

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В 1948–1994 гг.

С.К. Попов, А.Л. Лобов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
impi@yandex.ru*

Введение

Цель работы состояла в расчете пространственных изменений уровня Каспийского моря в течение продолжительного периода времени для получения характеристик сезонной изменчивости уровня в различных пунктах Каспийского моря. Оценкой качества расчетов по гидродинамической модели служат наблюдения на постах Каспийского моря. Пространственно-временная изменчивость уровня Каспийского моря по данным наблюдений анализируется в [1].

При моделировании межгодовой и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря должны учитываться стоки рек, осадки и испарение с поверхности моря. Сток рек и видимое испарение с поверхности моря не балансируют друг друга, поэтому возникают сезонные и межгодовые изменения уровня моря. Одной из первых работ по расчету сезонной изменчивости циркуляции вод Каспийского моря с использованием трехмерной модели является [5]. Расчеты были выполнены методом гидродинамической адаптации с использованием климатических полей температуры и солености, на поверхности моря задавались среднемесячные климатические напряжения трения ветра. Модель имела разрешение по пространству около 22 км и 20 горизонтов по вертикали. В следующей работе [6] по моделированию сезонной изменчивости температура и соленость рассчитывались по прогностическим уравнениям. На поверхности задавались среднемесячные атмосферные поля, соответствующие 1982 г., поскольку в этом году в среднем за год средний уровень моря не изменяется и сток рек в среднем за год балансируется видимым испарением. Разрешение по пространству составляло 9,3 км, по вертикали использовалось 22 уровня. В [7] вместо среднемесячных полей ветра использовались 6-часовые, что позволило приблизить модель к описанию реальной циркуляции моря. Горизонтальное разрешение сетки модели – около 4 км, по вертикали – 38 расчетных уровней. Расчеты по трехмерным моделям на периоды времени больше одного года для Каспийского моря найти в литературе не удалось.

Непрерывный расчет по гидродинамическим моделям в течение десятков лет стал

принципиально возможен с появлением в открытом доступе данных атмосферного реанализа. В данной работе для расчета течений и уровня Каспийского моря используется трехмерная гидродинамическая модель со свободной поверхностью с разрешением по пространству 3×3 морские мили. Модель позволяет рассчитывать непрерывные поля трехмерных скоростей течений в бароклинном море по ряду синоптических полей давления, заданных на уровне моря. Эта модель уже использовалась для расчета штормовых ситуаций в Каспийском море, приводящих к сильным нагонам и сгонам [4]. В [10] для моделирования сезонного хода уровня моря задавался климатический сток Волги и неравномерные по пространству климатические поля разности осадков и испарения для 12 месяцев [8]. По данным реанализа давления на поверхности моря NCEP с 6-часовой дискретностью были проведены расчеты “морского реанализа” уровня и течений в Каспийском море в течение 57 лет с 1948 по 2004 год.

В настоящей работе для моделирования межгодовых изменений уровня Каспийского моря задавался реальный среднемесячный сток Волги в течение 47 лет с 1948 по 1994 год.

Трехмерная гидродинамическая бароклинная модель со свободной поверхностью для расчетов постоянных и суммарных течений

Для расчетов уровня моря и течений используется трехмерная бароклинная гидродинамическая модель со свободной поверхностью [4, 9, 10]. Ее важным достоинством является возможность воспроизведения трехмерной структуры течений в бассейне, что позволяет решать целый ряд экологических задач, связанных с моделированием распространения различного рода загрязнителей.

Уравнения движения

Исходная система уравнений модели со свободной поверхностью в декартовой системе координат в приближении гидростатики и f -плоскости записывается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(vu) + \frac{\partial}{\partial z}(wu) - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + N_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) + \frac{\partial}{\partial z}(wv) + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + N_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uS) + \frac{\partial}{\partial y}(vS) + \frac{\partial}{\partial z}(wS) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\rho = f(T, S, p). \quad (7)$$

Начало координат расположено на невозмущенной поверхности моря, ось z направлена вверх, ось y – на север, ось x – на восток. Используются следующие обозначения: f – параметр Кориолиса; p – давление; ρ – плотность; T – температура; S – соленость; u, v, w – составляющие скорости по осям x, y, z соответственно; g – гравитационное ускорение.

Давление представлено с использованием уравнения гидростатики:

$$p = \int_z^\zeta \rho g dz = p_a + p_s + \rho_\zeta g \zeta, \quad (8)$$

где ζ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного положения, определяет внешнюю баротропную составляющую давления; ρ_ζ – плотность в поверхностном слое; N_z , N_h – коэффициенты вертикальной и горизонтальной вязкости; K_z – коэффициент вертикальной диффузии; $p_s = \int_z^0 \rho g dz$ – внутренняя бароклинная компонента давления; p_a – атмосферное давление.

Коэффициенты турбулентного перемешивания рассчитываются аналогично работе [10].

Граничные условия

На твердых боковых границах задается условие прилипания, т.е. равенства нулю нормальной и тангенциальной компонент скорости.

На поверхности моря задаются касательные напряжения ветра, кинематическое условие, температура и соленость по данным наблюдений:

$$N_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{sx}, \quad N_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{sy}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, \quad T = T_s, \quad S = S_s. \quad (9)$$

На дне принимается квадратичный закон трения, задаются кинематическое условие обтекания течением неровностей рельефа дна $H(x, y)$ и отсутствие потоков тепла и соли:

$$N_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{bx}, \quad N_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{by}, \quad u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = w, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (10)$$

где $(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = (C_d U_{ax} |\vec{U}_a|, C_d U_{ay} |\vec{U}_a|)$, $\vec{U}_a$ – вектор скорости ветра; $C_d = 3,2 \cdot 10^{-6}$,
 $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = (\alpha u_b |\vec{U}_b|, \alpha v_b |\vec{U}_b|)$, $\vec{U}_b$ – вектор придонного течения; $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Аппроксимация по пространству – на сетке “С”, оптимальной для инерционно-гравитационных волн. Численная схема модели приведена в работе [2].

Алгоритм осушения и затопления прибрежных территорий

При моделировании штормовых нагонов возможно затопление и осушение прибрежных областей. Для учета этих эффектов расчетная область содержит дополнительные точки, которые считаются «сухими» в начале расчета и могут затопляться в процессе нагона. Таким образом в этом случае предполагается задание в виде цифрового массива не только батиметрии акватории, соответствующей невозмущенному положению уровня моря, но и топографии прибрежных участков суши – районов возможного затопления. Учет осушения и затопления осуществлялся с помощью специальной технологии, разработанной на основе процедуры, изложенной в [4]. Важно отметить, что в алгоритме осушения и затопления учитываются не только полная глубина, но и разность уровней моря в окружающих точках.

Параметры модели

Горизонтальное разрешение сетки модели Каспия составляет 3×3 морские мили, всего 126×216 точек, из которых часть точек занимает суша. По вертикали сетка неравномерная и содержит 14 расчетных горизонтов. Шаг по времени – 40 секунд.

Входные данные

В качестве входной информации задаются поля давления на уровне моря по данным глобального реанализа метеорологических полей NCEP/NCAR с дискретностью 6 часов по времени и $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ по пространству.

Данные реанализа по ветру не используются, поскольку ветер по реанализу оказался значительно слабее реально наблюдавшегося на станциях. Специально была разработана методика расчета приводного ветра по полям атмосферного давления. Поле скоростей приводного ветра определяется по полю атмосферного давления с учетом кривизны изобар и агеострофической составляющей. Учет поворота и уменьшения скорости ветра за счет трения в приводном слое производится с помощью эмпирической связи параметров устойчивости атмосферы от величины барической тенденции.

