

**К УТОЧНЕНИЮ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА
ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО
МОРЯ****В. Н. Малинин, Р. Т. Сафар***Российский государственный гидрометеорологический университет*

На основе физико-статистического метода предложено две модели долгосрочного прогноза среднегодового морского уровня в г. Баку. Для первой модели предикторами служат значения уровня моря в Баку в декабре за два предшествующих года. Во второй – значения уровня, эффективного испарения над Каспием и аномалии температуры воздуха северного полушария за предшествующий год. Показано, что стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным в первом случае составляет 6,2, а во втором – 5,9 см/год, что вполне приемлемо с практической точки зрения.

С учетом огромного экономического значения Каспийского моря и его прибрежной инфраструктуры проблема долгосрочного прогноза уровня, несомненно, относится к числу наиболее актуальных проблем гидрометеорологии. Современная наука оказалась не в состоянии предсказать длительную многоводную серию, начавшуюся в 1978 г. и вызвавшую подъем уровня более чем на два метра. В результате этого подъема все созданное человеком в прибрежной полосе подверглось затоплению или подтоплению. Экономический ущерб от этого даже по весьма приближенным оценкам составляет не менее 2 млрд. долларов [1].

На наш взгляд, главной причиной неудачных прогнозов следует считать отсутствие до последнего времени адекватных физических представлений о природе формирования межгодовой изменчивости уровня моря. Только в начале 90-х годов XX столетия была достаточно достоверно установлена преимущественно климатическая обусловленность межгодовых колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) и предложена концептуальная модель их формирования [2], суть которой сводится к следующему.

Если вследствие процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике эффективное испарение (разность между испарением и осадками) оказывается в холодный период выше нормы, то большее количество атмосферной влаги будет переноситься в си-

стеме преобладающего зонального переноса на континент и соответственно большее количество осадков должно выпасть в бассейне Волги. Следовательно, происходит увеличение ее годового стока и наблюдается положительное приращение уровня моря. Обратная картина отмечается при ослаблении эффективного испарения в Северной Атлантике, когда в бассейне Волги выпадает меньшее количество осадков, что приводит к уменьшению годового стока и отрицательным приращениям уровня. Итак, процессы крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы по существу определяют межгодовые колебания УКМ, которые можно рассматривать как интегральный индикатор влагообмена в системе океан-атмосфера-суша [2].

Данная концептуальная модель формирования межгодовых колебаний УКМ послужила основой разработки физико-статистического метода его долгосрочного прогноза. Суть его состоит в том, что вначале устанавливаются физические связи функции отклика с определяющими факторами, а затем уже на статистической основе строится прогностическая модель, заблаговременность которой зависит от инерционности воздействующих на изучаемый процесс факторов. При этом статистическим аппаратом для решения указанной задачи обычно служит классический метод множественной регрессии. В общем случае прогностическую схему для УКМ можно разбить на три последовательных этапа: 1 – прогноз стока Волги, 2 – прогноз изменений объема моря, 3 – прогноз УКМ.

Основная рабочая гипотеза применительно к прогнозу стока Волги формулируется следующим образом: накопление влаги (общее увлажнение) в бассейне за два предшествующих началу половодья года практически полностью определяет речной сток в его замыкающем створе до начала следующего половодья. Естественно, главное влияние на сток оказывает первый предшествующий год. Влияние второго года сказывается главным образом в аномальные по характеру увлажнения годы. В результате прогностическая модель стока Волги может быть записана в следующем виде

$$Q_i = f \left\{ \sum_{k_1}^{k_1} P_{i-1}, \sum_{k_2}^{k_2} (P-E)_{i-1}, \sum_{k_1}^{k_1} P_{i-2}, \sum_{k_2}^{k_2} (P-E)_{i-2} \right\}, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – сумма месяцев в холодный (октябрь-март) и теплый (апрель-сентябрь) периоды года соответственно. Было установлено, что в зонах избыточного и достаточного увлажнения, к которым относится стокоформирующая часть бассейна Волги, межгодовая изменчивость осадков значительно превышает аналогичную изменчивость суммарного испарения, в том числе и в теплый период года [2, 3]. Поэтому формула (1) существенно упрощается

$$Q_i = f \left\{ \sum_{k_1}^{k_1} P_{i-1}, \sum_{k_2}^{k_2} P_{i-1}, \sum_{k_1}^{k_1} P_{i-2}, \sum_{k_2}^{k_2} P_{i-2} \right\}, \quad (2)$$

