

#### 3.9. УРОВЕНЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**Ведущие авторы:** Ф. С. Терзиев, В. Ч. Хон  
**Авторы:** Г. Ф. Заклинский, Ю. Г. Филиппов  
**Редактор-рецензент:** З. К. Абузяров

##### 3.9.1. Вводные замечания

При исследовании влияния будущих изменений климата на уровень Каспийского моря необходимо учитывать разнообразные факторы. Это — метеорологические факторы (атмосферная циркуляция, осадки и эвапотранспирация на водосборе), гидрологические (сток впадающих рек и видимое испарение), а также антропогенные факторы (регулирование стока рек и изменение свойств подстилающей поверхности с хозяйственными целями).

В долгосрочном плане — до конца XXI столетия и на более отдаленную перспективу — роль всех этих факторов возможно оценить лишь в рамках определенных сценариев, причем существенны не только представления о том, каково будет антропогенное влияние на глобальный климат вследствие эмиссий парниковых газов в атмосферу, но и как будет регулироваться сток рек в бассейне Каспийского моря с водохозяйственными целями. Работы в этом направлении проводятся в институтах Росгидромета (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Государственный гидрологический институт, Гидрометцентр России, Государственный океанографический институт, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и Российской академии наук и Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова, Институт водных проблем РАН).

Для среднесрочной перспективы (скажем, до 2020 г.) конкретный сценарий антропогенного изменения глобального климата не имеет решающего значения, а более существенны естественные колебания климата и водохозяйственная деятельность в регионах.

##### 3.9.2. Среднесрочные оценки

Вариации гидрологического цикла в бассейне Каспийского моря — в числе сильнейших региональных вариаций в XX веке. Это проявилось в значительных изменениях уровня Каспийского моря — самого большого в мире замкнутого водного резервуара, основной сток в который дает Волга. Уровень Каспийского моря может служить важным индикатором не только региональных, но и глобальных климатических изменений (Арпе и др., 1999).

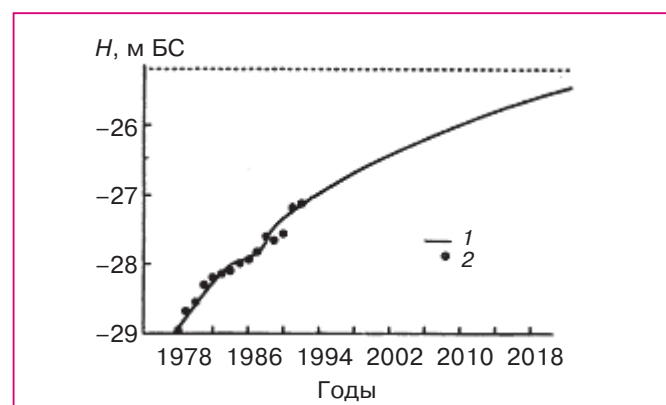
Колебания уровня Каспийского моря, наблюдавшиеся в XX веке и принесшие значительный

ущерб экономике страны, стали предметом особого внимания специалистов (Хубларян, 2000; Чуйков, 1998). К середине 1990-х годов в условиях затопления и подтопления оказались 7 млн. га территории с оценочной стоимостью 10 млрд. долл. США и населением около 600 тыс. человек (Фролов, 2003). Лишь понимание причин этих колебаний (Косарев, Макарова, 1988), их ведущих факторов и количественных закономерностей может привести к созданию эффективных моделей, с помощью которых возможно получить информацию на перспективу и предотвратить или же уменьшить размер ущерба в будущем.

В работе (Фролов, 2003) исследован многолетний водный баланс Каспийского моря, предложены воднобалансовые модели для водоема, а также приведены расчеты характеристик колебания уровня моря для прикладных задач. В работе (Казанский, 1994) были оценены изменения уровня моря в будущем — до 2020 г. — при помощи дифференциального детерминистического уравнения водного баланса. При этом предполагалось, что составляющие водного баланса будут соответствовать ситуации в 1978–1992 гг. Результаты моделирования приведены на рис. 3.9.1.

Вероятностный прогноз уровня Каспия, базирующийся на реконструкции водного баланса и уровня моря за последние 2000 лет и их совместном анализе, выполнен в статье Р. К. Клиге (1994). В работе даны прогнозные оценки 5%-, 50%- и 95%-ной обеспеченности уровня моря при безвозвратном потреблении речного стока в бассейне моря от 40 до 35 км<sup>3</sup> в год.

Перспективная оценка изменения уровня Каспия на ближайшие годы по данным Гидрометцентра России приводится на рис. 3.9.2 (Абузяров,



**Рис. 3.9.1.** Уровень Каспийского моря  $H$  (Казанский, 1994). Рисунок из работы (Фролов, 2003). 1 — теоретическая кривая; 2 — фактические данные.

