

Роль составляющих водного баланса Каспийского моря в месячных и годовых приращениях уровня моря

Введение

разномасштабные по времени колебания уровня каспийского моря (укм) являются одной из главных особенностей гидрометеорологического режима и основным фактором, лимитирующим все виды хозяйственной и другой деятельности на каспийском море. Для устойчивого функционирования водохозяйственных комплексов и проведения конкретных мероприятий по защите прибрежных территорий в странах каспийского региона требуется научно обоснованный прогноз возможных изменений укм для различных интервалов времени.

спектр колебаний уровня моря очень широк – от короткопериодных колебаний с временными интервалами от нескольких часов до нескольких суток до долгопериодных колебаний, охватывающих временные интервалы от месяца до года и более. Колебания уровня моря на разных частотных интервалах могут быть обусловлены различными факторами, которые находятся в сложном взаимодействии друг с другом. Эти факторы непрерывно меняются во времени и в пространстве, сложным образом взаимодействуя друг с другом. Относительное влияние каждого из этих факторов на колебания уровня моря трудно поддается интерпретации и его можно оценить только статистическими методами.

целью данной работы является оценка сезонных и межгодовых изменений составляющих водного баланса моря и связанных с ними изменений укм за последние 15 лет.

вопросам исследования причин сезонных и межгодовых укм и их прогнозу посвящено большое количество работ [1-15]. Однако, несмотря на серьезные исследования, проведенные в течение последних десятилетий в этом направлении, многие принципиальные проблемы еще далеки от своего решения.

в последние годы наиболее обстоятельные исследования водного баланса каспийского моря и связанных с ним колебаний уровня моря, выполнены в государственном океанографическом институте (гоин), гидрометцентре россии, государственном гидрологическом институте (гги), институте водных проблем российской академии наук (ивп ран) и московском государственном университете им. М.в ломоносова (мгу). В результате были получены примерные количественные оценки основных составляющих водного баланса моря и выявлены возможные причины изменения укм. Вместе с тем, анализ

результатов, полученных в этих организациях, свидетельствуют о том, что даже в отношении многолетних норм основных составляющих водного баланса моря (поверхностного стока, испарения и осадков) имеются значительные расхождения. Если же проанализировать данные расчетов за отдельные годы, то различия в оценках этих величин оказываются еще более ощутимыми. Основная причина этого лежит, на наш взгляд, как в различных подходах и качестве используемых материалов, так и в недостаточной надежности методов расчета элементов водного баланса.

Большинство работ, посвященных исследованию водного баланса каспийского моря и прогнозу укм, основаны на расчете замкнутого водного баланса. Впервые метод прогноза укм, основанный на приближенном расчете водного баланса, был внедрен в гидрометцентре россии еще в 50-е годы прошлого столетия и успешно применяется до сих пор. На основе этого метода ежегодно в первых числах мая выпускается прогноз месячного хода укм с годовой заблаговременностью по семи пунктам каспийского моря, а также прогнозы среднего месячного и среднего годового уровня моря. За прошедшее с тех пор время метод неоднократно уточнялся. Последнее уточнение метода было выполнено в конце 80-х годов 20-го столетия. В настоящее время возникла необходимость очередного уточнения метода. Оно обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, после последнего уточнения в гидрометеорологическом режиме каспийского моря произошли значительные изменения. Во-вторых, в методе используется ряд статистических величин (средние многолетние значения испарения, осадков и др.), которые необходимо время от времени пересчитывать.

в настоящее время при прогнозе годового хода укм используются средние многолетние значения гидрометеорологических величин, вычисленные за период с 1978 по 1988 г. В данной работе они пересчитаны для периода с 1988 по 2003 г. Соответственно, по уточненным за этот период статистическим данным были оценены изменения водного баланса моря и укм за последние годы.

Использованные материалы и их статистическая обработка

для выполнения расчетов водного баланса были использованы данные наблюдений за температурой воды и воздуха, осадками и уровнем моря на 12 прибрежных и островных станциях (махачкала, форт-шевченко, нефтяные камни, красноводск, куули-маяк, кара-богаз-гол, о.чиллов, ленкорань, баку, сумгаит, актау, о. Тюлений) за период с 1978 по 2003 г.

средние месячные данные о расходах воды по замыкающим створам рек волги, куры, урала, терека, самура, и сулака, а также величины сбросов воды волгоградской гэс и данные о водности рек, впадающих в каспийское море, были предоставлены отделом речных гидрологических прогнозов гидрометцентра россии. По этим данным были сформированы временные ряды и выполнены расчеты основных составляющих водного баланса (речной сток, испарение, осадки, сток в залив кара-богаз-гол и др.), а также

вычислены их статистические характеристики (среднемесячные, среднегодовые и средние многолетние величины, тренды, средние квадратические отклонения и др.). Для этого был применен программный комплекс «statistica».

расчет водного баланса каспийского моря за период с 1978 по 2003 г.

для суждения о межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня моря и соотношении между основными его элементами были выполнены расчеты по уравнению водного баланса, которое записывается в виде

$$\Delta h_{\Delta t} = \frac{\sum Q_{\text{д\`а\`т\`и\`н\`д\`о}}}{S} + \frac{Q_{\text{п\`и\`д\`г\`р\`у\`н\`д\`н\`й}}}{S} - \frac{Q_{\text{э\`а\`п\`а\`т\`н\`й}}}{S} + P - E \pm \Delta h_{\sigma}, \quad (1)$$

Где $\Delta h_{\Delta t}$ - изменение среднего уровня моря за определенный промежуток времени Δt ; $\sum Q_{\text{д\`а\`т\`и\`н\`д\`о}}$ - увеличение объема моря за счет суммарного поверхностного стока рек волги, куры, урала, терека, сулака, самура, иранских рек и междуречья; $Q_{\text{п\`и\`д\`г\`р\`у\`н\`д\`н\`й}}$ - подземный приток; $Q_{\text{э\`а\`п\`а\`т\`н\`й}}$ - сток воды в залив кара-богаз-гол; P - повышение уровня моря за счет осадков, выпавших на поверхность моря; E - понижение уровня моря за счет испарения с поверхности моря; Δh_{σ} - плотностные изменения уровня; S - площадь моря на момент расчета.

сущность расчета водного баланса каспийского моря, как замкнутого водоема, заключается в определении объемных величин (км³) приходной и расходной части за каждый месяц рассматриваемого года и последующего сравнения балансового изменения уровня моря (см слоя воды) с фактическими изменениями укм. Годовые величины получаются путем алгебраического сложения месячных значений прихода и расхода воды в море. Следует отметить, что прогноз приращений уровня моря по уравнению (1) является недостаточно надежной процедурой и связан с рядом допущений и приближений, которые могут приводить к значительным ошибкам, особенно при значительных и резких изменениях уровня моря.

точность расчета составляющих водного баланса, а, следовательно, и точность расчета и прогноза укм во многом определяется достоверностью наблюдений за гидрометеорологическими элементами и площадью моря, на данных которых основывается расчет. К сожалению, данные наблюдений не всегда соответствует необходимым требованиям. Вместе с тем, метод водного баланса позволяет контролировать качество исходных данных и понять, как уровень моря реагирует на изменения влияющих на него гидрометеорологических факторов. Кроме того, метод водного баланса может быть использован для выполнения ретроспективных расчетов испарения при известных значениях стока рек и уровня моря и для оценки стока морских вод в залив кара-богаз-гол.