При моделировании учитываются климатические поля температуры и солёности для 12 месяцев, полученные адаптационным расчётом на 30 стандартных горизонтах, которые интерполируются на 14 горизонтов модели. При переходе от месяца к месяцу поля температуры и солёности мгновенно изменяются и остаются постоянными в течение месяца. Следует отметить, что при мгновенном изменении полей температуры и солёности от месяца к месяцу возникают возмущения скоростей течений и уровня моря. Однако эти скорости течений, вызванные неравномерным распределением температуры и солёности малы по сравнению с ветровыми скоростями течений в верхнем слое моря. В данной работе климатическая термохалинная циркуляция рассматривается в качестве фона, на котором возникает ветровая циркуляция, вызванная полями ветра и давления.

В зимние месяцы задавалась ежесуточная сплочённость льда на сетке модели.

На поверхности моря задавались неравномерные по пространству климатические поля разности осадков и испарения (видимое испарение) для 12 месяцев.

В предыдущей работе [10] для расчёта сезонных изменений уровня Каспийского моря задавался климатический сток Волги для 12 климатических месяцев. В течение года для каждого месяца сток Волги не балансируется видимым испарением, и возникает сезонный ход уровня моря. Видимое климатическое испарение и сток Волги балансируются в сумме за год, так что суммарное за год изменение среднего уровня Каспия равно нулю. Всего с заданием климатического стока Волги по модели были рассчитаны 57 лет “морского реанализа” с 1948 по 2004 год. В начале каждого года средний уровень моря был равен $-27,1$ м БС.

Для воспроизведения сезонного хода уровня для каждого конкретного года, нужно задать для этого года сток Волги и видимое испарение, которые не обязательно будут в среднем за год балансировать друг друга, и возникнут межгодовые изменения уровня.

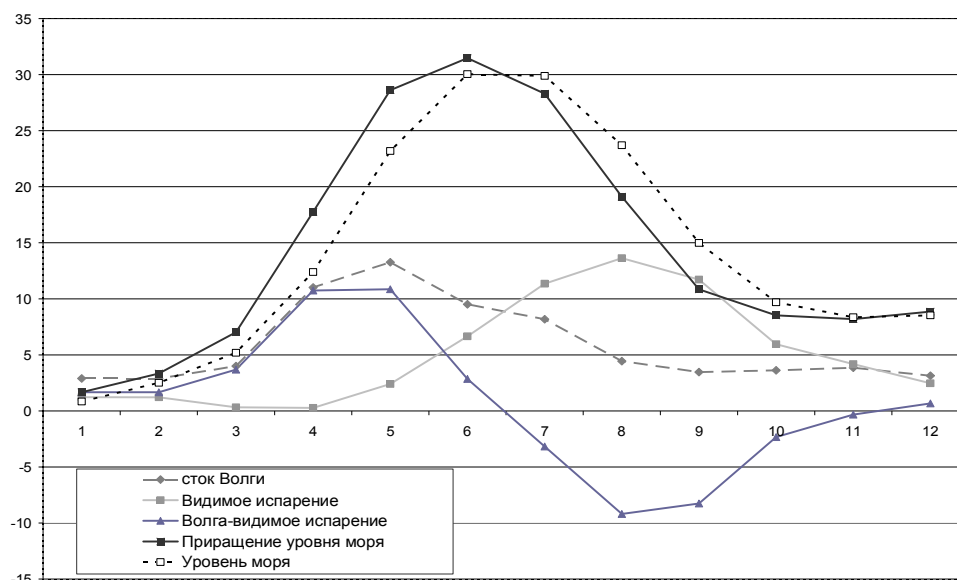
Сезонные изменения среднего уровня Каспийского моря

Средний уровень Каспия определяется балансом между стоком рек и видимым испарением с поверхности моря и не зависит от сгонно-нагонных колебаний уровня, которые не изменяют средний уровень всего моря.

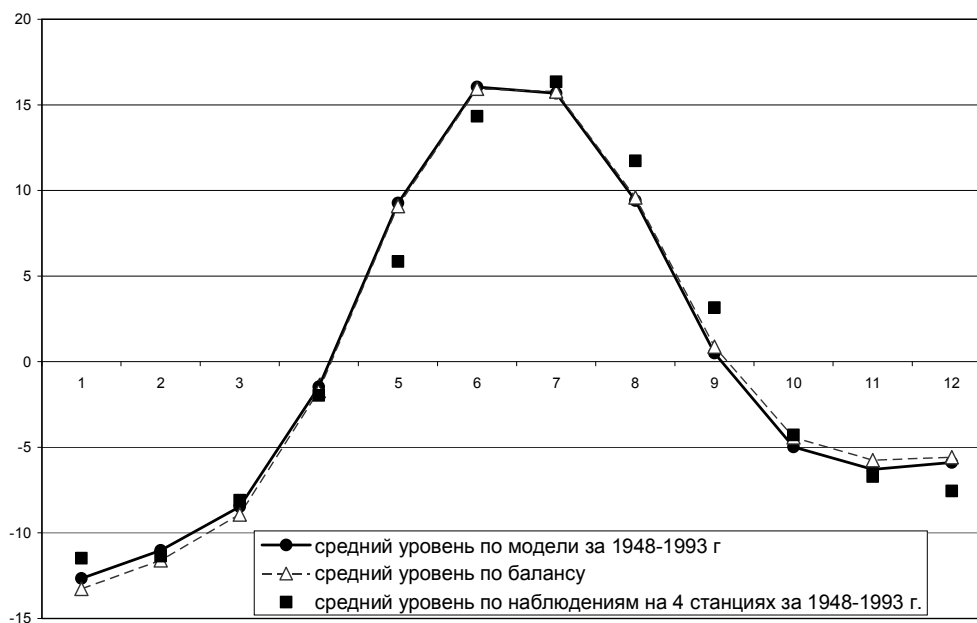
Рассмотрим сначала расчёты с заданием климатического стока Волги. Поскольку заданы климатические значения стока Волги и испарения, которые не меняются от года к году, то каждый год с 1948 по 2004 г. средний уровень моря изменяется одинаково (имеет одинаковый сезонный ход). Суммарное изменение среднего уровня моря за год равно нулю. Среднегодовой климатический сток Волги компенсируется видимым испарением с поверхности моря в сумме

за год, поэтому среднегодовой уровень моря остается постоянным (рис. 1а).

Чтобы найти видимое испарение для расчета баланса, производится осреднение по площади заданного неравномерного по поверхности видимого климатического испарения. Площадь моря при этом берется равной площади моря при отметке среднего уровня моря -27,1 м БС. В балансовых расчетах влияние стонов и нагонов на площадь моря не учитывается.



а)



б)

Рис. 1. Сезонный ход среднего уровня Каспийского моря: расчет по балансу Волга – видимое испарение (а); климатический по расчетам и наблюдениям (б).

При расчете по модели уровень в каждой точке поверхности Каспия, полученный для одного года, отличается от уровня для другого года вследствие различия в полях ветра. Площадь поверхности моря меняется в процессе расчета, в зависимости от нагонов и сгонов может происходить затопление и осушение значительных прибрежных территорий. В модели на каждом шаге по времени считается видимое испарение по реальной площади поверхности Каспия с учетом затопления и осушения значительных по площади территорий Северного Каспия. На рис. 1б сравнивается средний уровень моря, полученный осреднением по площади моря модельных среднемесячных полей уровня для 1948–2004 гг. и средний уровень моря по балансовым расчетам.

