

УДК 551.468.4

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2018 г. Г. С. Дьяконов^{1,2}, Р. А. Ибраев^{1,2,3,4}¹ *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*² *Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, Россия*³ *Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия*⁴ *Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия
e-mail: gleb.gosm@gmail.com*

Поступила в редакцию: 08.06.2016 г.

Представлена вихреразрешающая модель термогидродинамических процессов Каспийского моря, описывающая изменчивость его уровня на климатическом масштабе времени. Проведены численные эксперименты по реконструкции циркуляции вод и эволюции уровня Каспия во второй половине XX века. Исследован отклик многолетних трендов уровня на вариации ряда естественных и антропогенных факторов, влияющих на водный баланс моря.

DOI: 10.7868/S0030157418010021

ВВЕДЕНИЕ

Изолированность Каспийского моря обуславливает многие специфические его особенности. Одна из наиболее характерных и значимых из них — это большие колебания среднего уровня моря, имеющие ярко выраженную сезонную моду, связанную с летним половодьем и зимней меженью, а также сложную межгодовую изменчивость, понимание которой представляет серьезную научную проблему. Уровень Каспия принято рассматривать как интегральный индикатор климата не только в регионе Каспийского моря, но и во всем его водосборном бассейне, площадь которого в 10 раз превышает площадь самого моря [16]. В свою очередь, этот регион является частью глобальной климатической системы, и многие исследователи связывают уровень Каспия с Южной и Североатлантической осцилляциями и другими глобальными климатическими процессами [1, 14, 21, 22].

Другая важная особенность Каспийского моря — крайне разнообразный рельеф его дна. При средней глубине около 200 м и максимальной свыше 1 км, значительная площадь моря приходится на мелкий и пологий шельф с глубинами порядка 1 м, расположенный преимущественно в Северном Каспии и в восточной части Южного. Вследствие этого обширные прибрежные территории подвержены затоплению при поднятии уровня моря и осушению при его понижении, что затрудняет планирование хозяйственной деятельности на побережье и обуславливает практическую значимость

предсказания долгосрочной эволюции уровня Каспия.

По сложившемуся в научном сообществе мнению [11, 12, 17, 18], на внутривековом масштабе времени тектонические движения земной коры не оказывают значительного влияния на средний уровень Каспийского моря, и последний полностью определяется соотношением между составляющими водного баланса моря: речной сток, осадки, испарение, отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол и подземный водообмен. В XX веке в среднем на речной сток приходилось $\sim 300 \text{ км}^3/\text{год}$, на отток в Кара-Богаз-Гол $\sim 30 \text{ км}^3/\text{год}$, на испарения $\sim 400 \text{ км}^3/\text{год}$, на осадки $\sim 100 \text{ км}^3/\text{год}$ [16], на подземный приток $\sim 4 \text{ км}^3/\text{год}$ [5]. Осадки и речной сток можно рассматривать как внешние по отношению к морю факторы, в то время как интенсивность испарений определяется параметрами атмосферы и температурой поверхности моря (ТПМ). Расчет полного потока испарений с поверхности Каспия возможен только при учете особенностей его термохалинной циркуляции, процессов взаимодействия море–атмосфера, а также площади и конфигурации поверхности моря, которые вследствие упомянутой пологости берегов зависят от уровня. Поскольку полный поток испарений растет при увеличении размеров морского зеркала, между площадью поверхности Каспийского моря и его уровнем существует отрицательная обратная связь, учет которой необходим для описания межгодовой изменчивости последнего. Важную роль также играет морской лед,

экранирующий поверхность Северного Каспия в холодное время года и оказывающий значительное влияние на тепловой и водный бюджеты моря.

На сегодняшний день существует несколько подходов к исследованию и прогнозированию колебаний уровня Каспийского моря. Первый класс методов основан на выявлении скрытой периодичности в наблюдаемых рядах уровня и компонентов водного баланса и предполагает наличие дальних внутрирядных связей (см. например, [10, 19]). Другой класс – это методы, предполагающие вероятностную природу гидрометеорологических процессов и основанные на корреляционном анализе изменчивости уровня и некоторых геофизических и метеорологических параметров, таких как индексы атмосферной циркуляции различных районов Северного полушария [14], а также построении динамико-стохастических моделей [18].

Наконец, третий класс методов основывается на построении физико-математических моделей компонентов земной системы, а также совместной модели море – морской лед – атмосфера – суша. Примером этого подхода служит работа [29], авторами которой создана совместная модель море – атмосфера для региона Каспийского моря и его водосборного бассейна, с применением которой проведен десятилетний расчет, показавший высокую реалистичность модельного решения и перспективность этого подхода для исследований регионального климата. Однако длительность этого расчета не позволяет судить о возможностях модели в воспроизведении климатической изменчивости уровня Каспия и климата региона в целом. Более того, согласно приведенным результатам, уровень моря быстро отклоняется от наблюдений, что свидетельствует о несбалансированности совместной модели.

Создание адекватной совместной модели климата каспийского региона требует настройки каждого ее компонента, что подразумевает исследование отклика модели каждой среды на заданное внешнее воздействие, соответствующее идеальному поведению моделей остальных сред. Прежде всего, это относится к морскому компоненту, поскольку Каспийское море изолировано от Мирового океана и протекающие в нем термогидродинамические процессы определяются внешним воздействием, в то время как атмосферный компонент не может рассматриваться отдельно от глобальной климатической системы, и для его настройки необходимо, по крайней мере, минимизировать ошибки, вносимые морской моделью.

Численному расчету циркуляции Каспийского моря посвящен целый ряд работ [7, 15, 23, 25, 27], показавших достаточно реалистичные результаты моделирования. Однако эти модели

разрабатывались для описания внутригодовой изменчивости Каспия, поэтому их применимость для воспроизведения его климатической изменчивости находится под вопросом. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, на сезонном временном масштабе вариации площади зеркала моря, обусловленные изменениями береговой линии, не вносят значительного вклада в водный и тепловой балансы моря. На десятилетнем масштабе этот фактор становится существенным. Во-вторых, ошибки, возникающие в модели, могут быть незначительными для воспроизведения циркуляции моря на протяжении одного года, но, накапливаясь в течение 30–50 лет, способны привести к неадекватным результатам или затруднить описание мод изменчивости с периодом более года. Таким образом, для исследования климатических колебаний уровня Каспийского моря необходима доработка существующих моделей его трехмерной циркуляции и их дальнейшая настройка.

Представленная работа имеет следующую структуру. В первом разделе рассматривается модель Каспийского моря, разработанная для описания межгодовой изменчивости его уровня и гидрометеорологических параметров. Модель построена на базе Модели Гидротермодинамики Внутреннего Моря (МГВМ) [24], ранее использовавшейся для исследования сезонной изменчивости Каспия [7, 25] и теперь существенно доработанной для описания межгодовой эволюции моря. Во втором разделе рассматривается используемое внешнее воздействие (атмосфера, сток рек). В третьем разделе разработанная модель применяется для реконструкции изменчивости уровня и циркуляции Каспийского моря во второй половине XX века. При этом поток испарений, а также потоки явного и скрытого тепла рассчитываются с учетом модельной температуры поверхности моря, в то время как все остальные компоненты атмосферного форсинга задаются независимым образом на основе данных реанализа атмосферной циркуляции. Это позволяет исключить множество обратных связей с атмосферой и упростить настройку модели моря. В четвертом разделе приводятся результаты серии экспериментов по исследованию чувствительности многолетних трендов модельного уровня к параметрам внешнего воздействия и вариациям площади поверхности моря, что позволяет дать количественную оценку влияния ряда факторов на водный баланс Каспия на десятилетнем масштабе времени.

1. МОДЕЛЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

В качестве вычислительного ядра Модели Каспийского моря (МКМ) использована модель трехмерной циркуляции океана SZ-КОМПАС [8], основанная на интегрировании системы уравнений геофизической гидродинамики с применением общепринятых

приближений гидростатики, Буссинеска и несжимаемости морской воды. Модель SZ-КОМПАС является новой версией вышеупомянутой МГВМ, усовершенствованной для описания циркуляции Каспия на десятилетнем масштабе времени. МГВМ построена в геопотенциальной системе координат (z -системе), что накладывает ряд ограничений на круг описываемых в ней процессов. В XX веке уровень Каспийского моря находился в диапазоне шириной до 3.5 метров, и описание этой изменчивости в z -системе потребовало бы задание большой толщины верхнего слоя модельной сетки — до 5 метров. При столь грубом вертикальном разрешении следует ожидать высокую инертность температуры поверхности моря, и, как следствие, большие ошибки при расчете потока испарений, являющихся одним из основных компонентов водного баланса. В модели SZ-КОМПАС используется гибридная сигма- z вертикальная координата: верхний 30-метровый слой моря описывается в сигма-системе, а остальная его часть — в z -системе. Введение сигма-координаты позволяет задать произвольное вертикальное разрешение в приповерхностном погранслое (в данной работе оно составляет 0.1–2.0 метра) и максимально точно аппроксимировать рельеф мелководного шельфа, что делает возможным описание изменений береговой линии вследствие колебаний среднего уровня моря и ветровых сгонно-нагонных процессов. В свою очередь сохранение z -координаты глубже 30 метров позволяет избежать ошибок, возникающих в сигма-координатах при больших градиентах топографии дна. В горизонтальной плоскости используется сферическая система координат. Шаг сетки по долготе и широте составляет соответственно $(1/18)^\circ$ и $(1/24)^\circ$ или около 3–5 км, то есть модельная сетка является вихреразрешающей: для Каспийского моря бароклинный радиус деформации Россби оценивается в 17–22 км в глубоководных районах и 3–8 км на шельфе в восточной части Среднего Каспия [2]. По вертикали шаг сетки варьируется от 2 метров в верхнем слое моря (при невозмущенной поверхности) до 30 метров на больших глубинах. Для описания вертикальной турбулентной диффузии импульса, тепла и соли применяется параметризация Манка–Андерсона с коэффициентом вязкости $K_m = (0.1–5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и коэффициентом диффузии $K_h = (0.001–1) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Особое внимание при создании МКМ уделено расчету компонентов водного и теплового балансов моря. Осадки, речной сток, отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол, а также радиационные потоки тепла на поверхности задаются на основе имеющихся данных измерений и реанализа атмосферной циркуляции независимо от состояния моря. Расчет потоков импульса, испарений, явного и скрытого тепловых потоков производится в подмодели взаимодействия вода–воздух,

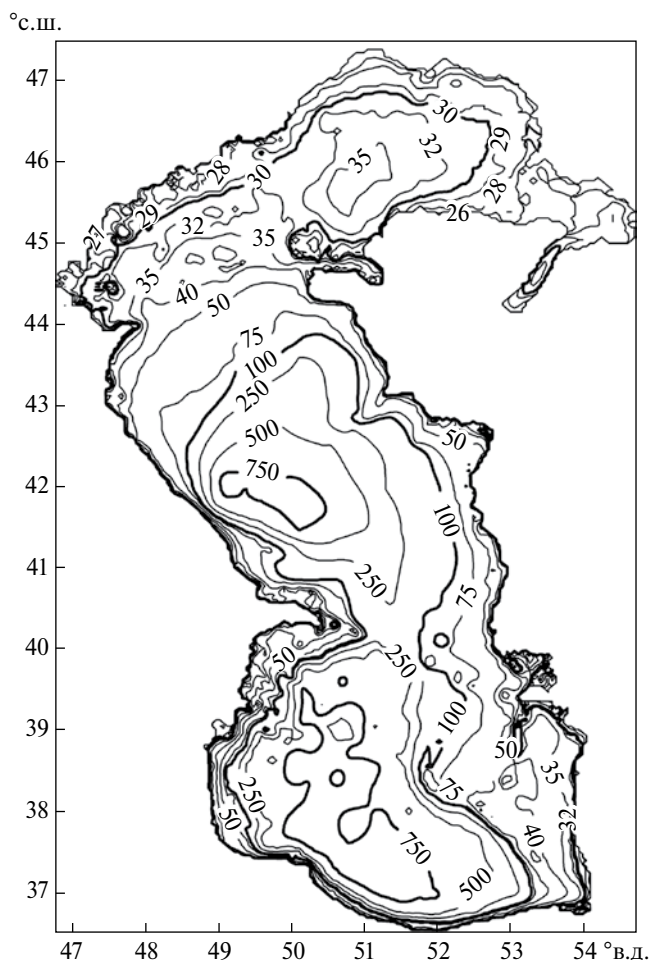


Рис. 1. Модельный рельеф дна Каспийского моря, построенный на основе данных ЕТОР01 [20], глубины (м) отсчитываются относительно нулевой отметки БСВ.

учитывающей параметры поверхности моря и приводного слоя атмосферы. МКМ явно описывает изменения береговой линии, возникающие вследствие колебаний среднего уровня моря и ветровых сгонов и нагонов [4], а также включает в себя подмодель формирования и термодинамики морского льда [28]. Таким образом, в модели описываются вариации площади открытой поверхности моря, что необходимо для корректного расчета потоков тепло- и массообмена с атмосферой.

Сток рек учитывается двумя различными способами. Реки, дельты которых достаточно глубоководны и не подвержены значительному осушению, описываются в модели через граничное условие на боковой поверхности, для которой задаются потоки воды, тепла, соли и импульса. Таким образом учитывается сток рек Терек и Сулак, а также отток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Реки Волга, Кура и Урал описываются в модели иначе. Вследствие больших размеров и мелководности их дельт

указанный способ не применим, поскольку боковая граница расчетной области здесь подвижна. Сток этих рек учитывается путем задания потока воды, тепла и соли на поверхности, аналогично осадкам.

Модельный рельеф дна Каспия, построенный на основе данных ETOPO1 [20], с глубинами относительно Балтийской системы высот (БСВ) представлен на рис. 1. Этот массив переинтерполирован на модельную сетку, что устранило его дискретность с шагом 1 м, удалены все искусственные шумы. Не представленный в ETOPO1 рельеф залива Комсомолец достроен с использованием бумажных карт, данные которых, однако, крайне скудны и нерегулярны. Также из рельефа удален залив Кара-Богаз-Гол, поскольку его связь с морем односторонняя: вода только вытекает из моря в залив. Этот отток учитывается через соответствующее граничное условие.

2. ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

2.1. Атмосферный форсинг. В качестве атмосферного форсинга для модели Каспийского моря используются данные реанализа ECMWF ERA-40 [26], охватывающего период с 1 сентября 1957 г. по 31 августа 2002 г. и имеющего временное разрешение 6 часов. Таким образом, массив ERA-40 содержит информацию как о синоптической изменчивости атмосферы, так и о климатической, то есть позволяет исследовать изменчивость климата — среднего за 30 лет состояния — в течение 15 лет. Также выбор ERA-40 обусловлен тем обстоятельством, что его временной интервал включает в себя момент режимного сдвига в климатической системе Каспия, произошедшего в 1976–1978 гг. Недостатком ERA-40 является весьма грубое пространственное разрешение 1.125° при размерах Каспия $8^\circ \times 11^\circ$.

Необходимо отметить, что в отдельных регионах параметры глобальной атмосферной циркуляции ERA-40 содержат существенные ошибки. Для верификации и корректировки данных, представленных в ERA-40 для региона Каспийского моря, используемые поля были осреднены за весь период для каждого месяца и сопоставлены со среднеклиматическими данными, опубликованными в атласах Каспийского моря [13, 16]. Сравнивались температура воздуха и точки росы на высоте 2 м, компоненты скорости ветра на высоте 10 м, атмосферное давление у поверхности моря, интенсивность осадков и радиационные потоки тепла (проникающая солнечная радиация и длинноволновое излучение с поверхности моря). В целом, можно утверждать, что данные ERA-40 согласуются с имеющейся климатологией. Наибольшие

ошибки обнаружены в полях интенсивности осадков (в среднем по акватории завышена на 50%) и скорости ветра (занижена на 13%). При проведении численных экспериментов эти поля в данных ERA-40 были умножены на 0.66 и 1.15 соответственно. Также в отдельных подбассейнах Каспийского моря обнаружены отклонения температуры воздуха зимой (выше климата на $2-3^\circ\text{C}$) и точки росы летом (выше климата на $1-3^\circ\text{C}$). Однако из-за высокой пространственной неоднородности этих отклонений их корректировка проведена не была для избежания сложных и неочевидных манипуляций с данными.

Поток солнечной радиации, представленный в ERA-40, занижен в зависимости от месяца на величины до 10%, однако мы не стали корректировать сезонную моду изменчивости этого параметра и скомпенсировали лишь систематическую ошибку, увеличив поток во все месяцы на 5%. Эта величина — единственный поправочный коэффициент, подобранный таким образом, чтобы максимально точно воспроизвести наблюдаемую эволюцию уровня моря, для чего была проведена серия настроечных экспериментов, в которых этот коэффициент варьировался в диапазоне от 0 до 10%. Влияние этой поправки рассматривается в параграфе 4.1.1. Все остальные корректировки форсинга произведены на основании сравнения с климатологией и независимо от результатов моделирования.

2.2. Речной форсинг. Для задания речного форсинга используются данные измерений среднемесячного расхода и температуры вод пяти рек: Волга, Урал, Кура, Терек и Сулак, а также среднегодового расхода оттока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Соответствующие временные ряды составлены на основе данных наблюдений на сети Гидрометеорологической службы СССР и других ведомств.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В 1958–2001 гг.

3.1. Начальные условия и “разгон” модели. Для инициализации модели используются трехмерные климатические поля температуры и солёности Каспия для января [9], проинтерполированные на модельную сетку. Расчет начинается с состояния покоя, высота поверхности моря в начальный момент соответствует среднему значению, зарегистрированному на уровненых постах в январе 1958 г. Следует отметить, что в указанных климатических полях плохо представлена аномалия, связанная с мелководностью прибрежных акваторий, термохалинный режим в которых существенно отличается от режима циркуляции вод в открытой части моря. При этом если в поле температуры эта

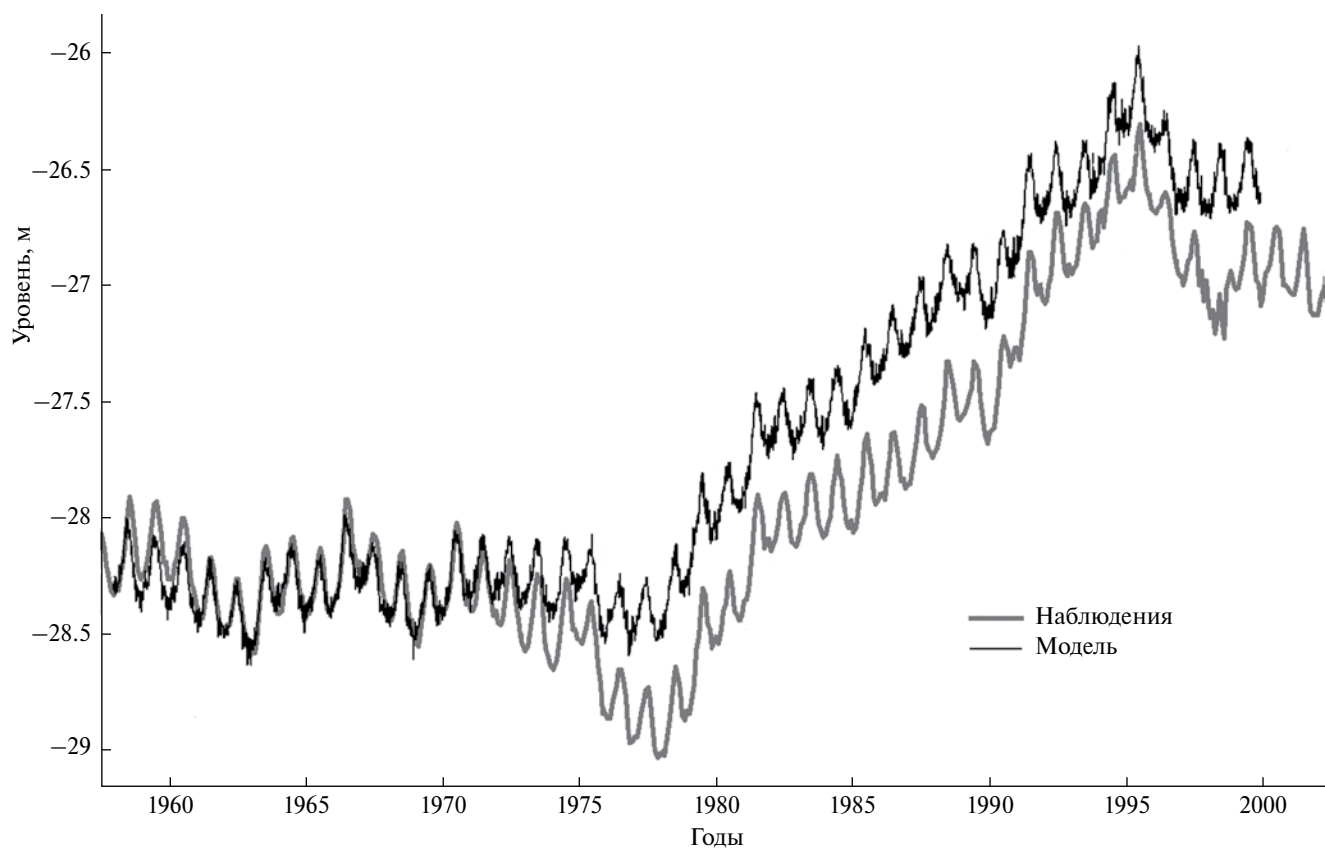


Рис. 2. Эволюция уровня (м) в окрестности г. Баку: измерения и модельный расчет.

