

УДК 556.048

ОБ ИСТОЧНИКАХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ОЦЕНКЕ РИСКА ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

©2005 г. М.В. Болгов, М.К. Филимонова

Институт водных проблем Российской академии наук

119991 Москва ГСП-1, ул. Губкина, 3

Стохастические колебания климата и гидрологического режима как естественные, так и антропогенно обусловленные являются основной причиной неопределенности при долгосрочном гидрологическом прогнозировании и, как следствие, вынуждают считать более высоким риск хозяйственной деятельности на побережьях внутренних морей.

Для оценки такого риска в работе рассмотрены некоторые источники неопределенности, возникающие при анализе гидрологического режима. С помощью цифровых моделей местности выявлены особенности морфометрических характеристик (в зависимости от уровня моря) и оценен их вклад в изменчивость уровня режима.

Для учета выборочной неопределенности оценок параметров стохастических моделей «побуждающих» процессов предложено использовать существующую методологию вероятностно-детерминированного прогнозирования колебаний уровня воды замкнутого водоема в сочетании с байесовским подходом.

Прогноз многолетних колебаний уровня воды внутреннего водоема (каким является Каспийское море) - сложнейшая геофизическая задача, для решения которой требуется знание как особенностей гидрометеорологического режима региона, так и механизмов возникновения долгопериодных колебаний климата и речного стока. Определение и тех и других связано с различного рода ошибками - следствием неверных наблюдений, несовершенных модельных представлений, приближенного характера выдвигаемых гипотез, ограниченного доступа к материалам исследований последних лет и т.д. Каспийское море имеет, например, значительные размеры, что делает невозможным проведение точных прямых измерений испарения с водной поверхности и приводит к большим ошибкам при оценке этой характеристики путем обратных расчетов.

МОДЕЛЬ

Колебания уровня внутреннего (бессточного) водоема слабо предсказуемое природное явление, тем не менее поддающееся описанию на основе стохастических моделей гидрометеорологических процессов и представлений о его водном балансе. Водобалансовый механизм колебания уровня бессточного водоема заключается в следующем [3,4]. Вода, поступающая в водоем в виде речного притока и осадков, расходуется в основном на испарение. Когда суммарное поступление воды больше, чем испарение, уровень водоема растет, что приводит к увеличению площади его зеркала и соответственно росту испарения. При превышении испарения над притоком уровень воды падает. Вследствие этого испарение уменьшается, и происходит замедление темпов снижения уровня воды. В конечном счете в стационарных климатических условиях уровень внутреннего водоема колеблется около отметки, отвечающей равенству среднесуточных величин (объемов) притока и испарения (так называемого уровня тяготения).

Колебания уровня воды h бессточного водоема могут быть описаны с помощью известного уравнения водного баланса [4,5]

$$\frac{dh}{dt} = \frac{v(t)}{F(t)} - e(t), \quad (1)$$

где $v(t)$ – приток воды в единицу времени, $e(t)$ – слой видимого испарения (испарение минус осадки), $F(t)$ – площадь зеркала водоема.

Если в начальный момент $t = 0$ уровень имеет отметку h_0 относительно так называемого равновесного значения, то решение уравнения (1) можно охарактеризовать математическим ожиданием

$$\bar{h}_t = h_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

и дисперсией:

$$\sigma_h^2(t) = \frac{\sigma_g^2 \{ (\beta - \alpha) - (\alpha + \beta) e^{-2\alpha t} + 2\alpha e^{-(\alpha + \beta)t} \}}{\alpha(\beta^2 - \alpha^2)} \quad (3)$$

где α и β параметры корреляционных функций побуждающих процессов [5].

ДААННЫЕ

С начала систематических наблюдений за режимом Каспия около столетия его уровень незначительно колебался около отметки -26 м. В 1930-е г. произошло катастрофическое снижение уровня на 1.7 м. В дальнейшем оно продолжалось, но гораздо медленнее, и в 1979 г. уровень достиг отметки -29 м. Начавшееся после этого повышение наблюдалось до 1995 г., при этом среднегодовой уровень превышал отметку -27 м.