Расчеты сезонного хода среднего уровня моря по балансу и по модельным среднемесячным полям уровня практически совпадают. Некоторые отклонения связаны с расчетом видимого испарения, которое в модели рассчитывается по изменяющейся моделируемой площади Каспия с учетом нагонов и сгонов. Площадь моря в модели меняется со временем и немного отличается от площади моря в балансовых расчетах.

Сезонный ход среднего уровня моря по модели хорошо совпадает со средним уровнем моря, полученным как средний уровень по наблюдениям на четырех постах: Махачкала, Баку, Форт-Шевченко, Куули-Маяк. Это совпадение свидетельствует о том, что гидродинамическая модель с заданными климатическими полями видимого испарения на поверхности моря и стока реки Волги хорошо воспроизводит климатический сезонный ход среднего уровня Каспийского моря. На рис. 1б представлены среднемесячные значения отклонений уровня от среднегодового значения среднего уровня моря. По наблюдениям, среднегодовой средний уровень моря изменяется от года к году, а в расчетах с заданием климатического испарения и стока Волги остается постоянным.

Сезонные изменения уровня в различных пунктах Каспийского моря

Уровень моря в каждой точке поверхности Каспия зависит от ветра и распределения температуры и солёности. В каждой точке поверхности моря полученные по модели ежечасные значения уровня моря усреднялись за месяц для получения среднемесячных значений уровня моря. По среднемесячным значениям уровня определялись среднегодовые значения. Заданные среднемесячные климатические поля температуры и солёности влияют на распределение уровня внутри Каспия и вносят свой вклад в среднемесячный уровень в каждой точке поверхности Каспия. Это распределение уровня, вызванное неравномерностью полей температуры и солёности, не изменяется от года к году, поскольку используются

климатические значения среднемесячных полей температуры и солёности. Основной вклад в изменение уровня в Северном Каспии вносит ветер. Влияние ветра проявляется в среднемесячных полях уровня, полученных осреднением ежечасных полей. Уровень в каждой точке Каспия, полученный для одного года, отличается от уровня для другого года только вследствие различия в полях ветра и давления.

Сезонный ход среднего уровня всего Каспия по модели с климатическим стоком Волги и испарением не меняется от года к году.

Модель с заданным климатическим видимым испарением и стоком Волги позволяет в среднем за период 1948–1994 гг. воспроизвести сезонные изменения среднего уровня моря. Модель неплохо воспроизводит для каждого конкретного года сезонный ход уровня моря на отдельных станциях, особенно на станциях Северного Каспия, где велико влияние стонов и нагонов (рис. 2 а). В пункте Баку (рис. 2 б) сезонные изменения уровня моря по модели в среднем за период 1948–1994 гг. совпадают с наблюдениями, но максимальные и минимальные значения среднемесячных уровней моря по модели меньше, чем по наблюдениям.

Такое различие связано с тем, что модель не может при заданном климатическом стоке Волги воспроизвести изменчивость сезонного хода среднего уровня моря от года к году.

Межгодовые изменения уровня моря

Для расчета межгодовой изменчивости среднего уровня Каспия были проведены расчеты с заданным реальным ежемесячным стоком реки Волги и климатическим видимым испарением на поверхности моря. Реальный ежемесячный сток Волги каждый год имеет свои сезонные особенности и в среднем за год не балансируется видимым испарением, в результате возникают межгодовые изменения среднего уровня Каспийского моря (рис. 3 а).

Модель считала непрерывно в течение двух периодов времени, стартуя с реального уровня Каспийского моря с 1948 по 1968 г. и с 1969 по 1994 год. На рис. 3 б представлены межгодовые и сезонные изменения среднего уровня Каспия по модели и наблюдениям. Видно, что задание реального стока Волги позволяет воспроизвести не только сезонные, но и межгодовые изменения среднего уровня моря. Расхождения с наблюдениями связаны с тем, что в модели задано климатическое видимое испарение на поверхности моря. Видимо, реальное испарение в период подъема уровня в 1977–1994 гг. было меньше климатического, но это не учитывалось, и по модели получился рост уровня меньше, чем по наблюдениям. Для улучшения качества расчетов по модели необходимо климатическое видимое испарение заменить реальным.