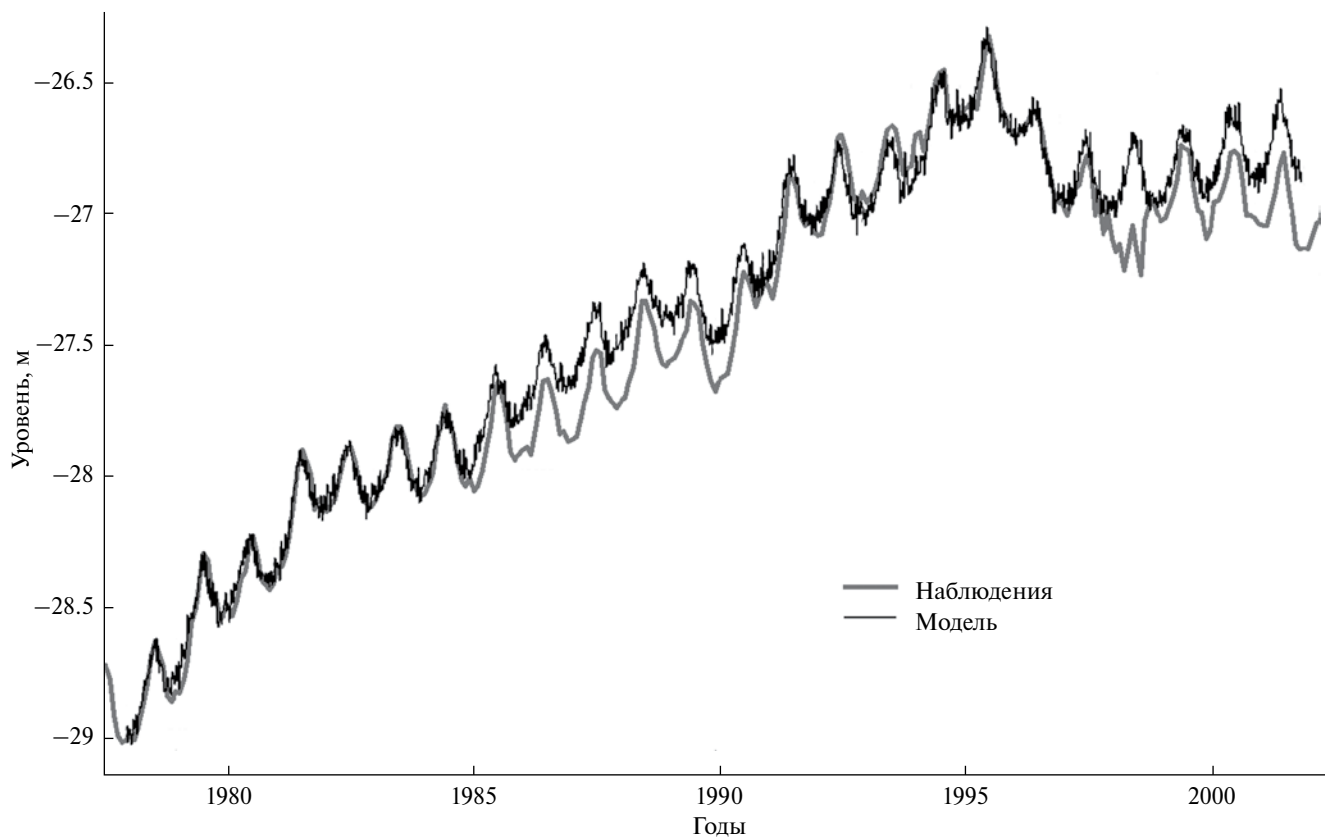


Рис. 3. Эволюция уровня (м) в окрестности г. Баку: измерения и второй модельный расчет (с 1978 г.).

аномалия формируется во время расчета достаточно быстро, то корректировка поля солености требует специальных мер. С целью получения реалистичного распределения солености, а также для достижения динамически согласованного состояния полей проводится “разгоночный” расчет на 4 года, в течение которого соленость поверхности открытой части моря (вдали от берега) искусственно релаксируется к среднеклиматическому распределению. За этот период устанавливается близкий к климату режим циркуляции, при котором речные воды (прежде всего волжские) формируют пресную аномалию на западе моря, плохо представленную в начальном среднеклиматическом поле солености. Как только эта аномалия достигает Южного Каспия, в этом бассейне устанавливается баланс между притоком пресных вод и испарениями, и в рабочем расчете релаксация солености поверхности не требуется.

3.2. Результаты расчетов. Для оценки качества модельного решения были проанализированы полученные характеристики термохалинной циркуляции моря, а также эволюция его уровня. Детальное рассмотрение характеристик течений и водных масс и их изменчивости будет представлено в следующих работах, в то время как в данной статье делается акцент на воспроизведении моделью уровня и водного баланса моря. При этом вместо того, чтобы осреднять имеющиеся данные измерений уровня по всем постам, мы используем конкретные величины, наблюдаемые на измерительном посту г. Баку. Соответственно для сравнения используются значения высоты поверхности моря, полученные по модели в окрестности этой станции.

На рисунках 2 и 3 представлена эволюция уровня Каспия, полученная в двух экспериментах, различающихся между собой только моментом старта модели: с 1958 г. и 1978 г. В целом можно сделать вывод о том, что модель достаточно реалистично воспроизводит наблюдаемую эволюцию уровня в течение первых 15–20 лет расчета. В то же время, в первом эксперименте после 1972 г. наблюдается существенное расхождение с данными наблюдений, причиной которого мог стать резкий климатический сдвиг, не описываемый моделью или некорректно представленный в форсинге вследствие ошибок и пробелов в данных измерений и анализе. Примером такого пробела служит 1998 г., в который наблюдалось аномальное падение уровня, не отраженное в обоих модельных расчетах, вероятно, из-за отсутствия соответствующего сигнала в данных о речном стоке.

Тем не менее эволюция уровня Каспия, полученная во втором расчете (рис. 3), проведенном для периода 1978–2001 гг., то есть после режимных сдвигов 1970-х годов, показывает высокое

сходство с данными наблюдений на протяжении 20 лет. Примечательно, что даже после небольшого расхождения 1985–1990 гг. уровень возвращается на кривую наблюдений, что, вероятно, обусловлено демпфирующим эффектом отрицательной обратной связи между уровнем и площадью зеркала моря. Количественная оценка этого эффекта приведена в параграфе 4.2.1.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ УРОВНЯ

Одна из целей данной работы – количественная оценка влияния факторов внешнего воздействия и различных физических процессов на многолетнюю эволюцию уровня Каспийского моря. Для этого проведена серия численных экспериментов по изучению чувствительности уровня к вариациям ряда параметров модели. В качестве базового принят второй из приведенных в предыдущем разделе расчет, охватывающий период быстрого роста уровня 1978–1996 гг., составившего около 2.7 м или в среднем 15.5 см/год. Все рассматриваемые далее эксперименты идентичны базовому за исключением того или иного фактора, о влиянии которого будем судить по отклонению указанного тренда уровня относительно базового расчета. Количественно это отклонение будем измерять разностью уровня (ΔSSH^1) в базовом и рассматриваемом экспериментах на момент максимума 1995 г.