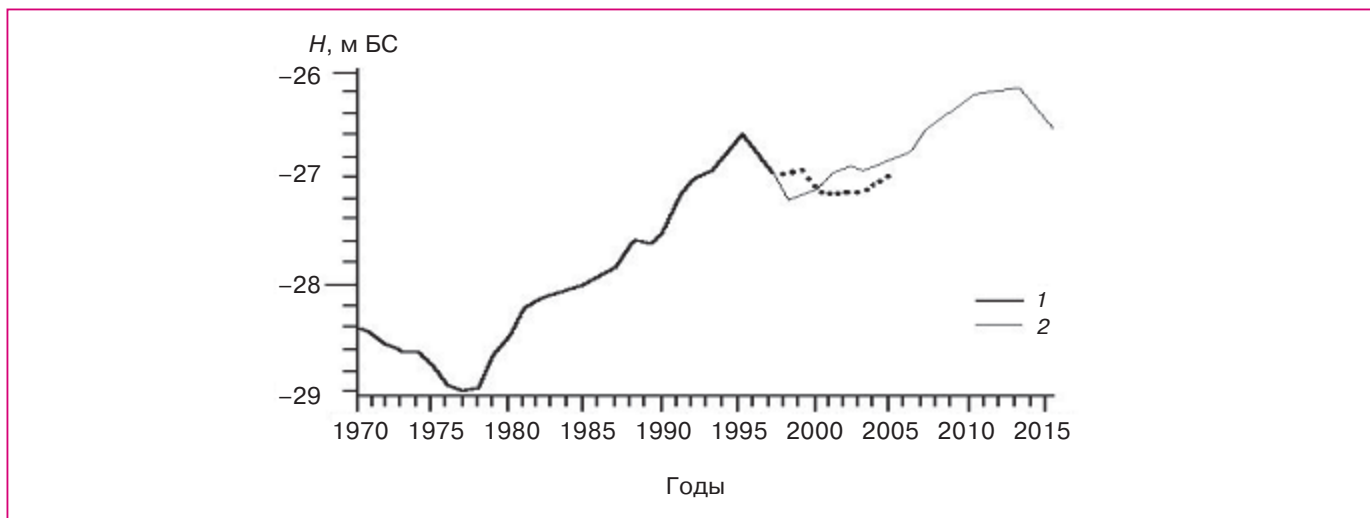
### 3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

2003). Близкие результаты были получены с использованием методики ГГО (Мещерская, Голод, 2003) (см. рис. 3.9.3). Эта перспективная оценка представлена в двух вариантах — с приведением и без приведения к фактическому уровню в 2000 г. (они различаются на 30 см).

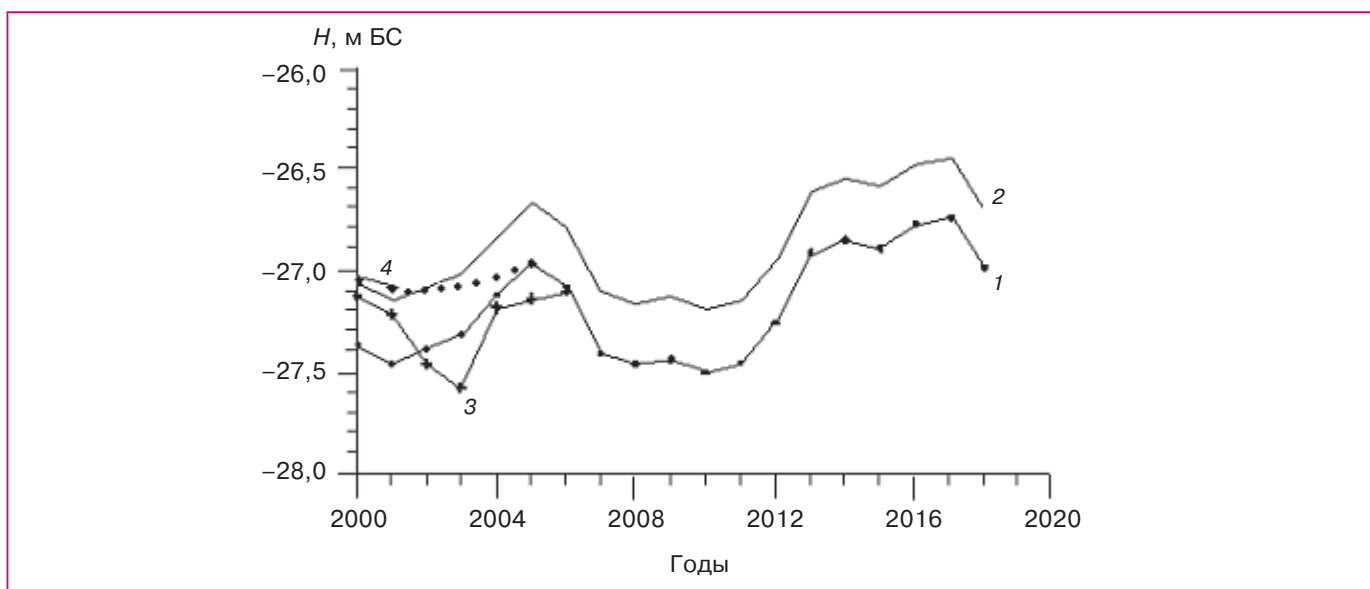
Приведенные на рис. 3.9.2 и 3.9.3 оценки уровня Каспия удовлетворительно согласуются между собой на среднесрочную перспективу, а также с фактическими данными за период наблюдений. Согласно этим оценкам, существенное по-