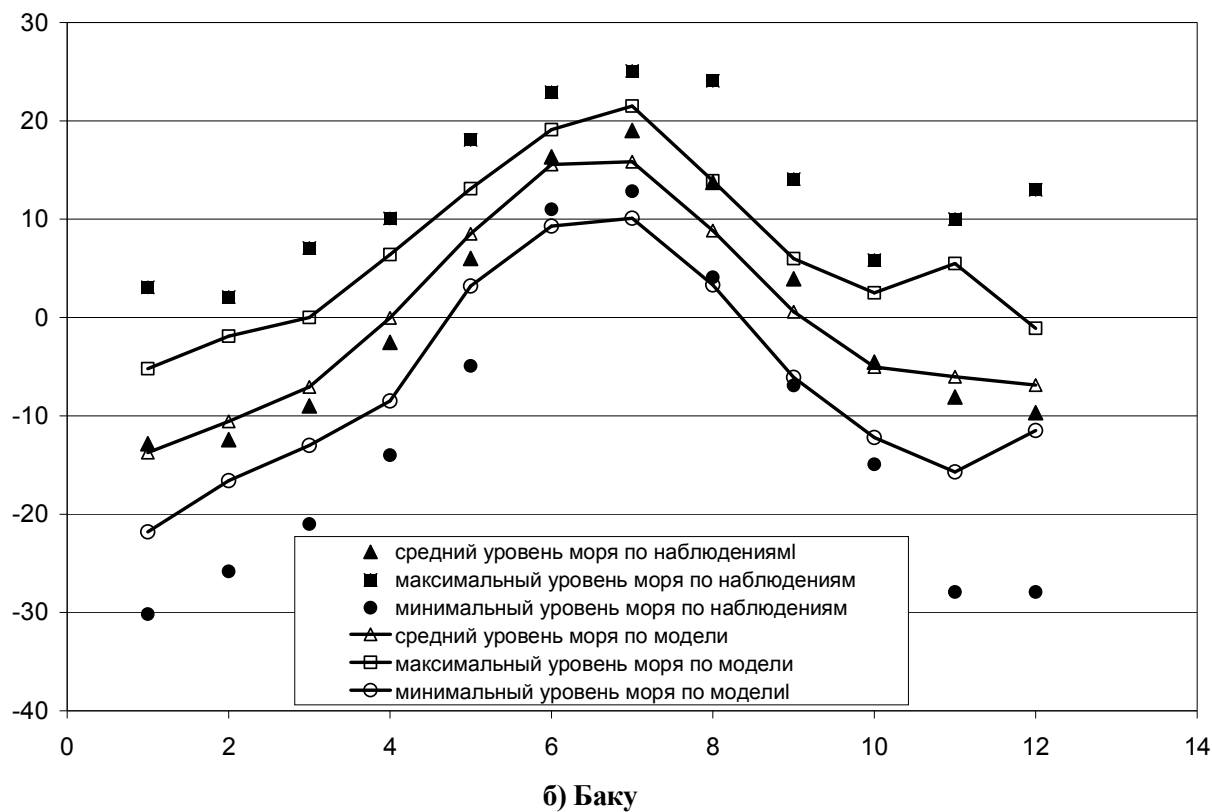
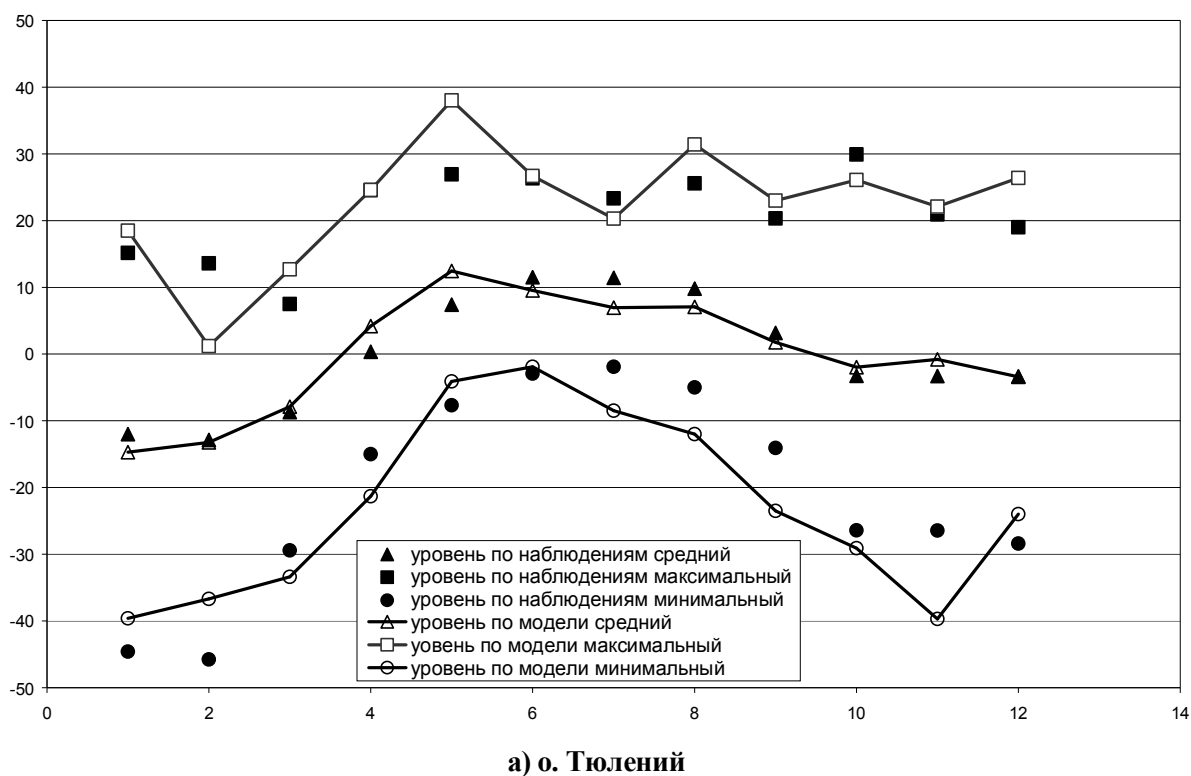
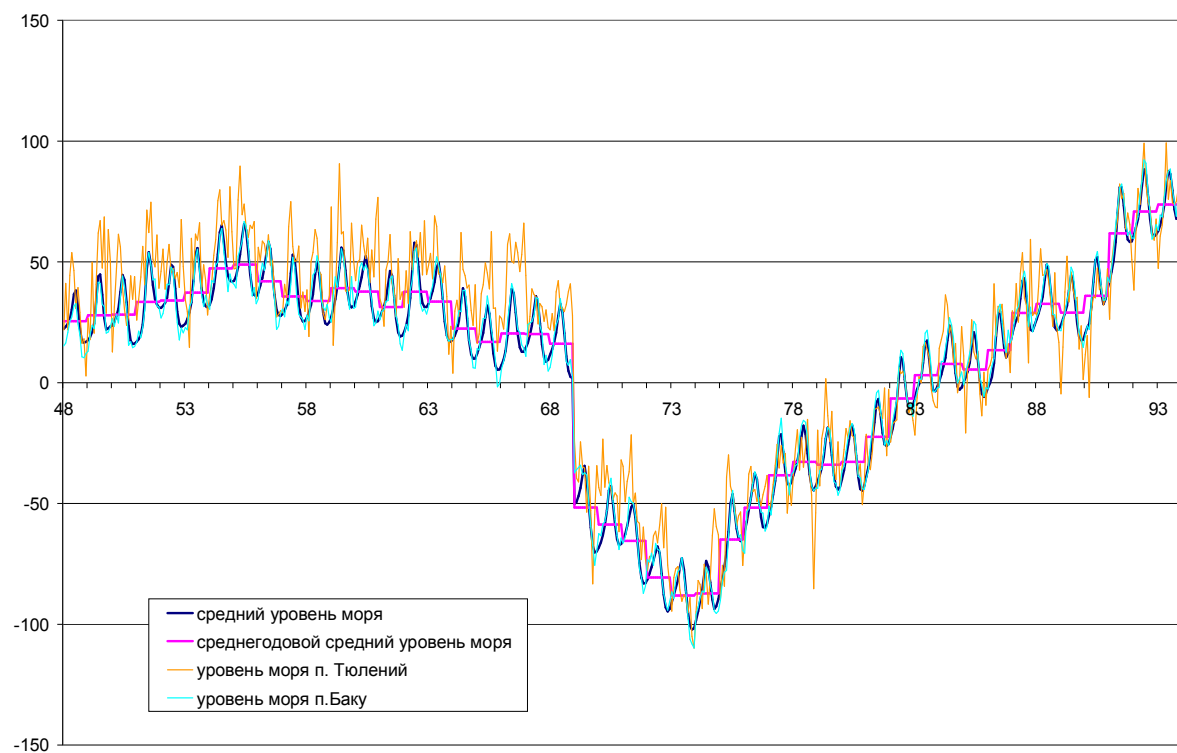
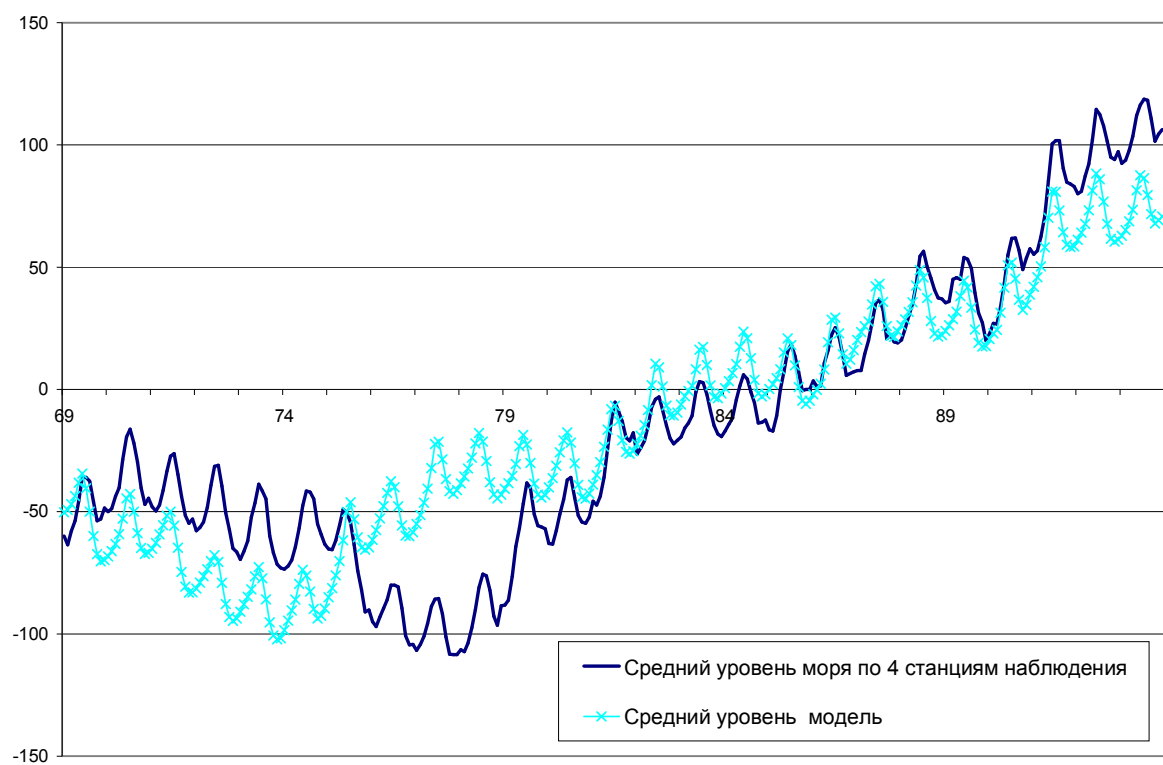


