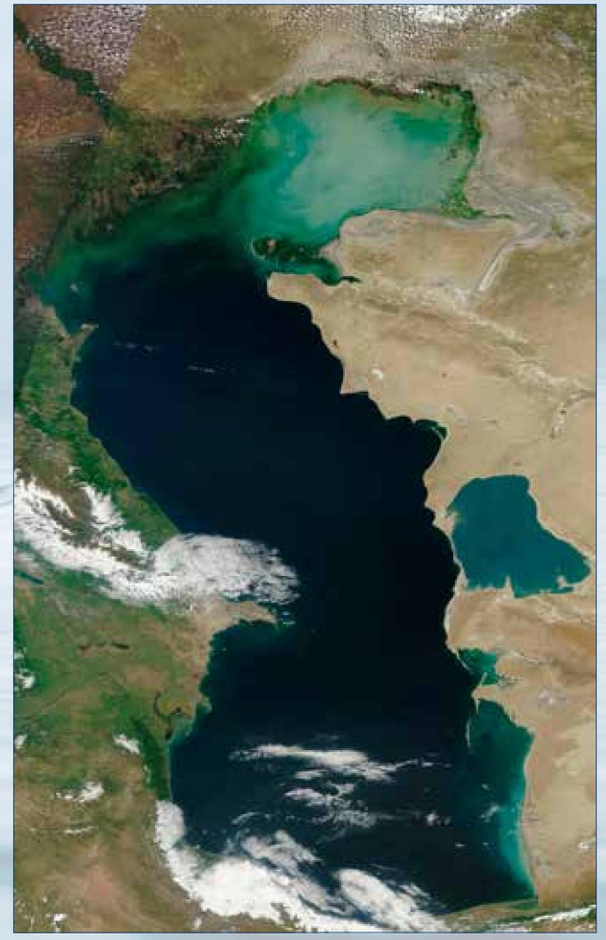
Водный баланс Каспийского моря



Водный баланс
и
колебания уровня Каспийского моря

Моделирование и прогноз

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

Научно-методическое пособие

ВОДНЫЙ БАЛАНС И КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ

Под редакцией
д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова

Москва
2016

УДК 551.461 (262.1)
ББК 26.236
В 62

Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. – М.: Триада лтд, 2016. – 378 с.

ISBN 978-5-9908623-0-2

Научно-методическое пособие посвящено проблемам, связанным с изменчивостью уровня Каспийского моря (УКМ). Основное внимание уделено многолетним колебаниям УКМ и причинам, их вызывающих. Анализируется роль климатического, тектонического и антропогенного факторов. Описывается уравнение водного баланса Каспийского моря и и вклад его компонент в изменения уровня. Излагаются методы долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза УКМ. Описаны условия возникновения сгонно-нагонных явлений и методы их прогнозирования.

Для специалистов в области океанологии, преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Рецензент:
доктор географических наук, профессор В.М. Грузинов

Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and prediction

The manual is devoted to the problems associated with variability of the Caspian Sea level (CSL). The focus is on long-term fluctuations of CSL and their causes. The role of climatic, tectonic and anthropogenic factors is analysed. The equation of the Caspian Sea water balance and the contribution of its components to the CSL change is described. The methods for the long-term forecast and super long-term forecast of CSL are given. The conditions of the occurrence of wind-driven surges and their forecasting methods are described.

For experts in oceanology, teachers, post-graduate students and students of corresponding specialities

УДК 551.461 (262.1)
ББК 26.236

ISBN 978-5-9908623-0-2

© ФГБУ «Гидрометцентр России», 2016

Памяти
Зыядина Каюмовича Абузярова

Предисловие

Эта книга была задумана Зыядином Каюмовичем Абузяровым – знатоком Каспия, известным специалистом по долгосрочным и сверхдолгосрочным прогнозам уровня Каспийского моря. Она виделась ему как современный срез проблемы Каспийского моря, включающей гидрометеорологические, геологические, экологические, правовые и другие аспекты. В таком ключе им была написана значительная часть текста. К сожалению, ему не довелось увидеть в окончательном виде воплощение своего замысла. Это научно-методическое пособие – дань памяти о Зыядине Каюмовиче Абузярове, замечательном ученом и человеке.

Пособие подготовил коллектив специалистов Росгидромета. В написании книги принимали участие: зав. отделом морских гидрологических прогнозов, д-р геогр. наук Е.С. Нестеров, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук З.К. Абузяров, ст. науч. сотр. Н.Г. Лежнева (ФГБУ «Гидрометцентр России»); вед. науч. сотр., канд. геогр. наук Р.Е. Никонова (ФГБУ «ГОИН»); зав. лаб., д-р геогр. наук А.В. Мещерская (ФГБУ «ГГО»); директор ФГБУ «КаспМНИЦ», канд. геогр. наук С.К. Монахов. Научное редактирование книги осуществил Е.С. Нестеров.

Введение

Значение Каспийского моря и его водосборного бассейна для населения прибрежных стран Каспийского региона трудно переоценить. Высокоразвитое рыбное хозяйство, водный транспорт, гидроэнергетика, нефтегазодобывающая и химическая промышленность, сельское хозяйство и ряд других отраслей играют важную роль в экономике стран Каспийского региона. В недрах Каспийского моря сосредоточены огромные запасы природных ресурсов, прежде всего нефти и газа. По некоторым данным, потенциал углеводородных ресурсов составляет не менее 15 млрд т условного топлива в нефтяном эквиваленте. Кроме того, Каспийское море – уникальный водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому многообразию флоры и фауны. В Каспийском море обитает более 500 видов растений и 850 видов животных, в том числе крупнейшее в мире стадо осетровых рыб (90 % мирового запаса). Каспий является главнейшим миграционным путем и местом обитания водоплавающих и береговых птиц. Эффективность Каспийского водохозяйственного комплекса и благосостояние населения, проживающего в прибрежной зоне, в значительной степени зависят от гидрометеорологического режима моря и устьев рек и, прежде всего, от положения его уровня. Не случайно поэтому к Каспийскому морю проявляется большой научный и практический интерес.

Феномен разнопериодных колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) включает как нагонные и сгонные перемещения водных масс, так и длящиеся в течение нескольких десятилетий трансгрессии и регрессии береговой черты. Все эти процессы динамики уровня моря ведут за собой существенные и нередко катастрофические последствия, затрагивающие прежде всего морские мелководья и сушу на низменных участках побережья. Негативное воздействие изменений уровня моря отражается на рациональном использовании природно-ресурсного потенциала, в первую очередь на использовании земельных, рыбных и рекреационных ресурсов, а также ресурсов нефти и газа, жизнеобеспечении населения, сохранении жилищного фонда и социальной инфраструктуры.

Социально-экономическое развитие в прибрежной зоне Каспийского моря всегда было связано с колебаниями уровня моря,

являющимися одной из самых существенных особенностей гидрологического режима Каспия и основным фактором, лимитирующим многие отрасли экономики, которые испытывают прямое и косвенное воздействие колебаний УКМ.

Разработка мероприятий по предотвращению и ослаблению их негативного влияния – одна из наиболее острых проблем Каспийского региона. Для этого требуются знания не только о последствиях этих воздействий и их взаимодействии, но и о способности систем адаптироваться к изменениям уровенного режима моря.

Основой для написания настоящего научно-методического пособия послужили результаты исследований, выполненных в научных учреждениях Росгидромета, РАН и высших учебных учреждениях страны соответствующего профиля (МГУ, РГГМУ и др.). Отсутствие пособий, посвященных проблеме моделирования и прогнозирования УКМ, побудило авторов собрать и обобщить разбросанные по различным литературным источникам сведения по указанному вопросу. При подготовке настоящего пособия авторы стремились учесть последние достижения в исследованиях причин разномасштабных колебаний УКМ. Поскольку книга имеет определенную практическую направленность, значительное внимание уделено методам моделирования и прогнозирования уровня Каспийского моря с различной заблаговременностью.

Трудности создания такого пособия прежде всего вытекают из того, что данная область знаний еще не достигла того научного уровня, при котором ее основные положения и принципы были бы окончательно установлены и общепризнаны. Сложность проблемы сверхдолгосрочных прогнозов УКМ вынуждает искать различные подходы к ее решению. Несмотря на то, что в литературе публикуется большое количество прогнозов уровня Каспийского моря, в настоящее время в России официальными считаются прогноз годового хода уровня и фоновый прогноз уровня на срок до 6 лет, выпускаемые Гидрометцентром России в мае в форме гидрометеорологического бюллетеня.

Очевидно, что закономерности процессов, происходящих в среде атмосфера – море – суша, можно правильно понять лишь в том случае, если их изучать комплексно и целенаправленно как цельного объекта. К сожалению, сегодня исследования носят разрозненный, нескоординированный характер, что не позволяет представить целостную картину происходящих в Каспийском море и его бассейне процессов. Исследования проводятся по различным проектам и программам, часто не согласованным между собой. Эти проекты ограничиваются решением задач по отдельным акваториям моря, что затрудняет сбор информации о Каспийском море как единой системе, причем доступ к полученным результатам часто ограничен.

В первой главе пособия кратко изложены социально-экономические и экологические проблемы Каспия, связанные с разномасштабными колебаниями его уровня. Во второй главе дана краткая характеристика физико-географических и геоморфологических особенностей моря. В третьей главе рассматриваются вопросы комплексного мониторинга УКМ, включающего развитие сети уровенных наблюдений и спутниковые технологии. В четвертой главе изложены особенности пространственно-временной изменчивости уровня моря в различных временных масштабах и их связь с атмосферными процессами. В пятой главе дается краткий обзор исследований причин многолетних колебаний; показана роль климатического, тектонического и антропогенного факторов в многолетних колебаниях УКМ.

В шестой главе приведено уравнение водного баланса Каспийского моря и описана роль его составляющих в разномасштабных колебаниях уровня моря. В седьмой главе излагаются методы прогнозов колебаний уровня моря с заблаговременностью до года, разработанные в институтах Росгидромета (Гидрометцентр России, ГГО) и других научных учреждениях. В восьмой главе излагаются методы сверхдолгосрочных прогнозов уровня моря на сроки от 5 лет и более. В девятой главе описаны условия возникновения сгонно-нагонных явлений и методы их прогнозирования.

Книга рассчитана прежде всего на специалистов, работающих в системе Росгидромета, занимающихся проблемами Каспийского моря, а также на специалистов других заинтересованных ведомств, для студентов и аспирантов профильных высших учебных заведений. Авторы надеются, что книга будет полезна и интересна широкому кругу читателей, интересующихся проблемами Каспийского моря.

.

Очень трудно делать предсказания,
особенно в отношении будущего.

Нильс Бор

Глава 1.
ПРОБЛЕМЫ КАСПИЯ В СВЯЗИ С КОЛЕБАНИЯМИ ЕГО УРОВНЯ

1.1. Социально-экономические последствия колебаний уровня Каспийского моря

Проблема прогнозирования уровня Каспийского моря является ключевой как для экономики, так и для экологии. Каспийское море – это уникальный во многих отношениях водоем со многими только ему присущими физико-географическими, гидрометеорологическими и биологическими особенностями. Феномен аномальных продолжительных понижений и повышений уровня моря является одной из главных особенностей гидрологического режима моря и основным фактором, лимитирующим все виды хозяйственной и другой деятельности в странах Каспийского региона. Неустойчивый режим уровня Каспийского моря определяет весь комплекс природно-хозяйственной деятельности в береговой зоне, устьевых областях рек и в открытом море и создает массу проблем социально-экономического, экологического характера, особенно для судоходства и рыболовства. Вместе с тем проблемы Каспийского моря настолько сложны и многообразны, что отсутствуют их простые решения. Неустойчивость состояния береговой зоны Северного Каспия как объекта природной среды и нестабильность ее положения в качестве территории для строительства инженерных сооружений непосредственно связана с колебаниями уровня моря и существованием сгонно-нагонных явлений. Определение прибрежных районов моря и отраслей экономики, подверженных наибольшему риску от предстоящих изменений УКМ, оценка экономических последствий влияния изменений УКМ являются предметом пристального внимания ученых и специалистов, занимающихся проблемами Каспийского моря [1–10, 12–17, 20–21, 23–28, 29, 33–37, 39, 41–50, 52].

Современная хозяйственная и иная деятельность на Каспийском море требует более совершенных методов расчета и прогноза УКМ для

управления и адаптации социально-экономической и хозяйственной инфраструктуры прибрежных территорий к сложным условиям и режиму колебаний уровня моря. Поэтому исследование и прогноз колебаний уровня Каспийского моря с различной заблаговременностью представляют большой практический интерес для многих аспектов жизнедеятельности стран Каспийского региона. Необходим детальный совместный анализ изменчивости уровня моря и многочисленных факторов, ее определяющих, с последующей оценкой тенденций будущих изменений уровня на основе длительных рядов наблюдений.

Проблема Каспия приобрела особую актуальность во второй половине XX века в связи с реализацией проектов по строительству гидроэлектростанций и водохранилищ на Волге и ее притоке Каме. Это повлекло за собой существенное изменение гидрологического режима Каспийского моря, и прежде всего, его уровенного режима. Все это осуществлялось на фоне значительного снижения уровня моря, которое в то время стало большой социально-экономической и экологической проблемой региона [4, 13, 26, 29, 33, 35, 48].

В силу своего географического положения и изолированности от океана, уровенный режим Каспийского моря находится в сильной зависимости от питающих его рек, атмосферных осадков и испарения – основных составляющих водного баланса моря, которые существенно меняются во времени. Это приводит к тому, что при однонаправленных процессах уровень моря в течение продолжительного времени то медленно понижается, то медленно повышается, достигая экстремальных значений и оказывая при этом одинаково отрицательные воздействия на различные отрасли природно-хозяйственного комплекса, непосредственно связанные с морем. Ущерб от последствий аномальных колебаний УКМ достигает таких размеров, что разработка мер по защите морских побережий является важнейшим компонентом каспийской проблемы.

Аномальные колебания УКМ в первую очередь отражаются на гидрологии и морфометрии мелководного Северного Каспия. Многочисленные заливы, банки, косы и острова этой части моря меняют свои размеры и очертания не только в связи с общими колебаниями уровня моря, но и под воздействием сгонно-нагонных явлений и аккумулятивной деятельности рек Волги, Терека и Урала, несущих в море большое количество твердых наносов. Наличие обширных мелководий, очень малые уклоны дна являются причиной того, что даже небольшое снижение уровня влечет за собой осушение обширных территорий.

Многие объекты инфраструктуры (промышленные предприятия, сельскохозяйственные и рыболовные организации) находятся в прибрежной зоне риска. При планировании строительства на побережье

моря населенных пунктов, портов, причалов, дамб, сооружений инженерной защиты от затопления, а также для выбора участков для сельскохозяйственного освоения в зонах возможного затопления необходимо знать:

– расчетные значения максимальных уровней воды заданной обеспеченности;

– продолжительность стояния этих уровней;

– продолжительность затопления или подтопления территории во время подъемов уровня.

В XX столетии отмечалось два экстремальных явления в многолетнем ходе уровня Каспийского моря, имеющие драматические последствия для населения прибрежных стран – аномально продолжительное падение уровня в период с 1930 по 1977 г. и вслед за этим аномально продолжительный подъем с 1978 по 1995 год (рис. 1.1).

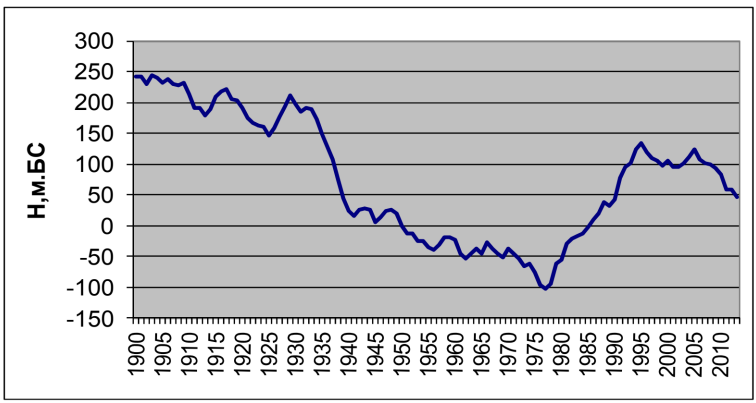


Рис. 1.1. Многолетний ход среднегодового уровня моря в Махачкале в XX и начале XXI в. Уровень приведен относительно единого нуля Каспийского моря, равного -28,00 м БС.