4.1. Чувствительность к ошибкам атмосферного форсинга. Исследуется влияние на водный баланс Каспия ошибок в полях температуры воздуха и точки росы, скорости ветра и потока солнечной радиации на поверхности. При дальнейшем построении совместной модели климата каспийского региона такие оценки позволят сформулировать критерии качества атмосферного компонента. Результаты экспериментов представлены на рис. 4 (уровень) и 5 (годовой ход ТПМ, осредненной по всему морю).

4.1.1. Вариация потока солнечного излучения на поверхности моря – эксперимент SSR². В этом эксперименте поток солнечного излучения задается по данным ERA-40 без корректировки, указанной во втором разделе, то есть примерно на 5% меньше. Ослабление радиационного прогрева верхнего слоя моря привело к понижению ТПМ относительно базового расчета на 0.25 °C зимой и на 0.4 °C летом и, следовательно, к уменьшению интенсивности испарений и усилению растущего тренда уровня моря. Величина отклонения уровня ΔSSH составила 83 см вверх (в среднем +4.7 см/год).

¹ От англ. Sea Surface Height.

² От англ. Surface Solar Radiation.

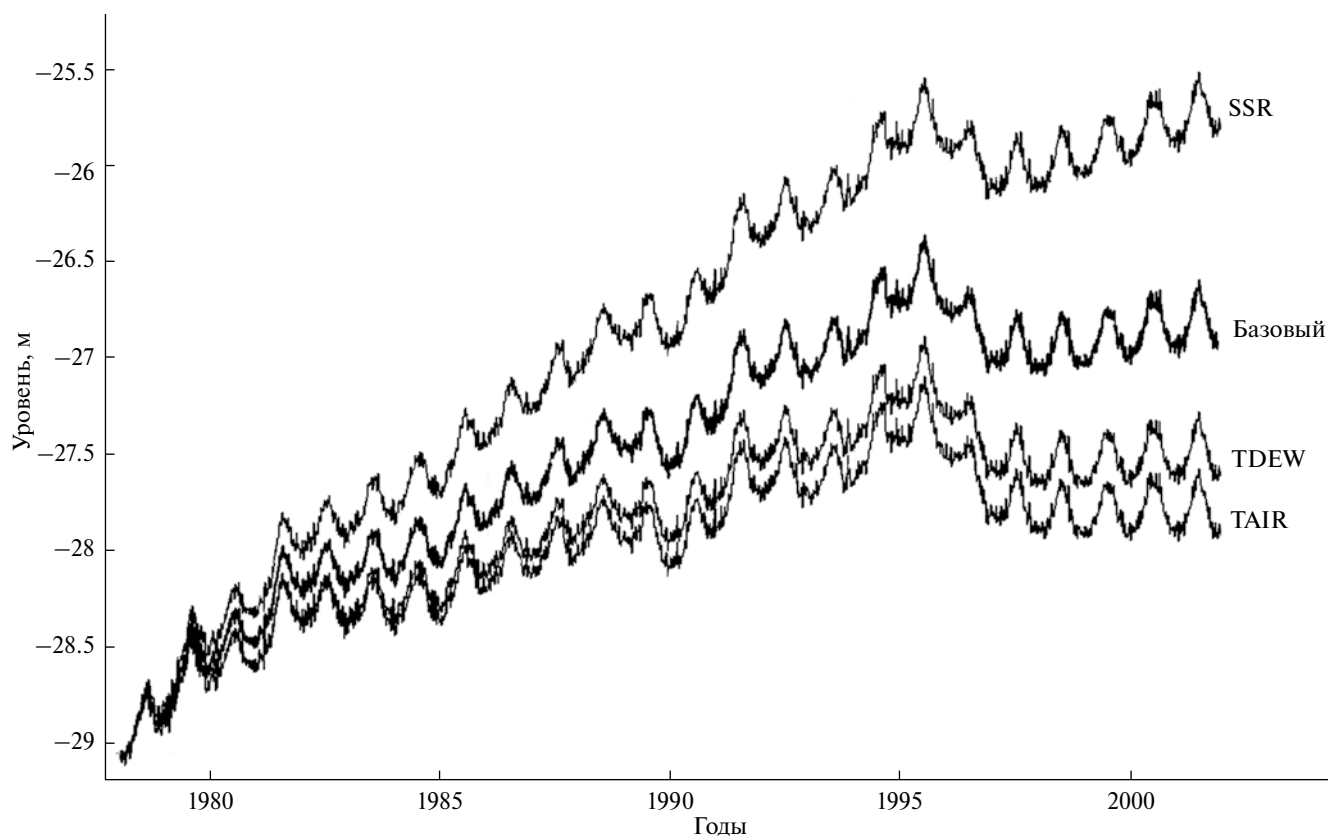


Рис. 4. Эволюция уровня (м) в окрестности г. Баку в базовом эксперименте и в экспериментах с вариациями атмосферных параметров.

4.1.2. Вариация влажности (температуры точки росы) — эксперимент TDEW³. Представленное в ERA-40 поле температуры точки росы уменьшено на 1 °С, то есть понижена влажность воздуха. Это привело к систематическому увеличению интенсивности испарений со всей поверхности моря и замедлению роста уровня. Величина Δ SSH составила 52 см вниз, или –3 см/год. При этом возрос поток скрытого тепла в атмосферу, что привело к снижению ТПМ на 0.3 °С зимой и 0.45 °С летом (рис. 5). Примечательно, что кривая годового хода осредненной по всему морю ТПМ практически совпала с соответствующей кривой эксперимента SSR.

4.1.3. Вариация температуры воздуха — эксперимент TAIR⁴. Повышена температура приводного слоя атмосферы на 1 °С. Это создало дополнительный поток явного тепла в море и привело к повышению ТПМ и, следовательно, к увеличению интенсивности испарений. При этом остальные задаваемые параметры атмосферы не изменились, поэтому повышение температуры воздуха также означает уменьшение его влажности на

сопоставимую с экспериментом TDEW величину, что еще больше усилило испарения. В свою очередь, возрастание интенсивности испарений обусловило дополнительный поток скрытого тепла в атмосферу, сделав повышение ТПМ менее выраженным. В конечном счете, величина отклонения уровня Δ SSH составила 73 см вниз или –4.2 см/год. ТПМ возросла на 0.45 °С зимой и 0.42 °С летом.

4.1.4. Вариация скорости ветра — эксперимент WIND. Скорость ветра задается по данным ERA-40 без корректировки, указанной во втором разделе, то есть примерно на 13% меньше, чем в базовом эксперименте. Ослабление ветра, на первый взгляд, должно привести к уменьшению потока испарений на сопоставимую величину и значительному повышению уровня моря. Однако этого не происходит, поскольку влияние уменьшения скорости ветра на испарения компенсируется ростом ТПМ (на 0.22 °С зимой и 0.55 °С летом), который обусловлен снижением потока скрытого тепла в атмосферу. В итоге величина отклонения уровня Δ SSH минимальна и составляет всего 9 см вверх или +0.5 см/год. Эволюция уровня в этом эксперименте почти совпадает с соответствующей кривой базового эксперимента и на рис. 4 не представлена.