Рис. 2. Сезонный ход среднемесячных значений уровня моря по наблюдениям и расчетам с заданной климатической Волгой за период 1948–1994 гг.: о. Тюлений (а), Баку (б).



а)



б)

Рис. 3. Межгодовые и сезонные изменения уровня моря: а) по модели с реальным ежемесячным стоком Волги в течение 1948–1994 гг. относительно –28 м БС, б) по модели и наблюдениям в 1969–1994 гг.

Принципиальное изменение при задании реального стока Волги, по сравнению с климатическим стоком, состоит в том, что кроме межгодовых изменений среднегодового уровня возникают межгодовые изменения сезонного хода среднего уровня моря. Среднемесячные значения среднего уровня моря изменяются от года к году, кроме среднего сезонного хода, по модели с заданным реальным стоком Волги удастся воспроизвести межгодовые изменения сезонного хода среднего уровня моря. На рис. 4 видно, что модель воспроизводит межгодовую изменчивость среднего уровня моря близко к наблюдениям.

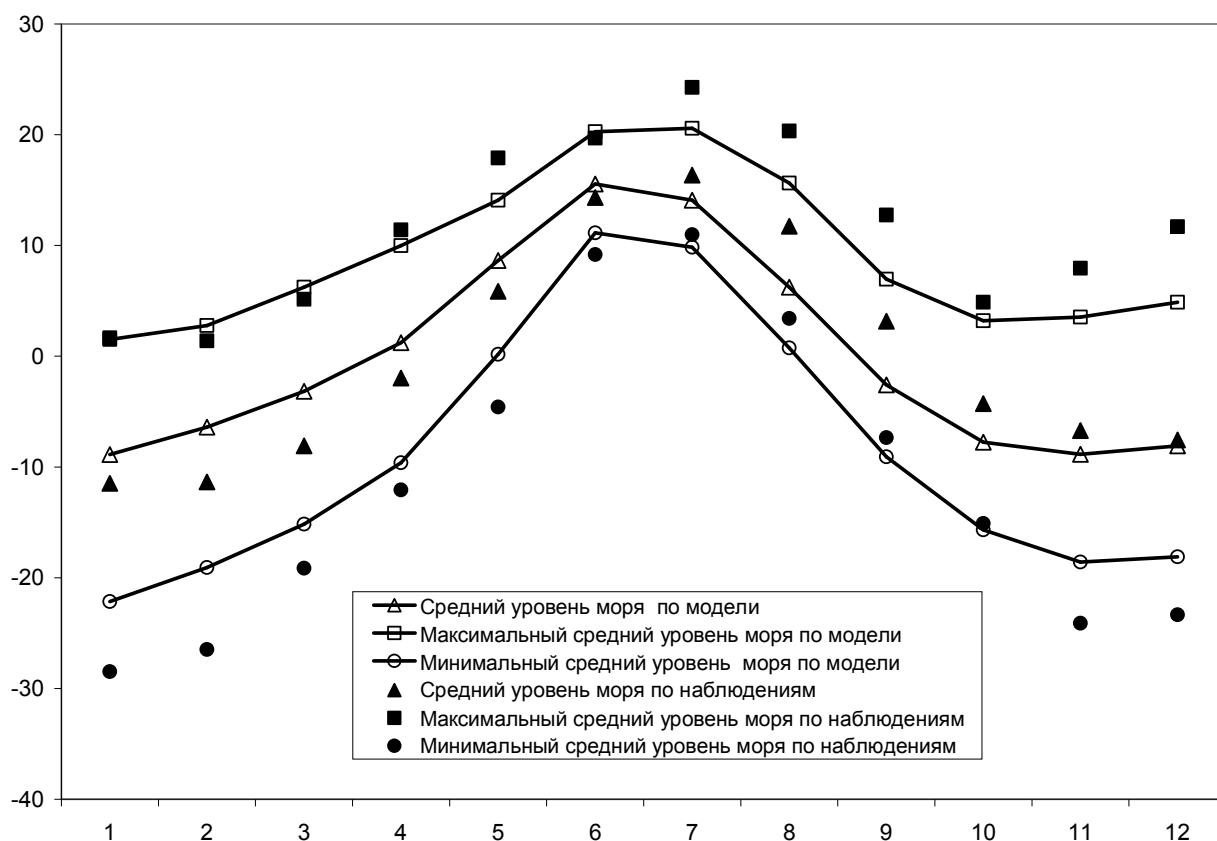
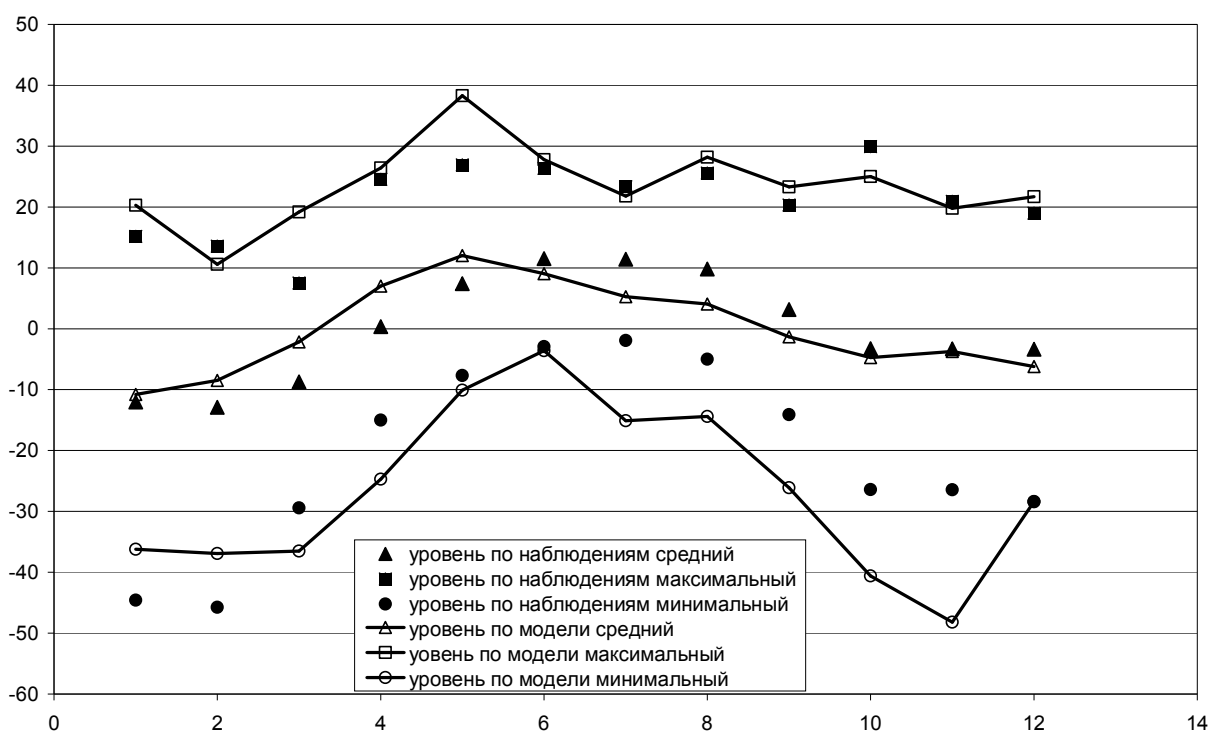
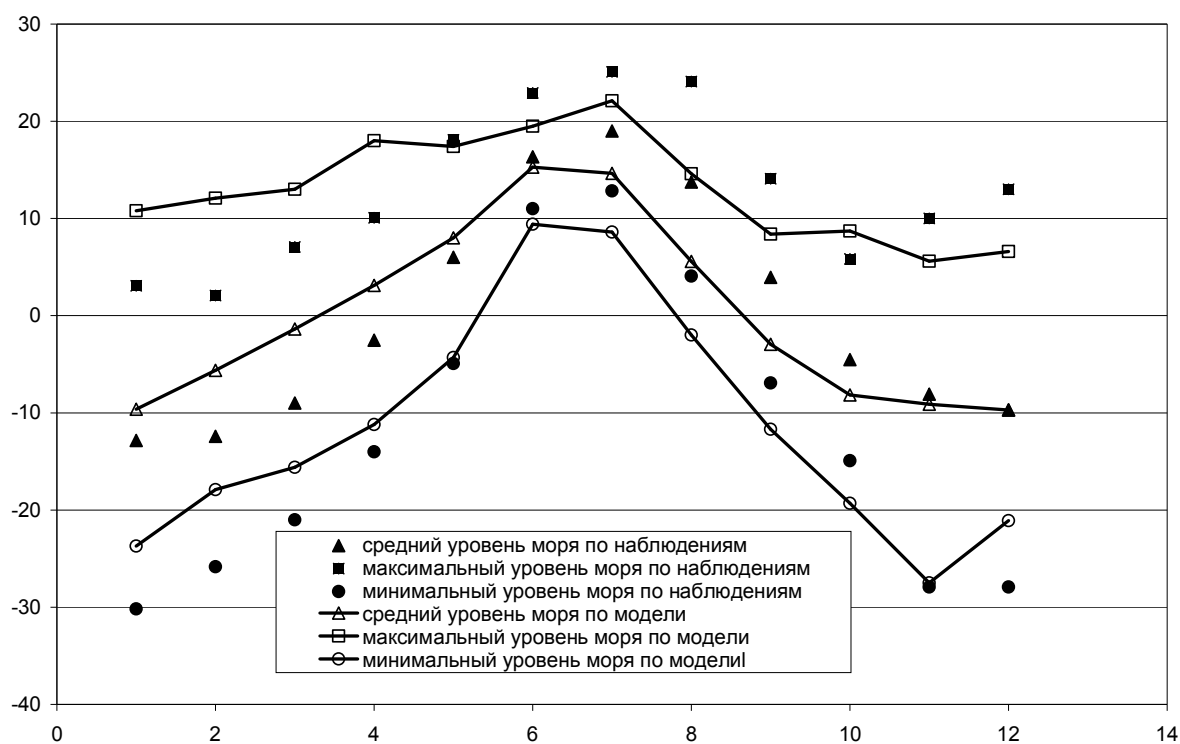


