

СВЕРХДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА 6, 12 И 18 ЛЕТ

З.К. Абузаров

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
abusiar@tocom.ru*

Введение

Вопросу сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря (УКМ) ввиду его практической важности уделяется большое внимание. Происходящие долгопериодные аномальные колебания УКМ, сопровождающиеся осушением или, наоборот, затоплением значительных прибрежных территорий моря, оказывают негативное влияние на многие аспекты жизнедеятельности стран Каспийского региона. Для принятия обоснованных стратегических и оперативных решений по вопросам обеспечения безопасности людей и снижения экономического и экологического ущерба от воздействия аномальных колебаний уровня моря необходимы сверхдолгосрочные прогнозы изменений УКМ на различные сроки.

Попытки прогнозирования УКМ на большие сроки (от 5 лет до нескольких десятилетий) предпринимались неоднократно, и их результаты опубликованы в научной литературе. К сожалению, вследствие слабой научной базы этих прогнозов, в большинстве случаев они оказывались крайне противоречивыми и неточными. В последнее время большинство ученых склоняются к тому, что долгопериодные колебания УКМ имеют климатическую природу. Тектонические и антропогенные факторы хотя и оказывают определенное влияние на долгопериодные колебания уровня, но не имеют решающего значения.

Возможность прогнозирования УКМ на 1 и 5 лет впервые была показана еще в 40-х гг. прошлого столетия Г.П. Калининым

и Н.А. Белинским [4, 5]. Их прогнозы основывались на асинхронных корреляционных связях между интегральными характеристиками уровня моря и интегральными характеристиками количественных показателей атмосферной циркуляции над Атлантико-Европейской территорией. Прогнозы выпускались сначала как опытные, а затем на регулярной основе, и вполне себя оправдали.

Идеи, заложенные в работах Белинского и Калинина, получили дальнейшее развитие в работах сотрудников Гидрометцентра России [1–3, 7–9, 10]. В настоящее время официальный статус имеют прогноз помесечного хода УКМ на год и фоновый прогноз УКМ на 6 лет. К сожалению, эти два вида прогнозов не полностью удовлетворяют запросы хозяйственных организаций. Например, для проектирования крупных гидротехнических сооружений необходимы прогнозы УКМ на годы и даже десятилетия.

В настоящей работе обсуждаются результаты исследований в области сверхдолгосрочных прогнозов УКМ, выполненных в Гидрометцентре России. В ней представлены сверхдолгосрочные прогнозы на сроки 6, 12 и 18 лет, составленные в разное время [1–3], а также прогнозы с учетом новых исходных гидрометеорологических данных.

1. Изменчивость УКМ в XX и начале XXI века и ее связь с атмосферными процессами

Уровень Каспийского моря в многолетнем масштабе характеризуется широким спектром изменчивости. На рис. 1 представлен график многолетнего хода УКМ, построенный по данным наблюдений в Махачкале, который очень близко соответствует ходу среднего уровня Каспийского моря (коэффициент корреляции равен 0,95).

Из рис. 1 видно, что многолетний ход УКМ в многолетнем масштабе испытывает значительные долгопериодные колебания и относится к классу нестационарных нелинейных процессов.

За последние 114 лет в многолетнем ходе УКМ четко выделяется шесть характерных периодов. Первый период (до 1929 г.) характеризуется относительно высоким стабильным положением уровня с некоторыми колебаниями около среднего значения –25,50 м в Балтийской системе высот (БС).



Рис. 1. Многолетний ход уровня Каспийского моря с 1901 по 2014 г.

Второй период (с 1930 по 1941 г.) характеризуется интенсивным падением уровня (на 1,7 м за 11 лет). Третий период (с 1941 по 1970 г.) характеризуется относительно медленным падением уровня со средней скоростью 3,6 см/год с некоторыми колебаниями около средней отметки $-28,28$ м БС. Четвертый период (с 1970 по 1977 г.) характеризуется очередным резким падением УКМ. В 1977 г. уровень моря достиг самой низкой абсолютной отметки за последние 500 лет ($-29,00$ м БС). Пятый период (с 1978 по 1995 г.) отмечился неожиданно резким продолжительным повышением уровня. Такие темпы и продолжительность роста уровня моря не отмечались за всю прошлую историю наблюдений. За 18 лет уровень поднялся почти на 2,5 м со средней скоростью 14 см/год. Шестой период (с 1996 года по настоящее время) характеризуется относительной стабилизацией уровня около среднего значения $-27,08$ м БС.