расчет притока речных вод

из более 130 рек, впадающих в каспийское море, в расчет принимался суммарный речной сток только 6 наиболее крупных рек (волга, кура, урал, терек, самур и сулак). Объем стока рек с иранского побережья и междуречий, составляющий около 5% суммарного стока, принимается постоянным. Суммарный речной сток определялся по гидрометрическим данным на замыкающих створах указанных рек.

потери воды в дельте волги $Q_{\bar{r}}$ оценивались по формуле [12]

$$Q_{\bar{r}} = 0,034 Q_{\bar{A}} + 0,22, \quad (2)$$

Где $Q_{\bar{A}}$ – объем волжского стока в нижнем бьефе волгоградской гЭС.

расчет испарения с поверхности моря

наряду с объемом стока рек, величина испарения является наиболее значимой слагаемой водного баланса моря. Величина испарения с поверхности каспийского моря непосредственно не измеряется, а рассчитывается. Для расчета испарения с поверхности моря была использована формула из работы [12].

$$E = 4,29 E_{tw} + 8, \quad (3)$$

Где E_{tw} - максимальная упругость водяного пара при температуре воды за предшествующий месяц.

температура воды в открытых акваториях моря, как известно, всегда ниже температуры прибрежных районов, следовательно, и испарение с открытых районов моря будет несколько ниже. Чтобы учесть это обстоятельство, рассчитанные по формуле (3) значения испарения были уменьшены на 5 %.

расчет осадков

в тех случаях, когда данные наблюдений отсутствовали, осадки рассчитывались по эмпирической формуле

$$P_M = 0,98 P_{\bar{A}\bar{N}} + 1,7(t_w - t_A) - 1, \quad (4)$$

Где P_M - месячная сумма осадков, выпадающих на поверхность моря (мм/мес);
 $P_{\text{АиН}}$ - средняя месячная сумма осадков, выпадающих на станциях; $t_W - t_A$ - средняя
 месячная разность температуры воды и воздуха на станциях.

Расчет стока морских вод в залив кара-богаз-гол

оценка современного стока каспийской воды в залив кара-богаз-гол осуществлялась на основе установленной эмпирической связи между расходом воды в проливе и уровнем моря на водпосту кара-богаз-гол за период с января 1992 по июль 1999 гг. Коэффициент корреляции этой связи составил 0,80.

аппроксимация указанной зависимости имеет вид

$$Q = 0,0526H - 3,1393, \quad (5)$$

Где Q – величина расхода воды в проливе кара-богаз-гол в км³, H – уровень моря в сантиметрах относительно абсолютной отметки -28,00 м бс.

учет подземного притока вод в море

подземный приток вод в море является наименее изученной составляющей водного баланса моря. Количественно оценить объем стока подземных вод суши в море очень трудно. По данным различных источников он колеблется в широких пределах от 2 до 40 км³. Основная причина этого – отсутствие достоверных гидрологических материалов, а также ненадежность применяемых методов расчета. В наших расчетах величина подземного притока принималась равной 4 км³/год [10]. По сравнению с другими составляющими водного баланса эта величина незначительна.

учет плотностных изменений объема моря

вследствие большой пространственно-временной изменчивости температуры и солёности воды в каспийском море происходят значительные колебания плотности, которые приводят к изменениям объема воды, а следовательно, и уровня моря. Весенне-летний прогрев обуславливает увеличение объема воды, а осенне-зимнее охлаждение - уменьшение. Расчеты показали [12], что роль плотностных изменений наибольшая в среднем и южном каспии, где изменения температуры и солёности воды охватывают значительно больший

объем воды. В период наиболее интенсивной теплоотдачи понижение уровня в этих районах составляет порядка 2-3 см в месяц. В северной части каспийского моря величина плотностных изменений уровня не превышает 1 см в месяц. Для оценки плотностных изменений уровня Δh_{σ} использовались данные табл.1.

Таблица 1

Средние многолетние плотностные приращения уровня моря по месяцам в мм слоя воды

(по Смирновой, 1972)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср.го д.
-7	-4	0	3	11	19	21	11	-9	-13	-20	-12	0

Определение площади моря

точность расчета составляющих водного баланса моря в значительной степени зависит от точности определения площади моря. В изменениях уровня, вызванных колебаниями объема воды, площадь моря играет роль «реактивного фактора». Один и тот же объем поверхностного притока воды при высоком стоянии уровня обусловит меньшее его повышение, чем тот же объем при низком стоянии. Однако влияние этого фактора на точность расчетов годового хода уровня моря оказывается не столь существенным и составляет лишь 2% ее амплитуды. В многолетних изменениях уровня моря этот фактор необходимо учитывать обязательно. Существует целый ряд объективных трудностей, усложняющих решение этой задачи. Одна из них связана с природой изучаемого явления – положение береговой линии моря постоянно меняется во времени и в пространстве (особенно северная мелководная часть моря), как вследствие общих тенденций роста или падения укм, так и в течение коротких промежутков времени под воздействием разнообразных факторов, таких, например, как сгонно-нагонные явления. Другая трудность заключается в невозможности в настоящее время обеспечить полноценный мониторинг состояния каспийского моря. Большую подвижность береговой линии определяют крайне малые уклоны (10-20 см на км) прибрежных участков суши и подводного берегового склона северной части моря. Следует отметить, что зависимость площади акватории Каспия от его уровня является фактором, стабилизирующим его колебания. Чем выше уровень, тем больше его площадь и тем больше потери воды на испарение.

площадь моря определяется по морфометрической кривой, предложенной Кудрицким в 1941 г. [8] и уточненной Аполловым в 1956 г. [4]. Эта кривая характеризует зависимость площади моря от уровня моря по водопосту Баку.

Аналитическое выражение этой зависимости имеет вид

$$S = (0,1514H + 375,034) \times 10^3, \quad (6)$$

где S - площадь моря в тыс. км²; H - средний уровень моря в см.

результаты расчета водного баланса

результаты расчетов средних годовых значений водного баланса по уравнению (1) и характеристики укм за период с 1978 по 2003 г. Приведены в табл.2.

Таблица 2

Водный баланс каспийского моря с 1978 по 2003 г.