Рис. 4. Сезонный ход среднемесячных значений среднего уровня моря в отклонениях от среднегодового по расчетам и наблюдениям за период 1948–1994 гг.

По модели удалось воспроизвести изменчивость сезонного хода среднего уровня моря, что позволило улучшить совпадение расчетов и наблюдений на отдельных станциях Каспия. На рис. 5 а, б представлен сезонный ход уровня моря на станциях о. Тюлений и Баку. На станции о. Тюлений сезонный ход уровня, по сравнению с рис. 2 б, мало изменился, поскольку основная изменчивость уровня происходит из-за нагонов и сгонов. В Баку максимальные и минимальные среднемесячные значения уровня моря стали ближе к наблюдениям, поскольку преобладает изменчивость, связанная с изменениями объема всего моря в целом.



а)



б)

Рис. 5. Сезонный ход среднемесячных значений уровня моря по наблюдениям и расчетам с реальным расходом реки Волги за период 1948–1994 гг.: а) о. Тюлений, б) Баку.

Среднемесячные поля уровня моря

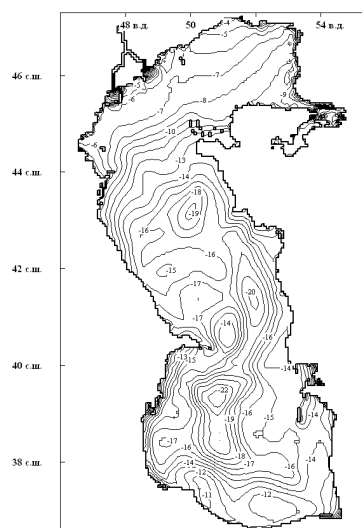
В результате расчетов по модели были получены ежечасные поля уровня Каспийского моря в течение 1948–2004 гг. на трехмильной расчетной сетке при заданном реальном стоке реки Волги и климатическом видимом испарении. По этим полям были получены среднемесячные поля уровня, которые используются для расчета сезонных изменений уровня моря. Расчеты по модели позволяют получить для каждого месяца каждого года картину уровня моря, которая отличается одна от другой вследствие действия реального ветра на поверхности моря, вызывающего сгоны и нагоны уровня. При осреднении за все годы расчета получается среднемноголетнее среднемесячное поле уровня для каждого из 12 месяцев года. Поля среднемесячных среднемноголетних (средних за период 1948–1994 гг.) уровней моря для января, апреля, июля и октября представлены на рис. 6 а–г.

Средний уровень моря определяется как средний по всей площади Каспийского моря. Средний уровень всего моря в целом не зависит от действия ветра и определяется только стоком Волги и видимым испарением с поверхности моря. Средний уровень Каспийского моря, полученный осреднением по площади этих полей уровня, составляет -12,8 см в январе, -1,5 см в апреле, 15,7 см в июле и -5,0 см в октябре, что соответствует рис. 1 б.

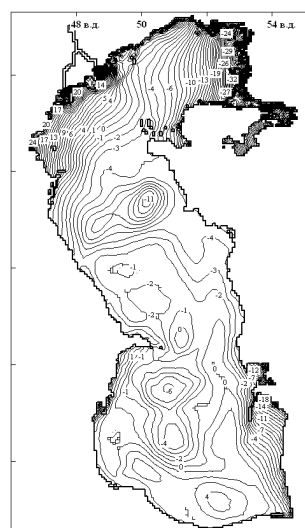
Поля уровня моря показывают неравномерность распределения уровня по площади моря. Из рис. 6 д видно, что среднегодовое значение уровня моря, например в пункте о. Тюлений, выше, чем средний уровень моря.