Вследствие изменений уровня моря происходит эволюция береговой линии. При повышении уровня моря происходит отступление берегов в сторону суши, а при понижении – наступление в сторону моря. При этом, вследствие изолированности моря от океана, повышение и понижение уровня происходит одновременно по всему периметру моря (с разной интенсивностью в зависимости от рельефа дна), что негативно отражается на всех видах хозяйственной деятельности в прибрежных районах моря.

Понижение уровня моря привело к коренному переформированию берегов и опустыниванию прибрежных территорий, обусловило

снижение уровня грунтовых вод, сопровождалось значительными изменениями экосистемы Каспия и сильно отразилось на эффективности работы морского флота и рыбного хозяйства, особенно в мелководной северной части моря [3–6, 8, 9, 13–15, 29, 35, 48]. Некоторые рыбопромысловые сооружения, выстроенные на берегу, оказались за десятки километров от уреза воды. Мелководное устьевое взморье Волги стало быстро зарастать водной растительностью, что ухудшило условия прохода рыбы на нерест в Волгу. Резко сократились уловы рыбы, особенно ценных пород: осетра и стерляди. Была уничтожена почти половина рыбных кормовых угодий, что привело к снижению уловов, значительно затруднило условия рыболовства и рыбоводства. Повышение солености вод Северного Каспия привело к снижению биомассы большинства донных организмов.

В северо-восточной части Северного Каспия береговая линия местами отступила на 120–140 км. Регрессия моря, продолжавшаяся до конца 1970-х гг., вызвала много других негативных проблем, в т. ч. отрицательно повлияла на нефтегазодобывающую промышленность в шельфовой зоне моря. В результате падения уровня моря возникли трудности судоходства в низовьях рек. Подходные пути к портам и сами порты обмелели, возникли сложности при проходе через Волго-Каспийский морской судоходный канал [32, 40]. Потребовались огромные средства на дноуглубительные работы, чтобы поддержать порты в судоходном состоянии. Достаточно сказать, что падение среднего годового уровня на 5 см потребовало дноуглубительных работ только на Волго-Каспийском канале на сумму порядка 100 млн рублей в ценах того времени.

В период снижения уровня моря природопользование и хозяйственная деятельность были основаны на активном освоении освобождающихся от морских вод береговых территорий. Все отрасли экономики прибрежных районов перестроились к пониженному положению уровня около абсолютной отметки -28,5 м БС. В то время по прогнозам большинства академических и отраслевых институтов ожидалось продолжение снижения уровня моря и рассматривались различные варианты его стабилизации. Как известно, к концу 1977 г. уровень моря опустился до самой низкой отметки за последние 500 лет – -29,0 м БС.

Для предотвращения катастрофического падения уровня моря в то время разрабатывалось много проектов, целью которых было не допустить дальнейшего падения уровня путем либо пополнения поверхностного притока речных вод, либо сокращения суммарного испарения с акватории моря и стока в залив Кара-Богаз-Гол. Среди проектов такие как отчленение с помощью дамб мелководных заливов моря – Кайдак, Мертвый Култук и др., создание Северо-Каспийского водохранилища площадью 76 тыс. км^2 путем строительства дамбы длиной 427 км

от Каспийска до п-ва Бузачи, отчленение с помощью дамбы всех восточных мелководий Северного Каспия, переброска северных рек в Каспий и т. д. Планировалось, например, осуществить переброску вод рек Вычегда и Печора в объеме 40 км^3 в год для стабилизации уровня моря и обеспечения водой народно-хозяйственных организаций. Из всех проектов был осуществлен только один – отделение в 1980 году залива Кара-Богаз-Гол от моря глухой дамбой.

Неожиданно начавшееся в 1978 г. резкое повышение уровня привело к еще более драматическим последствиям, чем его падение, так как хозяйство и население прибрежных районов уже приспособились к низкому уровню. Учитывая, что социально-экономическая политика прикаспийских государств с начала XX века и до 1978 года исходила из условий понижения уровня моря, резкое повышение уровня потребовало проведения срочных и дорогостоящих работ по устранению негативных последствий подъема уровня моря [1, 2, 17–20, 22–24, 36, 39–41, 43, 50, 51]. Повышение уровня привело к изменению природных, социально-экономических и медико-экологических условий прибрежных территорий в процессе их затопления и подтопления. Все это вызвало переселение значительной части населения из зон затопления. Только в Северном Каспии пострадали десятки населенных пунктов, из которых было переселено около 100 тыс. человек и перемещены многие промышленные объекты. Площадь затопленных территорий составила 35–40 тыс. км^2.

Стали уничтожаться обширные рекреационные зоны. Многие отрасли хозяйства стали терпеть ущерб, так как на землях, осушившихся во время падения уровня (1930–1977 гг.) были построены нефтепромыслы, дороги, жилые и производственные строения. Подъем уровня причинил ущерб сотням километров шоссейных и грунтовых дорог, под угрозой оказались участки железнодорожных магистралей (Астрахань – Кизляр, Ленкорань – Астара). Были затоплены крупные ирригационные сооружения, более 1 млн га сельскохозяйственных угодий. Под угрозой затопления оказалось много городов и населенных пунктов побережья в пределах административных районов Российской Федерации (Дагестан, Калмыкия и Астраханская обл.) (табл. 1.1).

На Апшеронском полуострове в результате подъема уровня под водой оказалась значительная часть благоустроенных пляжей с находящимися там объектами. Общая площадь затопленных территорий только в пределах Азербайджана в 1995 г., когда уровень моря достиг отметки -26,5 м БС, составила 484,5 км^2 (без учета территорий, затопленных в результате штормовых нагонов) [1, 2]. Были разрушены дороги и линии электропередач, инженерные сооружения, промышленные предприятия; усилились абразионные процессы в береговой зоне.

Таблица 1.1. Города и населенные пункты российского побережья, подверженные влиянию изменения уровня Каспийского моря

Дагестан		**Калмыкия**		**Астраханская область**	
Города и населенные пункты	Численность населения	Города и населенные пункты	Численность населения	Города и населенные пункты	Численность населения
Дербент	53740	Лагань	26750	Рынок	760
Новокаякент	1560	Красинское	590	Оля	730
Избербаш	39910	Аналыково	480	Зюзино	1640
Манаскент	32070	Буранное	220	Мумра	2840
Каспийск	64680			Бирючья Коса	680
Махачкала	317560			Оранжерей	2160
Судак	3710			Краса	140
Старотеречное	410			Трудфронт	2210
Крайморка	963			Житное	710
Новотеречное	270			Кировский	640
Суюткино	240			Гандурино	480
Брянск	320			Чапаево	555
Новый Чечень	560			Маково	1260
Новый Бахтемир	150			Калинино	2250
Итого	**516160**		**28040**		**16855**

На фоне высокого стояния уровня существенно возросла повторяемость опасных штормовых нагонов, которые приводят к затоплению значительных территорий и большому материальному ущербу. Так, в прибрежных районах Каспия на территории России за последние два десятилетия в результате штормовых нагонов было затоплено и выведено из землепользования 320 тыс. га ценных земель, суммарный прямой экономический ущерб составил около 4,3 млрд руб. (в ценах 1991 г.). Только один из наиболее катастрофических нагонов 12–16 марта 1995 г. нанес ущерб на сумму около 3 млрд руб. (в ценах 1995 г.). Этот нагон был предсказан Гидрометцентром России с трехдневной заблаговременностью, иначе материальный ущерб был бы неизмеримо больше. Все эти процессы привели не только к прямым экономическим потерям, но и усилили социальную и экологическую напряженность в ряде районов прибрежной зоны.

Периоды продолжительного падения и повышения уровня моря в XX веке некоторыми специалистами рассматриваются как закономерное проявление цикличности его уровенного режима. Уровень Каспийского моря испытывал колебания и в прошлом, и тогда они были более

значительными, чем в XX веке, но при этом жизнеспособность моря сохранилась. Например, годовые приращения уровня на 20–30 см отмечались и ранее в 1865–1866, 1895–1896 гг. и т. д. Периодические поднятия и падения уровня являются естественной закономерностью, свойственной природе Каспийского моря [28, 37, 44–46].

Для устойчивого функционирования природно-хозяйственного комплекса и проведения конкретных мероприятий по защите прибрежных территорий требуется научно обоснованный прогноз изменений УКМ на сроки от суток до нескольких лет и даже десятилетий, так как без надежного прогноза изменений уровня моря невозможно ни прогнозировать изменение экологической обстановки, ни планировать хозяйственную деятельность. Задачи прогнозирования изменений УКМ чрезвычайно широки. Помимо текущего оперативного обслуживания повседневной хозяйственной деятельности краткосрочными прогнозами уровня, важное практическое значение имеют прогнозы эволюции УКМ на перспективу, с учетом влияния на уровень моря результатов хозяйственной деятельности человека.

В настоящее время достаточно надежно составляются краткосрочные прогнозы уровня моря с заблаговременностью до двух-трех суток. Для оценки ожидаемых изменений уровня в ближайшие годы могут служить долгосрочные прогнозы с заблаговременностью до года и на шесть лет. Что касается прогнозов на большие сроки, то они разрабатываются, в частности, с использованием климатических сценариев.

Сложность проблемы долгосрочного прогноза уровня Каспийского моря заключается в отсутствии ясного понимания механизмов, управляющих изменчивостью уровня. Все типы колебаний (месячные, сезонные, межгодовые, многолетние, вековые и тысячелетние) зависят от большого количества факторов гидрометеорологического, тектонического и антропогенного характера, которые непрерывно меняются во времени и в пространстве, сложным образом взаимодействуя друг с другом. Исследования, выполненные в последние десятилетия в России и за рубежом, существенно расширили наши представления о роли основных факторов, формирующих уровенный режим Каспийского моря, и приблизили нас к разработке надежного метода сверхдолгосрочного прогноза колебаний уровня моря.

1.2. Проблемы экологии и охраны природной среды Каспия

Экологические проблемы Каспийского моря напрямую связаны с загрязнением вод в результате добычи и транспортировки нефти, поступлением загрязняющих вод из Волги и других рек, впадающих

в Каспийское море, жизнедеятельностью прибрежных городов, а также затоплением отдельных объектов во время повышения уровня моря.

Неблагоприятная экологическая ситуация в регионе усугубилась в результате резкого подъема уровня моря в конце XX века, вследствие чего усилились нагонные явления с разрушением берегов и затоплением прибрежных территорий. Затопление и подтопление населенных пунктов, сельскохозяйственных земель, оросительных систем, нефтепромыслов, дорог, линий электропередач и очистных сооружений привело к дополнительному загрязнению поверхностных и подземных вод токсичными веществами и нефтепродуктами. Также прогрессировало осолонение почв, происходила гидроморфизация растительности, ухудшались условия питьевого водоснабжения и расширялись очаги инфекционных заболеваний. Происходила потеря высокопродуктивных нерестилищ ценных пород рыбы в низовьях дельты Волги, снижались уловы.

В значительной степени была парализована и разрушена существовавшая ранее система наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками и загрязнением Каспийского моря, что затрудняет оценку реальной картины экологического состояния моря и прогноз изменений в природной среде Каспия. Это, в свою очередь, не позволяет получать необходимую информацию для осуществления защитных и компенсационных мероприятий, связанных с изменениями уровня моря, обеспечением хозяйственной деятельности в прибрежных районах Каспийского моря, реализацией мероприятий по охране природной среды и биоресурсов.

К проблеме использования природных ресурсов Каспия вплотную примыкает проблема загрязнения моря, которое в последние годы приобрело угрожающий характер [11, 19, 20, 22, 23, 31, 37, 39, 41, 44, 47, 50, 52]. При нефтяных разработках на Каспийском море ежегодно в воду уходит около миллиона тонн нефти. Добыча нефти на Каспийском море неуклонно растет, и загрязнение моря может достигнуть такой степени, когда очищение моря потребует неизмеримо больших усилий, чем нужно на применение вполне разумных превентивных мер.

К неблагоприятным ситуациям, связанным с колебаниями уровня моря, относятся:

– изменение гидрологического режима, особенно в северной части моря (возрастание длительности и величины нагонов, изменение интенсивности течений, образование новых мелководий и т. д.);

– изменение гидрохимического режима устьевых участков рек, дельты Волги и мелководий;

– изменение природных и социально-экономических условий прилегающих территорий в процессе их затопления, подтопления,

волнового разрушения, изменение медико-экологической обстановки на этих территориях;

– загрязнение тяжелыми металлами, нефтепродуктами и другими вредными веществами, поступающими в море с речным стоком.

До 90 % от общего объема загрязнений поступает в Каспийское море с речным стоком. Ежегодно в бассейн Волги сбрасывается 2,5 км^3 неочищенных и 7 км^3 условно очищенных сточных вод. Судоходство и транспортировка нефти водным путем являются другим источником загрязнения акватории Каспия. Значительными источниками загрязнения Каспия являются морские нефтепромыслы в России, Казахстане, Азербайджане и Туркменистане.

Замкнутость Каспийского моря усугубляет повышенную опасность загрязнения воды и берегов нефтепродуктами, поверхностно активными веществами и др. При этом загрязнение возможно как в результате непосредственного сброса соответствующих веществ в море, так и путем загрязнения его прибрежной полосы во время сгонно-нагонных явлений. Под воздействием техногенных и природных факторов на фоне непринятия адекватных мер в регионе Каспийского моря могут произойти значительные негативные социально-экономические и экологические изменения.

1.3. Пути решение проблем Каспия на современном этапе. Правовые аспекты Каспия

Проблемы гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей среды в бассейне Каспийского моря в 90-х гг. прошлого столетия были крайне обострены по следующим основным причинам:

1) катастрофический подъем уровня Каспийского моря в период с 1978 по 1995 г. почти на 2,5 м;

2) прогрессирующая деградация экосистемы Каспийского региона;

3) образование в регионе Каспийского моря новых государств, потребовавшее решения ряда сложных задач международно-правового, научно-технического обмена, организационного и финансового характера;

4) недостаточное финансирование, выделяемое на модернизацию морской наблюдательной сети, что привело к ее деградации, почти полному прекращению судовых наблюдений, экспедиционных работ, ухудшению процедур доступа к информационным данным, сокращению обмена оперативными и режимными данными и т. д.

Оперативно-производственные работы, связанные с организацией и проведением наблюдений, оценкой и прогнозом состояния и загрязнения Каспийского моря в пределах территории СССР, проводились

по единой системе получения и распространения информации о состоянии и загрязнении Каспия. После распада СССР были утрачены связи с научными институтами почти всех прикаспийских стран. Значительно уменьшился объем регулярных гидрологических и гидрохимических работ в море, а также уменьшился объем информации, поступающей с метеостанций и постов. Сеть станций и уровнемерных постов на Каспии стремительно сокращалась (в 1960 г. их было 79, в 1972 г. – 51, в 1992 г. – 36). Ухудшился обмен оперативными и неоперативными данными между странами Каспийского региона. Остро встал вопрос контроля и прогноза экологического состояния морской среды, возникла необходимость постоянного мониторинга изменчивости уровня Каспийского моря.

Социально-экономические и экологические проблемы Каспия усложнились в связи с тем, что период резкого повышения УКМ совпал с распадом СССР и последовавшим вслед за этим глубоким политическим и экономическим кризисом в странах Каспийского региона. После 1991 г. в бассейне Каспия возникли новые субъекты международного права. Пять суверенных государств: Азербайджан, Иран, Казахстан, Россия и Туркмения в одностороннем порядке заявили о своих правах на отдельные части Каспийского моря (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Политическая карта Каспийского региона.