Годы	Приход (в мм слоя)			Расход (в мм слоя)		Вычисленные приращения уровня, см	Сред.уровень моря, м.абс.	Фактич. Приращение, см	Невязка, см
	Поверхн. Сток	Осадки	Подз. Приток	Испарение	Сток в заливы в кбг				
1978	882	246	14	994	32	11,6	-28,98	5	-7
1979	995	277	“	1011	32	24,3	-28,66	32	8
1980	807	236	“	986	0	7,1	-28,54	12	5
1981	915	255	“	1045	0	13,9	-28,28	26	12
1982	715	220	“	972	1	1,3	-28,19	9	7

1983	715	146	“	1014	5	-10,3	-28,15	4	14
1984	730	265	“	992	5	1,7	-28,11	4	2
1985	890	185	“	967	10	11,7	-28,01	10	-2
1986	884	120	“	1020	10	-0,7	-27,91	10	11
1987	867	222	“	955	10	13,8	-27,82	9	-5
1988	780	230	“	1003	10	1,1	-27,62	20	19
Средне е За1978- 1988 гг.	835	218		996	10	6,9	-28,21 (-21 см)	12,8	5,8
1989	701	200	“	1011	10	-11,0	-27,63	-1	10
1990	1019	234	“	1019	10	23,8	-27,54	9	-15
1991	949	212	“	1013	10	17,2	-27,18	36	19
1992	773	229	“	977	13	15,2	-27,05	13	-2
1993	886	180	“	977	37	6,9	-26,94	11	4
1994	993	179	“	959	42	18,5	-26,75	19	0
1995	818	199	“	968	52	10,0	-26,62	13	3
1996	636	156	“	977	29	-20,0	-26,80	-18	2
1997	740	147	“	999	18	-11,6	-26,98	-18	-6
1998	784	138	“	1028	18	-11,0	-27,03	-5	6
1999	841	162	“	1057	18	-5,8	-27,05	9	4
2000	740	157	“	1040	18	-14,7	-27,08	-3	12
2001	827	108	“	1008	18	-7,7	-27,17	-9	-1
2002	833	199	“	891	18	13,7	-27,15	2	-12
2003	789	242	“	983	18	4,4	-27,09	6	2
Средне е за 1989-	822	183		994	22	+1,9	-27,07 (+93 см)	+4,3	+1,7

2003 гг.									
Средне е За 1978- 2003 гг.	827	205	14	995	17	4,0	-27,55 (+45 см)	8	4

Примечание в скобках приведен уровень в относительных единицах.

таким образом, средний годовой водный баланс каспийского моря за период 1978-2003 гг. определен в следующих объемах: составляющие приходной части водного баланса – поверхностный сток в размере 827 мм слоя воды, осадки 205 мм слоя и подземный приток 14 мм слоя. Итого приходная часть составила 1046 мм слоя. Составляющие расходной статьи водного баланса моря: испарение – 1033 мм слоя, сток в залив кара-богаз-гол – 17 мм. Итого расходная часть составила 1050 мм. Среднее приращение укм за указанный период - 4 см, а фактическое приращение - 8 см. Таким образом, невязка составила 4 см. Средний уровень каспийского моря при этом находился на абсолютной отметке - 27,55 м бс (относительная отметка 45 см).

Оценка роли межгодовой изменчивости характеристик водного баланса моря в месячных и годовых приращениях укм

исследованию межгодовой изменчивости характеристик водного баланса и уровня моря был посвящен ряд работ [5,6,7,9,12,15].

многолетний ход укм имеет ярко выраженный нестационарный характер

(рис. 1).

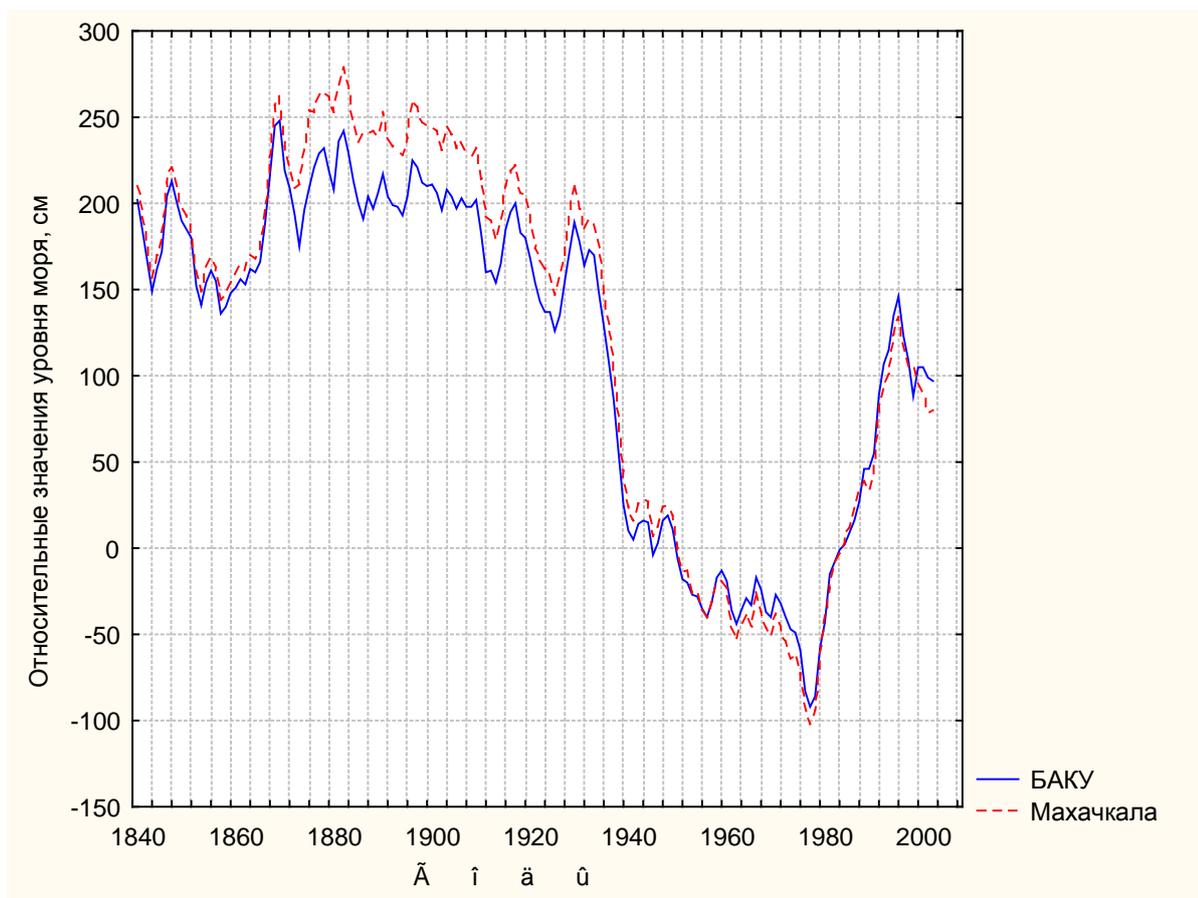


Рис. 1. Многолетний ход уровня каспийского моря в пунктах баку и махачкала.

(значения уровня даны в сантиметрах над единым нулем каспийского моря, равным $-28,00$ м бс).

в середине 70-х годов прошлого столетия укм был примерно на 3 м ниже, чем в начале столетия, так что линейный тренд составил около 3,8 см в год.

в течение 1878-1933 гг. Средний тренд был около 1 см в год, а в 1941-1977 гг. - 3 см в год. Если взять только естественный сток в каспийское море (без изъятия), то положительный тренд мог бы составить 1,5 см в год. Почти половина общего изменения укм приходится на период 1934-1940 гг., когда уровень понижался до 20 см и более в год, опустившись на 1,5 м в течение 6 лет.