Сезонный ход уровня моря в каждом его пункте строится в отклонениях относительно среднегодовых значений уровня в этом пункте. Но само среднегодовое значение уровня в каждом пункте моря изменяется от года к году. На рис. 7 а представлены межгодовые изменения уровня моря в пункте о. Тюлений. Уровень моря нарисован относительно среднегодового среднего уровня моря, который равен нулю в случае расчета по модели с климатической Волгой и изменяется от года к году в случае расчета по модели с реальной Волгой.

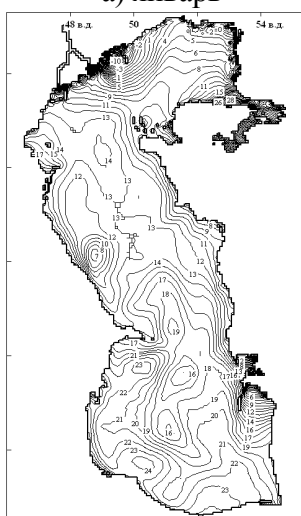
Уровень моря в пункте о. Тюлений (в отклонениях от среднего уровня моря) изменяется от года к году и почти не зависит от среднего уровня Каспийского моря. Сток реки Волги и видимое испарение понижают или повышают средний уровень Каспия, но распределение уровня по поверхности моря определяется ветром. Поскольку ветер был одинаковый в модели с климатическим и реальным стоками Волги, то и распределения уровня по поверхности Каспийского моря похожи. При разных отметках среднего уровня моря получается одинаковая картина распределения уровня по поверхности моря.



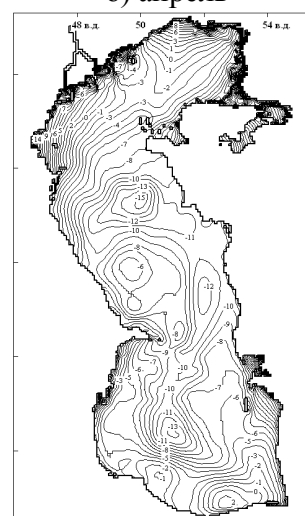
а) январь



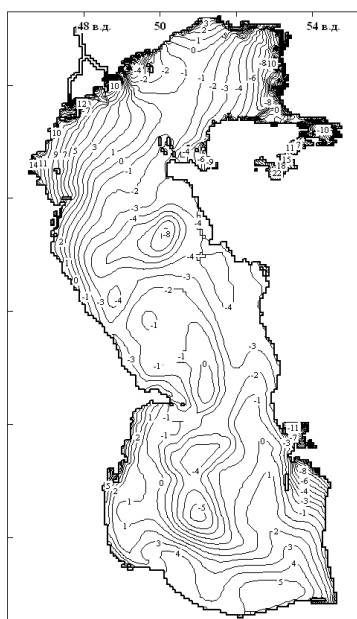
б) апрель



в) июль



г) октябрь



д) год

Рис. 6. Климатический (средний за 1948–1994 гг.) уровень моря: а) в январе, б) в апреле, в) в июле, г) в октябре, д) в целом за год.

Среднее значение уровня моря за период 1948–1994 гг. для о. Тюлений составляет 8,5 см по модели с климатическим стоком Волги и 8 см по модели с реальным стоком Волги, что соответствует рис. 6 д.

В среднем за период 1948–1994 гг. уровень моря для о. Тюлений выше, чем средний уровень моря. Прослеживается снижение среднегодового уровня моря для о. Тюлений с 1948 по 1994 год (рис. 7 а). Если в 1966 году среднегодовой уровень на о. Тюлений составлял 28 см, то в 1990 году – 6 см, то есть был ниже среднего уровня моря. Причина таких изменений уровня связана со спецификой полей ветра для каждого года, под действием которого происходят сгоны и нагоны уровня в Северном Каспии.

На рис. 7б показаны межгодовые изменения уровня моря в Баку, они малы по сравнению с изменениями для о. Тюлений и не превышают 4 см. В Баку, как показывают модельные расчеты, уровень моря очень близок к среднему уровню Каспийского моря. Среднее значение уровня моря за период 1948–1994 гг. в Баку составляет 1,8 см по модели с климатическим стоком Волги и 0,6 см по модели с реальным стоком Волги.

На рис. 8 приведен сезонный ход среднего уровня моря и уровней моря для о. Тюлений и Баку в отклонениях от среднегодового среднего уровня моря. На рис. 6 а–д представлен на плоскости всего моря уровень для различных месяцев года. Для пунктов о. Тюлений и Баку значения уровня моря на рис. 8 и на рис. 6 а–д совпадают. Уровень моря в пункте о. Тюлений выше, чем средний уровень моря, а уровень моря в Баку очень близок к среднему уровню Каспийского моря. Максимум уровня на о. Тюлений в мае, а в Баку – в июле.

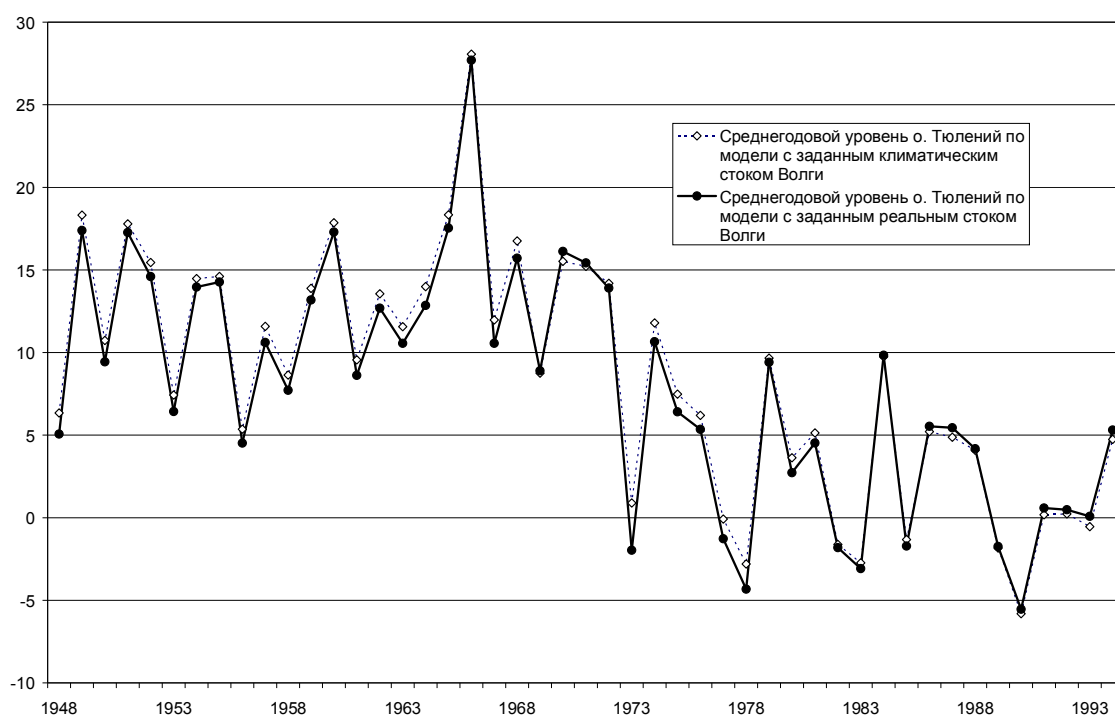
Заключение

Появление в открытом доступе данных атмосферного реанализа обеспечило необходимой входной информацией непрерывные по времени расчеты циркуляции в морях начиная с 1948 года и до настоящего момента времени. Расчеты сезонной и межгодовой изменчивости уровня моря в данной работе проведены по модели, оперативная версия которой внедрена в Гидрометцентре России.