вышение уровня ожидается после 2013 г. В конце периода, рассматриваемого в работе (Мещерская, Голод, 2003), т. е. к 2020 г., уровень моря (по приведенным данным) может оказаться на отметке около  $-26,5$  м БС, или примерно на  $0,5$  м выше, чем в 2000 г.

В 1967 г. К. И. Смирновой и О. И. Шереметевской (1967) был разработан метод прогноза месячных и годовых уровней Каспийского моря, основанный на приближенном расчете составляющих водного баланса моря. Этот метод с



**Рис. 3.9.2.** Фактический ход уровня Каспийского моря  $H$  (1) и его перспективная оценка до 2015 г. (2) (Абузяров, 2003). Точки показывают фактический ход уровня после 1997 г.



**Рис. 3.9.3.** Перспективные оценки уровня Каспия  $H$ , полученные с использованием климатических параметров в качестве предикторов (Мещерская, Голод, 2003). 1 — перспективные оценки большой заблаговременности без приведения к фактическому уровню в 2000 г.; 2 — то же с приведением; 3 — перспективные оценки средней заблаговременности (без приведения); 4 — фактические значения в 2000 и 2001 гг. по данным четырех станций; точки показывают фактический ход уровня после 2001 г.

некоторыми уточнениями до сих пор применяется в оперативной практике Гидрометцентра России. Решающую роль в годовом ходе уровня моря играют две составляющие водного баланса: поверхностный приток речных вод и эффективное испарение, которые в известной степени компенсируют друг друга. Из этих двух составляющих в условиях зарегулирования стока первая задается в соответствии с планируемыми режимами работы ГЭС, а сумма остальных компонентов водного баланса, вследствие ее малой изменчивости, в первом приближении принимается неизменной как средняя многолетняя величина. Анализ результатов расчетов по данному методу показывает, что приращение уровня моря от месяца к месяцу можно прогнозировать при заданном стоке с точностью до 3 см при обеспеченности 82% и с точностью до 5 см при обеспеченности 87%.

#### 3.9.3. Долгосрочные оценки

Возможность использования результатов расчета с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана для перспективных долгосрочных (до конца XXI века и на более отдаленную перспективу) оценок изменения уровня Каспийского моря в существенной степени определяется их способностью воспроизводить региональный климат прошлого. Этот вопрос был изучен в рамках подпроекта “Каспийский климат” Международной программы сравнения атмосферных моделей — AMIP (Golitsyn et al., 1996). Большинство климатических моделей высокого пространственного разрешения удовлетворительно воспроизвели как климат на водосборах рек Волги и Урала, так и колебания уровня Каспийского моря (Мелешко и др., 1998). На рис. 3.9.4 приведены результаты моделирования с МОЦАО ЕСНАМ4/ОРУС3 и годовые суммы осадков над водосбором Волги и ее сток по данным наблюдений. При расчете использовался сценарий увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере IS92a (Climate Change, 1992), предполагающий увеличение суммарной концентрации (в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте) от примерно  $350 \text{ млн}^{-1}$  в 1990 г. до  $700 \text{ млн}^{-1}$  в 2100 г. На рисунке видно хорошее соответствие модельных расчетов данным наблюдений для XX столетия.