Каспийская проблема переросла в сложную международную геополитическую проблему [6, 16, 25, 51]. К Каспийскому морю стали проявлять большой интерес страны, находящиеся далеко за пределами каспийского бассейна.

Изменившаяся геополитическая ситуация актуализировала вопрос о межгосударственной принадлежности Каспийского моря и в этой

связи и проблему определения международно-правового статуса акваторий моря [6]. Ввиду различных позиций стран Каспийского региона данная проблема долгое время оставалось предметом неурегулированных разногласий, связанных с разделом ресурсов каспийского шельфа – нефти и газа, а также биологических ресурсов. Наконец, после 18-летних переговоров о правовом статусе Каспия, в сентябре 2014 г. на IV Каспийском саммите в Астрахани, в котором участвовали лидеры Азербайджана, Ирана, Казахстана, России и Туркмении, был подписан политический документ, в котором главы пяти государств согласились на том, что большая часть Каспия будет общей. За государствами сохраняется 25-мильная зона, которая состоит из 15-мильной зоны государственного суверенитета и 10-мильной зоны с исключительным правом на рыболовство, за пределами которой сохраняется «общее водное пространство» Каспийского моря. Окончательно этот документ должен быть подписан (ратифицирован) в 2016 году в Казахстане.

Были также подписаны соглашения о сотрудничестве в области гидрометеорологии Каспийского моря, в сфере предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Каспийском море, а также Соглашение о сохранении и рациональном использовании водных биологических ресурсов. Данный документ открывает путь к консолидации усилий прикаспийских государств для решения целого ряда серьезных экономических, экологических и других проблем каспийского бассейна.

Учитывая сложившуюся неблагополучную социально-экономическую и экологическую ситуацию, странами каспийского бассейна, заинтересованными в решении острых проблем Каспийского моря, был предпринят ряд организационных мер для достижения устойчивого развития Каспийского региона. В июне 1995 г. во исполнение постановления Правительства Российской Федерации «О дополнительных мерах по защите населения и решению других проблем, связанных с подъемом уровня Каспийского моря» приказом Росгидромета был образован Каспийский морской научно-исследовательский центр (КаспМНИЦ) Росгидромета, основным направлением деятельности которого явилось гидрометеорологическое обеспечение мероприятий, направленных на решение проблем, обусловленных колебаниями УКМ.

В сентябре 1994 г. при поддержке ВМО/МОК был образован Координационный комитет по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения Каспийского моря (КАСПКОМ). Одной из ключевых задач КАСПКОМ является координация и объединение усилий всех прикаспийских государств в целях создания региональной системы мониторинга и обмена информацией о состоянии природной среды Каспийского моря, а также создания информационной основы для

комплексных научных исследований по проблеме изменений и прогноза уровня Каспийского моря.

Членами КАСПКОМ являются метеорологические организации всех пяти прикаспийских государств. В обязанности двух из них, а именно Казгидромета и Росгидромета, наряду с гидрометеорологией входит проведение наблюдений за загрязнением окружающей среды, в т. ч. за загрязнением Каспийского моря.

Прошедшее с тех пор время подтвердило все возрастающую роль и значение КАСПКОМ в решении различных задач в сфере социально-экономического развития и природоохранной деятельности в регионе Каспийского моря.

Активизация хозяйственной деятельности в регионе требует большого объема режимной, оперативной и прогностической информации о состоянии и загрязнении уникальной природой среды Каспийского моря. Эта информация необходима многочисленным конечным потребителям в области энергетики, морского транспорта, рыбного хозяйства, природоохранным организациям. На сессиях КАСПКОМ принимаются решения по различным вопросам, в частности касающимся улучшения механизма координации действий на национальном, региональном и международном уровнях.

1.4. Комплексная программа по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в регионе Каспийского моря и ее задачи

Под руководством КАСПКОМ экспертами прикаспийских государств при содействии и при активной поддержке международных организаций ВМО, ЮНЕП, МОК и МАГАТЭ была разработана Комплексная программа по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в регионе Каспийского моря (КАСПАС), которая была принята на 2-й сессии КАСПКОМ в Баку в феврале 1997 года [22, 25].

Начиная с 2011 года КАСПКОМ стал выпускать два раза в год (после прохождения максимума и минимума сезонного хода уровня моря) информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря, содержащий оценку фактических и ожидаемых сезонных изменений уровня моря с учетом прогноза помесячного хода уровня, выпускаемого Гидрометцентром России. Под эгидой КАСПКОМ создан Генеральный каталог уровня Каспийского моря [10].

Учитывая отсутствие международно-правого статуса Каспийского моря, в качестве правовой основы для реализации Программы КАСПАС был принят документ «Соглашение о сотрудничестве прикаспийских государств в области гидрометеорологии и мониторинга

природной среды Каспийского моря», разработанный и согласованный гидрометеорологическими службами всех прикаспийских стран на 5-й сессии КАСПКОМ в сентябре 2000 г. (Алма-Ата), и парафирован от имени правительств своих стран руководителями гидрометеорологических служб Ирана, Республики Казахстан и Российской Федерации.

Среди приоритетных задач Программы КАСПАС:

− восстановление и дальнейшее развитие сети морских наблюдений;

− улучшение подсистемы сбора данных и информации, ее обработки, хранения и распространения;

− совершенствование существующих технологий мониторинга, усвоения оперативных данных и прогнозирования гидрометеорологических условий на основе географических информационных систем (ГИС), систем управления базами данных и Web-технологий;

− развитие научно-исследовательской и оперативной деятельности, включающей разработку системы прогнозов гидрометеорологического режима заблаговременностью от нескольких суток до года, а также оценка возможного положения уровня моря на перспективу 10–20 лет и более с учетом влияния антропогенных факторов;

− определение влияния изменения уровня моря и хозяйственной деятельности на гидрометеорологический режим и загрязнение акватории моря, прибрежной зоны и в дельтах впадающих в Каспий рек;

− обеспечение гидрометеорологической безопасности населения прикаспийских субъектов Российской Федерации и хозяйственной деятельности в акваториях и на побережье Каспийского моря.

В последние годы в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 14.12.2007 г. и решениями Правительства Российской Федерации был разработан и утвержден приказом Росгидромета от 22.05.2008 г. № 159 «План мероприятий Росгидромета по обеспечению гидрометеорологической безопасности населения прикаспийских субъектов Российской Федерации и хозяйственной деятельности в акваториях и на побережье Каспийского моря на 2008–2010 гг.», согласно которому был осуществлен комплекс мероприятий по совершенствованию обеспечения администраций прикаспийских субъектов Российской Федерации, региональных органов исполнительной власти, территориальных органов МЧС России, всех заинтересованных учреждений и организаций предупреждениями об опасных гидрометеорологических явлениях и резких изменениях гидрометеорологических условий, прогнозами погоды и состояния моря различной заблаговременности, аналитической и справочной информацией, включая информацию о состоянии уровенного режима и загрязнения моря.

В России практической реализацией программы КАСПАС занимаются Федеральные государственные бюджетные учреждения

Росгидромета (Гидрометцентр России, ГОИН, ВНИИГМИ-МЦД, ГГИ, ГГО, ГХИ, КаспМНИЦ), а также оперативно-производственные организации – Астраханский, Дагестанский и Калмыцкий центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, входящие в состав Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [38].

В результате практической реализации программы КАСПАС улучшился обмен данными. В настоящее время имеются межгосударственные соглашения между национальными гидрометеорологическими службами (НГМС) Каспийского региона, по которым осуществляется обмен оперативными данными наблюдений, поступающих с российских, туркменских и казахских пунктов наблюдений. Обмен осуществляется через систему АСПД между странами СНГ и через ГСТ ВМО. В последнее время достаточно эффективными способами обмена данными и информацией стали сети Интернет и МЕСОМ, через которые можно получить любую информацию, находящуюся в открытом доступе. Во ВНИИГМИ-МЦД разработана схема регионального обмена между НГМС Каспийского региона, которая основывается на концепции системы интегрированных банков данных (СИБД) по природной среде Каспийского моря. Соответствующий документ включает в себя комплекс организационных структур, информационных ресурсов, технологий доступа и обмена данными о состоянии природной среды Каспийского моря и использовании его ресурсов. В документе сформулирована методология построения СИБД, предложены обобщенная архитектура системы, концептуальные решения по нормативной базе, телекоммуникационной и технологической платформе СИБД, а также по информационным ресурсам и основным технологиям СИБД.

В феврале 2003 г. в Тегеране пятью государствами Каспийского региона была принята «Рамочная конвенция по защите морской среды Каспийского моря». Целью Конвенции является защита морской среды Каспийского моря от загрязнения, включая защиту, сохранение, восстановление, устойчивое и рациональное использование его биологических ресурсов. В соответствии с данной Конвенцией договаривающиеся стороны согласились о проведении необходимых научных исследований и, насколько это возможно, принятии согласованных мер и процедур по смягчению последствий колебаний уровня Каспийского моря.

В 2014 г. на уровне правительств стран Каспийского региона было подписано Соглашение о сотрудничестве в области гидрометеорологии Каспийского моря между Азербайджаном, Ираном, Казахстаном, Туркменистаном и Россией на создание и развитие комплексной региональной системы получения информации и обмена информацией о состоянии Каспийского моря в интересах обеспечения безопасности

жизнедеятельности и развития экономической деятельности на его акватории. Со стороны России Соглашение было утверждено распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.03.2014 г. Реализацию этого Соглашения в нашей стране осуществляет Росгидромет на основе системы наблюдений, включающей, в частности, шесть береговых гидрометеорологических станций с автоматизированными наблюдениями, две аэрологические станции, станции приема информации метеоспутников, а также два научно-экспедиционных судна.

Значительный технологический прорыв в области гидрометеорологического обеспечения морской деятельности был сделан в Росгидромете в связи с созданием Единой системы об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) в рамках ФЦП «Мировой океан» [27]. ЕСИМО предназначена для обеспечения морской деятельности Российской Федерации, основные цели и задачи которой установлены Морской доктриной Российской Федерации на период до 2020 г. Функционирование ЕСИМО обеспечивается путем интеграции и рационального использования информационных ресурсов всех заинтересованных федеральных органов исполнительной власти и РАН, осуществляющих сбор, обработку, накопление, хранение и распространение информации об обстановке в Мировом океане. В 2005 г. была создана 1-я очередь ЕСИМО.

С 2010 г. началась разработка новых общесистемных компонентов полнофункциональной системы ЕСИМО на основе современных коммуникаций и геоинформационных технологий и средств информационного взаимодействия Центров системы и обслуживания потребителей. Проводятся работы по наращиванию информационной ресурсной базы указанной системы, а также по построению и развитию региональных и локальных контуров системы. В 2013 г. ЕСИМО была введена в промышленную эксплуатацию.

Гидрометцентр России, поддерживающий оперативный модуль ЕСИМО, поставляет диагностическую и прогностическую информацию, доступ к которой осуществляется через Web-портал ЕСИМО. В Гидрометцентре России в последнее время разработано и внедрено несколько технологических разработок, связанных со сбором, усвоением и обработкой морской гидрометеорологической информации.

В рамках оперативного модуля ЕСИМО на основе гидродинамической модели разработана технология автоматизированного прогноза характеристик ветрового волнения Каспийского моря на срок до 5 суток с периодичностью вывода результатов через 3 часа. Продукция этой технологии размещается на Web-сайте ЕСИМО [27].

С 2001 г. в Гидрометцентре России находится в оперативной эксплуатации технология краткосрочного (до 48 ч) прогноза течений и уровня Каспийского моря на основе трехмерной 19-уровенной

бароклинной гидродинамической модели с пространственным шагом 3 мили.

Разработана технология автоматизированного прогноза годового хода уровня Каспийского моря. Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме рассчитать прогноз помесячного хода среднего уровня в целом по морю и по семи базовым пунктам и оформить его в виде бюллетеня с характеристиками фактических и ожидаемых значений уровня Каспийского моря. Готовый бюллетень рассылается в директивные органы и заинтересованные организации и учреждения Российской Федерации, а также Руководителям НГМС прикаспийских государств.

В ГОИНе осуществляется систематический контроль среднего уровня Каспийского моря с использованием спутниковых альтиметрических данных. Там же разработана технология «SPILLMOD», позволяющая прогнозировать эволюцию нефтепродуктов в морской воде и параметров зоны загрязнения (площадь и географическая локализация, толщина нефтяной пленки) [31]. Технология установлена на вычислительной платформе отдела морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России. Кроме того, в ГОИНе создана электронная версия Каталога уровенных наблюдений. В центре ЕСИМО ГОИН также ведется работа по поддержанию в актуальном состоянии динамического электронного справочного пособия, описывающего гидрометеорологический режим Каспийского моря и тенденции его изменения.

В ГГО выполняются исследования изменений климатического режима Каспийского моря и связанных с ним колебаний УКМ на основе разработанной глобальной гидродинамической модели общей циркуляции атмосферы, на базе которой совместно с ИФА выполнены исследования водного баланса на водосборе Каспийского моря. В ГГО совместно с институтом Макса Планка (Германия) выполнен цикл работ по дальнейшему изучению термического режима и влагооборота в Каспийском регионе с целью определения их роли в межгодовых колебаниях УКМ. В рамках КАСПАС в ГГО в оперативном режиме подготавливается и передается в Гидрометцентр России для использования прогноз годового приращения УКМ с заблаговременностью 14 месяцев.

Глава 2.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ

2.1. История исследования Каспийского моря

История исследования Каспийского моря уходит вглубь веков. Документальные свидетельства о знакомстве русских с Каспийским морем и их плаваниях по нему относятся к IX–X вв. Считается, что регулярные исследования Каспийского моря начаты Петром I, по инициативе которого в 1714–1715 гг. была организована экспедиция под руководством А. Бековича-Черкасского, обследовавшего берега Каспия. В результате была составлена карта Каспийского моря.

В 20-х гг. XVIII в. были начаты гидрографические исследования моря И.Ф. Соймоновым, который впервые создал Атлас Каспийского моря, состоящий из восьми карт. В 1730–1734 гг. экспедиционные исследования берегов Каспия были выполнены адмиралом А.И. Нагаевым, под руководством которого в 1796 г. была издана Генеральная карта Каспийского моря. Во 2-й половине XVIII в. экспедиционные работы на Каспии были продолжены И.В. Токмачевым, М.И. Войновичем, в начале XIX в. – Колодкиным, впервые выполнившим инструментальную компасную съемку берегов [23].

В середине XIX в. (1856 г.) была проведена детальная инструментальная гидрографическая съемка Каспийского моря под руководством Н.А. Ивашинцева. По материалам этой экспедиции, продолжавшейся 15 лет, были составлены навигационные карты Каспийского моря и новая батиметрическая карта. Карты, созданные в результате этих съемок, служили основой для последующих изданий морских карт по Каспию до 30-х гг. XX века. Ивашинцев впервые объяснил причины изменений

береговой линии, особенности течений, исчезновения и возникновения островов.

В изучение природных условий Каспийского моря в XIX веке внесли большой вклад ученые: П.С. Паллас, С.Г. Гмелин, Г.С. Карелин, К.М. Бэр, Г.В. Абих, О.А. Гримм, Н.И. Андрусов, И.Б. Шпиндлер и др.