После достижения максимального значения уровня в 1995 г. уровень моря за последующие два года понизился на 36 см, после чего его падение замедлилось. За период с 1998 по 2001 г. уровень моря понизился всего на 8 см, а за период с 2003 по 2006 г. уровень снова повысился на 14 см. Однако в последние годы (с 2006 по 2014 г.) наблюдается относительно слабое, но устойчивое падение

уровня со средней скоростью примерно 8 см/год. К 2015 г. за 9 лет уровень упал на 68 см и достиг абсолютной отметки –27,62 м БС.

Совместный анализ многолетнего хода УКМ и климатических условий на водосборном бассейне Каспия показывает, что многоводные и маловодные периоды стока рек, главным образом Волги, и, как следствие, колебания УКМ обусловлены изменчивостью барико-циркуляционного режима в атлантико-евразийском секторе Северного полушария. Гидрометеорологические условия каспийского бассейна находятся в зоне трех центров действия атмосферы: Исландской депрессии, Азорского и Сибирского максимумов, активизация или ослабление которых обуславливают развитие циклонических и антициклонических процессов и соответствующего режима погоды на водосборном бассейне Каспия.

Так, высокое положение уровня и относительная его стабильность в конце XIX и начале XX века (первый период) были обусловлены аномально развитыми в Северном полушарии зональными процессами западной формы (по Вангенгейму), что способствовало смещению атлантических циклонов и ядра Азорского максимума на восток, в результате чего в северных районах, включающих водосборный бассейн Каспия, отмечалось обширное выпадение атмосферных осадков, особенно в осенне-зимний сезон. Объемы расходов рек волжского бассейна резко возросли, главным образом за счет р. Камы, формирующей в среднем около 50 % стока Волги. Тенденция снижения уровня моря в этот период была незначительной и составляла около 0,34 см за 30 лет.

Второй период, характеризующийся резким падением уровня моря, был связан с крупномасштабной климатической аномалией, охватившей все Северное полушарие; наиболее ярко она проявилась в 1930-е гг. Антициклонический режим погоды, установившийся в пределах всего атлантико-европейского сектора, явился следствием развития восточной формы циркуляции. Установившиеся засушливые условия, обусловленные значительным дефицитом атмосферных осадков, способствовали резкому снижению уровня моря.

Третий период (1940–1970 гг.) характеризовался более умеренными климатическими условиями в бассейне Каспийского

моря, темпы падения уровня замедлились. Аномально развитые процессы меридиональной формы циркуляции атмосферы способствовали увеличению увлажненности в бассейне Каспия. В 1949–1956 гг. дефицит водного баланса составлял около $19 \text{ км}^3/\text{год}$, а в 1957–1969 гг. в море поступало примерно $7 \text{ км}^3/\text{год}$, больше, чем испарялось и стекало в залив Кара-Богаз-Гол.

Некоторые современные тенденции изменения климата на водосборном бассейне Волги указывают на то, что годовое количество осадков, осредненное по водосборному бассейну, характеризуется резким увеличением с начала 70-х и до конца 80-х гг. прошлого столетия. Их рост по сглаженной кривой составил более 40 мм и происходил преимущественно за счет роста сумм летних осадков, который в начале 90-х годов сменился их уменьшением.

С начала XXI века летние суммы осадков практически не меняются. Зимой повышение количества осадков примерно на 20 мм продолжалось до начала XXI века, а дальше наметилась тенденция к их уменьшению. Следует отметить, что минимум осадков за исследуемый период (1948–2010 гг.), как в холодный, так и в теплый период года, наблюдался в начале 1970-х годов.