Исследования факторов, определяющих естественные колебания уровня Каспийского моря, по данным наблюдений указывают на то, что основными являются сток Волги и видимое испарение с поверхности водоема (разность между испарением в приповерхностном слое и осадками). На рис. 3.9.5 приведены скользящие коэффициенты корреляции между (1) приращением уровня моря и видимым испарением и (2) приращением уровня моря и стоком Волги (Арпе и др., 2002). Коэффи-

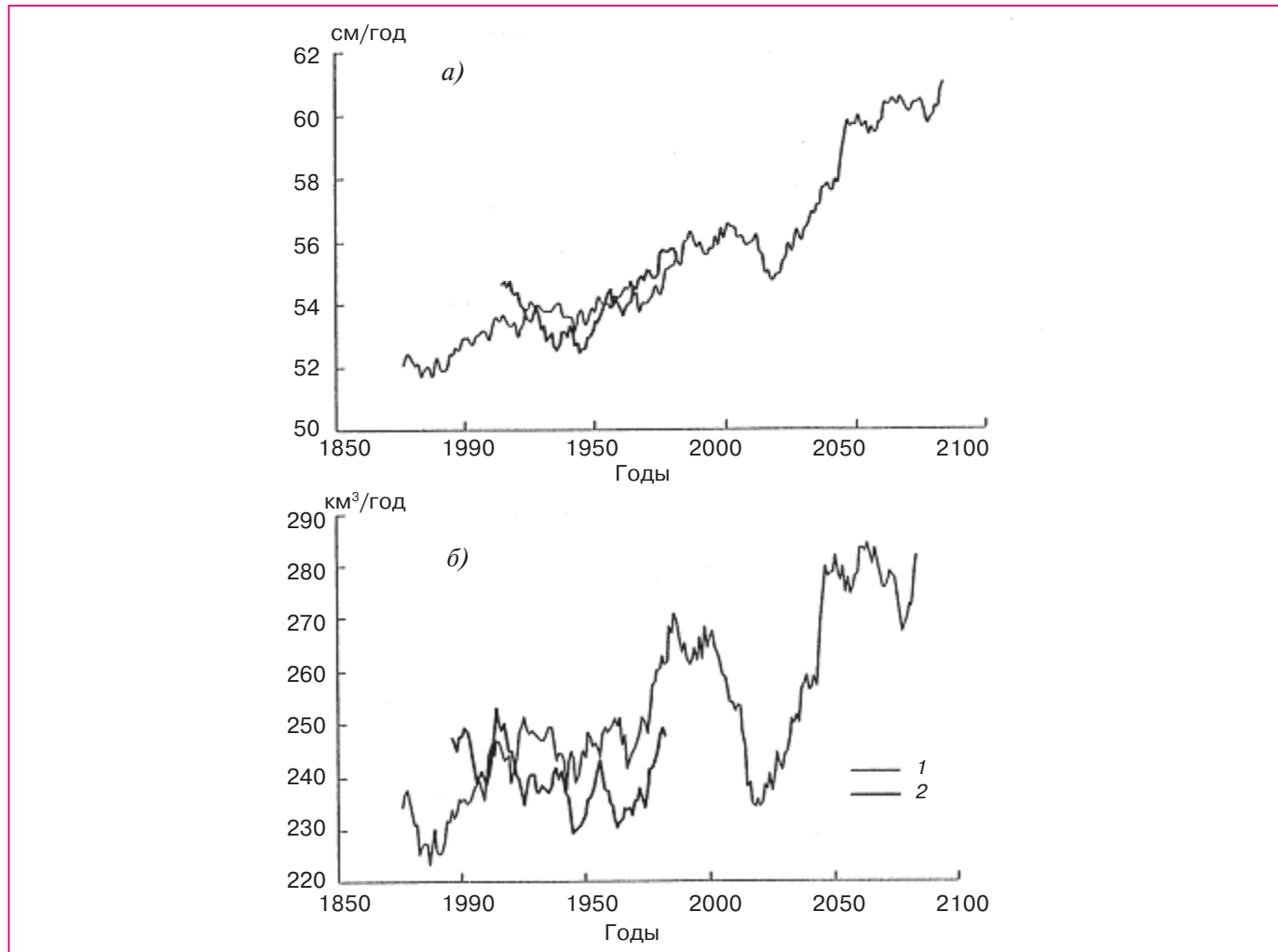
циент корреляции вычислялся для 21-летнего периода, который последовательно сдвигался на 1 год вперед. На рисунке видно, что приращение уровня моря сильно коррелирует со стоком; коэффициенты корреляции меняются в пределах от 0,64 до 0,92. Значения коэффициентов корреляции для приращения уровня моря и видимого испарения для некоторых периодов также значительны, от  $-0,75$  до  $-0,26$ .

Анализ связи сезонных осадков со стоком Волги показал, что основное влияние на формирование стока оказывают осадки в теплый период года, а влияние осадков в холодный период существенно меньше. Изменение осадков над бассейном Каспийского моря связано с соответствующими изменениями циклонической активности. Исследование влияния изменений температуры поверхности океана на влагооборот в бассейне Каспийского моря выявило наличие существенной статистической связи изменений уровня моря, стока Волги и осадков на водосборе реки с аномалиями температуры в тропической части Тихого океана, тесно связанными с явлениями Эль-Ниньо — южное колебание. Возможные физические причины влияния температурных аномалий в тропической части Тихого океана на влагооборот в бассейне Каспийского моря, по-видимому, связаны с изменениями циклонической активности в бассейне моря, обусловленными изменениями перепада температуры полюс — экватор (Арпе и др., 1999; Arpe et al., 2000).