³ От англ. Dewpoint Temperature.

⁴ От англ. Air Temperature.

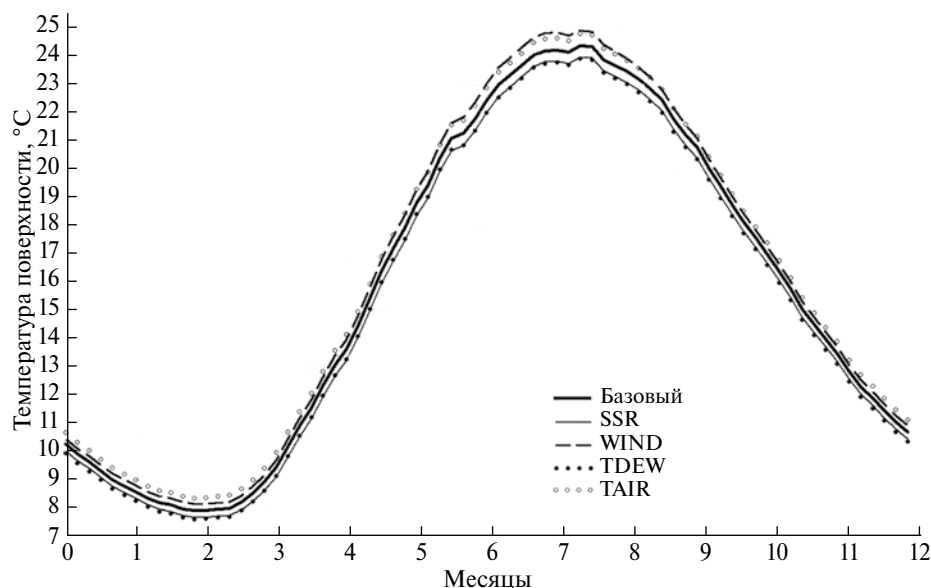


Рис. 5. Среднемноголетний годовой ход температуры поверхности моря (°C), осредненной по всей поверхности Каспия, в базовом эксперименте и в экспериментах с вариациями атмосферных параметров.

4.2. Чувствительность к вариациям потоков воды и площади зеркала моря. Рассмотрим прочие факторы формирования водного баланса Каспийского моря. Вследствие роста уровня на 2.7 м в период 1978–1995 гг. площадь поверхности моря в базовом эксперименте существенно увеличилась из-за продвижения береговой линии в глубь суши, прежде всего в Северном Каспии (см. рис. 6). Также площадь поверхности, с которой происходят испарения, зависит от наличия и распределения морского льда. В следующей серии экспериментов исследуется влияние на водный баланс Каспийского моря вариаций площади его зеркала, а также потоков воды, заданных внешним образом – речного стока и осадков. Результаты представлены на рис. 7.

4.2.1. Влияние затопления и осушения берега – эксперимент FAD⁵. В этом эксперименте береговая линия фиксирована в течение всего расчета и соответствует положению уровня моря на минимуме 1978 г., то есть на отметке –29 м БСВ. В эксперименте FAD отсутствие этого фактора привело к уменьшению полного потока испарений по сравнению с базовым расчетом. Величина отклонения уровня ΔSSH составила 63 см вверх, или +3.6 см/год, то есть наблюдаемый в период 1978–1996 гг. тренд роста уровня Каспия примерно на 20% слабее, чем в данном эксперименте. Это позволяет сделать вывод о том, что отрицательная обратная связь между площадью поверхности Каспийского моря и его уровнем оказывает значительный демпфирующий эффект на колебания последнего.

⁵ От англ. Flooding And Drying.

4.2.2. Влияние морского льда на водный баланс – эксперимент ICE. В холодные месяцы года поверхность Каспия частично экранируется морским льдом, что снижает интенсивность массо- и теплообмена с атмосферой. Для оценки влияния этого фактора на водный баланс моря в данном эксперименте поток испарений рассчитывается без учета ледового экранирования, то есть с нулевой компактностью льда. При этом все потоки тепла на поверхности моря по-прежнему рассчитываются с учетом реального распределения льда. Величина отклонения уровня ΔSSH составила 13 см вниз, то есть поправка, вносимая в водный баланс моря зимним ледообразованием, составляет –0.75 см/год. Эволюция уровня в этом эксперименте не представлена на рис. 7, так как она близка к кривой базового эксперимента. Влияние экранирования морским льдом тепловых потоков не оценивалось, поскольку без учета этого эффекта море может неограниченно охлаждаться и результаты моделирования не будут иметь физического смысла.

4.2.3. Чувствительность к вариациям осадков – эксперимент PREC⁶. Интенсивность осадков задается по данным ERA-40 без корректировки, указанной во втором разделе, то есть на 50% больше, чем в базовом эксперименте. Ожидаемо, это оказало большое влияние на водный баланс моря, величина отклонения уровня ΔSSH составила 149 см вверх (+8.5 см/год). Эта величина отражает и прямой вклад внесенной поправки, и косвенный, обусловленный увеличением площади моря

⁶ От англ. Precipitation.

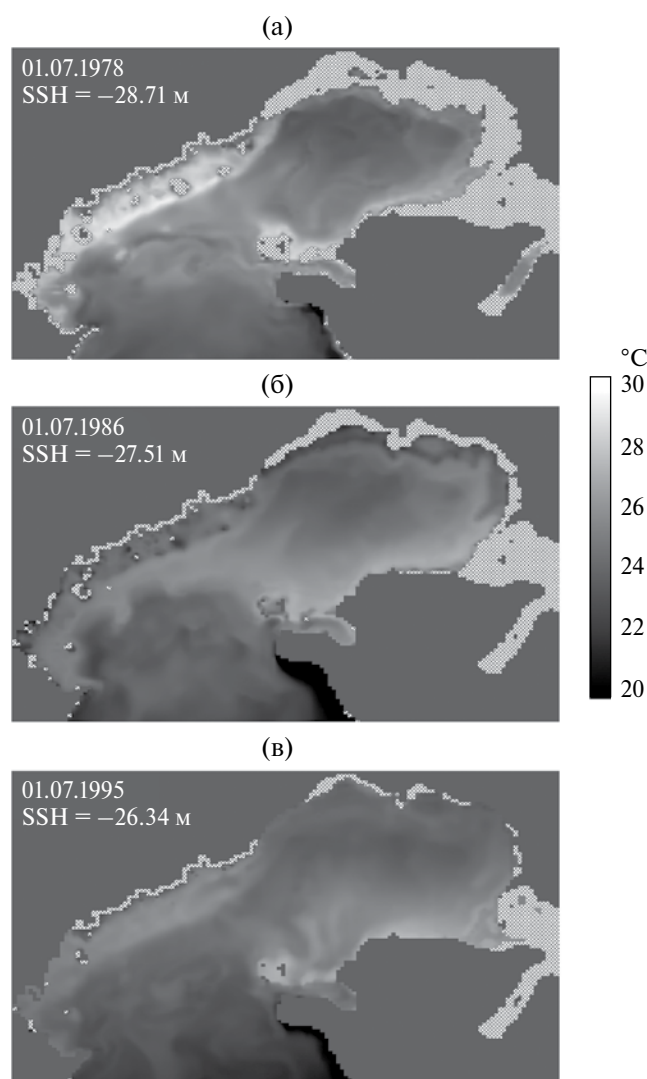


Рис. 6. Береговая линия и температура поверхности Северного Каспия в базовом эксперименте в различные моменты времени: (а) 01.07.1978 г. (год минимума уровня), (б) 01.07.1986 г. и (в) 01.07.1995 г. (год максимума уровня). Заштрихованная область соответствует осушенным территориям.