Важнейшая проблема при обработке информации - репрезентативность существующих рядов наблюдений за уровнем Каспия и надежность статистических выводов, получаемых в результате оценки немногочисленных данных.

Исследования колебаний речного стока, испарения с поверхности водоемов и анализ количества осадков показали, что в качестве математической модели этих процессов может быть принята так называемая простая цепь Маркова [6, 9, 8], а имитационное моделирование ряда уровней Каспия, выполненное на основе соответствующих численных алгоритмов [7], позволяет заключить, что распределение вероятностей от 0.1% до 99.9% хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения. В то же время необходимо отметить, что гистограмма изученной последовательности уровней моря имеет двухмодальную форму.

Если из моделированного ряда большой продолжительности выбрать несколько коротких участков продолжительностью 150 лет (то есть примерно равных имеющемуся ряду наблюдений), то при теоретическом «нормальном» распределении, выборочные гистограммы для коротких последовательностей имеют разнообразные очертания. Очевидно, что такие гистограммы недостоверны и не могут использоваться для инженерных выводов.

ГИПОТЕЗЫ

Объяснение аномальных процессов поведения Каспийского моря, наряду с другими гипотезами, может быть найдено в контексте проблемы изменения климата. Подъем уровня Каспийского моря в конце XX века обусловлен слишком большим речным притоком и пониженным испарением. Известно, что на больших временных интервалах (более столетия) климатические условия существенно не стационарны. Так, например, уровень Мирового океана за последний постледниковый период вырос, по некоторым оценкам, на 130 м. По данным инструментальных измерений отмечается и современный рост уровня океана примерно на 15 – 20 см за 100 лет, однако эта цифра лежит в пределах точности измерений и вряд ли является свидетельством существенных изменений климата (или их индикатором). По-видимому, существующая стохастическая модель колебаний стока может быть усовершенствована в рамках некоей квазистационарной теории путем учета долгопериодных тенденций в ходе увлажнения бассейна Каспия, но сегодня такие модели еще не предложены.

Другие гипотезы, объясняющие «аномальность» Каспийского моря, связаны с ошибками принятых модельных представлений. Так, в линеаризованных дифференциальных уравнениях водного баланса используется линейная зависимость площади водной поверхности от уровня моря. Еще одним существенным фактором уровня режима является возможная зависимость слоя испарения от уровня моря. Не обращаясь к возможным физическим гипотезам,

объясняющим возникновение такой зависимости, заметим, что ее непосредственный учет в прогнозной модели приводит к очень большой асимметрии распределения уровня моря.

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

Под морфометрическими зависимостями понимается связь между уровнем, площадью зеркала и объемом воды в море. Традиционные методы получения морфометрических зависимостей включают планиметрирование для каждого значения уровня моря. Высокая трудоемкость таких методов и отсутствие крупномасштабных карт, затрудняют получение детальных оценок. Современная вычислительная техника позволяет расширить возможности стандартной топоосновы при поиске морфометрических зависимостей. Для решения таких задач необходимо автоматизировать хранение и обработку высотных данных. С этой целью использовалась цифровая модель рельефа местности (матрица высот с географической привязкой) с шагом сетки 30 секунд, с гладким представлением по высоте. Все морфометрические характеристики Каспийского моря приводятся без учета акватории зал. Кара-Богаз-Гол.

По особенностям морфометрии ложа Каспий делится на три части: Северную (от 44°30' с.ш. на север), Среднюю (от 40° с.ш. до 44°30' с.ш.) и Южную (от 40° с.ш. на юг). Объем воды в море рассчитывался как последовательная сумма произведений площади водного зеркала на толщину слоя (0.5 м). Причем разница между верхней и нижней суммами не превышала 1% для уровней выше -950 м абс., в основном же была < 0.5%. По результатам расчетов объем воды в Каспийском море при уровне -28 м абс. составляет 73751.5 куб. км. Объем воды в Северном Каспии равен 398.8 куб. км (0.54% от объема воды всего моря). Объем воды в Среднем Каспии - 26802.2 куб. км или 36.3%. Объем Южной части - 46585.3 куб. км, (63.2%). Распределение объема воды по уровням моря для различных его частей показано на рис. 1.

