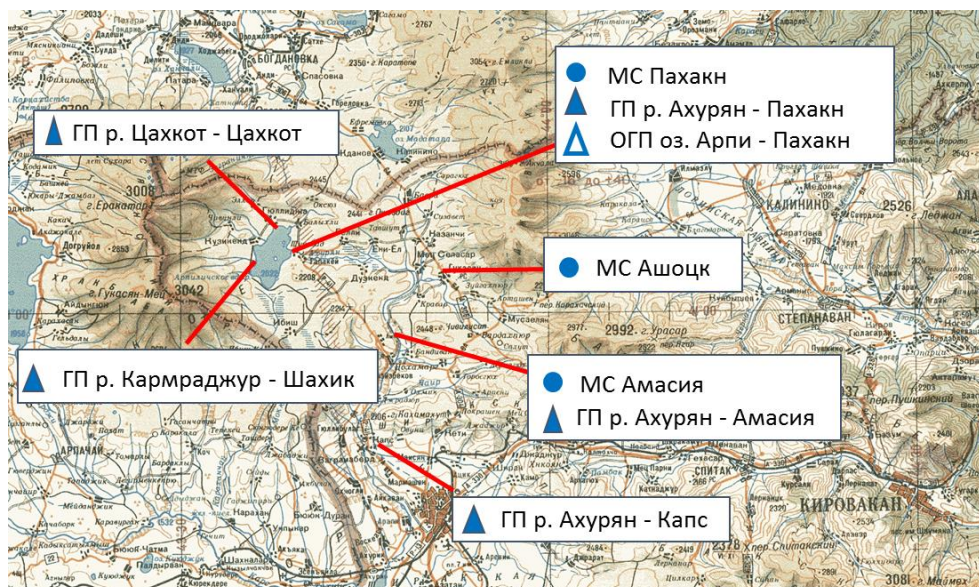


Рис. 1. Карта-схема гидрометеорологической изученности оз. Арпи.

База данных содержит следующие гидрометеорологические величины: среднемесячные уровни воды оз. Арпи – Пахакн ($H_{оз}$), р. Цахкот – Цахкот ($H_{пр1}$), р. Кармраджур – Шахик ($H_{пр2}$), р. Ахурян – Пахакн ($H_{отт1}$), р. Ахурян – Амасия ($H_{отт2}$), р. Ахурян – Капс ($H_{отт3}$); среднемесячная температура воздуха (T), атмосферное давление на уровне станции (P_0), относительная влажность воздуха (U), среднемесячное количество облачности нижнего яруса (Cld) по МС “Пахакн”, “Амасия” и “Ашоцк”, которые отбирались с помощью авторской программы HMDistance по ближайшему расстоянию, а после составлялась корреляционная матрица, чтобы определить, какие метеорологические величины и с какой МС лучше коррелируют с уровнями воды оз. Арпи (рис. 2).

Цель исследования достигалась посредством использования аппарата множественной линейной регрессии. Поскольку рассматриваемая гипотеза о возможности замены атмосферных осадков на осадкообразующие величины уже проверялась автором на примере других озер [9], то поэтапный отбор предикторов в данном исследовании можно пропустить.

Из основного набора предикторов – $H_{пр1}$, $H_{пр2}$, $H_{отт1}$, $H_{отт2}$, $H_{отт3}$, P_0 , Cld – составляются стандартизированные линейные регрессионные уравнения вида:

$$y = \beta_1 z_1 + \dots + \beta_n z_n, \quad (1)$$

где y – искомая функция уравнения; β_1, \dots, β_n – стандартизированные параметры регрессии; z_1, \dots, z_n – предикторы уравнения, влияющие на функцию отклика.

Оптимальной будет являться модель с минимальной в рамках физической обоснованности стандартной ошибкой и достаточно высоким коэффициентом детерминации $R^2 > 0,6$ [10].

Оценить вклад каждого предиктора и адекватность модели можно с помощью метода пошагового исключения предикторов, который заключается в оценке модели на каждом шаге после каждого исключения из нее переменных.

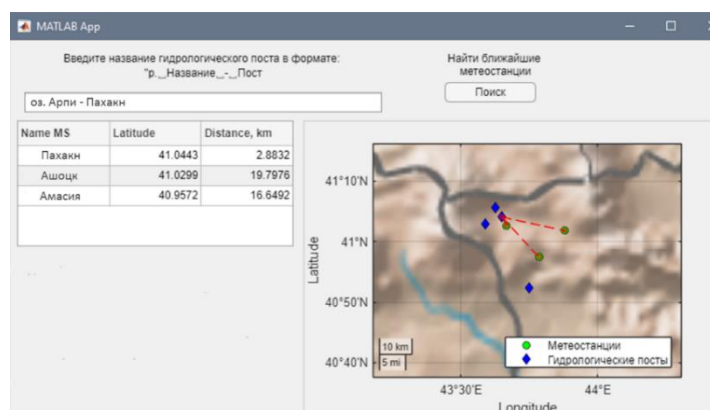


Рис. 2. Пример работы программы HMDistance по подбору МС.