межгодовая изменчивость составляющих водного баланса и укм определяется многими причинами, основными из которых являются: климатические факторы, тектонические процессы, оказывающие влияние на изменения объема морской чаши, и факторы, связанные с человеческой деятельностью на водосборе каспия, прежде всего изъятие речных вод на хозяйственные нужды.

Современные тектонические движения земной коры на побережье каспия не превышают нескольких миллиметров в год (от $\pm 2,5$ до $\pm 5,5$ мм), поэтому их вклад в изменения укм пренебрежимо мал. Антропогенная деятельность в бассейне каспия, главным образом

изъятие речных вод на хозяйственные нужды, приводит к дополнительному снижению уровня моря (в отдельные годы до 10-12 см). Суммарный объем безвозвратного водопотребления из рек водосборного бассейна каспия составлял в 80-е годы прошлого столетия порядка 40-50 км³ в год, в том числе до 50% всех изъятий приходилось на волжский сток. В естественных условиях уровень моря мог бы находиться существенно выше современных отметок. В настоящее время большинство исследователей [5,9] сходятся во мнении, что основной вклад в многолетние колебания укм вносят климатические факторы, оказывающие преобладающее влияние на формирование составляющих водного баланса моря. Неравенство приходной и расходной частей водного баланса определяют разномасштабную изменчивость укм.

в многолетнем ходе укм выделяется два периода с относительно устойчивым режимом колебаний уровня (1878-1933 и 1941-1977 гг.) И два периода с аномальным поведением уровня (1934-1941 и 1978-1995 гг.). Период с 1934 по 1941 г. Характеризовался катастрофическим падением уровня, а период с 1978 по 1995 г. Катастрофическим ростом. Наиболее значительные изменения укм отмечаются в периоды с аномальными колебаниями уровня моря. При этом переход из одного режима в другой происходит довольно резко. Так, после высокого стояния уровня в 1928-1933 гг. Началось быстрое его падение; обратная ситуация сложилась в конце 70-х годов прошлого столетия, когда после достижения в 1977 г. Минимального значения уровня за последние 500 лет (-29 м бс), он начал резко повышаться.

с 1978 по 1995 г. Уровень моря повысился почти на 2,5 м, так что средняя скорость роста в течение этого периода составила около 14 см в год.

в 1996-1997 гг. Уровень моря понизился почти на 0,4 м, после чего он стабилизировался, незначительно варьируя около средней величины -27,00 м бс и оставаясь в этом состоянии до настоящего времени. Что касается многолетнего хода приращений укм (т.е. Его изменений от года к году), то здесь не наблюдается сколько-нибудь заметно выраженного тренда (рис. 2).

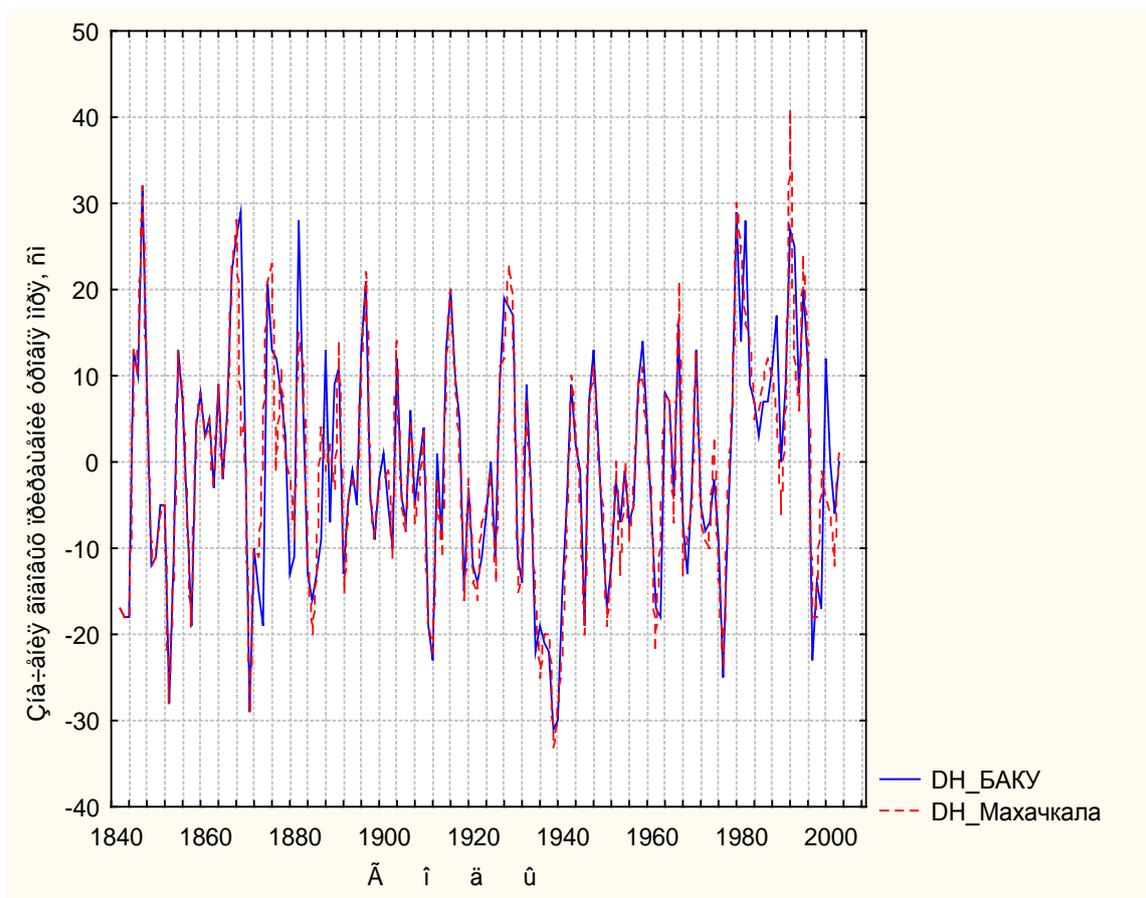


Рис. 2 многолетний ход годовых приращений укм в пунктах баку и махачкала.

в отличие от абсолютных значений уровня моря, повторяемость распределения приращений близко соответствует нормальному (гауссовому) распределению (рис.3).

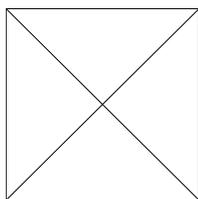


рис.3. Повторяемость распределения годовых приращений укм.

по результатам анализа многолетнего хода укм за прошлые сто лет было показано, что аномалия осадков и испарения над морем незначительно изменяют диапазон колебаний укм. Главной причиной тренда в ходе укм после 1977 г. является увеличенный сток рек в море.

как показали исследования [5,9], повышение уровня, начавшееся в 1978 г., было обусловлено климатическими факторами, определившими изменения в соотношении элементов водного баланса в сторону увеличения приходных составляющих поверхностного притока, главным образом стока волги и атмосферных осадков, выпадающих на поверхность моря, и уменьшения расходной составляющей – испарения с поверхности моря. В среднем за 1978-1995 гг. Речной приток и осадки были выше нормы на 5,6 % и на 6,6 %, а испарение на 3,9 % ниже нормы.