В 1897 г. была основана Астраханская научно-исследовательская станция (ныне Каспийский институт рыбного хозяйства). В 1904 г. по инициативе и на средства Общества рыболовства и рыбоводства и Департамента земледелия при содействии Русского географического общества на Каспии более трех месяцев работала экспедиция по исследованию сельдяного промысла, которой руководил Н.М. Книпович. В 1912–1913 гг. была проведена вторая промысловая экспедиция Н.М. Книповича, позволившая собрать большое количество океанографических данных. Исследования проводились в основном в средней и северной частях моря. В 1914–1915 гг. в течение пятнадцати месяцев работала третья экспедиция под руководством Н.М. Книповича, во время которой был собран большой материал по гидрологии, биологии и промыслам всего моря и впервые были получены сведения о сезонных изменениях гидрологических и биологических явлений [9]. Работы охватывали все районы моря, особое внимание было уделено глубоководной части моря. Экспедиция выполнила большое количество химических исследований, провела многочисленные наблюдения за температурой, плотностью, цветом и прозрачностью воды, течениями. Направление и скорость течений определялись вертушкой Экмана, закупоренными бутылками, привязными поплавками. Впервые были выполнены измерения вертикального распределения температуры воды в северной, средней и южной частях моря. Установлено исключительно низкое содержание кислорода в глубоководных районах моря ниже горизонта 200 м и, как следствие, отсутствие органической жизни. В слое воды ниже 600–700 м было обнаружено наличие сероводорода. По материалам наблюдений была предложена общая циклоническая схема течений, охватывающая все море. Эти работы были продолжены после 1917 г. созданной при АН СССР Каспийской экспедицией, также возглавляемой Н.М. Книповичем. Результаты этих исследований были обобщены в Трудах Каспийской экспедиции.

В первые годы советской власти выдающуюся роль в изучении геологического строения и нефтеносности Апшеронского полуострова и геологической истории Каспийского моря сыграли исследования советских геологов И.М. Губкина, Д.В. и В.Д. Голубятниковых, П.А. Православлева, В.П. Батурина, С.А. Ковалевского и др., преимущественно направленные на поиски нефти. Кроме того, проводились исследования водного баланса и колебаний уровня Каспийского моря.

В изучение водного баланса и колебаний уровня моря внесли значительный вклад Б.А. Аполлов, В.В. Валединский, К.П. Воскресенский, Л.С. Берг. В 1934 г. под руководством С.В. Бруевича была выполнена комплексная океанографическая съемка Каспийского моря. В дальнейшем до 1943 г. довольно регулярно проводились гидрохимические съемки на 4–5 стандартных гидрологических разрезах в Среднем и Южном Каспии.

После Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. на Каспийском море развернулись систематические разносторонние исследования, направленные на изучение гидрометеорологического режима моря, биологических условий и геологической структуры моря.

Большой вклад в исследование причин колебаний УКМ и их прогнозирования внесли Б.А. Аполлов, В.С. Антонов, Е.Г. Архипова, С.С. Байдин, Н.А. Белинский, Г.П. Калинин, М.И. Будыко, С.И. Варущенко, Г.С. Голицын, В.Ю. Георгиевский, Р.К. Клиге, А.Н. Косарев, С.Н. Крицкий, В.Н. Малинин, М.Ф. Менкель М.Ф., А.В. Мещерская, В.Н. Михайлов, Р.Е. Никонова, Д.Я. Раткович, С.С. Ремизова, С.Н. Родионов, Г.И. Рычагов, Н.А. Скриптунов, К.И. Смирнова, П.В. Федоров, А.В. Фролов, М.Г. Хубларян, И.А. Шикломанов, Б.А. Шлямин, Е.С Нестеров, З.К. Абузяров, А.С. Алиев и многие другие.

2.2. Физико-географические и морфологические особенности

Каспийское море является самым крупным в мире замкнутым водоемом, уровень которого на 28,0 м ниже уровня Мирового океана. Каспий существенно отличается от других морей и крупных озер земного шара одной уникальной особенностью: значительными многовековыми, вековыми и многолетними колебаниями его уровня, играющими огромную роль в жизни населения прибрежных стран. Его называют морем из-за своих размеров, а также из-за того, что его ложе сложено земной корой океанического типа.

Важной особенностью Каспийского моря является наличие на его восточном побережье обособленного мелководного залива Кара-Богаз-Гол, служащего своеобразным регулятором, сглаживающим многолетние колебания уровня моря [14]. К числу естественных регуляторов разномасштабных колебаний уровня моря относятся также и обширные мелководья Северного Каспия – заливы Комсомолец (Мертвый Култук) и Кайдак. При изменениях уровня моря происходит затопление или осушение этих мелководий, что приводит к росту или уменьшению испарения за счет изменения площади испаряющейся акватории [20].

Каспийское море расположено на границе двух крупных частей единого материка Евразии между 47°07' и 36°33' с. ш., 46°43' и 54°50' в. д. Общая протяженность береговой линии составляет 5970 км. Наибольшую протяженность береговой линии (без островов) имеет Казахстан – 2320 км, за ним Туркменистан – 1200 км, Иран – 900 км, Азербайджан – 850 км и Россия – 700 км.

Наибольшая протяженность моря (по меридиану 50°00' в. д.) составляет 1030 км. Наибольшая ширина достигает 435 км (по параллели 45°30' с. ш.), наименьшая ширина – 196 км (по параллели 40°30' с. ш.).

С севера и востока море окружено низменной равнинной полупустыней и возвышенной пустыней. С юга его окаймляет узкая прибрежная низменность, за которой параллельно берегу тянется хребет Эльбрус, а с запада к морю подступают хребты Большого Кавказа, южнее Апшеронского полуострова их сменяют Куринская и Ленкоранская низменности.

Геометрические размеры моря (площадь, глубина, длина и ширина) непрерывно меняются не только в связи с сезонными и многолетними изменениями среднего уровня моря, но и в результате воздействия сгонно-нагонных явлений и аккумулятивной деятельности рек, впадающих в Каспийское море, прежде всего Волги, Терека и Урала, несущих большое количество твердых наносов.

Рельеф дна Каспийского моря: северная часть моря мелководна, в южной и центральной части моря расположены впадины, которые пересекаются подводным порогом. На рис. 2.1 приведена батиметрическая карта Каспийского моря. Глубины даны относительно нуля поста -28,00 м БС.

Средняя глубина моря составляет 208 м, максимальная глубина – 1025 м. По величине максимальной глубины Каспий уступает лишь двум самым глубоким озерам мира – Байкалу (1620 м) и Танганьике (1435 м). В зоне материковой отмели глубина достигает 200 м. На эти глубины приходится около 69 % общей площади моря, а на мелководье с глубинами до 10 м – 28 %.

Каспийское море питается водами более 130 больших и малых рек, ежегодно поставляющих в него около 300 км^3 воды в год. Наиболее крупные из них: Волга, Терек, Самур, Сулак (Россия), Урал, Эмба (Казахстан), Кура (Азербайджан), Атрек (Туркменистан), Сефидруд (Иран) и др. 88–90 % поступающей в море воды, приходится на долю Волги, Урала, Терека и Сулака. Их суммарный водный сток составляет примерно 215–224 км^3/год. Характеристики бассейнов основных рек приведены в табл. 2.1.

Непосредственно в Волгу впадает 2600 рек. Крупнейшими притоками являются Ока и Кама. За 60 лет на Волге и Каме было создано

11 гидроузлов с водохранилищами. Общая площадь их водного зеркала составляет 23 тыс. км^2. Полный объем – 168 км^3, полезный объем – 80 км^3.

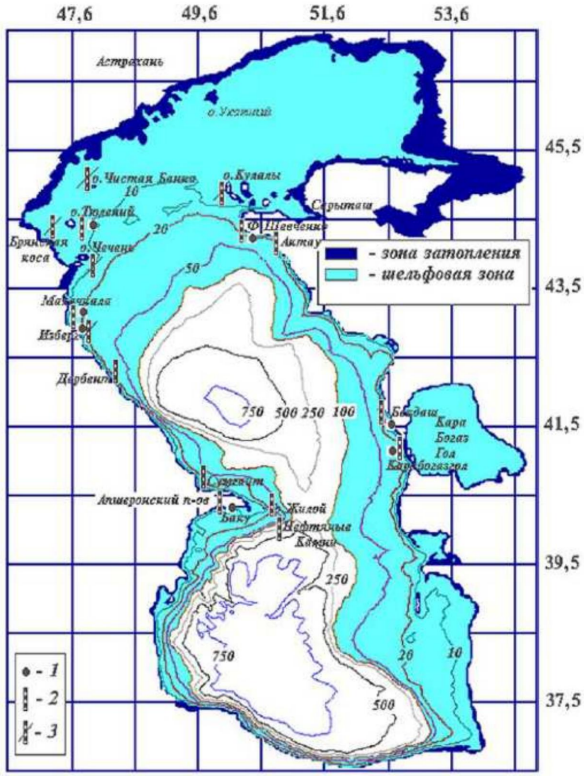


Рис. 2.1. Современная батиметрическая карта Каспийского моря с зонами затопления при положении среднего уровня (-28,00 м БС).

Таблица 2.1. Современные гидрографические характеристики основных рек, впадающих в Каспийское море [23]

Река	Длина реки, км	Площадь бассейна, тыс. км^2
Волга	3530	1360
Урал	2430	237
Терек	623	43,2
Сулак	169	15,2
Кура	1360	188

Водосборный бассейн Каспийского моря, в пределах которого протекают реки, питающие море, расположен между 61°14' и 34°49' с. ш., 31°59' и 60°59' в. д. и представляет огромную котловину, самая низкая часть которой, Каспийское море, заполнена водой. Общая площадь бассейнов рек, впадавших в Каспийское море в пределах бывшего СССР, равна 2950 тыс. км^2, что вместе с бассейнами иранских рек дает в сумме приблизительно 3050 тыс. км^2, что почти в 10 раз превышает площадь его акватории. При отметке уровня -27,50 м БС площадь Каспийского моря составляет 386,4 тыс. км^2. В настоящее время, по тем же данным, площадь бассейнов всех российских рек, впадающих в Каспийское море, составляет около 1750 тыс. км^2. Территория водосборного бассейна оценивается в 1380 тыс. км^2 (рис. 2.2).

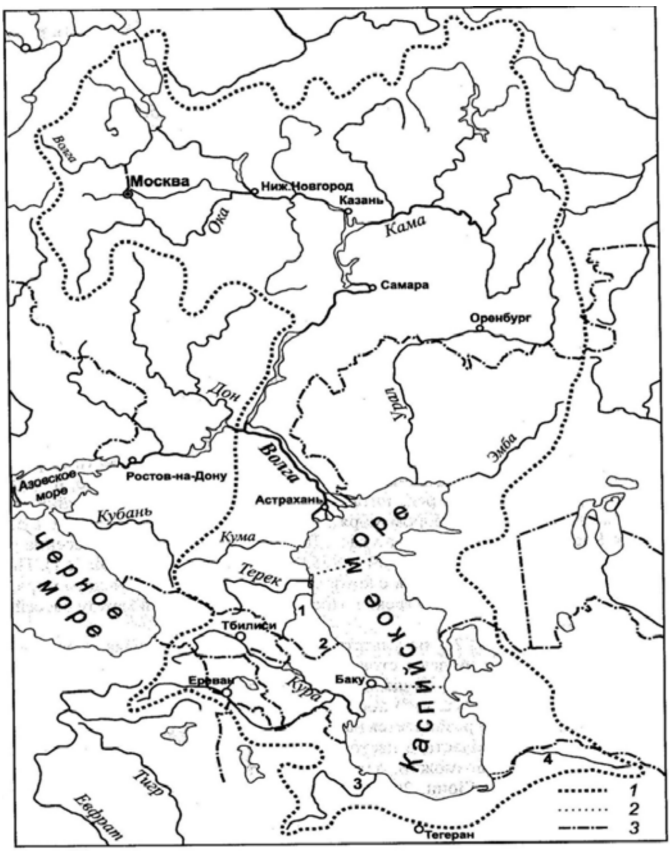


Рис. 2.2. Схема водосборного бассейна Каспийского моря [23]:
1 – граница бассейна; 2 – граница между северной, средней и южной частями Каспийского моря; 3 – государственные границы. Цифрами обозначены реки Сулак (1), Самур (2), Кызылузен (Сефидруд) (3), Атрек (4).

По геоморфологическим и гидрометеорологическим условиям Каспийское море условно делится на три части: Северный, Средний и Южный Каспий. За условную границу между Северным и Средним Каспием обычно принимают линию, соединяющую о. Чечень с м. Тюб-Караган (примерно совпадает с 44 параллелью), а между Средним и Южным Каспием – линию о. Жилой – м. Куули.

Северный Каспий – наименьшая по площади и самая мелководная часть Каспийского моря с преобладающими глубинами 4–5 м, средняя – глубоководная часть (600–700 м) и южная – самая глубоководная часть моря. В пределах Северного Каспия выделяют также западную и восточную части. При общей площади моря, равной 378480 км^2, площадь водной поверхности Северного Каспия составляет 90129 км^2. На его долю приходится 24,3 % площади всего моря и 0,5 % объема всего Каспия. Средняя глубина Северного Каспия 4,4 м, максимальная – 25 м. Большая часть площади (68 %) занята глубинами менее 5 м. Основной объем воды в Северном Каспии (63 %) сосредоточен в более глубоководной части на границе со Средним Каспием.

В условиях Северного Каспия береговая линия не имеет постоянного положения и зависит от разномасштабных колебаний УКМ. Наибольшие перемещения береговой линии (до десятков километров) происходят из-за многолетних колебаний УКМ (рис. 2.3). Под воздействием сезонных колебаний уровня моря береговая черта может смещаться на 3–5 км.

В северной части моря область малых глубин, не превышающих 10 м, простирается на расстоянии 40 км и более от берега. Изменения среднего уровня моря вызывают затопление или осушение полосы западного побережья Северного Каспия шириной до 10–15 км. Соответственно сдвигается и зона возможного затопления и осушения побережья при нагонах и сгонах.

На Северном Каспии островов мало, они в основном небольшие и расположены вблизи берегов; их общая площадь равна 1813 км^2. В западной части Северного Каспия находятся самые большие острова всего Каспия: о. Чечень (122 км^2) и о. Тюлений (68 км^2). В восточной части выделяется архипелаг Тюленьих островов, среди них наиболее крупные о. Кулалы (73 км^2) и о. Морской (65 км^2). На юге моря наиболее крупные острова: о. Огурчинский на востоке моря, о-ва Жилой, Свиной и Артема – на западе моря.

По характеру рельефа берегов и дна Северный Каспий представляет пологую мелководную равнину, слабо наклоненную к югу, с многочисленными островами, террасами, древними руслами рек. В пределах этой мелководной равнины прослеживаются разветвления долины палеорек Волги, Урала, Терека и ныне не доходящих до моря рек Кумы и Эмбы.

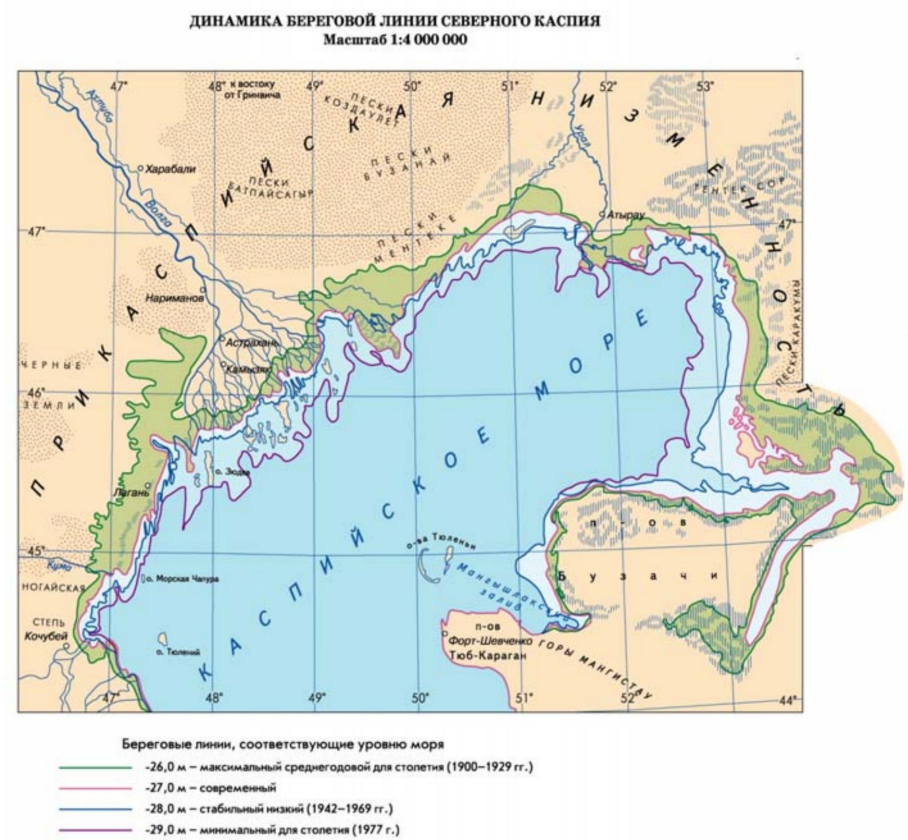


Рис. 2.3. Динамика береговой линии Северного Каспия.