Результаты и их обсуждение. В таблице представлены результаты применения метода пошагового исключения предикторов.

Статистические оценки параметров стандартизированного регрессионного уравнения месячного уровня воды оз. Арпи в зависимости от гидрометеорологических характеристик за 1961 г.

Шаг	Предиктор	R^2	ΔR^2	F	σ	p -level
–1	P_02	0,929	–0,002	4,98	0,51	0,847
–2	$H_{отт2}$	0,926	–0,003	7,17	0,45	0,715
–3	$H_{пр1}$	0,924	–0,002	10,13	0,41	0,747
–4	$H_{отт3}$	0,883	–0,041	9,04	0,46	0,161
–5	P_03	0,841	–0,042	9,27	0,49	0,195
–6	$Cld3$	0,779	–0,062	9,40	0,55	0,142

Примечание: P_02 – атмосферное давление на уровне станции Ашоцк; P_03 и $Cld3$ – атмосферное давление и облачность нижнего яруса МС “Пахакн”.

Можно увидеть, как происходит последовательное исключение предикторов из модели. Видно, что при исключении параметров 1–6 коэффициент детерминации R^2 постепенно незначительно убывает, интенсивность его убывания можно отследить по параметру ΔR^2 , который является разностью между коэффициентами детерминации на соседних шагах. Критерий Фишера F заметно возрастает до третьего шага, на четвертом шаге происходит резкое понижение, после чего F снова идет на повышение и в несколько раз превышает критическое значение $F_{кр} = 4,07$, что говорит о статистической значимости уравнения; средняя квадратическая ошибка σ также убывает до третьего шага, а после отмечается постепенное незначительное увеличение, но не превышает критическое значение $\sigma_{кр} = 2,26$. Критерий p -level стабильно убывает вплоть до шестого шага и достигает соблюдения условия $p\text{-level} < 0,05$ на седьмом шаге (в таблице не указан), на котором и формируется итоговое регрессионное уравнение.

Таким образом, регрессионное уравнение для моделирования месячных уровней воды оз. Арпи, полученное по данным с месячной дискретностью за 1961 г., имеет вид:

$$H_{оз} = -0,60P_{01} + 0,49H_{отт1} + 0,41H_{пр2}, \quad (2)$$

Проверка модели производилась на независимом материале – по данным за 1962 г.

Оценка уравнения на эффективность осуществлялась с помощью критериев S/σ (где S – среднеквадратическая погрешность, σ – среднеквадратическое отклонение моделируемой величины относительно среднего значения) [11] и зарубежному критерию NSE (критерий Нэша-Сатклиффа), который изменяется от 0 до 1, и ситуация, в которой $NSE = 1$, говорит о том, что смоделированные значения идеально сопоставимы с фактическими [12].

Итак, коэффициент детерминации уравнения (2) $R^2 = 0,78$ показывает, что 78% изменчивости функции отклика описывается полученной моделью.

Для периода параметризации (1961 г.) критерий $S/\sigma = 0,47$, что удовлетворяет условию $S/\sigma \leq 0,70$ при $n \leq 15$. Обеспеченность, которая определяется по формуле $P = (n'/n)100$, (где n' – количество смоделированных значений с погрешностью, меньшей допустимой, n – количество всех смоделированных значений), составляет $P = 83\%$. Критерий $NSE = 0,78$, что также является хорошим показателем эффективности модели.

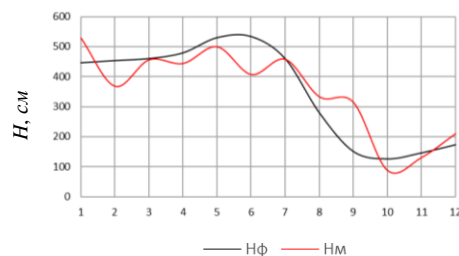


Рис. 3. График изменений фактических и смоделированных уровней воды оз. Арпи за период параметризации (1961 г.).

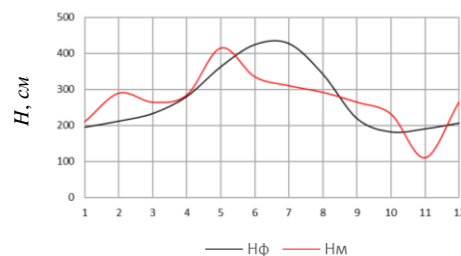


Рис. 4. График изменений фактических и смоделированных уровней воды оз. Арпи за проверочный период (1962 г.).

Проверка на независимом материале (1962 г.) также дала неплохие результаты. Критерии S/σ и NSE равны 0,72 и 0,84 соответственно, обеспеченность $P = 67\%$, что, в целом, можно считать удовлетворительным результатом, учитывая небольшую длину ряда периода параметризации.

На рис. 3–4 представлены графики хода фактических и смоделированных месячных уровней воды оз. Арпи за период параметризации и за проверочный период. Можно увидеть, что смоделированные уровни в целом повторяют ход фактических уровней: периоды подъема и спада хорошо улавливаются, но ход не такой плавный, как у фактических значений.