Аномальные условия погоды в 2010 и 2012 гг. были обусловлены устойчивым блокирующим антициклоном, который располагался над севером России. Формирование этого антициклона связано с Сибирским максимумом, западный отрог которого стал распространяться на северо-восточные районы ЕТР. Антициклонический процесс зимой 2012 г. по масштабам воздействия и распространения на запад является экстремальным. Очевидно, эти процессы и привели к устойчивому снижению уровня моря в последние годы.

2. Исходные данные и метод исследования

Сверхдолгосрочный прогноз УКМ непосредственно связан с разработкой прогноза климата – одной из сложнейших современных нерешенных проблем [6]. Современные возможности математического моделирования климатических сценариев с использованием моделей общей циркуляции атмосферы (ОЦА) не позволяют

пока получить адекватных результатов. Реакция УКМ на воздействия атмосферных процессов усложняется наложением ряда факторов антропогенного и тектонического характера.

Поскольку конкретного эволюционного механизма влияния атмосферных процессов на ожидаемый характер хода уровня моря в явном виде определить не удастся, то в настоящей работе для выявления взаимосвязей между временным ходом УКМ и характеристиками атмосферной циркуляции применен метод регрессионного анализа. Эффективность такого подхода для разработки методов долгосрочных гидрометеорологических прогнозов доказана многолетней практикой.

Исходной информацией для исследования послужили многолетние ряды (с 1901 по 2014 г.) наблюдений за уровнем моря и о приземном атмосферном давлении по водпосту Махачкала.

При построении физико-статистических моделей колебаний УКМ исходные ряды уровня приводились в соответствие с моделью стационарного случайного процесса. Для этого в качестве показателя изменчивости УКМ брались не абсолютные значения уровня, а их приращения от года к году, так называемые первые разности. С физической точки зрения годовые приращения уровня характеризуют годовой отток или приток воды в море и отражают изменчивость водного баланса моря. На рис. 2 представлен график многолетнего хода годовых приращений УКМ, который показывает, что их распределение близко к случайному распределению, что подтверждается гистограммой распределения (рис. 3).

Рис. 3 демонстрирует хорошее соответствие эмпирической и теоретической кривых распределения годовых приращений УКМ, что дает основание применять к анализу временных рядов методы линейной математической статистики.

Гидрометеорологические условия каспийского бассейна находятся в зоне влияния трёх барических образований: Исландской депрессии, Азорского и Сибирского максимумов, активизация или ослабление которых обуславливают развитие циклонических или антициклонических процессов и соответствующие режимы погоды. Поэтому для суждения о развитии атмосферных процессов в Северном полушарии поля аномалий приземного атмосферного

давления анализировались для трех секторов Северного полушария, включающих Северную Атлантику (1 сектор), Европу (2 сектор) и Азию (3 сектор) (рис. 4).

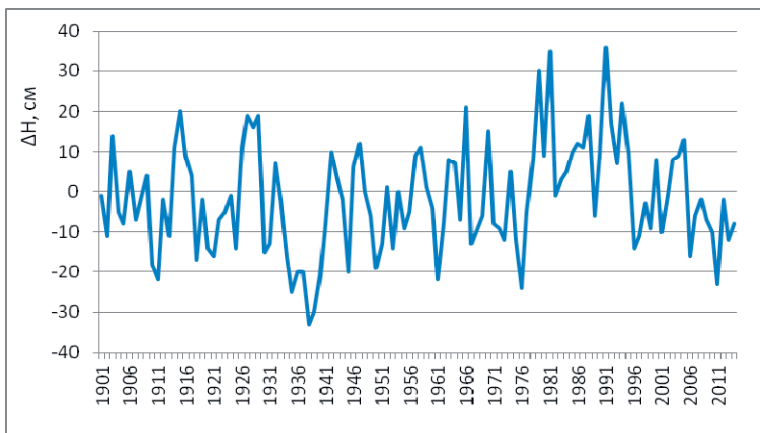


Рис. 2. Ход годовых приращений УКМ.



Рис. 3. Гистограмма распределения годовых приращений УКМ с наложенной нормальной плотностью распределения.