Палеорусла разделены повышенными участками, древними водоразделами, часто представленными островами, барами, банками. Между дельтой р. Урал и Мангышлагским заливом расположено изолированное понижение дна со ступенчатыми склонами – обширная впадина с глубинами 5–8 м под названием Гурьевская (Уральская) бороздина. Севернее полуострова Тюб-Караган находится еще одна бороздина – Мангышлагская (глубины до 12 м), которая является также древней речной равниной.

Из-за речных наносов, образующих множество отмелей, рельеф дна Северного Каспия неровный. Берега Северного Каспия пологие и низкие, в основном аккумулятивные. Наносы рек, откладываясь в дельтах впадающих рек, постепенно их наращивают. Благодаря этому процессу появляются новые косы, банки и острова. Наличие обширных мелководий, малые уклоны дна являются причиной того, что даже

небольшие понижения или повышения уровня моря влекут за собой осушение или затопление обширных прибрежных территорий моря.

В Северном Каспии наиболее крупные заливы: Аграханский, Кизлярский, Мертвый Култук, Кайдак, Казахский, Мангышлагский. В Южном Каспии наиболее крупные заливы и бухты: Кара-Богаз-Гол, Красноводский, Туркменбаши, Туркмен, Гызылагач, Гасан-Кули, Гиркан, Гызлар, Энзели. Средний Каспий представляет собой обособленную котловину, область максимальных глубин которой – Дербентская впадина смещена к западному берегу. Средняя глубина этой части моря 190 м, наибольшая – 788 м. Средняя часть моря имеет относительно ровную береговую черту. На западном побережье на границе с южной частью моря расположен Апшеронский п-ов. На западе Южного Каспия находятся Бакинская бухта, Кызылагачский залив. Большинство островов и полуостровов расположены вдоль береговой линии и образуют два архипелага: Апшеронский (на востоке Апшеронского п-ва) и Бакинский (на юге полуострова).

Восточный берег Среднего Каспия более изрезан. Здесь расположен самый крупный залив моря Кара-Богаз-Гол (в переводе Черная пасть). В 60-е годы прошлого века его площадь составляла 12 км^2, в конце 70-х годов 5–6 км^2. Средняя глубина 5,5 м с уменьшением до 2 м. От моря залив отделен песчаными косами – северной и южной. Соленость воды в заливе около 280–305 ‰. Температура воды летом достигает 35 ºС, зимой ниже 0 ºС. Температура воздуха летом достигает 40 ºС, зимой – минус 6 ºС. Залив соединяется с морем проливом, длина которого около 8 км, а ширина около 200 м. К концу 1979 г. перепад уровня между морем и заливом составлял около 3 м. При стоке 5 км^3/год в залив вносилось 55 млн т солей, что приводило к опреснению моря на 0,8–1,7 ‰. При большом стоке в залив из моря выбрасывалось 350 млн т солей в год.

Южная часть моря отделена от средней части моря Апшеронским порогом, являющимся продолжением Главного Кавказского хребта. Глубины над этим подводным гребнем не превышают 180 м. Наиболее глубоководная часть Южно-Каспийской котловины с максимальной для моря глубиной 1025 м расположена восточнее дельты Куры. Над дном котловины поднимается несколько подводных хребтов высотой до 500 м.

Главные порты Каспия: Астрахань, Баку, Махачкала, Туркменбаши. Крупнейший город-порт Баку, столица Азербайджана, находится в южной части Апшеронского полуострова и насчитывает 2,5 млн человек (на 2010 г.). Несколько прикаспийских городов расположены на южном (иранском) побережье. Самый крупный из них Энзели (бывший Пехлеви). На северном берегу Красноводского залива расположен

туркменский город Туркменбаши (бывший Красноводск). На российском побережье моря расположены города Лагань, Махачкала, Избербаш и Дербент. Городом-портом также считается Астрахань, который находится в дельте Волги в 60 км от северного побережья моря. На восточном берегу моря расположен казахский город-порт Актау, на севере в дельте Урала в 20 км от моря расположен город Атырау.

2.3. Климатические и гидрометеорологические особенности

Основные черты метеорологического и гидрологического режимов Каспийского моря обобщены во многих публикациях [1, 3, 5–7, 10–11, 13, 16, 20–22]. Из-за большой меридиональной протяженности Каспийское море находится под влиянием нескольких климатических зон: континентальная зона на севере, умеренно теплая на западе, субтропическая влажная на юго-западе и пустынная на востоке. Разнообразие климатических зон проявляется в сезонных особенностях развития синоптических процессов и погоды в бассейне Каспийского моря. Основными барическими центрами, определяющими циркуляцию атмосферы над Каспийским морем и его водосборным бассейном, зимой является отрог азиатского максимума, а летом – гребень азорского максимума. Характерной чертой климата Северного Каспия является преобладание антициклональных условий погоды, резкие перепады температуры воздуха в течение года, холодная и ветреная зима, обуславливающая образование устойчивого ледяного покрова на большей части Северного Каспия при всех типах зим, преимущественно спокойное и жаркое лето.

Для всей акватории моря величина радиационного баланса составляет в среднем 60 ккал/см^2. Избыток тепла предопределяет интенсивное испарение и интенсивный конвективный теплообмен с атмосферой. Для всей акватории тепловой баланс положительный с марта по октябрь и имеет максимум в июне-июле (11–12 ккал/см^2). Тепловой баланс отрицательный только в декабре (1–2 ккал/см^2).

Каспийское море находится в зоне постоянного воздействия холодных полярных воздушных масс и влажных воздушных масс, формирующихся над Северной Атлантикой, сухих континентальных воздушных масс из Сибири, а также влажных субтропических масс воздуха, приходящих со Средиземного моря и Малой Азии. Таким образом, выделяется несколько типов синоптических процессов, оказывающих непосредственное влияние на влагооборот в бассейне Каспийского моря и, как следствие, на колебания УКМ. Эти группы процессов непрерывно меняются, взаимодействуя друг с другом. При этом ясно

выраженных устойчивых групп не наблюдается. Они носят стохастический (случайный) характер, поэтому вклад каждой группы в суммарную дисперсию изменчивости уровня моря можно оценить лишь статистически.

Зимой большая часть акватории моря находится под влиянием отрога сибирского антициклона. Наличие местного максимума давления над Армянским и Иранским нагорьями в зимний сезон способствует некоторому повышению давления в самой южной части моря. В средней части моря образуется область сходимости воздушных потоков, обладающих большой разностью температур, что приводит к развитию циклонической циркуляции зимой, наблюдается выход южных циклонов с Черного и Средиземного морей. Для весеннего периода свойственна большая изменчивость синоптических процессов и частая смена воздушных масс. Летом температурные контрасты сглаживаются и циркуляционные процессы ослабевают. Синоптические процессы над Каспийским морем с запада находятся под воздействием североатлантического колебания.

Уральские и Кавказские горы являются барьером для поступления воздушных масс воздуха с востока и юга и оказывают большое климатообразующее влияние на бассейн Каспия. Если открытость водосборного бассейна Каспия к северу – Арктическому бассейну способствует глубокому проникновению на юг холодных воздушных масс, то горные системы Кавказа и Урала препятствуют поступлению теплого воздуха с юга.

Большая часть бассейна находится в умеренном климатическом поясе с относительно теплым летом и холодной зимой. Самая южная часть бассейна расположена в субтропическом поясе: в западных районах с ясной и тихой погодой летом, дождливой и ветреной зимой, в восточных районах с сухим и жарким летом и относительно холодной зимой.

Ветер

Что касается ветров, то для северной части моря большую часть года характерно преобладание восточных и северо-восточных ветров. Среднегодовая скорость ветра изменяется от 2 до 5 м/с. На Среднем Каспии господствуют ветры северо-западного и юго-восточных направлений, а в районе Апшеронского п-ва из-за орографического эффекта – северного и южного направлений. В южной части моря на юго-западе преобладают северные и северо-восточные ветры, на юго-востоке зимой – северо-западные, а летом – юго-восточные. Среднегодовая скорость ветра изменяется от 2 до 5 м/с. На рис. 2.4 представлены розы ветров над Каспийским морем в различные месяцы.

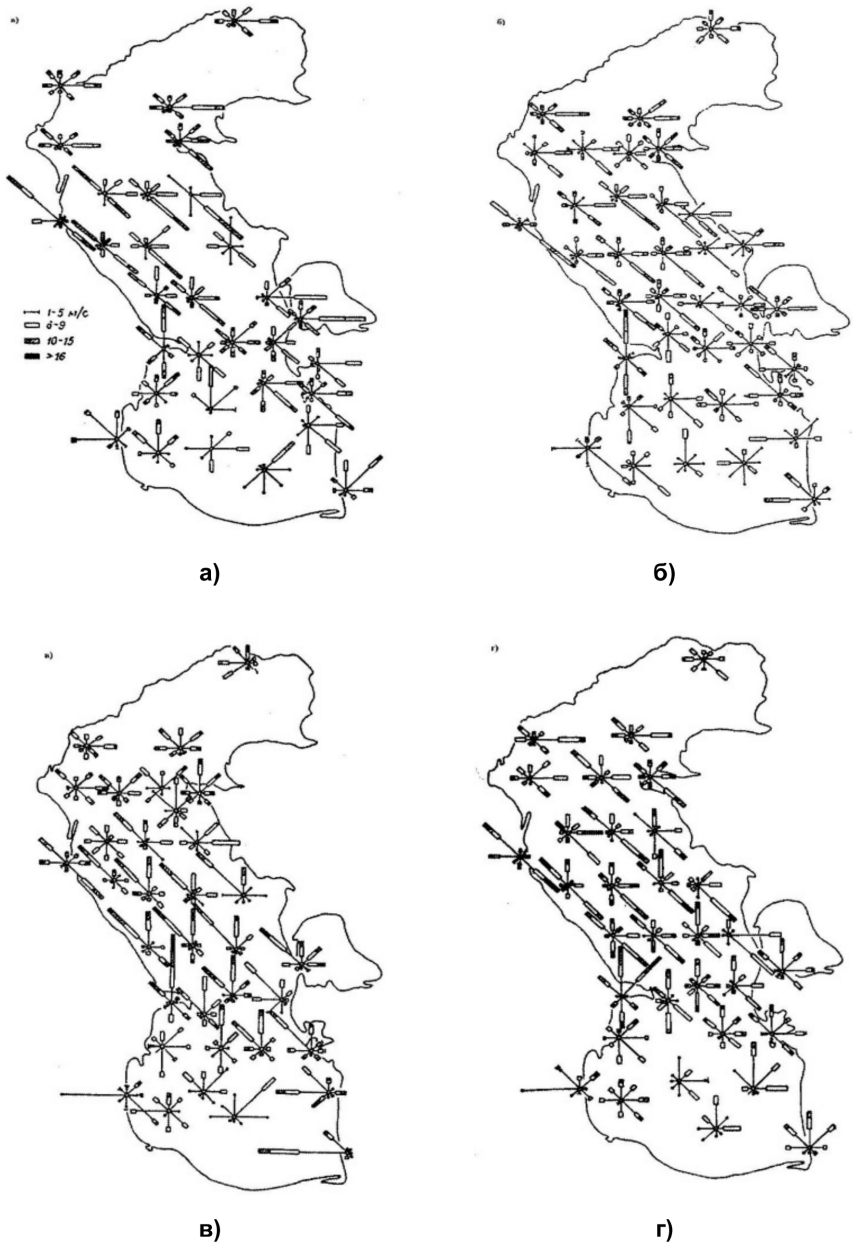


Рис. 2.4. Розы ветров над Каспийским морем [3]: январь (а), апрель (б), июль (в), октябрь (г).

Над открытым морем преобладают ветры со скоростями до 10 м/с (65–80 %), тогда как повторяемость штормовых ветров составляет 1,0–1,5 %. Наибольшая повторяемость штормовых ветров наблюдается в направлении с северо-востока на юго-запад, создавая циркулирующие течения. Повторяемость слабых ветров на Северном Каспии (до 6 м/с) составляет в среднем летом 63 %, в остальные сезоны – от 40 до 43 % [3, 12].

Осадки

Распределение осадков по акватории моря имеет очень пеструю картину. Даже осредненные за много лет осадки на двух соседних станциях могут различаться весьма значительно. Причины этого, по-видимому, кроются в своеобразии рельефа местности, существенно влияющего на направление и интенсивность потока воздуха, а следовательно, и на уровень конденсации паров воды, зависящего от температуры воздуха и дефицита влажности.

Режим осадков на Каспии в значительной степени зависит от взаимодействия различных по происхождению воздушных масс. Главными причинами выпадения осадков на западном побережье моря в холодный период года являются высотная ложбина холодных масс над Кавказом и Каспийским морем и теплый высотный гребень над Средиземным морем и Скандинавией. Тогда над северными районами Европы развивается область высокого давления, а над Закавказьем – южный циклон.

Осадки по площади моря распределены неравномерно. Наибольшее количество осадков (до 1700 мм/год) выпадает на юго-западном побережье моря во влажных субтропиках Ленкоранской низменности, через которую проходит с запада на восток основная масса средиземноморских циклонов; наименьшее количество осадков выпадает на восточном побережье моря. В центральной части западного побережья в зоне субтропиков годовая сумма осадков составляет 115–220 мм, уменьшаясь в направлении моря (Нефтяные Камни – 110 мм/год). На большей части восточного побережья годовая сумма осадков не превышает 95–125 мм [3, 5, 16].

Наименьшее количество осадков выпадает в летний период. Ежегодное повышение уровня моря в результате выпадения осадков составляет примерно 20 см, причем на восточном засушливом берегу 9–10 см, а в субтропической юго-западной части побережья 17 см. Отклонения количества осадков от нормы могут обусловить отклонения в годовых приращениях уровня в среднем на ±3–7 см, что составляет 10–15 % размаха его внутригодовых колебаний.

В юго-восточной части Каспийского моря находится обширная барическая ложбина, которая представляет собой западное ответвление ирано-афганского минимума. Во второй половине лета резко возрастает засушливость северо-восточных побережий и Кура-Араксинской низменности. Только для крайней юго-западной части моря характерно значительное превышение осадков над испарением. В целом же на акватории моря наблюдается обратная картина: осадков значительно меньше, чем испарения.

Большую часть года Каспийское море служит источником тепла и влаги для воздушных масс, проходящих над его поверхностью. Сумма атмосферных осадков, выпадающих на водное зеркало Каспийского моря, составляет примерно 180 мм в год, а испарение с поверхности моря – 910 мм в год.

Внутригодовое распределение осадков и испарения находится в противофазе: максимум осадков наблюдается в холодное полугодие (с октября по март), а максимум испарения – в теплое полугодие (с июля по сентябрь). Наибольшая разность между испарением и осадками, так называемое эффективное, или видимое испарение, наблюдается в августе и сентябре.

Испарение на большей части акватории около 100 см/год, а в восточной части Южного Каспия и в районе Апшеронского полуострова до 140 см/год.

Наибольшее количество осадков наблюдается в холодный период года (сентябрь-март) (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Среднее месячное и среднее годовое значение количества осадков (см) за период 1898–1965 гг.

Пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Махачкала	29	28	26	26	28	31	28	29	50	45	52	39	411
Кулалы	9	10	10	14	14	19	14	14	16	12	11	17	176
Пешной	9	8	9	10	12	14	14	12	11	10	11	14	134
Искусственный	13	11	10	10	13	15	10	10	10	9	10	10	131
Тюлений	13	11	11	13	10	13	16	13	11	12	7	11	141
Чечень	10	9	9	18	21	19	18	20	21	20	14	11	190
Изберг	17	17	15	15	17	19	17	17	29	27	32	22	244
Дербент	25	23	23	23	20	22	16	21	48	48	50	36	355

Температура воздуха

Что касается температуры приповерхностного воздуха, то большую часть года (с конца августа по апрель) средняя температура воздуха над открытым морем выше, чем на побережье, и лишь во вторую половину весны и летом ее распределение обратное. Наиболее холодный месяц над юго-западным и центральными районами моря – февраль [3]. Распределение температуры воздуха по сезонам представлено на рис. 2.5.

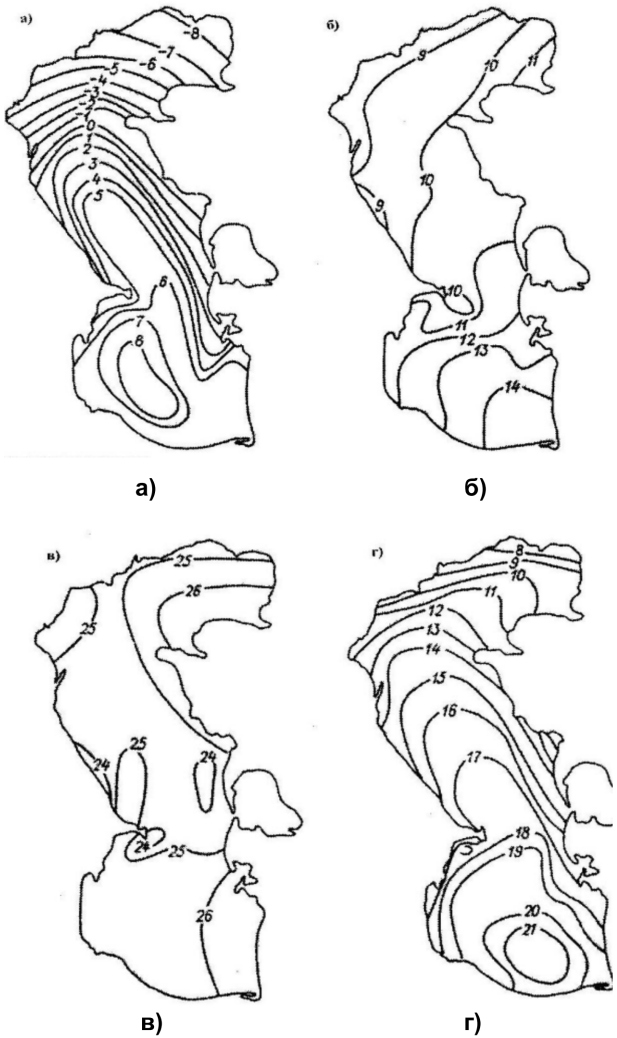


Рис. 2.5. Среднемесячная температура воздуха (ºС): январь (а), апрель (б), июль (в), октябрь (г).

Зимой в январе-феврале среднемесячные температуры воздуха на севере достигают -8…-10 °С, на среднем Каспии +3…-5 °С и на юге +8…+12 °С. Летом средняя температура воздуха самых теплых месяцев (июль–август) изменяется от +24 °С на севере до +27–28 °С на юге. Различия в температуре воздуха отмечаются между западной частью моря, где ее среднее значение в июле равно +24,5 °С, и восточной, где средняя месячная температура воздуха в июле составляет +27,0 °С.

На большей территории бассейна Каспия средняя температура составляет в январе -8…-16 °С, в июле +16…24 °С. Исключение составляют самые южные прибрежные районы Каспия, где температура в январе немного больше 0 °С, а в июле превышает 24 °С.

Температура воды

Температура воды подвержена значительным широтным изменениям, наиболее отчетливо выраженным в зимний период, когда температура изменяется от 0–0,5 °С у кромки льда на севере моря до 10–11 °С на юге, т. е. разность температуры воды составляет около 10 °С. Для мелководных районов с глубинами менее 25 м годовая амплитуда может достигать 25–26 °С. В среднем температура воды у западного побережья на 1–2 °С выше, чем у восточного берега, а в открытом море температура воды выше, чем у побережий, на 2–4 °С [3, 6, 18].

По характеру горизонтальной структуры поля температуры воды в верхнем двухметровом слое в годовом цикле изменчивости можно выделить три периода. С октября по март температура воды увеличивается в южном и восточном направлениях, что особенно хорошо прослеживается в Среднем Каспии. Можно выделить две устойчивые квазиширотные зоны, где градиенты температуры повышены. Это, во-первых, граница между Северным и Средним Каспием и, во-вторых, между Средним и Южным. У кромки льда, на северной фронтальной зоне, температура в феврале-марте увеличивается с 0 до 5 °С, на южной фронтальной зоне, в районе Апшеронского порога, – с 7 до 10 °С.

В апреле-мае область минимальных температур перемещается в Средний Каспий, что связано с более быстрым прогревом вод в мелководной северной части моря. Правда, в начале сезона в северной части моря большое количество тепла тратится на таяние льда, но уже в мае температура повышается здесь до 16–17 °С. В средней части температура в это время составляет 13–15 °С, а на юге увеличивается до 17–18 °С. Весенний прогрев воды выравнивает горизонтальные градиенты, и разность температур между прибрежными районами и открытым морем не превышает 0,5 °С. Прогрев поверхностного слоя, начинающийся в марте, нарушает однородность в распределении температуры с глубиной.

В июне-сентябре наблюдается горизонтальная однородность в распределении температуры в поверхностном слое. В августе, который является месяцем наибольшего прогрева, температура воды по всему морю составляет 24–26 °С, а в южных районах возрастает до 28 °С. В августе температура воды в мелководных заливах, к примеру в Красноводском, может достигать 32 °С.

В это время наблюдается явление апвеллинга. Он наблюдается ежегодно вдоль всего восточного побережья Среднего Каспия и частично проникает даже в Южный Каспий. Подъем холодных глубинных вод происходит с различной интенсивностью в результате воздействия преобладающих в летний сезон северо-западных ветров. Ветер данного направления вызывает отток теплых поверхностных вод от берега и подъем более холодных вод из промежуточных слоев [8]. Начало апвеллинга приходится на июнь, однако наибольшей интенсивности он достигает в июле-августе. Как следствие, на поверхности воды наблюдается понижение температуры (7–15 °С). Горизонтальные градиенты температуры достигают 2,3 °С на поверхности и 4,2 °С на глубине 20 м. Очаг апвеллинга постепенно смещается с 41–42° с. ш. в июне к 43–45° с. ш. в сентябре. Летний апвеллинг имеет большое значение для Каспийского моря, в корне меняя динамические процессы на глубоководной акватории. Спутниковые изображения апвеллинга в Каспийском море приведены в [15].

В открытых районах моря в конце мая – начале июня начинается формирование слоя скачка температуры, который наиболее четко выражен в августе. Чаще всего он располагается между горизонтами 20 и 30 м в средней части моря и между 30 и 40 м – в южной. Вертикальные градиенты температуры в слое скачка очень значительны и могут достигать нескольких градусов на метр. В средней части моря вследствие сгона у восточного побережья слой скачка поднимается близко к поверхности. В открытом море температура воды в поверхностном слое понижается в средней части до 12–13 °С, в южной – до 16–17 °С. В вертикальной структуре слой скачка размывается за счет конвективного перемешивания и к концу ноября исчезает.

Зимой, благодаря климатическим различиям между северными и южными районами моря, температура воды на поверхности изменяется от 0–0,5 ºС у кромки льда до 10,0–10,7 ºС на юге моря. При этом у западного побережья моря температура воды ниже благодаря переносу на юг холодных вод с севера, а вдоль восточного побережья моря выше в связи с поступлением на север более теплых южно-каспийских вод. Вертикальные термические различия в толще вод зимой малы вследствие интенсивного развития процессов конвективного перемешивания. Летом, наоборот, климатические условия над акваторией моря

однородны и горизонтальные температурные различия водных масс в целом меньше, чем зимой. В августе на большей части акватории температура воды на поверхности находится в пределах от 22–23 до 26–27 ºС. Лишь в районе восточного берега Северного Каспия в июле-августе образуется обширная зона пониженных значений температуры воды (до 16–11 ºС), обусловленная частыми сгонами в летнее время и устойчивыми северо-западными ветрами, приводящими к выходу на поверхность более холодных вод промежуточных слоев.

Наибольшие годовые разности температуры воды на поверхности моря (до 20 ºС), обусловленные интенсивным летним прогревом и зимним охлаждением мелководий, наблюдаются в северных районах моря, а также у восточных берегов Южного Каспия. Для центральной части Южного Каспия характерны наименьшие изменения температуры в течение года, соответствующие сезонным климатическим различиям.

Волнение

В отношении волнения Каспийское море является довольно неспокойным, особенно его средняя и южная части. В северной части моря развитие волнения ограничено мелководьем, а, кроме того, с ноября по март – наличием льда. Высоты волн, как правило, не превышают 4 м, и лишь в приглубом юго-западном районе моря они достигают 8 м. В течение всего года в Каспийском море преобладают высоты волн менее 2 м, повторяемость их колеблется от 65 до 90 %. Повторяемость высот волн 2–4 м составляет 10–30 %. В средней и южной частях моря в течение всего года могут отмечаться высоты волн 6 м и более. Особенно неспокойным является район Нефтяных Камней и район, расположенный к северо-западу от него. Здесь высоты волн во время сильных штормов могут достигать 12 м.

Течения

Важную роль в перераспределении вод в Каспийском море играют течения, которые имеют сложный характер. Обычными факторами, формирующими режим течений, являются ветры, пространственная неоднородность плотности воды, конфигурация береговой линии и рельеф дна, а в северной части моря, кроме того, речной сток [2, 3, 6, 21]. В северной мелководной части моря преобладают ветровые течения, направление которых в целом совпадает с направлением господствующих ветров. В глубоководной части моря течение отклоняется от направления ветра вправо примерно на 45º. Скорость течений колеблется в пределах от 15 до 30 см/с. Наибольшей скоростью

и постоянством отличается течение в заливе Кара-Богаз-Гол вследствие более низкого его уровня по сравнению с морем.

Вдоль западных берегов Среднего и Южного Каспия в слое от поверхности до дна доминируют течения в южном направлении (за исключением района устья р. Куры, где течения чаще направлены на север [3, 6]). Вдоль восточных берегов течения менее стабильны. В теплое полугодие в поверхностном слое преобладают южные течения, в холодное – северные. В придонном слое северный перенос вод преобладает круглый год. Пиковые значения скоростей инструментально измеренных течений достигали почти 100 см/с. Однако при осреднении за сутки они практически не превышали 50 см/с. Средние скорости в абиссали не превышают 10 см/с [6].

Основное течение Каспийского моря образует круговорот, направленный против часовой стрелки. Внутри общего круговорота существует два циклонических круговорота в средней и южной части моря, разделенные подводным продолжением Большого Кавказа (рис. 2.6).

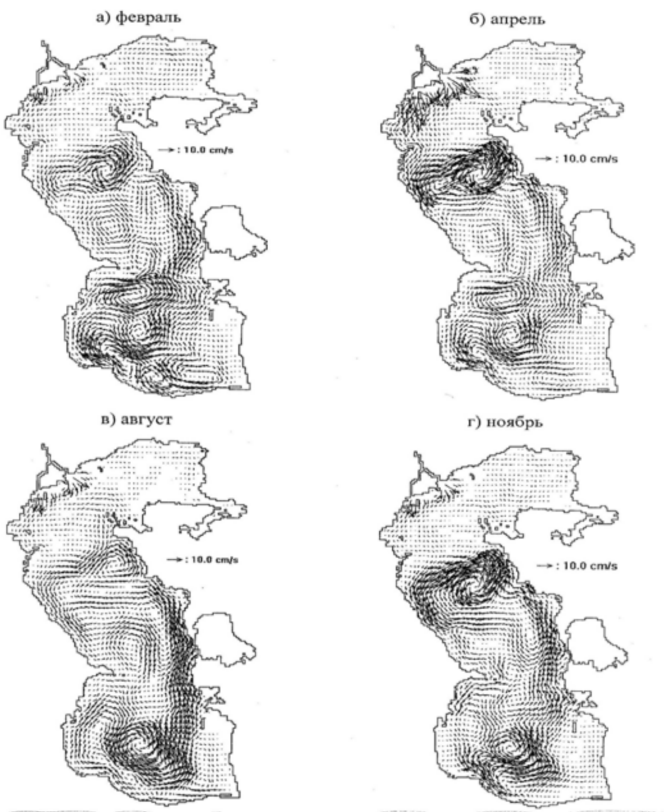


Рис. 2.6. Схемы поверхностных течений Каспийского моря [3].

В [22] сделано предположение, что одним из основных механизмов генерации общей циркуляции вод в Каспийском море может быть локальная ветровая накачка энергии и завихренности типа апвеллинг или даунвеллинг (особенно в Среднем Каспии), усиленная эффектами меридиональной ориентации моря, его замкнутости и рельефа дна. На основе спутниковых данных получена новая информация о динамике вод Каспийского моря (крупномасштабные круговороты, мезомасштабные вихри) [15]. Численное моделирование климатической циркуляции вод Каспийского моря выполнено в [19].

Соленость воды

Солевой состав вод замкнутого Каспийского моря отличается от океанского. Существуют значительные различия в соотношениях концентраций солеобразующих ионов, особенно для вод районов, находящихся под непосредственным влиянием материкового стока. Процесс метаморфизации вод моря под влиянием материкового стока приводит к уменьшению относительного содержания хлоридов в общей сумме солей морских вод, увеличению относительного количества карбонатов, сульфатов, кальция, которые являются основными компонентами в химическом составе речных вод.

Наиболее консервативными ионами являются калий, натрий, хлор и магний. Наименее консервативны кальций и гидрокарбонат-ион. Соленость воды особенно резко изменяется в северной части моря: от 0,1 ‰ в устьевых областях Волги и Урала до 10–11 ‰ на границе со Средним Каспием. Минерализация в мелководных соленых заливах-култуках может достигать 60–100 г/кг. В Северном Каспии в течение всего безледного периода с апреля по ноябрь наблюдается соленостный фронт квазиширотного расположения. Наибольшее опреснение, связанное с распространением речного стока по акватории моря, наблюдается в июне.

На формирование поля солености в Северном Каспии большое влияние оказывает поле ветра. В средней и южной части моря колебания солености невелики. В основном она составляет 11,2–12,8 ‰, увеличиваясь в южном и восточном направлениях. С глубиной соленость возрастает незначительно (на 0,1–0,2 ‰).

В глубоководных частях моря соленость на поверхности увеличивается в целом с севера на юг и с запада на восток. Такое распределение солености связано с опресняющим влиянием речного стока вдоль западного побережья и осолонением вод у восточного берега в условиях интенсивного испарения и отсутствия пресного стока. В открытых районах моря соленость редко выходит за пределы 12,7–13,2 ‰.

Вертикальное распределение солености в Среднем и Южном Каспии весьма однородное – от поверхности до дна ее увеличение не превышает десятых долей промилле.

Изменения солености в различных районах моря от сезона к сезону не отличаются той однонаправленностью, которая присуща изменениям температуры. Так, от весны к лету на всей акватории Южного Каспия соленость возрастает вследствие увеличения испарения. В то же время в Среднем Каспии, где проявляется влияние опресненных северо-каспийских вод, соленость на большей части акватории понижается.

Изменения солености от ноября к февралю носят противоположный характер. В Южном Каспии соленость уменьшается, а в Среднем возрастает, что объясняется условиями водообмена между этими частями моря. В это время года более соленые южно-каспийские воды поступают в среднюю часть моря, а в южную выносятся менее соленые среднекаспийские воды.

Максимальные величины годового диапазона изменений солености на поверхности, превышающие 1 ‰, отмечаются на северной границе Среднего Каспия и в приустьевых районах. В открытом море они весьма малы и составляют в среднем 0,2–0,4 ‰.