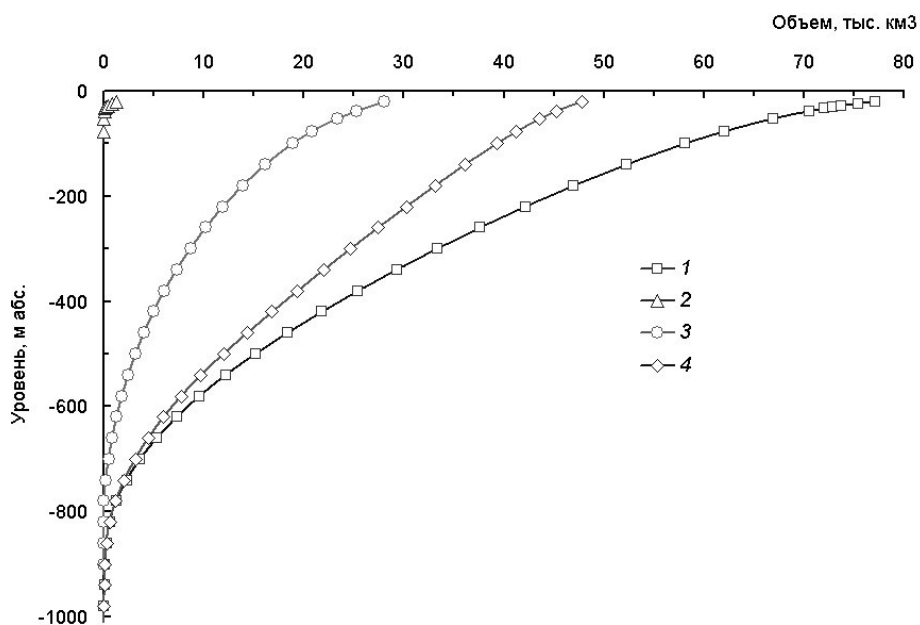


Рис. 1. Зависимость объема воды Каспийского моря от его уровня. 1 – для всего Каспия без вод зал. Кара-Богаз-Гол, 2, 3, 4 – для Северной, Средней и Южной частей Каспия соответственно.

Средняя глубина Каспийского моря, рассчитанная по батиметрической кривой, равна 195 м, Северного Каспия – 5.4, Среднего Каспия – 174, Южного Каспия – 325 м.

Самую значительную часть акватории моря занимают глубины до 100 м – 66.6%, причем 42.4% этой части площади (28.2% общей площади моря) приходится на глубины < 10 м, которые в основном приурочены к Северному Каспию (70%). Глубины > 900 м занимают 1% площади. Оставшаяся же площадь достаточно равномерно распределена между глубинами 200 – 800 м примерно по 4-5% на каждые 100 м глубины. Общий характер распределения глубин представлен на батиметрической кривой моря (рис. 2). На этой кривой отмечаются два плавных излома на

глубинах 500 и 100 м и различный наклон: пологий в верхней части, очень крутой в средней и менее крутой в нижней части кривой.