и, соответственно, испарений, а также опреснением поверхности и другими следствиями увеличения осадков. Таким образом, большие ошибки воспроизведения интенсивности осадков моделями атмосферы могут стать главной причиной неточности описания водного баланса и уровня Каспия. Эволюция уровня в этом эксперименте близка к соответствующей кривой следующего эксперимента, поэтому на рис. 7 не представлена.

4.2.4. Влияние зарегулирования стока рек — эксперимент RIV⁷. Оценивается вклад в водный баланс Каспийского моря безвозвратных изъятий речных

⁷ От англ. Rivers.

вод, обусловленных хозяйственной деятельностью в регионе. Согласно [6], вследствие забора вод на орошение земель, коммунальное хозяйство, промышленность, а также из-за испарений с поверхности водохранилищ Волжско-Камского каскада, приток в Каспийское море снизился в среднем на 12%: сток Волги уменьшился на 9.2%, Урала — на 24%, Терека и Сулака — на 60.2%, Куры — на 12.8%. В данном эксперименте сток рек увеличен для компенсации этих изъятий, то есть аппроксимируется его естественная изменчивость. В среднем сток рек увеличен на 13.6% относительно базового эксперимента. Величина отклонения уровня ΔSSH составила 166 см вверх (+9.5 см/год). Как и в предыдущем эксперименте, эта величина отражает и прямой вклад внесенной поправки, и косвенный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена вихререзающая модель трехмерной циркуляции Каспийского моря, предназначенная для исследования межгодовой изменчивости его уровня и гидрометеорологических параметров. При разработке модели особое внимание уделено расчету водного и теплового балансов Каспия в случае больших колебаний его уровня — до 10 м и более. Для корректного описания температуры поверхности и, следовательно, интенсивности испарений модель построена в сигма- z системе координат, позволяющей задать высокое вертикальное разрешение верхнего погранслоя моря даже при большой пространственно-временной изменчивости уровня. Модель также описывает вариации площади поверхности моря, которые, как показано в настоящей работе, становятся на климатическом масштабе времени важным фактором формирования полного потока испарений с поверхности. В качестве форсинга модели используются данные реанализа атмосферной циркуляции ERA-40, частично скорректированные для согласования с имеющимися среднеклиматическими полями для каспийского региона: скорость ветра увеличена на 15%, интенсивность осадков уменьшена на 34%, поток солнечной радиации увеличен на 5%. При этом потоки испарений, явного и скрытого тепла, а также поток импульса на поверхности моря рассчитываются исходя из параметров моря и воздуха. С применением рассмотренной модели впервые проведена численная реконструкция эволюции уровня и циркуляции вод Каспийского моря на климатическом масштабе времени, показавшая перспективность метода детерминистического моделирования для исследования многолетней изменчивости Каспия.

Для оценки влияния различных факторов на водный баланс Каспийского моря проведена серия

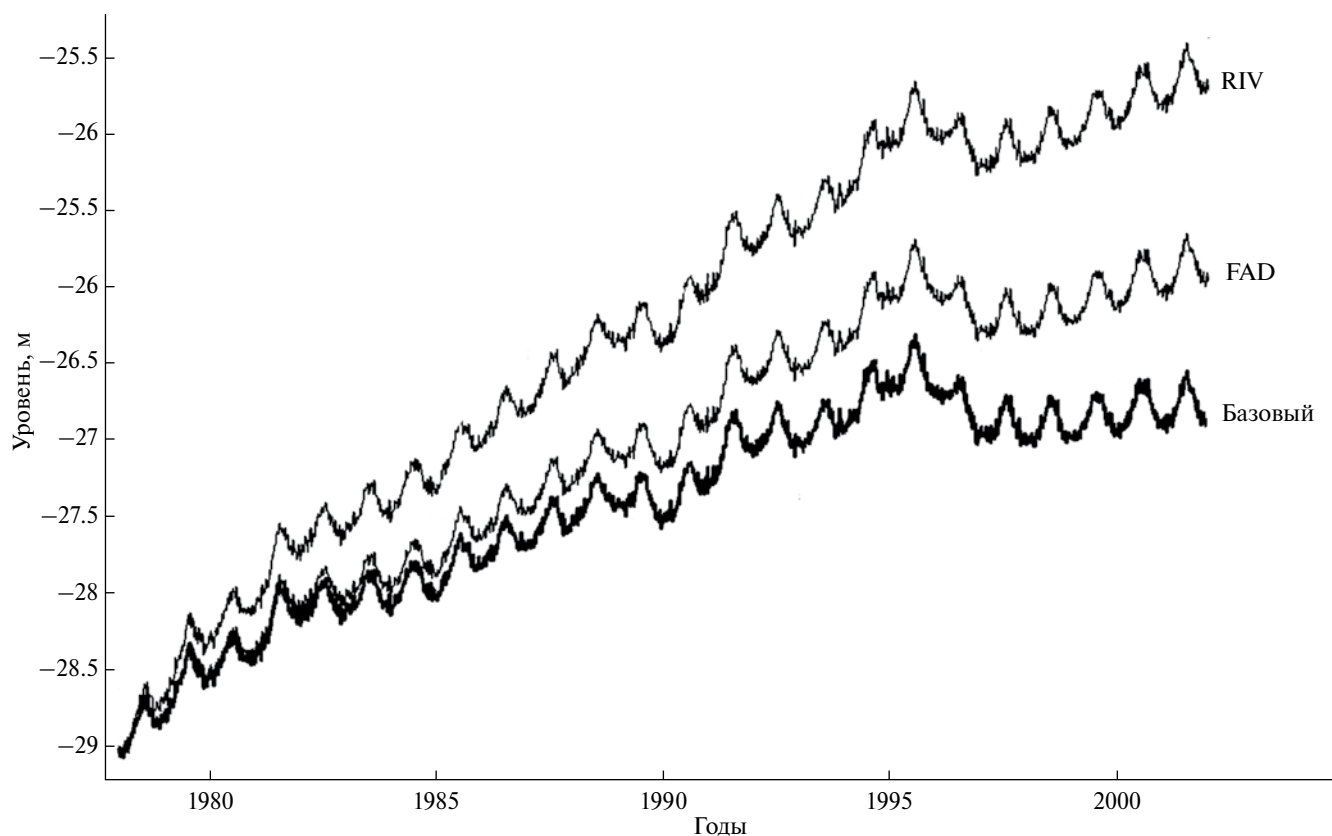


Рис. 7. Эволюция уровня (м) в окрестности г. Баку в базовом эксперименте и в экспериментах с вариациями потоков воды и площади зеркала моря.