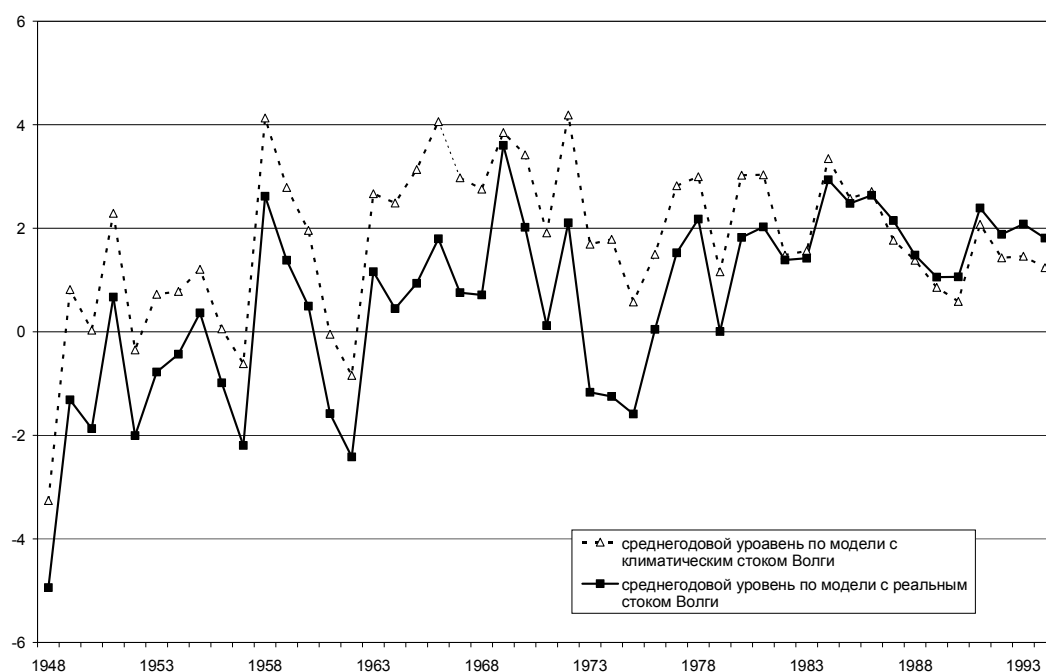
Для воспроизведения межгодового и сезонного хода уровня моря задавался реальный среднемесячный сток Волги за период 1948–1994 гг. Задание реального стока Волги позволило рассчитывать межгодовые изменения уровня, что было невозможно при задании климатического стока Волги.

Использование реального стока Волги, по сравнению с климатическим, улучшает воспроизведение межгодовой изменчивости сезонного хода уровня моря.

Для того, чтобы добиться более правильного воспроизведения межгодовых изменений среднего уровня моря, нужно среднемесячные климатические поля видимого испарения с поверхности моря заменить реальными.



а)



б)

Рис. 7. Межгодовые изменения среднегодовых значений уровня моря по модели с климатическим и реальным расходами реки Волги: а) о. Тюлений, б) Баку.

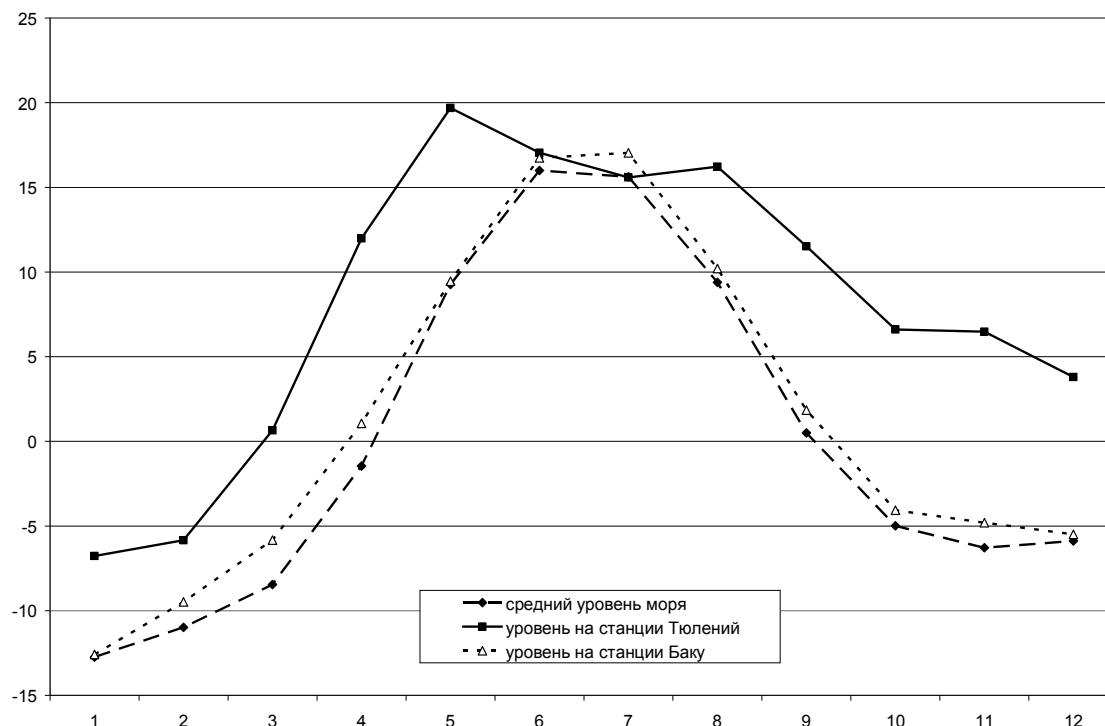


Рис. 8. Сезонный ход среднемесячных значений уровня моря в пункте о. Тюлений, Баку и средних значений уровня моря осредненных за период 1948–1994 гг. в отклонениях от среднегодовых средних уровней моря.

Список использованных источников

1. Абузяров З.К., Нестеров Е.С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 5–23.
2. Архипов Б.В., Попов С.К. Моделирование плотностных и ветровых течений в юго-восточной части Баренцева моря // Океанология. – 1996. – Т. 36, № 6. – С. 805–813.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 6. Каспийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под редакцией Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 359 с.
4. Зильберштейн О.И., Попов С.К., Чумаков М.М., Сафронов Г.Ф. Метод расчета экстремальных характеристик уровня моря в Северном Каспии // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 6. – С. 692–700.
5. Ибраев Р.А., Саркисян А.С., Трухчев Д.И. Сезонная изменчивость циркуляции вод Каспийского моря, реконструированная по среднемноголетним гидрологическим данным // Известия РАН. ФАО. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 103–111.
6. Ибраев Р.А., Курдюмов Д.Г. Чувствительность сезонной изменчивости циркуляции вод Каспийского моря к параметризации вертикального перемешивания в модели гидродинамики // Известия РАН. ФАО. – 2003. – Т. 39, № 6. – С. 849–856.

7. Курдюмов Д.Г., Озкой Э. Среднемесячные характеристики внутригодовой изменчивости циркуляции вод Каспийского моря, полученные по вихреразрешающей термогидродинамической модели // Океанология. – 2004. – Т. 44, № 6. – С. 843–853.
8. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. – М.: Наука, 1987. – 88 с.
9. Попов С.К. Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 5. – С. 76–84.
10. Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Чумаков М.М. Моделирование сезонного хода уровня Каспийского моря с применением параллельных вычислений // Метеорология и гидрология. – 2009. . – № 12. –С. 41–53.

Поступила в редакцию 22.10.2013 г.