объем суммарного стока речных вод в период подъема уровня моря (1978- 2003 гг.) Составил в среднем 827 мм слоя воды в год или 305,5 км³ в год и был на 9% больше среднего объема стока за предыдущие 20 лет. В отдельные годы в море поступало речной воды свыше 350 км³ в год. Волга приносила в море свыше 260 км³ в год, а в особенно многоводные годы до 300 км³.

многолетние значения стока рек, осредненные за период с 1925 по 2003 г., приведены в табл. 3.

таблица 3

Средние годовые значения притока речных вод в каспийское море

Реки	средний годовой приток (км ³)	Процент от суммарного стока
Волга	228,6	84,5
Кура	16,6	6,1
Урал	8,4	3,1
Терек	6,8	2,5
Сулак	4,2	1,6
Самур	1,7	0,6
Иранские реки и междуречья	4,1	1,6

из таблицы видно, что наибольшие величины притока вод в море (84,5%) дает р. Волга (84,5%). Все остальные реки дают приток речных вод около 15,5%.

Вместе с тем, точный расчет волжского стока в море осложняется достаточно высокой степенью зарегулированности рек. Получить точные данные о зарегулированности речного

стока пока не представляется возможным. Ошибки здесь могут достигать 30%. Основные источники ошибок могут быть обусловлены разными причинами, среди которых:

- Завышение стока из-за подпора воды в русле реки во время ледохода;
- Потери воды на участке реки от гэс до устья.

реальная ситуация может представлять собой комбинацию вышеуказанных и других причин. По оценкам специалистов [9] потери воды в дельте волги могут достигать 20 км^3 . Испарение за этот период составило 908 мм слоя, оно уменьшилось по сравнению с предыдущим периодом примерно на 8%. Повышение уровня моря в этот период определялось также увеличением количества атмосферных осадков, выпавших на поверхность моря.

при расчете стоковых приращений уровня моря в пунктах, расположенных по периметру моря, важным моментом является расчет времени добегания воды от дельты волги до этих пунктов.

анализ данных наблюдений за уровнем моря с севера на юг показывает, что время распространения волжской воды от дельты до различных районов моря неодинаково [15] например, наступление максимума в годовом ходе уровня моря в пункте махачкала происходит примерно месяц спустя после сброса воды в нижний бьеф волгоградской гэс, а в баку эта вода приходит почти через два месяца. Отсутствие ежедневных графиков зарегулированных расходов р. Волги у волгограда не позволяют сделать расчеты трансформации весенней паводочной волны при ее распространении с севера на юг с большей полнотой. При этом должны учитываться два важных обстоятельства, которые могут повлиять на точность расчета стоковых приращений уровня моря.

1. В каспийском море нет однонаправленного устойчивого потока вод с севера на юг. На движение волжских вод накладываются дрейфовые и градиентные течения и ветровые нагоны, обуславливающие сложность рельефа поверхности моря. В результате, показания средних месячных уровней в отдельных пунктах определяются не только трансформацией волжских вод, но и другими факторами.

2. Внутригодовое перераспределение величины стоковых приращений уровня имело существенное значение в условиях естественного гидрологического режима, когда образовавшаяся на волге паводочная волна, без каких-либо ограничений проникала на акваторию каспийского моря и в этом случае учет трансформационной волны был оправдан. В условиях зарегулированности стока крупных рек, роль этого фактора уменьшилась. Поступление воды в море стало более равномерным по сравнению с естественными условиями, что способствует некоторому выравниванию рельефа уровенной поверхности. Кроме того, в условиях зарегулированности стока рек нарушилась закономерность распространения паводочной волны в море из-за разнообразий объемов пускa воды в нижний бьеф гэс. Это определило большую изменчивость времени пробега волны от устья волги до заданных пунктов на каспийском море. Эта проблема недостаточно

изучена и требует более глубокого исследования с привлечением детальных исходных данных.

в результате перекрытия плотиной в 1980-1984 гг. залива кара-богаз-гол и сокращения стока в залив в 1985-1992 гг. До $1,5 \text{ км}^3$ в год, поступление морских вод в залив существенно уменьшилось по сравнению с условиями свободного стока. Это привело к дополнительному повышению укм примерно на 40 см. Ликвидация плотины в 1992 г. Увеличила расход воды в заливе и замедлила повышение укм. В 1993-1995 гг. За счет большого стока в залив уровень моря был примерно на 10 см меньше, чем в условиях регулирования стока через плотину. Месячные значения расхода воды в проливе кара-богаз-гол приведены в табл. 4.

таблица 4

Месячные значения расхода воды в проливе кара-богаз-гол (км^3) за период с 1992 по июль 1999 гг.

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средн ее
1992	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14	0,88	1,90	1,90	1,90	2,00	1,90	1,90	13,0
1993	2,00	1,67	1,96	2,18	2,76	3,94	5,15	4,99	3,13	2,79	2,98	3,19	36,7
1994	3,03	2,66	3,27	3,16	3,24	3,16	3,46	3,62	3,73	4,15	3,89	4,13	41,5
1995	3,99	3,70	4,21	4,33	4,40	4,10	4,70	4,80	4,60	4,60	4,50	4,30	52,2
1996	4,10	3,60	3,30	2,70	2,70	2,70	2,80	2,30	1,60	1,13	0,83	1,15	28,9
1997	1,10	1,02	1,15	1,24	1,45	1,71	2,09	2,41	2,00	1,37	1,11	1,05	17,7
1998	1,04	1,08	1,10	1,18	1,37	1,63	2,12	2,83	2,20	1,65	0,90	0,60	17,7
1999	0,55	0,50	0,80	0,92	1,70	2,62	2,70						

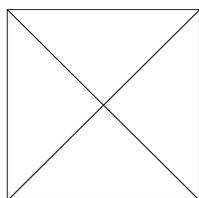
из таблицы видно, что расход воды в проливе имеет сезонный ход и связан с сезонным ходом уровня моря. Приведенные в таблице данные были использованы при получении формулы (5).

Сезонная изменчивость характеристик водного баланса и уровня моря

в годовом цикле колебания укм носят четко выраженный сезонный характер, обусловленный метеорологическими условиями над бассейном каспийского моря.

внутригодовой ход уровня в различных пунктах наблюдений имеет свои особенности, отражающие в то же время и общие закономерности, характерные для моря в целом. Одни районы мелководные и открытые, там наблюдаются значительные сгонно-нагонные колебания уровня, другие – глубоководные, где изменение уровня обусловлено в основном водным балансом всего моря. На рис.4 представлены кривые помесячного хода уровней по данным 11 станций, осредненным за период с 1978 по 2003 г.

как видно из рисунка, самое низкое положение уровня чаще всего наблюдается в октябре-феврале, затем в марте-июне он быстро повышается, достигая в июне-июле максимальных значений, после чего снова понижается до зимнего минимума.



. Рис. 4. Годовой ход уровня каспийского моря по 11 пунктам моря

значения уровня даны в см над единым нулем каспийского моря, равным -28,00 м абс.