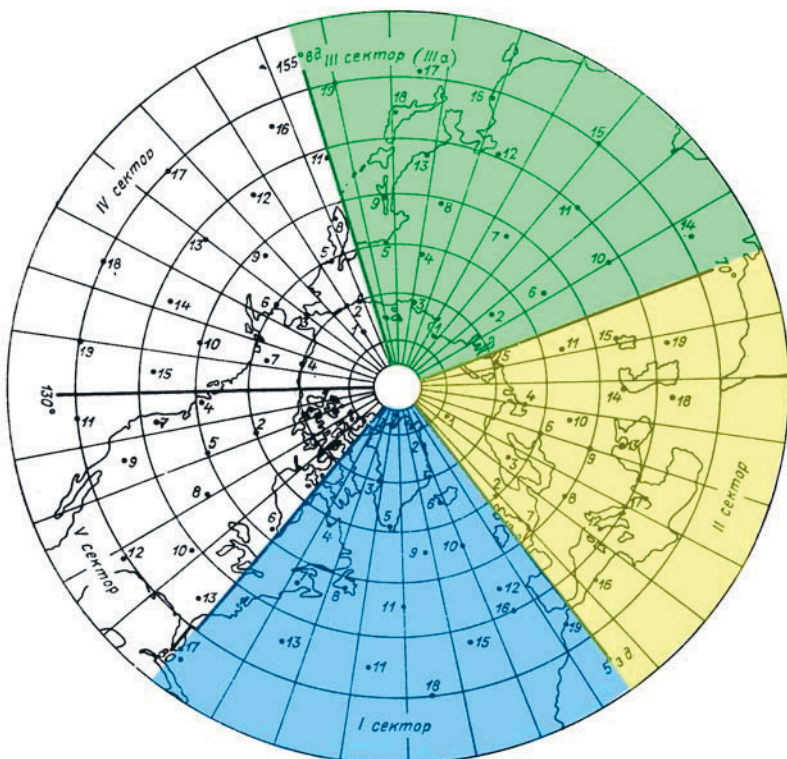


Рис. 4. Сектора, для которых рассчитывались коэффициенты разложения B_i : Северная Атлантика (1 сектор, синий), Европа (2 сектор, желтый), Азия (3 сектор, зеленый).

Следует отметить, что все отобранные сектора имеют характерные природные различия, обусловленные региональной спецификой направления воздушных потоков и их интенсивностью, связанных с общей циркуляцией атмосферы. Совокупность полей аномалий атмосферного давления, определяющих статистический ряд, представлялись аналитически функцией координат x , y . Коэффициенты разложения B_i этих полей использовались в качестве предикторов при построении линейных прогностических зависимостей.

Для каждого из секторов были выбраны по 3 первых коэффициента разложения, которые с достаточно высоким приближением описывают исходное поле атмосферного давления: B_0^1, B_1^1, B_2^1 (1-й сектор), B_0^2, B_1^2, B_2^2 (2-й сектор) и B_0^3, B_1^3, B_2^3 (3-й сектор). Здесь верхний индекс означает номер сектора, а нижний – порядковый номер коэффициента разложения. Величина коэффициента разложения характеризует интенсивность переноса воздушных масс, а знак – направление переноса. Коэффициент B_0 характеризует среднее значение аномалий давления в каждом из трех секторов. При $B_0 > 0$ в соответствующем секторе преобладает циклоническая деятельность, а при $B_0 < 0$ – антициклоническая. Величина и знак коэффициента B_1 характеризуют интенсивность и направление зонального переноса воздушных масс. При $B_1 > 0$ происходит ослабление общей циркуляции атмосферы и преобладает антициклоническая деятельность, что обычно ведет за собой уменьшение осадков и увеличение испарения и, как следствие, падение уровня моря. При отрицательном знаке этого коэффициента происходит усиление циркуляции атмосферы в средних широтах. Это обычно приводит к усилению циклонической деятельности, к увеличению осадков и уменьшению испарения и к росту уровня моря.

Величина и знак коэффициента B_2 характеризуют меридиональный перенос воздушных масс. При $B_2 > 0$ происходит меридиональный перенос холодного и сухого воздуха из арктического бассейна. Наоборот, при $B_2 < 0$ происходит меридиональный вынос теплого и влажного воздуха в средние широты из тропиков. Этот коэффициент, в частности, связан с выходом южных циклонов, которые приносят на водосборный бассейн Каспия и Волги большое количество осадков, особенно в зимнее время.