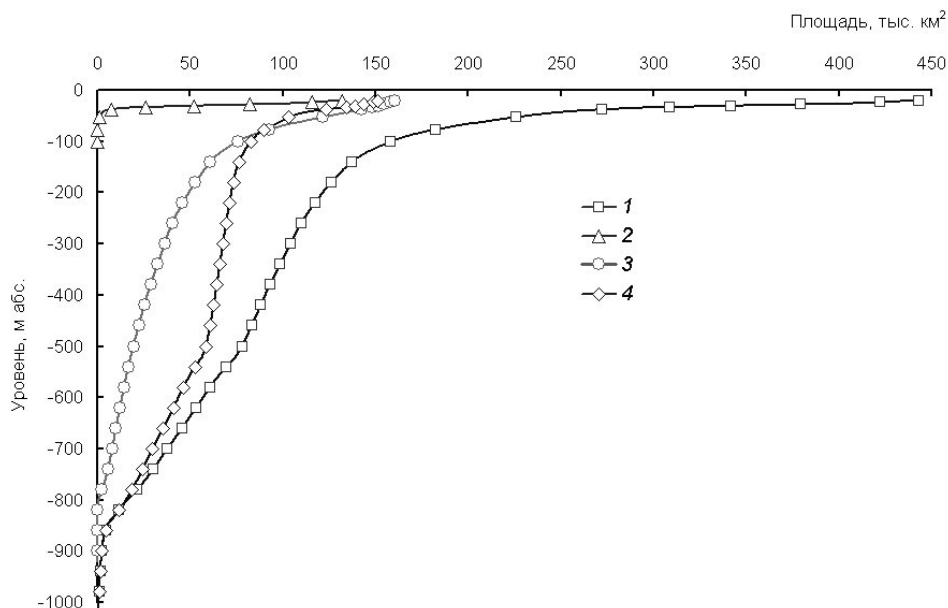


Рис. 2. Зависимость площади водного зеркала Каспийского моря от его уровня. 1 – для всего Каспия без вод зал. Кара-Богаз-Гол, 2, 3, 4 – для Северной, Средней и Южной частей Каспия соответственно.

Если более подробно рассмотреть часть батиграфической кривой, соответствующей высотам рельефа -40 - -20 м абс. (рис. 3), то дополнительно можно выделить перегиб на батиграфической кривой около -28 м абс. Причем это больше характерно для Северной части моря, тогда как кривые Среднего и Южного Каспия не имеют таких особенностей в данном диапазоне высот. Такое поведение батиграфической кривой связано с сильной выположенностью рельефа прибрежной зоны и побережья Северного Каспия. Очевидно, что данные особенности рельефа не позволяют использовать метод линейной интерполяции (и экстраполяции) площадей при прогнозировании изменения уровня моря и затопления береговой зоны.