Итак, осадки, выпавшие на территории бассейна за предшествующие два года, а если точнее, то за 21 месяц, являются предикторами при построении прогностической модели речного стока. При этом стокоформирующие факторы в зависимости (2) можно рассматривать как «внутренние», поскольку они входят в уравнение водного баланса водосборного бассейна и, следовательно, непосредственно влияют на изменчивость речного стока. Однако осадки сами являются продуктом крупномасштабного влагообмена в системе океан-атмосфера-материк, характеристики которого через «внутренние» факторы косвенно воздействуют на межгодовые колебания речного стока. Поэтому назовем их условно «внешними» стокоформирующими факторами. К числу «внешних» стокоформирующих факторов относятся эффективное испарение, горизонтальный перенос атмосферной влаги, циклоническая активность атмосферы над Северной Атлантикой, температура поверхности океана и др. [4]. Отсюда возникает необходимость в построении многоступенчатой (иерархической) прогностической модели стока Волги, состоящей из нескольких локальных (частных моделей). При-

чем каждая новая модель учитывает результаты предыдущей. В качестве предикторов первой ступени модели можно использовать внутренние стокоформирующие факторы, а на последующих ступенях – уже внешние факторы. Такая многоступенчатость, наилучшим образом обеспечивает учет сложной многофакторной системы причинно-следственных связей формирования межгодовых колебаний речного стока.

Не останавливаясь на технологии расчетов, отметим, что оправдываемость опытных прогнозов стока Волги за период с 1971 по 1990 гг., составила почти 100%. При этом стандартная ошибка прогноза составила 720 м³/с, что почти в два раза меньше допустимой ошибки прогноза, принимаемой за стандартное отклонение межгодовой изменчивости стока [2].

Основой для прогноза изменений объема моря ΔV может служить следующее соотношение

$$\Delta V = \Delta V_Q + \Delta V_{E-P}, \quad (3)$$

где первое слагаемое представляет изменения объема моря за счет притока речных вод, а второе – за счет эффективного испарения над морем. Вклад первого слагаемого достигает до 70% дисперсии величины ΔV . Первое слагаемое можно рассматривать как детерминированную компоненту, на которую накладывается случайная компонента ΔV_{E-P} , представляющая собой процесс, близкий к белому шуму. Поэтому в первом приближении эффективное испарение над морем в модели (3) не учитывалось.

Для прогноза непосредственно годового уровня моря использована двухпараметрическая модель вида

$$h_{i+1} = f(h_{12i}, \Delta V_{(i+1)}), \quad (4)$$

где h_{12i} – уровень в декабре предшествующего года. Значения h_{12i} и ΔV_{i+1} характеризуют соответственно инерционную и динамическую составляющие в изменениях уровня. Если $\Delta V > 0$, то уровень повышается, если $\Delta V < 0$, то он понижается.

Итак, для прогноза уровня на один год нужно знать фактические значения h_{12i} и прогностические оценки ΔV . Очень важно, что первый предиктор дает главный вклад в формирование h , причем роль его увеличивается в периоды монотонных изменений уровня. Это означает, что, во-первых, нет необходимости предъявлять слишком жесткие требования к прогнозам ΔV , а, во-вторых, приближенный прогноз уровня может быть дан только на основе данных о h_{12i} .

Прогноз УКМ был осуществлен за период с 1967 по 1986 гг. [2]. Прежде всего, отметим высокую точность прогноза уровня. Максимальное расхождение отмечалось в 1979 г. и составляло только 10 см, что существенно меньше допустимой ошибки прогноза, равной для данного периода 18 см/год. При этом стандартная ошибка модели прогноза годового уровня моря равна 5,16 см/год. Заметим, что стандартная ошибка инерционного прогноза, т.е. по данным о h_{12} , лишь ненамного выше ($\sigma_{y(x)} = 8,1$ см/год).

Несмотря на довольно высокую точность долгосрочного прогноза УКМ, достаточно очевидными являются определенные недостатки рассмотренной выше прогностической схемы. В частности, окончательный прогноз УКМ основан на предварительном прогнозе изменений объема моря и стока Волги. Отметим также громоздкость прогностической схемы для стока Волги, обусловленной необходимостью построения иерархических моделей, которые требуют привлечения большого объема данных не только по характеристикам увлажнения в бассейне, но и по характеристикам взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. Покажем, как можно обойти эти трудности.

Но прежде укажем, что в данной статье в качестве исходных данных использовался уровень моря в городе Баку за период с 1949 по 2005 гг. Отметим, что межгодовой ход уровня в городе Баку очень тесно связан с осредненным по всей акватории моря уровнем, за который обычно принимаются результаты осреднения данных по 4 уровневным станциям: Баку, Махачкала, Красноводск, Форт-Шевченко. Коэффициент корреляции уровня в Баку со средним уровнем моря составляет $r=0,98$.