Как известно, увеличение заблаговременности прогноза прежде всего связано с учетом крупномасштабных атмосферных процессов. Это неизбежно требует увеличения масштабов осреднения исходных рядов, чтобы выявить наиболее закономерные и устойчивые особенности в многолетнем ходе УКМ и характеристик

атмосферных процессов. Увеличение масштабов осреднения делает корреляционные связи более устойчивыми к случайным явлениям. Поэтому в дальнейшем низкочастотная (вековой ход) и высокочастотная части спектра (с периодами менее 5 лет) были исключены из исходных рядов методом скользящего осреднения по различным интервалам времени.

Предиктант и предикторы подготавливались следующим образом. После выполнения процедуры сглаживания исходных рядов производилось скользящее суммирование по интервалам, равным заблаговременности прогноза, а затем осуществлялся сдвиг ряда накопленных сумм УКМ по отношению к рядам накопленных сумм показателей атмосферной циркуляции. После чего ряды выравнивались по длине.

Установление меры тесноты связей осуществлялось с помощью метода пошаговой множественной линейной регрессии с процедурой скользящего оценивания по схеме:

$$(\sum \Delta H)_{t+\Delta\tau} = C_0 + a_i (\sum \Delta B_i)_t + d, \quad (1)$$

где $(\sum \Delta H)_{t+\Delta\tau}$ – накопленная сумма годовых приращений УКМ на момент прогноза; $(\sum \Delta B_i)_t$ – накопленная сумма годовых приращений величин коэффициентов разложения за интервал времени, предшествующий моменту составления прогноза; C_0 – свободный член; a_i – коэффициенты регрессии; d – ошибка прогноза (белый шум); $\Delta\tau$ – заблаговременность прогноза.

От величин накопленных сумм годовых приращений УКМ нетрудно перейти к значениям уровня в абсолютных или относительных единицах измерений. Для этого вычисляются средние значения изменения уровня за соответствующий интервал времени, которые затем последовательно прибавляются к исходному уровню моря по формуле.

$$H_{\text{текущ}} = H_0 + (\sum \Delta H / \Delta\tau), \quad (2)$$

где H_0 – исходный средний уровень моря в год составления прогноза; $\sum \Delta H$ – сумма годовых приращений уровня моря; $\Delta\tau$ – заблаговременность прогноза.

Для отбора оптимальной группы предикторов из 9 первоначально закрепленных было проведено множество экспериментов, позволяющих получить наилучшие оценки. Это делалось с помощью корреляционной матрицы, по данным которой исключались дублирующие и неэффективные предикторы.

Надежность прогностических уравнений оценивалась с помощью статистических критериев: коэффициента корреляции R , среднего квадратичного отклонения S , средней квадратичной ошибки σ . Эффективность метода оценивалась по отношению S/σ .

Оценки проверочных фоновых прогнозов на 6 лет за период с 1989 по 2009 г. показали, что успешность методических прогнозов оказалась выше успешности прогнозов по норме (климатических) в среднем на 27 %. При допустимой погрешности прогноза $\sigma = 25$ см оправдываемость прогнозов составила 100 %.

На рис. 5 представлен пример фоновых прогнозов тенденции изменения УКМ на 12 лет (до 2017 г.), составленный в 2005 г., а на рис. 6 – фоновый прогноз тенденции изменения УКМ на 18 лет (до 2015 г.), составленный в 1997 году.

Как видно из рис. 5 и 6, фоновые прогнозы тенденций изменения уровня на 12 и 18 лет вперед достаточно удовлетворительно уловили тенденцию изменения хода уровня несмотря на большую заблаговременность прогнозов.

3. Сверхдолгосрочные прогнозы тенденций изменения УКМ на сроки 6, 12 и 18 лет, составленные в 2014 г.