на рис. 4 обнаруживается большой разброс значений уровня моря между различными пунктами. Максимальные различия (до 25-30 см) наблюдаются между пунктами западного и восточного побережья моря.

вследствие преимущественного поступления речных вод в северную часть каспийского моря и влияния силы кориолиса, уровенная поверхность моря имеет наклон с севера на юг и с запада на восток, который наиболее ярко выражен весной в период половодья.

на внутригодовой ход уровня моря также оказывают влияние и сгонно-нагонные явления, приводящие в отдельные месяцы к значительным отклонениям от нормального внутригодового хода уровня. Отклонения уровня моря при сгонно-нагонных явлениях от их среднемесячных величин соизмеримы с размахом (амплитудой) внутригодовых колебаний уровня моря и составляют в среднем 30-70 см. Наибольшие отклонения уровня моря от

среднемесячных значений наблюдаются в северной мелководной части каспийского моря. При составлении прогноза помесячного хода уровня эти особенности уровня режима моря должны учитываться.

величина размаха внутригодовых изменений уровня моря (разность наибольшего и наименьшего среднемесячных значений уровня моря) за 1900 – 2004 гг. Составила в среднем по морю около 30 см, а в северном каспии до 40 см. В отдельные годы величины размаха внутригодовых колебаний могут существенно отличаться от среднего многолетнего значения.

сезонный ход уровня в основном определяется речным стоком, отличающимся большой изменчивостью. Наибольшие величины положительных отклонений средних месячных значений уровня моря от их средних годовых значений отмечаются с мая по август, и особенно в июне-июле (рис.5) .

в северной части моря, куда поступает основная часть стока, размах сезонных колебаний уровня наибольший. Самые значительные сезонные колебания отмечаются в мелководной части устьевое взморья волги, где в среднем они достигают 1 м и постепенно уменьшаются в сторону моря до значений, характерных для сезонного хода всего каспийского моря (30-40 см).

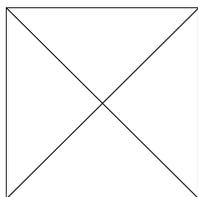


Рис.5 годовой ход отклонений средних месячных значений уровня (dh) от среднего годового уровня, осредненных за период с 1978 по 2003 г. Для 7 пунктов.

анализ многолетних данных показывает, что в маловодные годы отклонения средних месячных значений уровня моря от среднего годового его значения в первую половину года меньше, чем во вторую, а в многоводные годы, наоборот.

отклонения среднемесячных значений стока от средних многолетних более существенны в период половодья (апрель-июль), когда сток рек может колебаться от 15 до 90 км³ в месяц, а в зимнюю межень (декабрь-февраль) – от 5 до 30 км³ в месяц, т.е. Объем речного притока вод может увеличиваться или уменьшаться в 2-3 раза.

величина размаха внутригодовых изменений уровня моря за 1900-2003 гг. Составила в среднем по морю около 30 см, а в северном каспии – до 40 см. Изменения испарения воды с поверхности моря определяют около 30% размаха сезонного хода уровня моря. Роль атмосферных осадков в сезонных колебаниях уровня мала и составляет 10-15 % величины годового хода уровня.

что касается месячных приращений укм, то они достигают наибольших положительных значений в мае-июне, а наибольших отрицательных значений в сентябре-октябре (рис. 6).

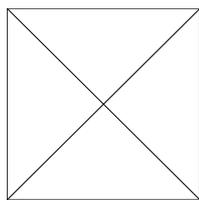


Рис.6. Месячные приращения укм для 7 пунктов, осредненные за период 1978-2003 гг.

достаточно полное представление о масштабах колебаний укм по акватории моря можно получить из табл.5, в которой даны средние месячные уровни для лет с максимальным и минимальным размахом уровня (1977 и 1995 гг.) По ряду пунктов каспийского моря.

Средние месячные приращения уровня по 7 пунктам каспийского моря для двух аномальных лет (1977 и 1995 гг.)

Пункты	месяцы													
	Годы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср. Год.
Баку	1995	2	1	3	-4	12	10	6	-9	-6	-13	-3	-5	-0,5
	1977	2	-1	5	6	5	5	1	-7	-12	-11	-1	1	-1,6
О.жилой	1995	-1	-10	5	3	17	2	10	1	-11	-16	-7	5	-0,2
	1977	3	2	1	4	8	3	6	8	5	-11	-4	1	2,2
Форт-шевче- Ко	1995	2	2	-7	2	13	2	2	-4	-1	-7	-2	0	0,2
	1977	-6	5	1	7	5	5	-4	-6	-10	-4	2	-4	-0,8
Махачкала	1995	-4	-7	1 0	2	4	16	2	1	-17	-11	-2	-1	-0,6
	1977	-8	4	0	6	7	0	-2	-5	-5	-14	6	-1	-1,0
Куули-маяк	1995	-4	0	2	4	10	9	2	-3	-10	-10	-6	1	-0,4
	1977	-4	5	2	3	1	1	5	-10	-16	-4	-7	-2	-2,2
Красноводск	1995	-1	0	2	4	-9	6	7	-2	-14	-10	-7	1	-1,9
	1977	-3	2	7	3	7	3	8	-13	-11	-5	-4	1	-0,4
Кара-богаз- гол	1995	2	-2	1 0	10	4	14	7	-1	-4	1	-5	2	3,2
	1977	-3	8	2	9	5	4	3	-9	-9	-6	-4	0	0
Среднее	1995	-1	-2	4	3	7	8	5	-2	-9	-9	-5	0	

	1977	-3	4	3	5	5	3	2	-6	-8	-8	-2	-1	
Макс. Разности между пунктами	1995	6	12	1 7	14	26	14	8	10	16	17	5	10	13
	1977	10	9	7	7	7	5	12	21	17	10	13	5	10

что касается годового хода отклонений среднего месячного уровня от среднего уровня моря, то он довольно сильно отличается от пункта к пункту (рис.7). Прежде всего видны большие положительные отклонения уровня от среднего годового, достигающие 12 см для станций западного побережья (о. Жилой, баку) и столь же большие отрицательные отклонения для станций восточного побережья (красноводск, кара-богаз-гол и куули-маяк). При этом, наибольшие положительные отклонения уровня от среднего по морю наблюдаются в пункте о. Жилой, а наибольшие отрицательные – в пункте красноводск. Что касается годового хода отклонений уровня моря, то здесь не просматривается какой-либо закономерности, что, по-видимому, связано с влиянием сгонно-нагонных явлений, особенностями распространения паводочной волны, с пространственным различием плотностных изменений объема воды в море и другими причинами.

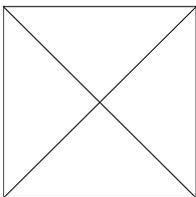


Рис. 7. Годовой ход отклонений среднего месячного уровня (dh) от среднего уровня моря за период с 1978 по 2003 г.

в качестве примера в табл. 6 приведены данные расчета водного баланса и уровня моря для двух конкретных лет (1999 и 2000 гг.).