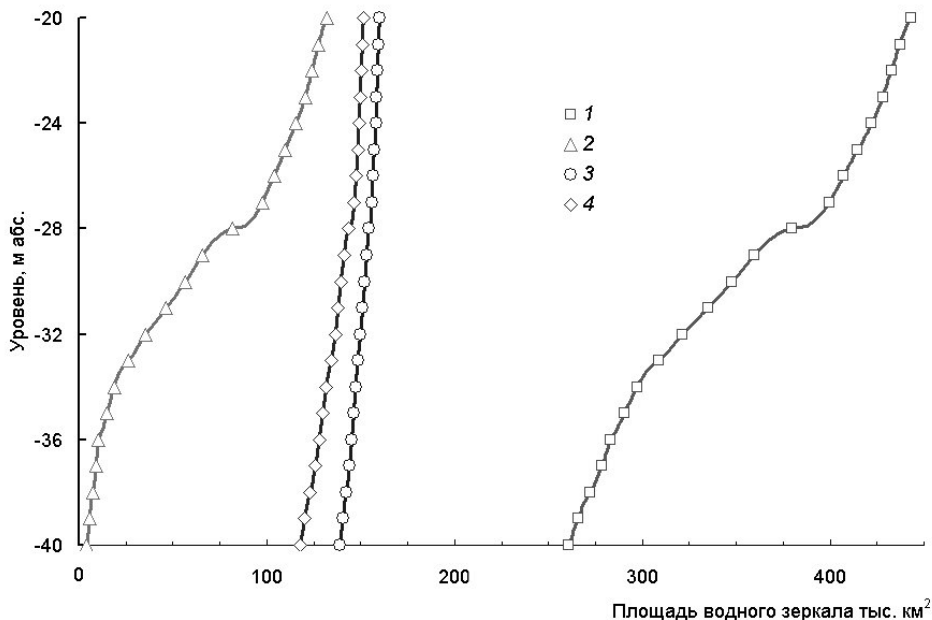


Рис. 3. Зависимость площади водного зеркала Каспийского моря от уровня. Крупный масштаб для области высот, близких к современному уровню Каспия. 1 – для всего Каспия без вод зал. Кара-Богаз-Гол, 2, 3, 4 – для Северной, Средней и Южной частей Каспия соответственно.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с уже имеющимися данными, опубликованными [2]. На рис. 4 приведены характеристики моря для одних и тех же отметок,

полученных с помощью цифровой модели рельефа местности и по данным [2]. На рис. 4 заметна разница между этими величинами для высот -40 - -24 м абс. Можно сделать предположение, что автор [2] использовал линейную экстраполяцию кривой площадью для уровней, выше -28 м абс., поскольку в те годы крупномасштабных топопланов на всей прибрежной части моря не существовало, а шаг горизонталей на стандартной топооснове масштаба 1:100000 составляет 20 м.

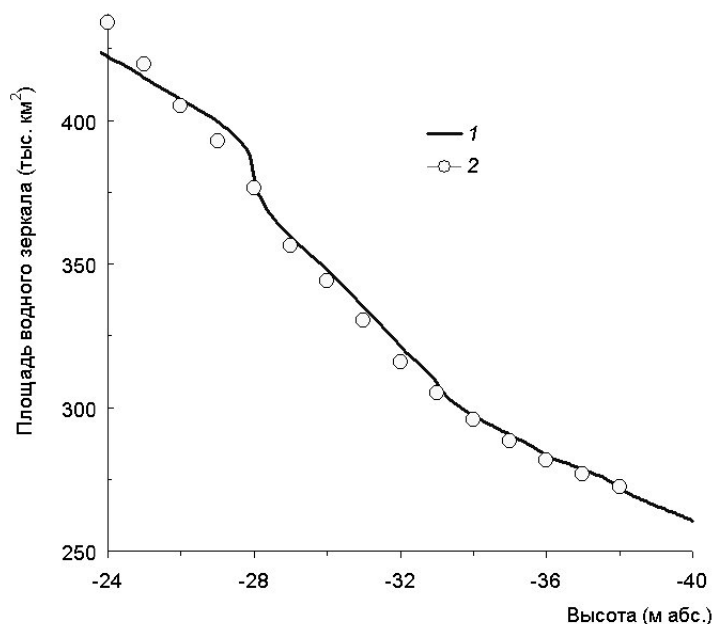


Рис. 4. Сравнение значений площадей водного зеркала, рассчитанных Р.В. Николаевой и по модели (1) и по [2] (2).

Если построить зависимости условного радиуса (радиуса равновеликого круга, соответствующего площади моря) от высоты (рис. 5), то можно получить представление о некоем «среднем профиле» берега. На рис. 5 заметно, что если на Среднем и Южном Каспии профиль берега имеет более-менее однородный характер, то для Северного Каспия характерен сложный профиль с явно выраженным слабо наклоненным участком.