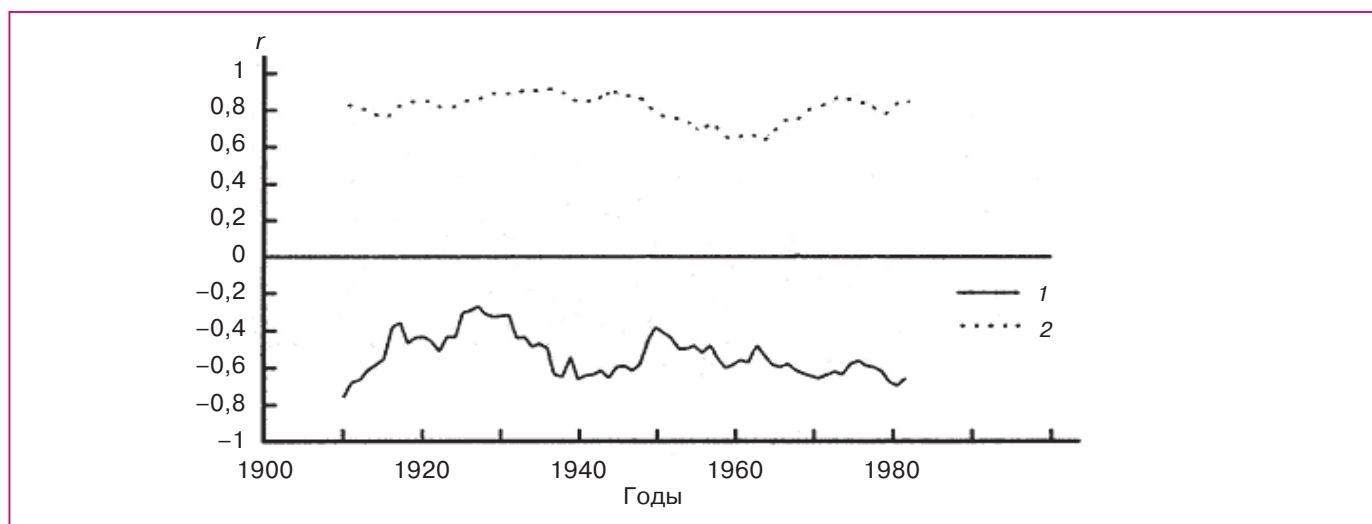
На рис. 3.9.4 и 3.9.5 видно, что в рамках сценария IS92a и при неизменных условиях испарения с поверхности водоема следует ожидать повышения уровня Каспийского моря во второй половине XXI века. Представление о том, что при перспективных оценках изменения уровня Каспийского моря можно ограничиться одним предиктором — стоком Волги, — подкреплялось сопоставлением этих величин для XX века. На рис. 3.9.6 приведены данные о годовом стоке и приращении уровня моря, причем шкалы подобраны так, что кривые максимально близки. При таком отображении заметно сильное сходство этих кривых.

Исследуя влияние суммы осадков, Арпе и Рекнер (Arpe and Roekner, 1999) провели численные эксперименты с климатической моделью ЕСНАМ4/ОРУС3. Результаты расчета показали, что увеличенный сток Волги, возникающий вследствие увеличения осадков зимой над бассейном, приведет к подъему уровня Каспийского моря в XXI веке. Изменение режима осадков в модели возникало вследствие увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, т. е. из-за изменений в глобальной климатической системе.