Учитывая, что межгодовые колебания ΔV и приращения уровня Δh происходят практически синхронно, то перепишем выражение (4) как

$$h_i = f(h_{12(i-1)}, \Delta h_i), \quad (5)$$

где $\Delta h_i = h_{12i} - h_{12(i-1)}$ – внутригодовые изменения УКМ. Отсюда видно, что среднегодовой уровень моря может быть предвычислен по данным об уровне за декабрь текущего и предшествующего года. Использование классической модели множественной линейной регрессии для расчета среднегодового уровня моря на основе фактических данных об уровне за декабрь текущего и предшествующего года позволило получить следующее уравнение

$$h_i = 10,41 + 0,46h_{12(i-1)} + 0,52h_{12(i)}, \quad (6)$$

Отметим, что коэффициенты данной зависимости очень мало меняются с изменением объемов зависимой и независимой выборок. В таблице приводятся параметры зависимости (6), когда в качестве зависимой выборки принимался период с 1949 по 1990 гг., а независимой – период с 1991 по 2005 гг. Естественно, что коэффициент детерминации данной модели, показывающий долю объясненной дисперсии функции отклика, очень близок к единице ($R^2=0,997$). Очень важно, что расчет h по независимым данным показал, что стандартная ошибка почти не изменилась по сравнению с обучающейся выборкой и составила $\sigma_{y(x)}=2,71$ см/год. Таким образом, данную величину можно рассматривать как теоретическую ошибку физико-статистического метода, т.е. тот предел, к которому нужно стремиться при построении прогностических моделей.

На первом этапе в качестве прогностической рассматривалась инерционная модель вида

$$h_i = 12,45 + 1,01h_{12(i-1)}, \quad (7)$$

Таблица

Оценки параметров регрессионных моделей для среднегодового уровня моря в г. Баку

Модель	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий Фишера, F	Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$ см/год	Стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным, см/год
6	0,997	3652	2,71	3,12
7	0,946	707,3	8,51	7,24
9	0,854	114,5	15,49	12,38
10	0,948	357,6	8,47	6,18
11	0,954	293,0	8,04	7,58
12	0,954	293,0	8,04	5,90

Параметры данной модели, рассчитанные методом наименьших квадратов, приведены в таблице. Для независимой выборки стандартная ошибка инерционного прогноза составляет $\sigma_{y(x)} = 7,24$ см/год, что значительно ниже допустимой ошибки прогноза ($\Delta_{\text{доп}} = 44,5$ см), определяемой по величине стандартного отклонения.

Из уравнения (5) следует, что поскольку величина $h_{12(i-1)}$ является известной, то прогнозу подлежит только уровень моря в декабре текущего года h_{12i} . Очевидно, для его прогноза целесообразно вначале рассмотреть возможности чисто инерционной модели, предикторами в которой служат среднемесячные значения уровня моря предшествующего года, т.е.

$$h_{12i} = f(h_{12(i-1)}, h_{11(i-1)}, \dots, h_{1(i-1)}, h_{12(i-2)}), \quad (8)$$

где $h_{12(i-2)}$ – среднемесячный уровень в декабре с заблаговременностью два года. Отсюда видно, что общее число предикторов в прогностической модели (8) равно $m=13$. В результате пошаговой регрессии получена оптимальная модель, которая включает в качестве предикторов уровень моря в декабре двух предшествующих лет и имеет вид

$$h_{12(i)} = 2,62 + 1,18 h_{12(i-1)} - 0,16 h_{12(i-2)}, \quad (9)$$

Параметры модели представлены в таблице. Коэффициент детерминации модели составляет $R^2=0,854$, а стандартная ошибка прогноза по независимой выборке $\sigma_{y(x)} = 12,38$ см/год.

Подставляя (9) в основную модель (7), получаем окончательно следующую прогностическую модель для среднегодовых значений уровня моря

$$h_i = 11,58 + 1,10 h_{12(i-1)} - 0,11 h_{12(i-2)}, \quad (10)$$

Как видно из результатов моделирования (см. таблицу), точность прогноза уровня заметно возросла, причем самое важное, что прогноз по независимой выборке оказался даже лучше, чем по зависимой выборке. Итак, по данным об уровне моря в декабре за два предшествующих года можно довольно уверенно прогнозировать среднегодовой уровень в г. Баку.