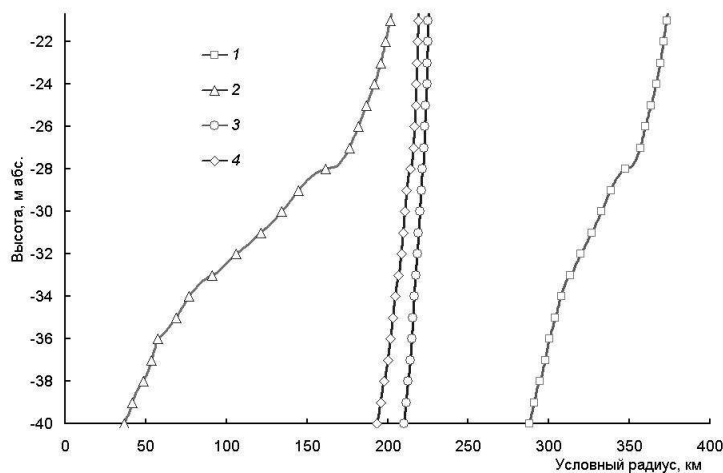


Рис. 5. Зависимость условного радиуса от уровня в Каспийской впадине. 1 – для всего Каспия без вод зал. Кара-Богаз-Гол, 2, 3, 4 – для Северной, Средней и Южной частей Каспия соответственно.

Располагая цифровой моделью местности, можно получить такую важную характеристику, как зависимость площади мелководий от уровня моря. На рис. 6 представлены площади мелководий (участки акватории с глубинами до 1, 2 и 3 м) в зависимости от отметки для всего моря в целом. Весьма интересно обратить внимание на рост площади мелководий до отметки -28 м, затем спад примерно до -22 м и дальнейший плавный рост. Некоторая нерегулярность этих зависимостей может быть вызвана ошибками интерполяции и разнородностью использованного картографического материала. В целом такой профиль может

указывать на то, что в недавнем прошлом вряд ли имели место продолжительные трансгрессии моря выше отметок -24 - -22 м.

На графиках зависимостей площади мелководий от уровня моря (рис. 6) хорошо заметна бимодальность батиметрических кривых в области современного берега Каспия

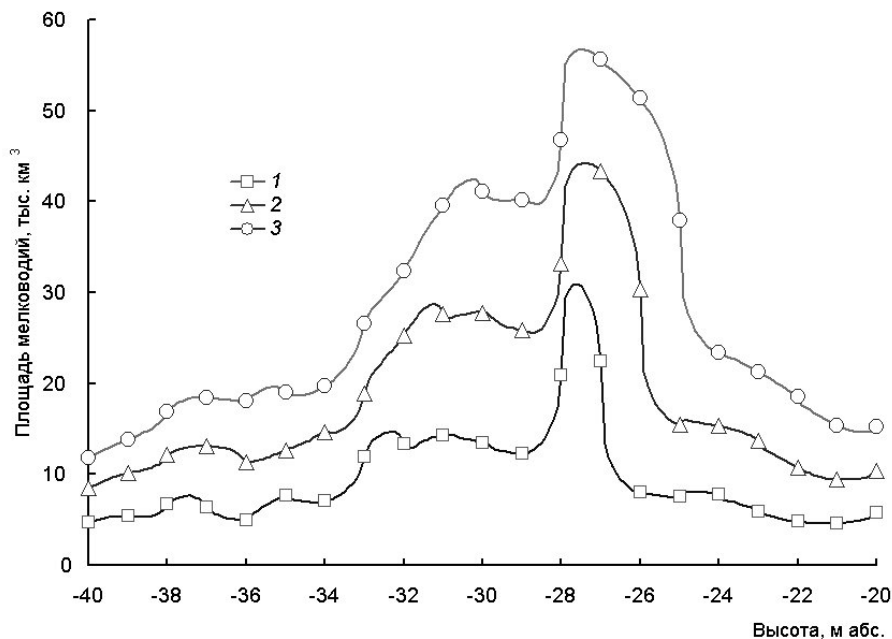


Рис. 6. Зависимость площади мелководий от уровня моря. 1 – 3 – мелководья 1 – 3 м соответственно.

Учет "новой" морфометрии Каспийского моря в задачах долгосрочного прогноза уровня приводит к несколько заниженным величинам (квантилям) малой вероятности превышения по сравнению с "линейной" задачей.

ПРОГНОЗ

Долгосрочный прогноз гидрометеорологических составляющих водного баланса на определенный день при современном уровне научного знания невозможен. Следовательно, не существует и метода долгосрочного прогноза уровня моря. Возможны лишь вероятностные прогнозы, например, среднего положения уровня моря и отклонения от этого положения заданной вероятности (квантили).