Таблица 6

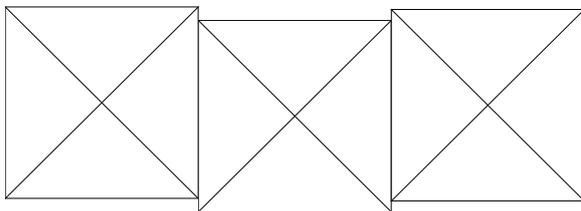
Помесячный расчет составляющих водного баланса и уровня моря и их невязки
в 1999 и 2000 гг.

Месяц	Приход (км ³)	Расход (км ³)	Δb	Δh в См	Δh ф См	Δh - Δh ф
-------	---------------------------	---------------------------	------------	--------------------	-----------------------	---------------------------------

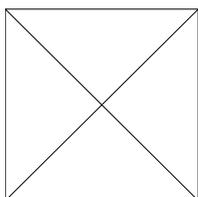
	Qсток		Q подз	Σ	E		Σ				
1999 г.											
I	20,3	4,5	0,33	25,1	19,5	0,9	20,4	4,7	0,5	0	0,5
II	22,3	3,1	0,33	25,7	17,4	0,9	18,3	7,3	1,5	1	0,5
III	31,7	4,2	0,33	36,2	18,8	1,0	19,8	16,4	4,2	5	-0,8
IV	42,0	3,3	0,33	45,6	22,2	1,1	23,3	22,3	6,0	3	3,0
V	64,5	8,3	0,33	73,1	27,9	1,5	29,4	43,8	12	6	6,0
VI	31,4	0,0	0,33	31,7	34,3	2,0	36,3	-6,6	1,0	11	-10
VII	20,2	6,9	0,33	27,4	45,1	2,3	47,4	-20,0	-3,0	-4	1,0
VIII	19,7	12,5	0,33	32,6	49,8	2,6	52,4	-19,8	-3,9	-1	-2,9
IX	18,9	12,8	0,33	32,0	53,8	2,1	55,9	-23,9	-7,0	-12	5,0
X	14,8	15,7	0,33	30,8	44,4	1,5	45,9	-15,1	-5,2	-6	0,8
XI	16,1	18,3	0,33	34,7	37,9	1,0	38,9	-4,1	-3,1	-3	-0,1
XII	16,1	2,4	0,33	18,8	25,7	0,8	26,5	-7,6	-3,2	-1	-2,2

Год	318	92	4,0	414	397	18	415	-2,6	-0,2	-1	0,8
2 0 0 0 г.											
I	15,1	11,4	0,33	26,8	20,0	0,9	20,9	5,9	0,8	-2	1,2
I	13,6	4,9	0,33	18,9	16,1	0,9	17,0	1,9	0,1	0	0,1
lii	17,4	11,0	0,33	28,8	17,5	1,0	18,5	10,2	2,6	2	0,6
Iv	31,4	0,9	0,33	32,6	20,2	1,1	21,3	11,2	3,2	2	1,2
V	62,5	4,6	0,33	67,5	30,9	1,5	32,4	35,0	10	5	5,0
Vi	28,9	0,7	0,33	29,9	36,1	2,0	38,0	-8,2	-0,2	0	-0,2
Vii	22,8	0,0	0,33	23,1	43,2	2,3	45,5	-22,4	-3,6	10	-14
Viii	18,1	0,9	0,33	19,3	49,8	2,6	52,4	-33,2	-7,4	-5	-2,4
Ix	18,5	18,0	0,33	36,8	50,7	2,1	52,8	-16,0	-5	-8	3,0
X	17,1	20,9	0,33	38,4	43,9	1,5	45,4	-7,1	-3,1	-8	4,9
Xi	17,2	16,2	0,33	33,7	34,2	1,0	35,2	-1,5	-2,4	-1	-1,4
Xii	16,2	8,6	0,33	25,2	27,0	0,8	27,8	-2,6	-1,9	-3	1,1
Год	279	98,1	3,96	381	390	18	408	-26,6	-6,8	-8	-1,2

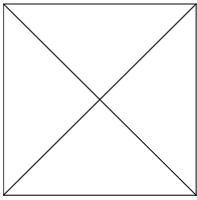
Примечания.



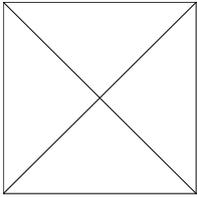
- суммарный речной сток (км³);



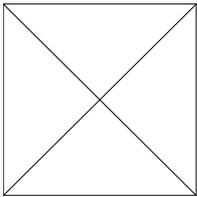
- атмосферные осадки, выпадающие на зеркало моря (км³);



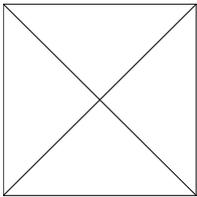
- испарение с поверхности моря (км^3);



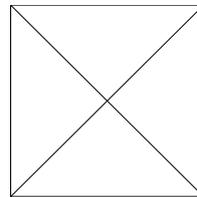
- подземный приток (км^3);



- сток морских вод в залив кара-богаз-гол (км^3);

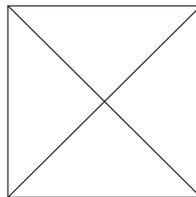


- баланс моря (изменение объема моря), определяется как разность между приходной и расходной частями водного баланса (км^3);

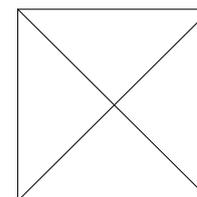


- расчетное приращение уровня моря (см), определяется как отношение

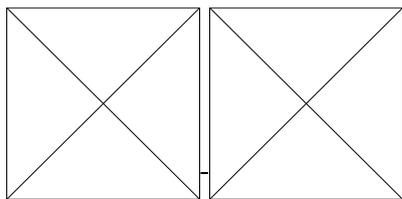
изменения объема моря
изменений уровня моря;



к площади моря с учетом плотностных



- фактическое месячное и среднегодовое значение уровня моря;



- разность между вычисленным и наблюдаемым приращением уровня моря, характеризует погрешность расчета водного баланса.

как видно из табл. 6, в период с января по май наблюдался рост уровня, обусловленный преобладанием приходной составляющей водного баланса над расходной, а в период с июня по декабрь происходило понижение уровня за счет преобладания испарения над стоком и осадками вместе взятыми.

представляет интерес сравнение результатов расчета по уравнению водного баланса с результатами официального прогноза гидрометцентра россии на 1999 и 2000 гг. И данными наблюдений.

в 1999 г. Суммарные величины приходной (414 км^3) и расходной (415 км^3) частей баланса оказались практически равными, т.е. Уровень не изменился. Вычисленный уровень составил 98 см, а средний годовой фактический уровень составил 97 см, разность равна +1 см, что лежит в пределах точности расчета.

в 2000 г. Расходная часть водного баланса (408 км^3) преобладала над приходной (381 км^3) на величину 27 км^3 , в пересчете на уровень это составило -7 см. Фактическое среднее годовое приращение также было отрицательным (-4 см), таким образом, погрешность расчета составила 3 см.