В глубоководной части Каспийского моря в вертикальном профиле солености наблюдаются характерные прогибы изогалин и локальные экстремумы в районе восточного материкового склона, которые свидетельствуют о процессах придонного сползания вод, осолоняющихся на восточном мелководье Южного Каспия. Величина солености также сильно зависит от уровня моря и (что взаимосвязано) от объема материкового стока. Изолированность моря от океана, приток речных вод и осаждение солей в результате интенсивного испарения в заливе Кара-Богаз-Гол определяют своеобразие солевого состава воды Каспийского моря [3, 6].

Лед

Ледообразование в Северном Каспии начинается обычно во второй декаде ноября, реже в октябре или декабре [3, 4]. В течение декабря–января площадь, занятая как плавучим, так и неподвижным льдом, постепенно увеличивается, возрастает также и его толщина. В это время льды покрывают почти всю акваторию Северного Каспия, за исключением лишь его южной части. С марта начинается разрушение льда, которое заканчивается в апреле. Средняя толщина льда зимой колеблется от 20 см на западе до 40–50 см на северо-востоке. Максимальная толщина отмечается в феврале, реже в марте и достигает на северо-востоке 90 см. Продолжительность ледового периода может изменяться от 0 до

168 дней в году, в открытых районах моря от 10 до 30 дней. На Каспийском море преобладает ветровой дрейф льда, усиливаемый на отдельных участках моря течениями. Направление генерального дрейфа льда в различные зимы сравнительно устойчиво. Изменяется лишь южная граница плавучего льда, которая смещается в суровые зимы к югу, а в теплые – к северу.

В Среднем Каспии ледообразование в закрытых бухтах восточного побережья обычно начинается в конце ноября, а на открытых мелководных акваториях – в третьей декаде декабря. В январе и феврале могут появляться приносимые с севера плавучие льды. У западного побережья лед обычно образуется на участке от Махачкалы до Низовой пристани в январе, хотя в суровые зимы лед может появиться уже в конце ноября. В теплые зимы на западном побережье моря лед почти всегда отсутствует. В Южном Каспии лед появляется очень редко. Детальная информация о ледовых условиях в Каспийском море приведена в [4].

Глава 3.
КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

3.1. Цели и задачи мониторинга

Рациональная хозяйственная деятельность на прибрежных территориях Каспийского моря в условиях значительных колебаний УКМ немыслима без наличия обширных, подробных и надежных данных и информации о фактическом и прогнозируемом состоянии и загрязнении природной среды в регионе, важнейшими из которых являются [1, 30]:

а) данные и информация о гидрометеорологическом режиме и водном балансе моря, которые крайне необходимы для краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования уровненного режима моря;

б) данные и информация о состоянии морской среды Каспийского моря, включающие уровень моря, ветер, волны, температуру воздуха и воды, ледовые условия, течения, химический и солевой состав морских вод, биогенные вещества, загрязнение морских вод и донные отложения, которые составляют основу информационной базы для обеспечения морской деятельности, осуществляемой прикаспийскими странами.

В настоящее время система гидрометеорологического и экологического мониторинга на Каспии оставляет желать лучшего. После ликвидации Госкомгидромета СССР распалась хорошо организованная единая система комплексного мониторинга за гидрометеорологическими процессами и загрязнением на Каспии. На большинстве морских и устьевых станций и постов, находящихся на побережье и островах, повреждены вследствие затопления и подтопления здания и сооружения, пришли в негодность технические средства измерений, наблюдательная сеть стала быстро приходить в упадок. Все это привело к тому, что

в настоящее время возможности системы гидрометеорологических наблюдений и наблюдений за загрязнением на Каспии и его водосборном бассейне, сбора, обработки и анализа полученных данных не соответствуют в полной мере потребностям населения и хозяйства прикаспийских государств. Существующие в прикаспийских странах устаревшие и изношенные системы связи без соответствующего обновления уже в ближайшем будущем перестанут отвечать требованиям единых международных методик сбора данных и использования их в системе международного обмена ВМО, что в свою очередь грозит потерей контроля над природной обстановкой в регионе Каспия.

Особенно сложная обстановка создалась с системой уровенных наблюдений на Каспии. Известно, что изменения среднего уровня, обусловленные сезонными, сгонно-нагонными и другими колебаниями, можно оценить только по информации с большого числа пунктов наблюдения. Однако сейчас даже немногие действующие наблюдательные пункты находятся в крайне неудовлетворительном состоянии, что вызывает серьезное беспокойство в связи с возникновением реальной опасности оказаться не только без прогноза, но и без оперативных данных об уровне моря. Затопление ряда водомерных постов или перенесение части из них в новые места в связи с аномальным повышением среднего уровня моря в конце XX века привело к прерыванию рядов наблюдений и нарушению их однородности [20].

В последние годы в рамках Программы КАСПАС и других проектов предпринимаются меры по восстановлению и развитию комплексного мониторинга Каспийского моря. Однако их реализация осуществляется крайне медленно и в ограниченных масштабах.

С целью регулярной и объективной оценки состояния природной среды Каспийского региона и для информационного обеспечения потребителей на Каспийском море создается единая система комплексного мониторинга природной среды Каспийского моря, включающего гидрометеорологические, гидрохимические, гидробиологические наблюдения и наблюдения за загрязнением моря.

Неотъемлемой частью мониторинга Каспийского моря является морская наблюдательная система, представляющая собой комплекс наблюдений, проводимых с различных наблюдательных платформ (наземного и космического базирования) унифицированными средствами измерений на основе единой нормативно-методической и правовой базы. Следует подчеркнуть, что каспийский комплексный мониторинг может быть эффективным только в случае его организации на всей территории Каспия на основе современных информационных технологий. Для этого должна быть создана межгосударственная региональная система гидрометеорологии и мониторинга загрязнения

окружающей природной среды, действующая по единому плану и общей методике на основе наземной морской и космической наблюдательной сети.

Основными задачами этой системы должны быть:

– проведение регулярных метеорологических и океанографических наблюдений, а также наблюдений за загрязнением морской среды на основе принципов непрерывности (с учетом заданной дискретности), единства и сопоставимости методов наблюдений, сбора, обработки, хранения и распространения полученной в результате наблюдений информации;

– проведение первичной обработки результатов всех наблюдений, передачи в установленном порядке текущей, оперативной и экстренной информации в определенном формате в заданные адреса в соответствии с планом и схемой информационной работы;

– обеспечение государственных органов и населения стран Каспийского региона экстренной информацией о возникновении и развитии опасных и стихийных морских гидрометеорологических явлений, данными об экстремальных уровнях загрязнения морской среды, включая обеспечение аварийно-спасательных работ и мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера на морском побережье и в устьях рек.

Важной составляющей комплексного мониторинга окружающей среды Каспийского моря является мониторинг уровня Каспийского моря. Ниже подробнее рассматривается эта проблема.

3.2. К истории организации инструментальных наблюдений за уровнем Каспийского моря

Первые стационарные гидрометеорологические наблюдения на Каспийском море были выполнены в XVIII веке военным врачом И. Лерхе, который в 1732 г. провел их в Астрахани, Баку, Дербенте, Низовой Пристани и в устье р. Сулак. Первые метеорологические станции на Каспийском море (1827–1830 гг.) открывались различными ведомствами и выполняли ограниченный комплекс наблюдений.

Развитие методов наблюдений за уровнем моря имеет длительную историю. Первые инструментальные наблюдения над уровнем воды в дельте Волги в Астрахани были начаты в апреле 1770 г. академиком С.Г. Гмелиным, а первые исторические и литературные сведения об уровне Каспия были собраны акад. Н.В. Ханыковым и описаны в его труде «О перемежающихся изменениях уровня Каспийского моря» [32]. Он же предложил водобалансовый метод исследования для объяснения причин колебаний уровня Каспийского моря.

Регулярные инструментальные наблюдения за уровнем Каспийского моря впервые были организованы по инициативе академика Э.Х. Ленца, который в 1830 г. поставил в Бакинской бухте (м. Баилов) две постоянные марки (отметки) [13]. Измерения проводились с помощью водомерной рейки. Эти наблюдения дали возможность А.И. Михайлевскому в 1932 г. восстановить непрерывную кривую колебаний уровня Каспийского моря более чем за 100 лет [17]. С 1830 по 1832 г. эти наблюдения носили эпизодический характер, с 1837 г. были систематическими, а регулярными стали с 1890 г. По инициативе Н.М. Филиппова наблюдения за уровнем моря проводились в Астрабаде (1850–1883 гг.) и Ленкорани (1869–1882 гг.).

Систематические инструментальные наблюдения за колебаниями уровня Каспийского моря в Махачкале и в Куули-Маяк начались в 1900 г. В 1915 г. был открыт пост в Красноводске (ныне Туркменбаши), а в 1921 г. были открыты посты Форт-Шевченко и Кара-Богаз-Гол. Наблюдения за уровнем моря на иранском побережье (Энзели) были начаты в 1904 г. После этого было открыто еще большое количество постов, некоторые из них просуществовали недолго. Наибольшее число уровенных постов (порядка 78) приходилось на 20–30 гг. прошлого столетия (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Сеть водомерных постов за период инструментальный наблюдений за уровнем Каспийского моря [18]

№	Пункт наблюдения	Годы работы
1	Аладжа	1963–1992
2	Александр-Бай	1937–1960
3	Аляты	1932–1954
4	Апшерон	1912–1941
5	Апшеронская	1984 – н.в.
6	о. Артема	1940–1966
7	Астара	1912–1916, 1930–1975
8	Астрабад	1853–1883
9	Баку (Баилов)	1900 – н.в.
10	Бекташ	1930 – н.в.
11	Бирючья коса	1892–1945
12	Брянская коса	1931–1958
13	Бурунчук	1937–1939
14	Бухта Бековича	1935–1942
15	Бяндован	1946–1950
16	Ганюшкино	1933–1940

Таблица 3.1 (продолжение)

№	Пункт наблюдения	Годы работы
17	Гасан-Кули	1938–1951
18	Главный Сулак	1932–1943
19	Дербент	1925–1957
20	Джорат	1935–1941
21	Жанбай	2004 – н.в.
22	Жилая коса	1935–1937
23	о. Жилой	1924 – н.в.
24	Изберг	1949–1980
25	о. Искусственный	1941 – н.в.
26	Кара-Богаз-Гол	1921 – н.в.
27	Каламкас	2005 – н.в.
28	Карайский маяк	1976–1988
29	Кара-Сукут	1948–1954
30	Карши	1936–1938
31	Кендерли	1935–1956
32	Кизил-Бур (Сиазань)	1936–1938, 1957–1959
33	Кизил-Куп	1930–1944
34	Кизил-Су	1942–1958
35	Кильгинка	1940–1955
36	Коса Ада	1957–1968
37	Красноводск (Туркменбаши)	1915 – н.в.
38	о.Кулагин	1947–1951
39	о.Кулалы	1936–1992, 2004 – н.в.
40	З.О.Култук (Нефтечала)	1916–1917, 1927–1947, 1948–1988
41	Кургузул	1940–1943
42	Куринская коса	1952–1962
43	Куули-Маяк	1900–1917, 1921 – н.в.
44	Лагань (Каспийский)	1935–1949, 1976 – н.в.
45	Ленкорань	1869–1981, 1905–1916, 1936–1938, 1978 – н.в.
46	Махачкала	1900 – н.в.
47	о.Нефтяные Камни (Нефт.Дашлары)	1953 – н.в.
48	Низовая пристань	1936–1942, 1945–1963
49	Ноушехр	1945–1946

Таблица 3.1 (окончание)

№	Пункт наблюдения	Годы работы
50	о. Огурчинский	1938 – н.в.
51	12-я Огневка	1954, 1977–1988
52	Пехлеви	1925–1952
53	о.Пешной	1929 – н.в.
54	Прорва	1933–1940
55	о.Сара	1921–1955
56	Сартас	1930–1938
57	Сарыташ	1948–1958
58	о.Свиной	1954–1992
59	Сумгаит	1948 – н.в.
60	о.Тюлений	1937 – н.в.
61	о.Укатный	1951–1964
62	Устье Куры	1925–1935
63	Форт-Шевчено	1921 – н.в.
64	Фетисово	2007 – н.в.
65	Челекен	1913–1963
66	Челекен (эстакада)	1963 – н.в.
67	о.Чечень	1921–1923, 1931–1956
68	Чикишляр	1912–1917
69	о.Чистая банка	1941–1958
70	З.В.Шалыга	1953–1964
71	З.О.Шалыга	1950–1953
72	Шевченко (Актау)	1961 – н.в.

В годы гражданской войны закрылись все гидрометеорологические станции, за исключением Махачкалы. Восстановление и развитие сети гидрометеорологических станций началось с организации в 1922 г. гидрометеорологической службы в Азербайджане. С 1929 по 1936 г. на всем побережье была создана сеть гидрометеорологических станций и постов.

Наиболее интенсивно сеть наблюдений за уровнем моря развивалась с момента организации Гидрометеорологической службы СССР в период с 1929 до 1937 г. В это время по всему побережью Каспийского моря были открыты водомерные посты, некоторые из них действуют до настоящего времени. На рис. 3.1 приведена схема расположения гидрологических постов на Каспийском море.



Рис. 3.1. Схема расположения уровенных постов на Каспийском море [6]: действующие (1), вековые (2), закрытые (3).

3.3. Наблюдения над колебаниями уровня моря

Наблюдения над колебаниями уровня моря производятся на специально оборудованном уровенном посту. Отсчеты уровня производятся от условной, постоянной для данного уровенного поста поверхности, называемой нулем поста. По устройству различают: реечные, свайные реечные посты, а также уровенные посты с установкой самописца уровня моря. Реечные уровенные посты сооружаются обычно в портах у приглубого берега и оборудуются постоянными металлическими водомерными рейками (футштоками).

С 1961 г. на морях России установлен единый нуль поста, представляющий единую уровенную поверхность, от которой производится отсчет уровня моря на всех уровенных постах. На Каспийском море за единый нуль поста принят горизонт, лежащий на 28,00 м ниже нуля Кронштадтского футштока, который фиксирует положение нулевой поверхности системы абсолютных отметок высот России (Балтийская система высот). Отметки (высоты) реперов над нулем Кронштадтского футштока принято называть абсолютными отметками, или отметками (высотами) в Балтийской 1977 г. системе координат высот. Если отметки реперов не определены относительно нуля Кронштадтского футштока (реперы уровенного поста не связаны нивелировкой с реперами государственной нивелирной сети), то отметки их, а следовательно, и отметки нулей постов принято называть условными [26, 27].

В связи с тем, что нуль водомерной рейки невозможно совместить с нулем поста, после ее установки производится нивелирование с целью определения приводки – превышение нуля рейки над нулем поста. Для каждого уровенного поста должны устанавливаться отметки уровня – отметки, превышение которых или падение ниже которых, влечет за собой опасные в данном районе последствия.

Непрерывные наблюдения за уровнем моря производятся по самописцу уровня моря (СУМ). Наиболее распространенным является поплавковый самописец. Принцип действия его основан на механическом преобразовании вертикальных перемещений находящегося на поверхности воды поплавка в пропорциональные перемещения пера, записывающего их на диаграммную ленту. Прибор устанавливается над специальным колодцем, связанным с морем и защищающим поплавок от воздействия волн и обмерзания. Данные об уровне записываются на ленту, с которой и снимаются показания уровня.

При отсутствии самописца отсчет уровня осуществляется по футштоку, прикрепленному к жесткому основанию, или переносной рейке в соответствии с нанесенными на них делениями. Отсчеты в сантиметрах производят в основные синоптические сроки по московскому времени.

Первичная обработка наблюдений по рейке заключается в следующем. При волнении уровень отсчитывают в моменты прохождения через рейку вершины и подошвы волны, при этом делают три пары отсчетов, после чего полученные данные делят на 6. При приведении среднего отсчета по рейке к нулю поста к нему прибавляется поправка.