В табл. 1 представлены квантили условных распределений вероятности уровня на ближайшие десятилетия. Как следует из этой таблицы, диапазон возможных значений уровня достаточно широк. Отметка -26 м имеет обеспеченность 1%. Также вероятны и низкие стояния уровня моря на отметках - 28, -29 м.

Таблица 1. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря (здесь и в табл. 2, 3 безвозвратные изъятия - 25 км³/год, начальный уровень - -27.0 м)

| Обеспеченность, % | Заблаговременность прогноза, годы | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 0.1 | -25.87 | -25.59 | -25.48 | -25.48 | -25.54 | -25.63 |
| 1.0 | -26.20 | -26.04 | -26.02 | -26.06 | -26.13 | -26.21 |
| 5.0 | -26.50 | -26.44 | -26.51 | -26.58 | -26.66 | -26.73 |
| 50.0 | -27.22 | -27.40 | -27.67 | -27.83 | -27.92 | -27.98 |
| 95.0 | -27.93 | -28.37 | -28.84 | -29.07 | -29.19 | -29.23 |
| 99.0 | -28.23 | -28.76 | -29.33 | -29.59 | -29.71 | -29.75 |

Наиболее неблагоприятный прогноз 0.1% обеспеченности на те же периоды -25.48 м, а такой же прогноз 1% обеспеченности -26.02 м.

БАЙЕСОВСКИЕ ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ.

Начавшееся с 1978 г. повышение уровня моря имело тяжелые экономические и экологические последствия для прибрежных территорий: затопление и повреждение зданий и сооружений, усиление абразионных процессов и т.п. В комплексе вопросов, связанных с катастрофическими явлениями на Каспийском побережье, одни из приоритетных – анализ и прогноз риска затопления в условиях плохо предсказуемого колебания уровня моря, в особенности для районов, наиболее неблагоприятных в социально-экономическом отношении.

Риск хозяйственного освоения прибрежных территорий возникает вследствие как стохастического характера воздействий (в качестве которых рассматриваются среднегодовые или экстремальные уровни), так и вследствие широкого набора неопределенностей, требующих учета при принятии проектных (или организационных) решений. Изложенные выше модели учитывают основной вид неопределенности – вероятностный характер побуждающих гидрометеорологических процессов. При этом не принимаются во внимание погрешности параметров вследствие их оценивания по коротким выборкам. Не учитывается также неопределенность задаваемых величин, характеризующих изменение водности рек в результате антропогенного влияния, а точнее, безвозвратные изъятия (потери на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ, водопотребление в жилищно-коммунальном хозяйстве и промышленности, потери воды в сельском хозяйстве (орошение)). В последнем случае трудно даже предложить какую-то стохастическую модель, поскольку безвозвратные потери оцениваются с очень большой погрешностью и плохо прогнозируются в условиях нестабильной экономики, что делает их учет при долгосрочном прогнозе уровня режима моря малоэффективными.

Рассмотрим влияние выборочных аспектов оценок параметров модели. Выражения для математического ожидания и дисперсии уровня моря как функции времени дают возможность прогнозировать будущие колебания моря в виде доверительных интервалов или величин заданной вероятности (при аппроксимации условной плотности гауссовским законом). Последняя форма прогноза используется при обосновании мероприятий и проектировании сооружений инженерной защиты прибрежных территорий. Напомним, что выражения (2) и (3) получены в предположении, что оценки параметров стохастических моделей известны точно и полученные условные распределения отражают только стохастический характер изменчивости гидрометеорологических процессов. Однако известно, что оценки параметров обладают «выборочными свойствами», а в простейшем случае характеризуются погрешностями.