### 3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

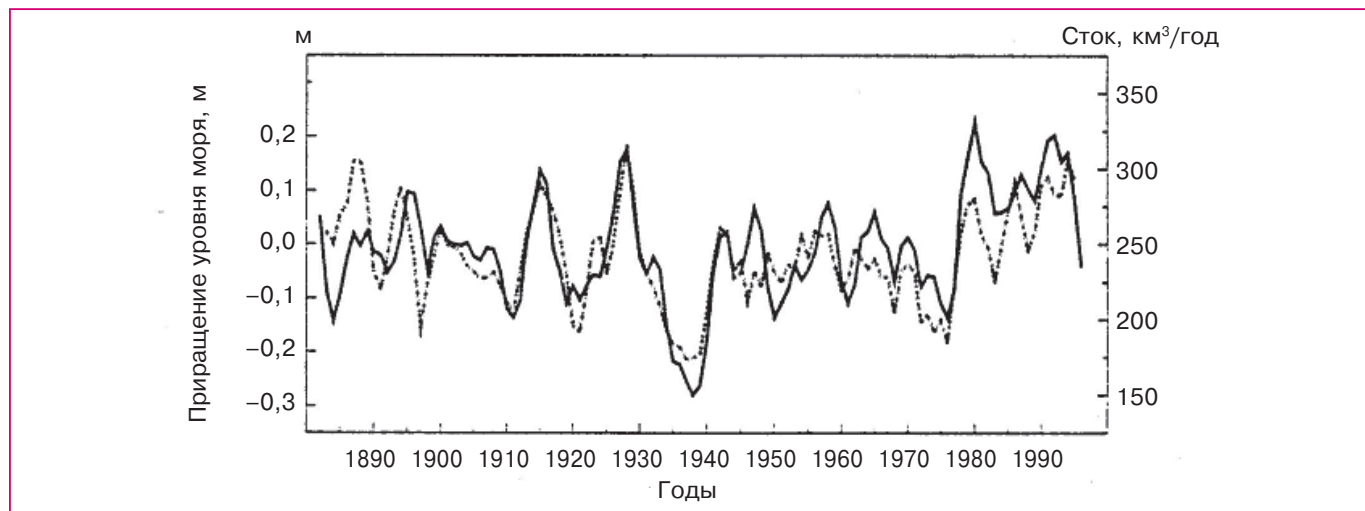


**Рис. 3.9.4.** Результаты моделирования с МОЦАО ЕСНАМ4/ОРУСЗ (1) и годовые суммы осадков (30-летнее скользящее сглаживание) над водосбором Волги (а) и ее сток (б) по данным наблюдений (2) (Арпе и др., 1999).



**Рис. 3.9.5.** Скользящие коэффициенты корреляции  $r$  между приращением уровня моря и видимым испарением (1) и приращением уровня моря и стоком Волги (2) (Арпе и др., 2002). Для каждого года на рисунке представлен коэффициент корреляции, который вычислялся для 21-летнего периода времени, центром которого был данный год.





**Рис. 3.9.6.** Приращение уровня Каспийского моря за год (сплошная линия) и годовой сток Волги (пунктир) (Arpe et al., 2000).

Однако в недавней работе (Elguindi and Giorgi, 2006) была приведена иная информация. Авторы получили оценки возможного изменения уровня Каспийского моря в XXI веке по сценариям A2 и A1B для 8 современных МОЦАО. При этом по отдельности исследовано влияние осадков и испарения над поверхностью моря и его бассейном. Для 14 из 16 рассмотренных случаев (8 моделей × 2 сценария) уровень Каспия в XXI веке в долгосрочном плане понижается. К концу века в среднем по ансамблю это понижение может составить 9 м. Различие с результатами работы (Arpe and Roekner, 1999) авторы объясняют более детальным моделированием эвапотранспирации.

В ГИ Росгидромета разработан вероятностный прогноз уровня Каспийского моря на первую половину XXI века. Моделирование уровня Каспия производилось на период 2001–2050 гг. для 12 вариантов климатических условий на водосборе (современный и рассчитанный с помощью климатических моделей HadCM3, ECHAM4, CGCM1) и разными предположениями о водопотреблении в бассейне (пессимистическими, умеренными и оптимистическими). Во всех случаях смоделированные уровни моря 50%-ной обеспеченности до середины столетия имеют отметки ниже современных. Только при сценарии CGCM1 в конце расчетного периода верхняя граница доверительного интервала превысит абсолютную отметку –26 м БС. В остальных случаях вероятность превышения этой отметки оказалась меньше 5%. При увеличении водопотребления в бассейне уровень моря будет находиться на более низких отметках (Отчет о НИР..., 2004).

Таким образом, имеющиеся долгосрочные оценки возможного изменения уровня Каспий-

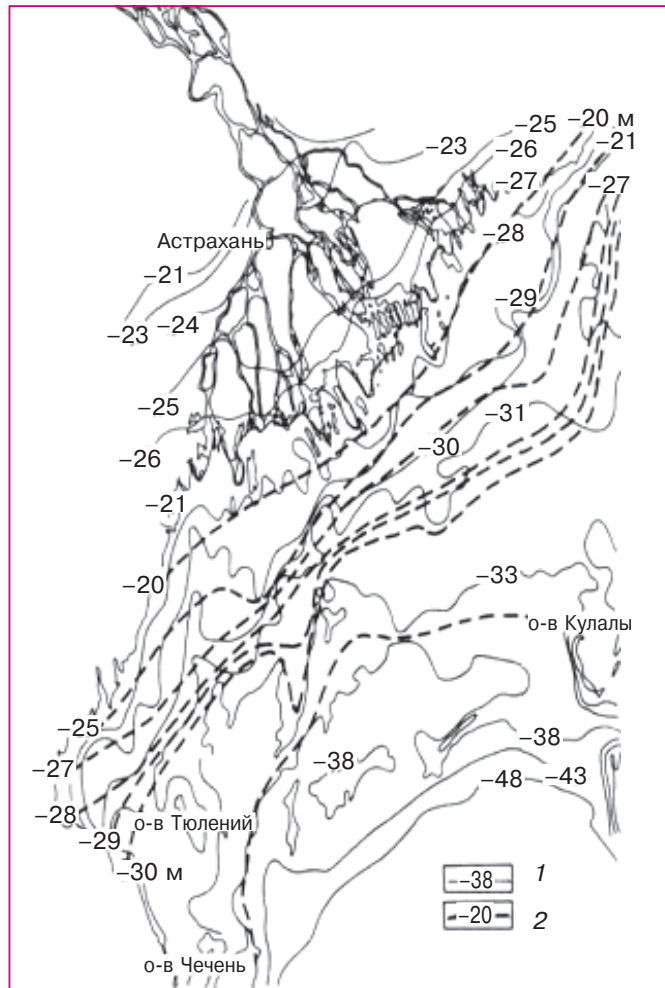
ского моря противоречивы. Проблема ввиду своей практической значимости для региона требует дальнейшей интенсивной разработки.