экспериментов по изучению отклика его уровня на вариации параметров атмосферы, потоков воды и тепла на поверхности, а также площади зеркала моря. В качестве меры чувствительности используется величина отклонения тренда уровня 1978–1995 гг. относительно базового эксперимента, в котором скорость роста уровня в этот период составляла в среднем 15.5 см/год, что практически совпадает с данными измерений.

Результаты экспериментов говорят о высокой чувствительности водного баланса Каспия к параметрам атмосферы: систематическое повышение температуры воздуха и понижение точки росы на один градус привели к замедлению этого тренда соответственно на 4.2 и 3 см/год. При этом уменьшение скорости ветра на 13% до значений, представленных в ERA-40, практически не сказалось на уровне: тренд усилился всего на 0.5 см/год, что объясняется значительным повышением температуры поверхности моря, скомпенсировавшим влияние ослабления ветра на интенсивность испарений. Задание потока солнечной радиации согласно данным ERA-40, то есть на 5% меньше базового эксперимента, усилило тренд уровня на 4.7 см/год. Все это свидетельствует о том, что при создании совместной модели климата каспийского региона

необходимо уделить особое внимание минимизации нормы ошибки ее атмосферного компонента; в противном случае вероятно возникновение дисбаланса потоков воды и тепла между компонентами модели.

Также показано, что учет в модели вариации площади поверхности Каспийского моря оказывает существенное влияние на эволюцию его уровня: в эксперименте без учета изменений береговой линии при росте среднего уровня моря рассматриваемый тренд усилился на 3.6 см/год. Таким образом, можно сделать вывод о значительной демпфирующей роли отрицательной обратной связи между уровнем и площадью зеркала Каспийского моря. Дополнительно исследована роль морского льда в формировании водного баланса моря: уменьшение полного потока испарений вследствие экранирования поверхности льдом дает вклад в тренд уровня около 0.75 см/год.

Ожидаемо высокое влияние вариаций потоков воды – осадков и речного стока. Повышение средней интенсивности осадков на 50%, то есть до величины, согласующейся с данными ERA-40, но не с климатологией, дало дополнительный прирост уровня в 8.5 см/год. В свою очередь в эксперименте

с заданным естественным расходом рек, то есть без учета изъятий 12% вод на хозяйственные нужды, тренд роста уровня усилился на 9.5 см/год.

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера Карельского научного центра при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-17-00740 “Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях”. При проведении расчетов использовались ресурсы суперкомпьютерного комплекса МГУ [3] и Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С. и др.* Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 248–252.
2. *Архипкин В.С., Бондаренко А.Л., Ведев Д.Л., Косарев А.Н.* Особенности циркуляции вод у восточного берега Среднего Каспия // Водные ресурсы. 1992. № 6. С. 36–43.
3. *Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др.* Практика суперкомпьютера “Ломоносов”. Открытые системы. М.: Издательский дом “Открытые системы”, 2012. № 7. С. 36–39.
4. *Дьяконов Г.С., Ибраев Р.А.* Учет изменений береговой линии в модели общей циркуляции океана // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 601–608.
5. *Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Месхетели А.В.* Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 207 с.
6. *Зонн И.С.* Каспий: Иллюзии и реальность. М.: ТОО Коркис, 1999. 468 с.
7. *Ибраев Р.А.* Математическое моделирование термодинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 128 с.
8. *Ибраев Р.А., Дьяконов Г.С.* Моделирование динамики океана при больших колебаниях уровня // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 514–526.
9. *Косарев А.Н., Тужилкин В.С.* Климатические термохалинные поля Каспийского моря. М.: СОРБИС, 1995. 96 с.
10. *Мещерская А.В., Александрова Н.А.* Прогноз уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. 1993. № 3. С. 73–82.
11. *Михайлов В.Н., Повалишников Е.С.* Еще раз о причинах изменений уровня Каспийского моря в XX веке // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1998. № 3. С. 35–38.
12. Многолетний водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Кн. 2 / Под научным руководством А.В. Фролова. М.: Совинтервод, 1994. 59 с.
13. *Панин Г.Н.* Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 88 с.
14. *Панин Г.Н., Дианский Н.А.* О связи колебания уровня Каспийского моря и климата северной Атлантики // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 1–13.
15. *Саркисян А.С., Зарипов Б.Р., Косарев А.Н., Ржеплинский Д.Г.* Диагностические расчеты течений в Каспийском море // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 2. № 10. С. 1106–1110.
16. *Терзиев Ф.С., Косарев А.Н., Керимов А.А. (ред.).* Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 6: Каспийское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
17. *Федоров П.В.* Причины колебаний уровня Каспийского моря в четвертичном периоде // Тр. ИО АН СССР. 1956. Вып. 15. С. 41–48.
18. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
19. *Шлямин Б.А.* Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Изв. ВГО. 1962. Т. 94. Вып. 1. С. 26–33.
20. *Amante C., Eakins B.W.* ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24 // National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. 25 p.
21. *Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G.S. et al.* Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. P. 2693–2696.
22. *Golitsyn G.S., Arpe K., Bengtsson L. et al.* The study of the Atmospheric Water Cycle Variability in Eastern Europe and its Association with the Caspian Sea Level Change // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, WGNE Rep. # 23, WMO/TD-734, Geneva. 1996. P. 2.8–2.9.
23. *Gunduz M., Ozsoy E.* Modelling Seasonal Circulation and Thermohaline Structure of the Caspian Sea // Ocean Sci. Discuss. 2014. V. 11. P. 259–292.
24. *Ibrayev R.A.* Model of enclosed and semi-enclosed sea hydrodynamics // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2001. V. 16. № 4. P. 291–304.
25. *Ibrayev R.A., Ozsoy E., Schrum C., Sur H.I.* Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction // Ocean Sci. 2010. V. 6. P. 311–329.
26. *Kallberg P., Simmons A., Uppala S., Fuentes M.* ERA-40 Project Report Series No. 17 // European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2004. 31 p.

27. *Kara A.B., Wallcraft A.J., Metzger E.J., Gunduz M.* Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea // *Cont. Shelf Res.* 2010. V. 30. Iss. 10–11. P. 1211–1225.
28. *Schrum C., Backhaus J.O.* Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in North Sea and Baltic Sea. A comparative Assessment // *Tellus.* 1999. V. 51A. P. 526–549.
29. *Turuncoglu U.U., Giuliani G., Elguindi N., Giorgi F.* Modelling the Caspian Sea and its catchment area using a coupled regional atmosphere-ocean model (RegCM4-ROMS): model design and preliminary results // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 283–299.

Simulation of Interannual Variability of the Caspian Sea Level in a High Resolution Hydrodynamic Model

G. S. Dyakonov, R. A. Ibrayev

An eddy-resolving model of the Caspian Sea thermo-hydrodynamics is presented. The model reproduces climatic (decadal) variability of the sea level. Numerical experiments were conducted to reconstruct the sea circulation and the evolution of its level in the second half of the 20th century. We also investigate the impact of variations of a number of natural and anthropogenic factors influencing the Caspian Sea water balance on the long-term trends of its level.