Фоновый прогноз УКМ на 6 лет

Длина исходного ряда составила 68 лет (1946–2014 гг.). Расчетный ряд составил 48 лет. Параметры корреляции: $R = 0,960$; $\sigma = 25$ см; $S = 11,43$; $S/\sigma = 0,45$. Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид

$$\sum_{n=1}^6 \Delta H = -16,92B_0^3 + 9,13B_1^3 + 2,55B_2^3 - 6,62B_0^2 + \quad (3) \\ + 6,53B_2^2 - 25,00B_0^1 - 6,17B_1^1 + 4,54.$$



Рис. 5. Сверхдолгосрочный фоновый прогноз УКМ на 12 лет, составленный в 2005 г.



Рис. 6. Сверхдолгосрочный фоновый прогноз УКМ на 18 лет, составленный в 1997 г.

На рис. 7 представлен график фактического и расчетного хода накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ с прогнозом до 2020 г., а на рис. 8 – фактический ход уровня и прогноз в абсолютных отметках уровня.

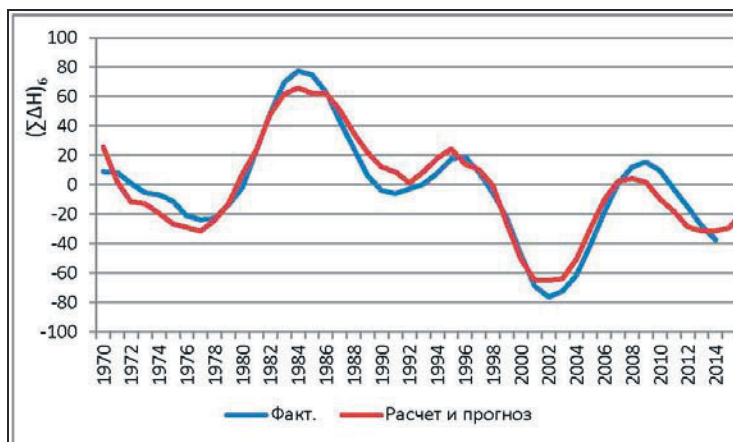


Рис. 7. Ход фактических и рассчитанных по уравнению накопленных по 6-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2020 г.

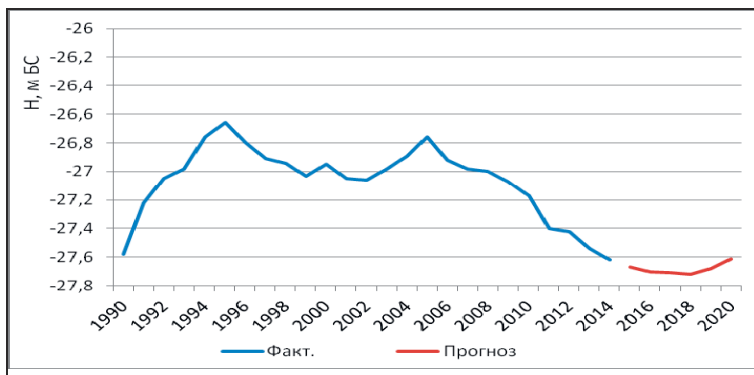


Рис. 8. Фоновый прогноз УКМ на 6 лет до 2020 г., составленный в 2014 г.

Фоновый прогноз УКМ на 12 лет

Длина исходного ряда составила 83 года (1931–2014 гг.). Расчетный ряд составил 48 лет. Параметры корреляции: $R = 0,926$; $S = 18,43$. Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид:

$$\sum_{n=1}^{12} \Delta H = -11,7B_0^3 + 1,14B_1^3 + 2,01B_2^3 + 16,40B_0^2 +$$

$$+ 5,50B_2^2 + 1,59B_0^1 - 2,60B_1^1 - 0,50. \quad (4)$$

На рис. 9 представлен график хода фактических и вычисленных по уравнению (4) величин накопленных по 12-летиям сумм годовых приращений УКМ с прогнозом до 2026 г., а на рис. 10 – фактический ход уровня и прогноз в абсолютных отметках уровня.