Заключение. Применение метода множественной линейной регрессии, а именно метода пошагового исключения переменных, позволило подобрать оптимальные предикторы регрессионного уравнения для моделирования месячных уровней воды оз. Арпи.

Результаты оценки эффективности полученного уравнения показали, что допустимой является замена такого стокоформирующего фактора, как атмосферные осадки, на атмосферное давление. Но стоит учитывать, что это может быть справедливым только для рассматриваемого в исследовании водного объекта, поскольку образование осадков на территории Республики Армения связано с различными факторами – район исследования относится к району с преобладающими в образовании осадков внутримассовыми процессами [13]. Учет параметров, обуславливающих выпадение осадков в том или ином орографически сложном районе, может способствовать выпуску вероятностных прогнозов, основанных на атмосферных процессах.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 15.05.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ресурсы поверхностных вод СССР*. Т. 9., вып. 2: *Бассейн р. Аракса* (под ред. А.П. Муранова). Москва, Гидрометеиздат (1973), 471.
2. Маргарян В.Г. Динамика летне-осеннего меженного стока впадающих в водохранилище Арпи малых рек в контексте глобального изменения климата. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. *Тр. VI Междунар. науч.-практ. конф.* (Пермь, 29 мая–1 июня 2017 г.). Т. 1: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами (науч. ред. А.Б. Китаев, О.В. Ларченко, С.А. Двинских). Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т (2017), 111–115.
3. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Армении в 2002 г. (под ред. К. Даниелян). Ереван (2003), 141.
4. Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием в Армении (под ред. С. Балоян). Ереван (2002), 193.
5. Саргсян Г.В., Абгарян Г.Р. и др. *Землетрясения Северной Евразии*. Вып. 23. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН (2020), 61–67.
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.05>
6. Манукян Л.В., Маргарян Ж.С. и др. Анализ результатов современного геодезического мониторинга земляных дамб некоторых водохранилищ Республики Армения. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* 57 (2023), 10–19.
<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2023.57.1-2.010>

7. Суренян Г.Г., Хоецян А.В. и др. Погодные условия на территории Армении при проникновении южного циклона. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* **44** (2010), 30–35.
<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2010.44.2.030>
8. Батмазова А.А., Решин Н.А. Определение повторяемости метеорологических величин для построения вероятностной модели. *ИнжГидро-2025. Матер. международ. научно-практической конф. по инженер. гидрологии*. Санкт-Петербург (2025).
9. Батмазова А.А., Гайдукова Е.В. Построение регрессионных моделей для оценки уровня озера Северо-Запада России. *Гидрометеорология и экология* **78** (2025).
10. Малинин В.Н., Гордеева С.М. *Физико-статистический метод прогноза гидрологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна)*. Мурманск, ПИНРО (2003), 129.
11. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. *Гидрологические прогнозы*. Санкт-Петербург, изд-во РГГМУ (2007), 436.
12. Сумачев А.Э. Оценка возможности прогнозирования максимального ледоходного уровня воды с использованием максимальной толщины льда на примере рек бассейна Северной Двины. *Ученые записки РГГМУ. Научно-теоретический журнал* **54** (2019), 48–57.
13. Геворгян А.М. Синоптические условия образования обильных и максимальных осадков в Армении. *Труды ГГО* **562** (2010), 127–138.

Ա. Ա. ԲԱՏՄԱԶՈՎԱ

ԱՐՓԻ ԼՃԻ ՋՐԻ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՌԵԺԻՄԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Աշխատանքը նվիրված է Արփի լիճ-ջրամբարի ջրի մակարդակի ռեժիմի մոդելավորմանը: Օգտագործվում է բազմակի գծային ռեգրեսիա. պրեդիկտորի փուլային բացառմամբ ընտրելով վիճակագրորեն համարժեք և ֆիզիկապես հիմնավորված մոդել: Հոդվածում նկարագրվում է մթնոլորտային տեղումների փոխարինման հնարավորությունը՝ որպես ջրի մակարդակի վրա ազդեցության անուղղակի գործոնի ֆունկցիա, ինչպիսիք են օդի հարաբերական խոնավությունը: Մոդելը ստացվել է ամսական դիսկրետությամբ ստանդարտացված տվյալներից: Մոդելի արդյունավետությունը գնահատվում է կախյալ և անկախ նյութերի հիման վրա:

A. A. BATMAZOVA

MODELING THE WATER LEVEL REGIME OF LAKE ARPI

Summary

The work is devoted to modeling the level regime of the Arpi Lake-reservoir. The multiple linear regression apparatus is used, with the help of step-by-step exclusion of predictors, a statistically adequate and physically justified model is selected. The article describes the possibility of replacing atmospheric precipitation as a function of the influence on the water level with indirect factors such as relative air humidity. The model is derived from standardized data with monthly discreteness, an assessment of the model's effectiveness is given on dependent and independent material.