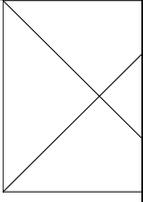
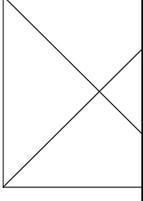
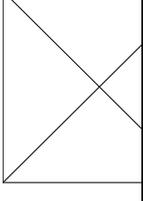
в соответствии с официальным прогнозом гидрометцентра россии в 1999 г. Ожидалось повышение среднего годового уровня моря по отношению к 1998 г. На 3 – 5 см, а фактически он понизился на 2 см, т.е. Ошибка прогноза составила около 6 см. По результатам расчета по уравнению (1), уровень по отношению к 1999 г не изменился, ошибка составила 2 см.

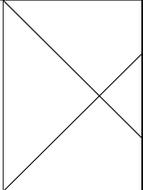
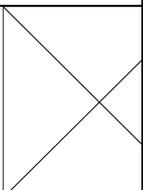
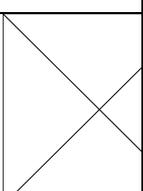
в соответствии с официальным прогнозом на 2000 г. Ожидалось понижение уровня на 1– 4 см по отношению к среднему уровню 1999 г. (97 см), а фактически он понизился по отношению к уровню 1999 г. На 5 см, т.е. Ошибка прогноза составила порядка 3 см. Результаты расчета по уравнению (1) дали понижение уровня на 7 см, т.е ошибка составила 2 см.

в табл. 7 приведены месячные данные результатов расчета среднего уровня моря по уравнению водного баланса, официального прогноза гидрометцентра россии и фактических наблюдений.

Таблица 7

Сопоставление уровней моря, рассчитанных по уравнению водного баланса ($h_{\text{выч}}$), с официальным прогнозом гидрометцентра россии ($h_{\text{прог}}$) и с фактическими данными ($h_{\text{факт}}$)

Годы	Уровни	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср. Год.
1999		89	91	95	99	105	111	112	107	100	93	90	88	98
		95	88	92	94	104	111	115	112	103	95	93	93	100
		88	88	96	96	100	110	108	110	100	93	89	85	95
	Абс.ошибки расчета (см)	1	3	1	3	5	1	4	3	0	0	1	3	3
	Абс.ошибки прогноза (см)	7	0	4	2	4	5	7	2	3	2	4	8	5

2000		86	86	89	92	10 2	10 3	99	92	87	84	82	80	90
		87	87	88	91	98	10 6	108	102	93	85	82	81	92
		87	87	89	91	96	10 4	106	101	93	85	84	81	93
	Абс.ошиб ка Расчета (см)	1	1	0	1	6	1	7	9	6	1	2	1	3
	Абс.ошиб ка прог-за (см)	0	0	1	0	2	2	2	1	0	0	2	0	1

как видно из табл. 7, среднегодовые абсолютные ошибки расчета укм по уравнению водного баланса (1) и официальному прогнозу гидрометцентра россии в 1999 и 2000 гг. Оказались порядка 3 см. Что касается абсолютных ошибок расчета и прогноза по отдельным месяцам, то здесь наблюдается большой разброс – от 0 до 9 см. В мае 1999 г. Максимальная ошибка расчета составила 5 см, а в июле - 7 см. В августе 2000 г. Максимальная ошибка расчета составила 9 см, а максимальная ошибка прогноза была в пределах 2 см. В целом расчет дал лучший результат в 1999 г., а прогноз был несколько точнее в 2000 г. Однако какие-либо обобщенные выводы по этим результатам делать преждевременно. Для этого необходимо накопить большую статистику.

заклучение

на основе наиболее полных гидрометеорологических данных проведены исследования многолетней и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня моря. Показано, что изменчивость укм определяется изменением соотношений между составляющими водного баланса каспийского моря. Активизация западной формы атмосферной циркуляции в 70-80-е годы и аномальное развитие циклонической деятельности в пределах всего атлантико-европейского региона – основная причина значительной увлажненности водосборного бассейна каспия, определившей значительный сток рек, впадающих в море, прежде всего волги, и, как следствие, резкий подъем укм в период с 1978 по 1995 г. В течение 1996 и 1997 гг. Уровень резко снизился почти на 0,5 м, а далее начался постепенный подъем, который продолжается до сих пор. Составляющие водного баланса и уровень моря за этот период характеризовались незначительной изменчивостью.

Список литературы

1. Абузьяров з.к. Технология прогноза тенденций изменения уровня каспийского моря на перспективу 6 и 18 лет //гидрометеорологические аспекты проблемы каспийского моря и его бассейна.- 2003.- с.351-363
2. Абузьяров з.к., красюк в.с. Прогноз годового хода уровня каспийского моря, основанный на приближенном расчете уравнения водного баланса //гидрометеорологические аспекты проблемы каспийского моря и его бассейна. - 2003. - с.310-322.
3. абузьяров з.к., фролов а.в. Диагноз элементов водного баланса и прогноз уровня каспийского моря на различные сроки в гидрометцентре россии. //международ.симпоз. Природные и социально-экономические исследования, разработки и управления природными ресурсами//тез. Докл.- 1995.- м.
4. Аполлов б.а. Колебания уровня каспийского моря //труды иоан.-1956.- т.xv.- с. 27-31.
5. Голицын г.с., панин г.н. О водном балансе и современных изменениях уровня каспия // метеорология и гидрология.- 1989.- № 1.- с. 57-64.
6. Зайков б.д. Водный баланс каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня //труды ниу гугмс.- 1946.-сер.iv.- вып.38.- с.15-25.
7. Калинин г.п., смирнова к.и., шереметевская о.и. Водобалансовые расчеты будущих уровней каспийского моря //метеорология и гидрология.- 1968.- № 9.-с. 45-52.

8. Кудрицкий д.м .площадь поверхности каспийского моря //труды ниу гугмс.- 1941.- серия viii.- вып.1.-с. 67-70.
9. Никонова р.е., бортник в.н. Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня каспийского моря за период его современного повышения // водные ресурсы.- 1994.- вып.4.-с. 410-414.
10. Потайчук м.а. О подземном стоке воды в каспийское море //труды гоин.- 1970.- вып.-98.- с. 42-48.
11. Лунякова л.г. К вопросу о прогнозе среднего уровня каспийского моря в условиях современного подъема уровня //труды гмц ссср.- 1991.- вып. 314.- с. 113-122.
12. Смирнова ки. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня каспийского моря // труды гидрометцентра ссср.- 1972.- вып.94.-с. 123.
13. Смирнова к.и. Изменчивость элементов водного баланса каспийского моря // труды гмц ссср.- 1968.- вып.34.-с. 26-33.
14. Смирнова к.и. Уточнение метода прогноза уровня каспийского моря //труды цип.- 1966.- вып.156. - с. 103-106.

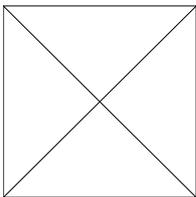


Рис. 1. Многолетний ход уровня каспийского моря в пунктах баку и махачкала.
(значения уровня даны в сантиметрах над единым нулем каспийского моря, равным -28,00 м бс).