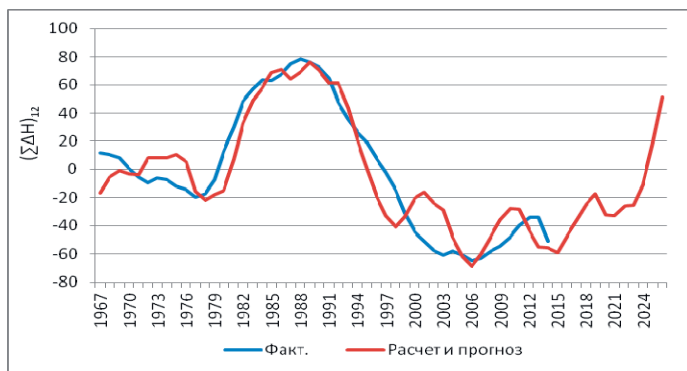


Рис. 9. Ход фактических и рассчитанных по уравнению накопленных по 12-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2026 г.

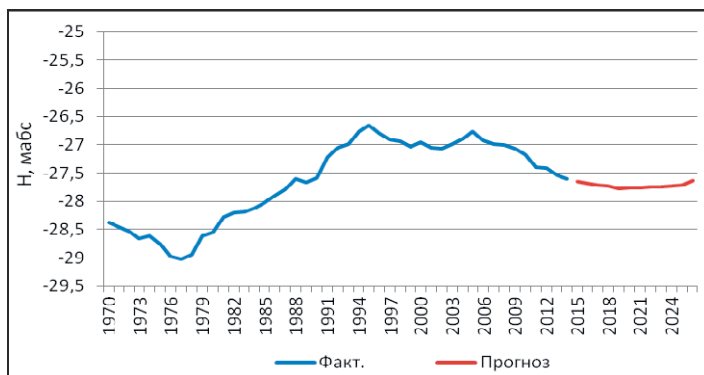


Рис. 10. Фоновый прогноз УКМ на 12 лет вперед до 2026 г., составленный в 2014 г.

В соответствии с прогностической оценкой тенденции изменения уровня на 12 лет, не ожидается резких колебаний уровня. В ближайшие 12 лет уровень моря будет изменяться незначительно с некоторой тенденцией сначала падения (до 2018 г.), а затем повышения в диапазоне абсолютной отметки $-27,5$ м БС ÷ $-28,00$ м БС.

Фоновый прогноз УКМ на 18 лет

Длина исходного ряда составила 83 года (1931–2014 гг.), расчетный ряд составил 36 лет. Параметры корреляции: $R = 0,981$; $S = 11,84$. Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид

$$\sum_{n=1}^{18} \Delta H = 59,43B_0^3 - 6,14B_1^3 + 48,66B_0^2 - 4,88B_0^1 + 21,84. \quad (5)$$

На рис. 11 представлен график хода фактических и вычисленных по уравнению (5) величин, накопленных по 18-летиям сумм годовых приращений УКМ с прогнозом до 2032 г., а на рис. 11 – фактический ход уровня и прогноз в абсолютных отметках уровня.

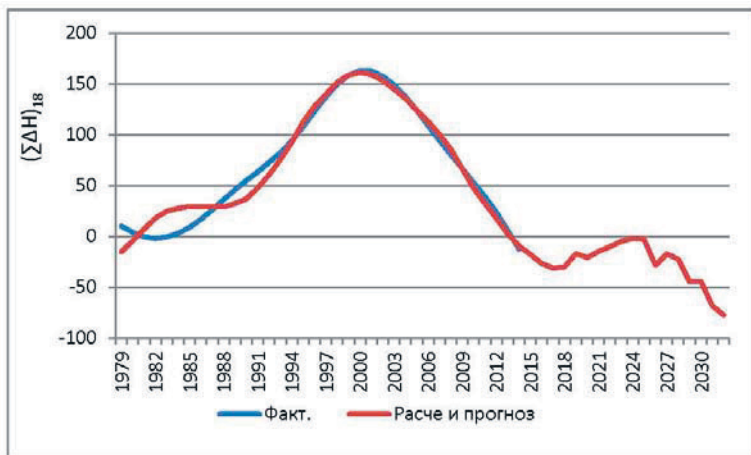


Рис. 11. Ход фактических и рассчитанных по уравнению накопленных по 18-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2032 г.