Заметим, что при всех расхождениях имеющих оценок абсолютные величины ожидаемых изменений — несколько метров, что существенно превосходит ожидаемые в XXI веке изменения уровня Мирового океана. По результатам последних расчетов, опубликованных МГЭИК (Climate Change 2007, 2007), ожидаемое повышение уровня Мирового океана к концу XXI века составляет 0,18–0,59 м.

#### 3.9.4. Последствия возможного подъема уровня Каспия

В отчете Шредера (Schradet, 2001) даются оценки потенциальной угрозы затопления территории разных стран вследствие повышения уровня Каспия. Наиболее подверженными такому воздействию являются Казахстан и Российская Федерация. В целом Каспий может затопить от 12 500 км² при повышении на 1 м до 46 000 км² при повышении на 5 м. Для России эти оценки составляют соответственно 4170 и 18 620 км².

С подъемом уровня Каспия до отметки –26,0 м БС могут быть разрушены или оказаться под водой многие прибрежные населенные пункты, социальные и производственные объекты в России и в других прикаспийских странах. Для защиты этих объектов потребуется провести комплекс специальных инженерных работ. Положение береговой линии в районе дельты Волги при разных уровнях моря показано на рис. 3.9.7 (Устьевая область Волги..., 1998).



**Рис. 3.9.7.** Изогипсы (1) и границы зон транзита (2) волжских вод при разных среднегодовых уровнях Каспия.

Степень влияния подъема уровня моря на береговую зону увеличивается с севера на юг по мере удаления от аванделты Волги. Малые уклоны прибрежной равнины Калмыкии способствуют глубокому проникновению морских вод, особенно во время ветровых нагонов. Если уровень Каспия достигнет отметки  $-26,0$  м БС, практически на всем побережье резко интенсифицируются абразионные процессы и начнется размыв голоценовых и более древних аккумулятивных образований. Трансгрессивные изменения в южной части Калмыкии захватят в этом случае зону шириной до 30 км (Лукьянова и др., 1996).

На современном этапе изученности проблемы, учитывая очень большую неопределенность в оценках климатических сценариев середины текущего столетия и соответственно основных составляющих водного баланса Каспия, пока нет оснований при планировании мероприятий по защите побережий от затопления ориентироваться на отметки уровня выше  $-25,5$ ... $-26,0$  м БС.

#### 3.9.5. Литература

- Абузьяров З. К., 2003.** Технология прогноза тенденций изменения уровня Каспийского моря на перспективу 6 и 18 лет, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеиздат, с. 351–363.
- Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Мохов И. И., Семенов В. А., Спорышев П. В., 1999.** Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря, Доклады РАН, т. 366, № 2, с. 248–252.
- Арпе К., Спорышев П. В., Семенов В. А., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Елисеев А. В., Мелешко В. П., Мещерская А. В., Мохов И. И., 2002.** Исследование причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы, в кн.: Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 165–179.
- Казанский А. Б., 1994.** Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря, Доклады РАН, т. 338, № 4, с. 531–537.
- Клиге Р. К., 1994.** Прогнозные оценки изменения уровня Каспия, Мелиорация и водное хозяйство, № 1, с. 10–11.
- Косарев А. Н., Макарова Р. Е., 1988.** Об изменениях уровня Каспийского моря и возможности их прогнозирования, Вестник МГУ, сер. 5, География, № 1, с. 21–26.
- Лукьянова С. А., Никифоров Л. Г., Рычагов Г. И., 1996.** Голоценовые морские аккумулятивные формы северо-западного побережья Каспийского моря, Вестник МГУ, сер. географ., № 2.
- Мелешко В. П., Голицын Г. С., Володин Е. М. и др., 1998.** Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 34, № 4, с. 591–599.
- Мещерская А. В., Голод М. П., 2003.** О статистических долгосрочных прогнозах уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных климатических параметров, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеиздат, с. 278–294.
- Отчет о НИР Росгидромета “Разработка новых и развитие существующих методов и технологий оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров морской среды в интересах обеспечения морских отраслей экономики и обороны страны”, 2004.** СПб, ГГИ, 124 с.
- Смирнова К. И., Шереметевская О. И., 1967.** Расчеты водного баланса Каспийского моря для прогноза годового хода уровня моря, Труды Гидрометцентра СССР, вып. 3.

- Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря, 1998. М., ГЕОС, 279 с.
- Фролов А. В., 2003. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения, М., ГЕОС, 171 с.
- Хубларян М. Г., 2000. Колебание уровня Каспийского моря и его эколого-экономические последствия, в кн.: Экологические проблемы Каспия, РАН и Национальная Академия США. Сборник докладов Международного научного семинара по экологическим проблемам Прикаспийского региона, 1–3 декабря 1999 г., Москва, под ред. М. Г. Хубларяна, М., Киров, с. 5–13.
- Чуйков Ю. С., 1998. Проблемы экологической безопасности Астраханской области в связи с подъемом Каспийского моря, в кн.: Научные, экологические и политические проблемы стран Каспийского региона, под ред. М. Глянца и И. Зонна, М., Найроби: Kluwer Acad. Publish., pp. 145–156.
- Arpe K. and Roekner E., 1999. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases, *Adv. Water Res.*, vol. 23, pp. 105–119.
- Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S., Mokhov I. I., Semenov V. A., and Sporyshev P. V., 2000. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 27, No. 17, pp. 2693–2696.
- Climate Change, 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton J. T., Callander B. A., and Varney S. K. (eds.), Cambridge University Press, 198 p.
- Climate Change 2007, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S. D., Qin M., Manning Z., Chen M., Marquis K. B., Averyt M., Tignor M., and Miller H. L., eds., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.
- Elguindi N. and Giorgi F., 2006. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, L08706, doi:10.1029/2006GL025943.
- Golitsyn G. S., Meleshko V. P., Mescherskaya A. V., Mokhov I. I., Pavlova T. V., Galin V. A., and Senatorsky A. O., 1996. GSM simulation of water balance over Caspian Sea and its watershed, *Proceedings of the First Int. AMIP Scientific Conference, WMO/TD-No. 732*, pp. 113–118.
- Schrader F., 2001. Caspian Sea Potential Inundation and Impacts on Human and Natural Environment, *Caspian Environment Programme, Baku, AZ*, 39 p.

#### 3.10. ПОСЛЕДСТВИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

*Ведущие авторы:* Л. И. Болтнева, В. А. Семенов, Б. Г. Шерстюков

*Авторы:* В. А. Бузин, З. Д. Копалиани, П. М. Лурье, С. П. Малевский-Малевич, В. Д. Панов

*Редактор-рецензент:* Д. Б. Киктев

##### 3.10.1. Вводные замечания

Ожидаемое в XXI веке глобальное потепление, возможно, будет сопровождаться усилением экстремальных гидрометеорологических явлений. В Третьем (Climate Change 2001, 2001, pp. 69–76) и Четвертом (Climate Change 2007, 2007a, 2007b) оценочных докладах МГЭИК засухи и наводнения отнесены к основным проблемам почти для всех регионов мира. Для России с ее огромным разнообразием экологических и климатических условий возможно проявление более частых и интенсивных засух и наводнений, увеличение пожароопасности лесов в отдельных регионах. Однако при разработке адаптаций к возможным изменениям климата в будущем важны не только эти широкомасштабные последствия экстремальных метеорологических явлений, проявляющиеся в масштабе регионов. Существенны также и локальные по-

следствия, сопряженные с большой опасностью для жизни человека, его жилища и технических сооружений. Таковыми являются сели и лавины, особенно проявляющиеся в Кавказском регионе. Эти проблемы для XXI века также будут рассмотрены в данном разделе. Велика также опасность комплекса таких опасных гидрометеорологических явлений, как ураганы, сильные ветры, шквалы, смерчи, однако их возникновение является наименее предсказуемым.

##### 3.10.2. Общая характеристика ожидаемых изменений климата и его экстремальности

В этом разделе кратко излагаются результаты моделирования изменений основных характеристик климата России в XXI веке по регионам, приведенные в работах (Школьник и др., 2006; Мелешко и др., 2004), а также в ряде других исследований (о методах — см. раздел 3.1.10).

Возможные изменения климата в XXI веке на Европейской территории России рассчитаны с помощью модели регионального климата, созданной в ГГО Росгидромета. Ее пространственное