В речной гидротехнике недостоверность оценок параметров моделей за счет выборочных свойств учитывается путем введения так называемой гарантийной поправки к расчетным значениям. Расчетными значениями чаще всего выступают квантили заданной (достаточно малой) вероятности превышения (обеспеченности), а гарантийная поправка представляет собой некоторую долю выборочного среднеквадратического отклонения этих квантилей (вероятность превышения и поправка зависят, как правило, от уровня ответственности сооружения). В интересующем нас случае построить выборочное распределение квантилей возможно, например, методом имитационного моделирования.

Однако такой способ решения представляется весьма громоздким. Более простой подход, приводящий к легко интерпретируемым результатам, основывается на байесовской идеологии, предполагающей построение так называемой прогнозной плотности искомой величины x в виде условного распределения $\pi(x | y)$ при заданных наблюдениях y .

Придерживаясь терминологии [10] введем вероятностную модель для x в виде $g(x | \theta)$, зависящую от некоторого параметра θ , определяемого по имеющимся значениям y . Далее, полагая что известна апостериорная плотность распределения этого параметра $p(\theta | y)$, и что x и y независимы, прогнозную плотность вероятностей можно получить из следующего выражения:

$$\pi(x | y) = \int_{\theta} g(x | \theta) p(\theta | y) d\theta \quad (4)$$

Расчеты по уравнению (4) выполняются путем численного интегрирования с использованием в качестве плотности распределения P либо выборочного распределения параметра (оценки), либо распределения оценки по группе однородных объектов (водосборов,

озер, метеорологических станций и т.п.). В качестве функции g возможно использование «нормального» закона распределения с параметрами, определяемыми по формулам (2) и (3) в зависимости от оценок параметров стохастических моделей речного притока и испарения с поверхности водоема. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3 для случаев с учетом выборочной дисперсии оценок средних значений притока и испарения и оценки коэффициента автокорреляции

Таблица 2. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря при учете выборочных свойств (погрешности) оценки математического ожидания притока

| Обеспеченность, % | Заблаговременность прогноза, годы | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 0.1 | -25.86 | -25.56 | -25.40 | -25.36 | -25.40 | -25.48 |
| 1.0 | -26.20 | -26.01 | -25.97 | -25.97 | -26.02 | -26.10 |
| 5.0 | -26.50 | -26.42 | -26.47 | -26.51 | -26.58 | -26.65 |
| 50.0 | -27.22 | -27.40 | -27.68 | -27.83 | -27.92 | -27.98 |
| 95.0 | -27.94 | -28.39 | -28.89 | -29.14 | -29.27 | -29.31 |
| 99.0 | -28.24 | -28.79 | -29.39 | -29.68 | -29.82 | -29.86 |

Таблица 3. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря при учете выборочных свойств (погрешности) оценки математического ожидания притока и испарения

| Обеспеченность, % | Заблаговременность прогноза, годы | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 1.0 | -26.19 | -26.00 | -25.94 | -25.94 | -25.96 | -26.01 |
| 99.0 | -28.24 | -28.80 | -29.40 | -29.70 | -29.86 | -29.92 |

ВЫВОДЫ

Детальный учет различного рода неопределенностей параметров динамико-стохастических моделей колебания уровня замкнутого водоема, каковым является Каспийское море, приводит к увеличению разброса прогнозных значений (доверительного интервала). Учет в практике строительного проектирования новых доверительных интервалов приводит к увеличению зон риска затопления на побережье Каспия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В. Моделирование многомерных случайных величин методом разложения по естественным ортогональным функциям // Метеорология и гидрология. 1994. № 7. С. 82-85.
2. Каспийское море: гидрология и гидрохимия. М.: Наука, 1986. 261 с.
3. Крицкий С.Н. Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6, С. 9-26.
4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Тр. Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29-61.
5. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
6. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976.
7. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. № 6. С. 389-404.
8. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения. Л.: Гидрометеиздат, 1977.
9. Сарманов О.В., Сарманов И.О. Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии. М.: Наука, 1983, 200 с.
10. Справочник по прикладной статистике. Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана. М.: Финансы и статистика, 1990. 526 с.