Однако учитывая, что еще не все прогностические резервы исчерпаны, то было осуществлено дополнительное изучение возможных предикторов из числа компонент водного баланса моря и внешних факторов. Более эффективной по сравнению с (10) является прогностическая модель, которая содержит значения эффективного испарения $E_{\text{эф}}^i$ в точке с координатами ($\varphi = 37,08$ с.ш., $\lambda = 50,37$ в.д.), находящейся вблизи г. Баку и аномалии температуры воздуха Северного полушария $\Delta T_{\text{сп}}$, взятые в предшествующий год. Среднемесячные значения осадков и испарения для расчета $E_{\text{эф}}^i$ в данной точке брались из архива CDAS (Climate Data Assimilation System), являющегося частью системы так называемого «ретроспективного» анализа» (реанализ) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis [5] и находящегося в свободном доступе на одном из интернетовских сайтов.

Итак, сформулируем модель

$$h_i = b_0 + b_1(h_{12(i-1)} + b_2 E_{\text{эф}}^{(i-1)} + b_3 \Delta T_{\text{сп}}^{(i-1)}), \quad (11)$$

В качестве зависимой выборки в регрессионной модели (11) принимался период с 1949 по 1990 гг., а независимой – период с 1991 по 2005 гг. Параметры модели (11) приводятся в таблице. Не-

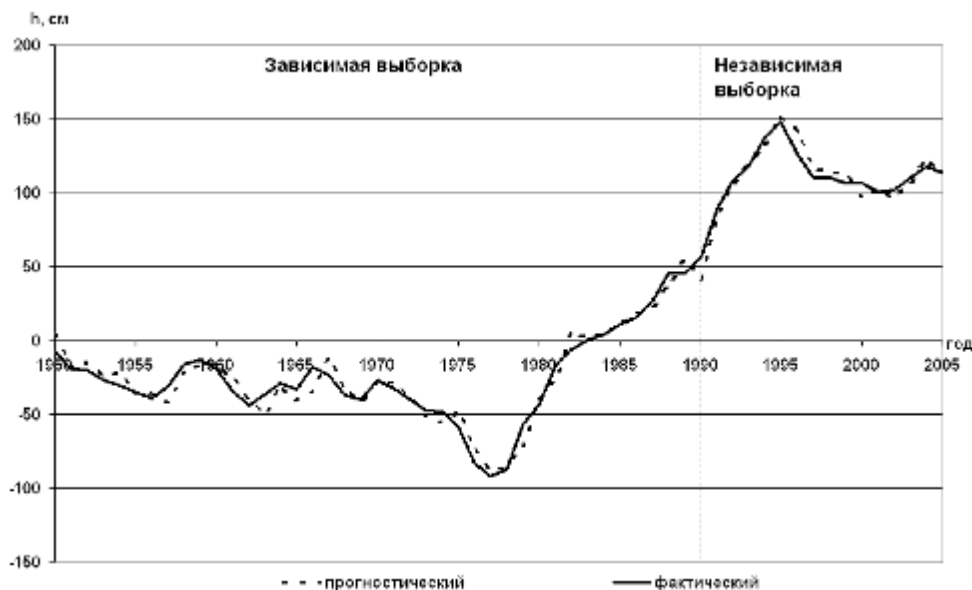


Рис. Сопоставление фактических и прогностических по модели (12) значений морского уровня в г. Баку

трудно видеть, что точность прогноза уровня заметно повысилась. В результате расчетов было установлено, что ошибки прогноза уровня могут быть еще более уменьшены, если удлинять зависимую выборку каждый раз на один год, заново пересчитывать коэффициенты модели и делать независимой прогноз на один шаг вперед. Тогда коэффициенты регрессии в модели (11) зависят от времени t

$$h_{i+1} = b_0(t_i) + b_1(t_i) h_{12i} + b_2(t_i) E_{\text{эф}} + b_3(t_i) T_{\text{сп}} \quad (12)$$

Действительно, в этом случае стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным составляет лишь 5,9 см/год, что вполне соответствует практическим требованиям. Сопоставление прогностических и фактических значений уровня в г. Баку за независимый период времени дается на рис. Нетрудно видеть, что максимальная ошибка отмечается в 1996 г. и равна 15 см.

Таким образом, для практического использования можно рекомендовать прогностические модели (10) и (12). Первая из них требует минимум

исходной информации, а вторая имеет минимальную среднеквадратическую ошибку прогноза морского уровня в г. Баку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицын Г. С. Подъем уровня Каспийского моря как задача диагноза и прогноза региональных изменений климата / Г. С. Голицын // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 31. – № 3. – С. 1-7.
2. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря / В. Н. Малинин. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 1994. – 160 с.
3. Малинин В. Н. Физико-статистический метод долгосрочного прогноза годового стока Волги / В. Н. Малинин // Условия формирования и методы прогноза стока Волги. – СПб., 1995. – С. 52-64.
4. Малинин В. Н. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна) / В. Н. Малинин, С. М. Гордеева. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. – 164 с.
5. The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay [et al.] // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – Vol. 77. – P. 437-471.