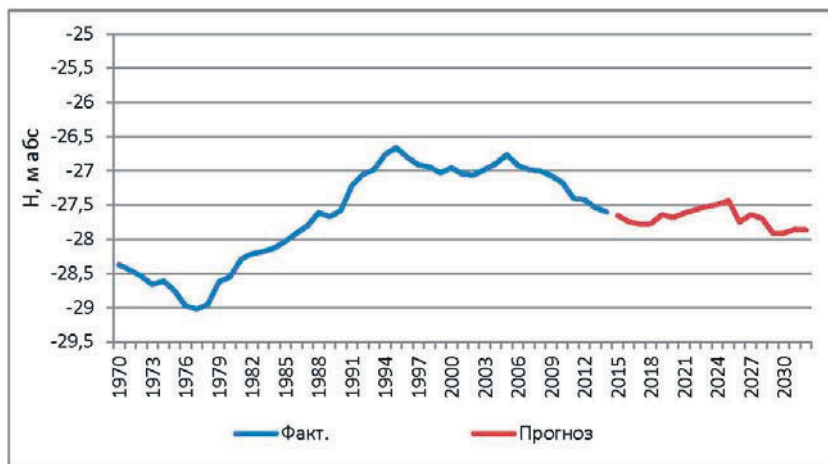


Рис. 12. Фоновый прогноз УКМ на 18 лет вперед до 2032 г., составленный в 2014 г.

В соответствии с прогностической оценкой тенденции изменения уровня на 18 лет ожидается, что уровень моря будет колебаться в пределах от $-27,6$ м БС до $-27,9$ м БС, причем до 2018 г. сохранится тенденция незначительного понижения уровня, после чего уровень будет иметь неустойчивый характер с колебаниями в пределах от $-27,3$ м БС до $-27,9$ м БС. В пределах заблаговременности прогноза не ожидается сильного подъема или падения уровня УКМ. В целом до 2032 г. будет сохраняться относительная стабильность уровня вблизи современной отметки $-27,7$ м БС.

Заключение

1. Аномальные колебания уровня Каспийского моря в его вековом и многолетнем ходе являются проявлением климатической изменчивости глобального и регионального масштаба.

2. Учитывая положительные результаты прогнозов на 6, 12 и 18 лет, составленных ранее, в 2014 г. были подготовлены новые прогнозы фоновых тенденций изменения УКМ до 2020, 2026 и 2032 гг.

3. В соответствии с этими прогнозами в ближайшее двадцатилетие не ожидается резких продолжительных подъемов или падений УКМ.

Список использованных источников

1. *Абузаров З.К.* Физико-статистический метод фонового прогноза уровня Каспийского моря на срок 6 лет // Информационный сборник № 40. – 2013. – С. 23–40.

2. *Абузаров З.К.* О прогностической оценке фоновых изменений уровня Каспийского моря на срок 12 лет // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 3–21.

3. *Абузаров З.К.* Технология прогноза тенденций изменения УКМ на перспективу 6 и 18 лет // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 251–363.

4. *Белинский Н.А.* Использование некоторых особенностей атмосферных процессов для долгосрочных прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. – 203 с.

5. *Белинский Н.А., Калинин Г.П.* О прогнозе колебаний уровня Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС. – 1946. – Серия IV. – Вып. 37. – 36 с.

6. *Косарев А.Н., Никонова Р.Е.* Современные колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, тенденции // Вестник Каспия. – 2006. – № 4 (60). – С. 40–59.

7. *Нестеров Е.С.* Особенности циркуляции атмосферы в Северной Атлантике в последние десятилетия // Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященных 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. – М.: Триада лтд, 2010. – С. 269–280.

8. *Нестеров Е.С.* О связи между характеристиками глобальной циркуляции атмосферы и уровнем Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 323–325.

9. *Нестеров Е.С.* Низкочастотная изменчивость циркуляции атмосферы и уровень Каспийского моря во второй половине XX века // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 11. – С. 27–36.

10. *Смирнова К.И.* Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1972. – Вып. 94. – 123 с.

Поступила в редакцию 7.05.2015 г.