Первичная обработка записи на ленте СУМ состоит из следующих этапов: проверка и исправление записи на ленте; определение на записи точек, соответствующих моментам целых часов (разметка); снятие показаний СУМ (ординат) в моменты целых часов и приведение их

к нулю поста; определение максимальных и минимальных уровней за сутки.

3.3.1. Приведение уровнемерных постов к единой высотной основе

Организация Гидрометеорологической службы СССР обусловила необходимость проведения отсчетов уровня моря, измеряемых на постах, расположенных в различных районах каспийского побережья, к единой исходной плоскости, так как до этого времени единой системы высотных отметок не существовало и каждый водомерный пост имел свой условный нуль поста. До начала XX века инструментальные наблюдения за уровнем моря проводились разными ведомствами, поэтому организованные ими водомерные посты имели свои условные системы высот, часто не сопоставимые между собой, что существенно снижало их практическую значимость.

До 1961 г. на побережье Каспия существовало несколько не связанных между собой систем высот: черноморская (относительно уровня Черного моря, рассчитанного по Батуми), в основе которой лежит водная нивелировка, выполненная В.А. Зениным [7,8]; система высот 1950 г. – система высот Каталога Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) издания 1949–1952 гг.; ведомственные, в том числе основанные на нивелировке Военно-топографического управления, исходными реперами которых служат репера III и IY классов, не включенные в Каталог ГУГК.

Отсутствие единой системы высотных отметок и наличие на каждом уровенном посту своего условного нуля поста привело к необходимости приведения наблюдений за уровнем моря, проводимых в различных частях и районах каспийского побережья, к единому нулю уровенного поста.

В 1961 г. наблюдения в 31 пункте были сведены в Каталог в единой системе высот реперов и установлен единый нуль поста Каспийского моря на 28,00 м ниже нуля Кронштатдского футштока (средний взвешенный уровень моря за 1940–1955 гг.). Характеристики уровня моря даются в превышениях над единым нулем поста, равным -28,00 м БС относительно нуля Кронштадтского футштока – Балтийской системы высот 1950 г. Эта отметка уровенной поверхности является «нулем глубины» всех навигационных карт Каспийского моря. Качество наблюдений в Каталоге не оценивалось. Главное достоинство Каталога состояло в систематизации наблюдений и расчете приводок уровней моря для пересчета в единую систему высот нуля поста Каспийского моря.

В 1964 г. И.Н. Лукиным был издан Каталог уровенных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море, где были обобщены уровенные наблюдения по 1960 г., однако они не были еще приведены к единому нулю поста [15]. Введенная с 1 января 1979 г. система высот 1977 года – Главная высотная основа СССР 1977 г. (ГВО 1977 г.) – в практических целях не используется и отметки всех уровенных постов принимаются в единой системе высот 1950 года.

Впервые увязка нулей уровенных постов Каспийского моря методом водного нивелирования была выполнена В.В. Борисовым за период с 1916 по 1935 г. и В.А. Зениным с 1936 по 1938 г. [7, 8]. В результате выполненных работ отметки всех нулей водомерных реек уровенных постов были определены в сравнении с нулем рейки уровенного поста Баку, принятого в качестве опорного. Расхождения отметок нулей постов, рассчитанных В.В. Борисовым и В.А. Зениным, составляли 4–5 см.

При организации наблюдений за уровнем моря предварительно проводятся рекогносцировочные работы, оборудуются посты наблюдений и осуществляется их высотная привязка.

Привязка реперов водомерных постов к Балтийской системе высот выполняется геометрическим нивелированием IV класса при расстоянии до репера 10 км и нивелированием III класса при больших расстояниях в прямом и обратном направлениях [3, 7–10, 16, 19, 26]. Распространение Балтийской системы высот на реперы водомерных постов, находящихся на недоступных для геометрического нивелирования местах (на островах, специальных платформах и т. п.), производится водным нивелированием от двух береговых постов в соответствии с требованиями нормативных документов Роскартографии и Росгидромета. Передача высот на реперы водомерных постов может также осуществляться с помощью спутниковых геодезических средств.

В 1975–1980 гг. репера водомерных постов повторно привязывались к Государственной системе высот («эпоха 1977 г.»). В результате нивелирования реперов в регионе Каспийского моря (западное побережье) посты получили изменение высотных отметок относительно «эпохи 1950 г.» в пределах от +2 до +15 см.

Выполненное в 1970-е годы геометрическое нивелирование на западном побережье Каспийского моря и последующее нивелировочное уравнивание сети изменили высотные отметки реперов. Изменение отметок было связано с повышением точности нивелирования и вертикальными движениями реперов за период 1950–1977 гг. В то же время на восточном побережье Каспийского моря по различным причинам в 1970-е гг. нивелирование не проводилось. Поэтому в настоящее время

на Каспийском море для расчета уровня моря существует две системы высот: система высот 1950 г. для восточного побережья и система высот 1977 г., введенная с 1 января 1979 г., для западного побережья.

Отсутствие единого топографического обоснования уровенных наблюдений на Каспийском море приводит к разностям между средними годовыми высотами уровня восточного и западного побережий иногда до 30 см. Поэтому для водомерных постов западного побережья вводятся поправки, чтобы все данные наблюдений привести к «эпохе 1950 года».

3.3.2. О введении поправок на вертикальные тектонические движения

Современные тектонические движения на побережье Каспийского моря приводят к вертикальным перемещениям нулей футштоков водомерных постов, что надо учитывать при оценке современных колебаний уровня моря. Мнения исследователей относительно перемещения нулей водомерных постов и их направленности вследствие тектонических движений ложа моря расходятся. Вместе с тем, если рассматривать относительные движения нулей водомерных постов, то видно, что оценки, полученные разными авторами, совпадают. При этом относительное высотное положение нулей уровенных постов Махачкала, Форт-Шевченко, Куули-Маяк и Туркменбаши (Красноводск) изменяются очень незначительно. Наиболее существенные тектонические движения наблюдались в районе ГМС Баку, где происходило отчетливое опускание нуля футштока (около 1 см в год), продлившееся до 1978 г., после чего направление вертикальных смещений поменяло свой знак. За период с 1830 по 1977 г. нуль Бакинского футштока опустился на 50 см, а общее снижение уровня моря составило 3,2 м. Линейный тренд тектонического смещения нуля поста в Баку за период с 1900 по 1939 г. составил 0,64 см в год (по данным Каталога 1964 г. [15]). Анализ вертикальных перемещений нулей всех основных водомерных постов Каспийского моря свидетельствует о разнонаправленности этих движений в различных частях моря и о различной скорости перемещений на каждом уровенном посту за многолетний период.

В современную геологическую эпоху разнонаправленные вертикальные смещения дна каспийской впадины, обусловленные тектоническими процессами в различных ее частях, в большинстве случаев не превышают ±2,5–5,5 мм/год [24, 33]. В конце 1970-х гг. было также отмечено изменение направления вертикальных движений в пунктах Форт-Шевченко и Красноводск. Расчетами современных скоростей вертикальных движений земной коры на побережье Каспийского моря занимались многие авторы.

Б.А. Аполлов и Е.И. Федорова [2] исследовали вертикальные перемещения нулей всех основных водомерных постов Каспийского моря путем анализа параллельных уровенных наблюдений за 1900–1945 гг. Водпост Форт-Шевченко являлся наиболее устойчивым, поэтому был принят в качестве неизменного при исследовании движения других реек. Исследования показали, что положение нуля поста Махачкала за период 1900–1945 гг. оставалось практически неизменным, незначительное поднятие составляло всего 0,05 см в год, нуль поста Красноводск поднимался в среднем на 0,23 см ежегодно, а нуль постов Куули-Маяк и Баку опускался, соответственно, на 0,53 и 0,47 см в год. Поправка, соответствующая скорости опускания 0,47 см, была принята возможной для Баку и для периода с 1866 по 1900 г. Для периода 1830–1865 гг. высотное положение условного нуля футштока 1920–1928 г., к которому относились все наблюдения, считалось неизменным, таким как в 1866 году.

Принципиальное значение вводимых поправок заключалось в том, что они применялись не к отметкам нуля футштока, а к отсчетам высоты стояния уровня воды над нулем, отметку которой авторы принимали постоянной, полученной точным нивелированием в 1928 году, когда на посту Баилов мыс был установлен новый футшток (-28,73 м в Черноморской системе высот). Таким образом, авторы предложили вводить поправки к значениям уровня, выраженным в Черноморской системе высот (в качестве неизменного принят уровень 1928 г.). Авторы заново пересчитали средние месячные и средние годовые значения уровня по данным Баку с 1830 по 1945 г. с учетом всех принятых ими исправлений, дополнений и высотных поправок.

Учитывая вертикальные деформации земной коры в районе Апшеронского п-ва, Г.Р. Брегман [3] также пришел к выводу о необходимости вводить поправки в отметки средних годовых уровней, полученных по наблюдениям на водпостах. Так, для водпоста Баку (Баилов мыс) опускание нуля футштока было оценено в 0,16 см в год (около 1 см за каждые 6 лет) начиная с 1900 года.

И.Н. Лукин [15] рассчитал скорости современных тектонических движений на побережье Каспийского моря, составившие для водпоста Баку 1,10 см/год, Махачкала – 0,14 см/год, Форт-Шевченко – 0,09 см/год, Куули-Маяк – 0,18 см/год, Красноводск – 0,01 см/год. С 1900 по 1939 г. опускание рейки водпоста Баку составляло 0,64 см/год. И.Н. Лукин рекомендовал вести счет поправок к уровням от 1950 г., для которого принимать их равными нулю, для последующих лет – положительными. Эта необходимость связана с тем, что отметки нулей водомерных постов, помещенные им в Каталоге уровенных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных

на Каспийском море, даны в системе высот 1950 г. Однако в уровни, помещенные в Каталог, поправки на тектонику не были включены.

К.И. Смирнова [28] оценила скорость вертикальных движений ряда водомерных футштоков относительно футштока Махачкала, абсолютная скорость движения которого принималась постоянной (-1,4 мм/год). Расчеты проводились методом водного нивелирования, суть которого состоит в определении превышений уровня одного пункта над другими или превышений уровня в нескольких пунктах над единым нулем моря. По четырем основным уровенным постам были получены следующие скорости вертикальных движений: Баку – -1,03 см/год, Махачкала – -0,14 см/год, Красноводск –0,04 см/год и Форт-Шевченко – -0,07 см/год. Полученные данные позволили сделать вывод о наличии неоднородности вертикальных движений земной коры. На Апшеронском п-ве они больше, чем на восточном и северном побережьях моря. К.И. Смирнова, как и ранее Г.Р. Брегман, сделала предположение, что наблюдаемые вертикальные движения земной коры в районе Апшеронского п-ва происходят не только за счет тектонических движений, но и в связи с последствиями добычи нефти и газа со дна моря, приводящими к оседанию земной поверхности и сжимаемости пород.

По расчетам С.Н. Крицкого и др. (1975 г.), опускание Бакинского футштока за период 1900–1969 гг. составило в среднем 0,73 см/год. Поправка для периода 1940–1965 гг. принята равной 1,29 см/год, а для 1890–1899 гг. условно равной 0,42 см/год (средней за 1900–1939 гг.). Введение поправок на изменение высотного положения Бакинского футштока, имеющего наиболее длительный ряд наблюдений, позволило принять его в качестве опорного пункта уровенных наблюдений. Поправки на опускание нуля Бакинского футштока после 1965 г. не вводились ввиду того, что увеличения разности отметок уровня по водпосту Баку с другими водпостами после 1965 г. не наблюдалось.

Отмечая разнообразный характер вертикальных движений побережья Каспийского моря, С.В. Победоносцев [23–25] рассчитал скорости абсолютных вертикальных перемещений нулей водомерных постов. Эти перемещения составили в Махачкале (за период 1900–1977 гг.) и Форт-Шевченко (за период 1921–1977 гг.) 0,15 см/год, в Красноводске (1915–1977 гг.) 0,24 см/год и в Баку (1900–1977 гг.) -0,56 см/год. С 1938 по 1967 г. наблюдался 30-летний период наиболее активных вертикальных смещений берегов Каспийского моря в районе Баку (-8,1 мм/год), Махачкалы (1,9 мм/год), Форт-Шевченко (1,9 мм/год) и Красноводска (3,0 мм/год). Как отмечал С.В. Победоносцев, за последние годы изменились направления вертикальных движений в пунктах Форт-Шевченко и Красноводск и замедлились в Махачкале и Баку.

В [23] получено, что колебания среднегодовых вертикальных смещений в 1990–2000 гг. на семи пунктах побережья Каспийского моря составляли не более 0,5 см. В настоящее время учет вертикальных движений целесообразно проводить с помощью методов спутниковой геодезии.

3.4. Современное состояние уровнемерной сети на Каспии

Существующая сеть наблюдений, особенно в мелководных труднодоступных районах Северного Каспия, в том числе и на побережье Российской Федерации, недостаточно полно отражает сложный режим уровня моря. Количество уровнемерных постов за последние годы сократилось до такой степени, что не позволяет контролировать уровень моря на всем побережье Каспийского моря, в результате чего уровень в различных районах моря известен не точно. В течение длительного времени отсутствовали наблюдения в восточной части Северного Каспия, в настоящее время здесь стали открываться по инициативе Гидрометслужбы Казахстана уровенные наблюдательные пункты.

До 1991 г. на Каспии выполнялись морские гидрометеорологические наблюдения на 23 береговых, островных и устьевых станциях и постах, из которых 6 находились на территории России, 16 – на территориях Азербайджана, Туркмении и Казахстана. Общегосударственная система наблюдений за загрязнением на Каспии обеспечивала наблюдения на 212 станциях в прибрежных районах и в открытой части моря. На всех станциях выполнялись комплексные гидрохимические наблюдения и наблюдения за содержанием загрязняющих веществ, в т. ч. за содержанием нефтяных углеводородов и фенолов в воде. Кроме того, выполнялись судовые наблюдения на 8 вековых разрезах.

После распада СССР единая государственная наблюдательная сеть разделилась между независимыми государствами Каспийского региона. Сеть прибрежных морских станций и постов в основном сохранилась, но ее техническое оснащение оставляет желать лучшего. Вопрос репрезентативности также достаточно сложен и требует постоянного внимания со стороны НГМС. Несовершенство связи и технического оснащения морских прибрежных гидрометеорологических станций и постов особенно отражается в период действия стихийных гидрометеорологических явлений, когда развитие явления опережает время прохождения информации по каналам связи. Это затрудняет своевременное обеспечение информацией руководящих органов о наиболее опасных участках затоплений.

Следует отметить, что в результате резких изменений уровня Каспийского моря на протяжении XX столетия сеть уровенных постов,

расположенных на побережье и островах, со временем менялась. Одни посты переносились в другие места, другие ликвидировались. Эти изменения были связаны с затоплением или осушением побережья в периоды аномальных колебаний уровня, а также с хозяйственными потребностями в них. За период инструментальных наблюдений за уровнем моря, проводимых на Каспии с 1830 г., функционировало в среднем до 70 водомерных постов и ГМС, работавших в разные годы.

В настоящее время на побережье Каспийского моря действуют 22 пункта наблюдений, в т. ч. на побережье России четыре: Махачкала, Лагань, о. Тюлений, о. Искусственный; в Казахстане семь пунктов: Жанбай, Актау, Форт-Шевченко, Фетисово, Каламкас о. Большой Пешной, о. Кулалы; в Азербайджане пять пунктов: Баку, Сумгаит, Ленкорань, Нефтяные Камни, о. Жилой; в Туркмении шесть пунктов: Бекташ, Кара-Богаз-Гол, Туркменбаши, Челекен, Куули-Маяк, о. Огурчинский

Восстановление и оптимизация сети прибрежных и островных станций с учетом современной гидрологической обстановки и, в частности, необходимости мониторинга уровня моря современными техническими средствами и приборами является одной из неотложных и жизненно важных практических задач всех государств Каспийского региона.

Достаточно плотная наблюдательная сеть имеется лишь в дельте Волги, где в настоящее время находится 16 основных и дополнительных гидрологических постов, расположенных вдоль основных водотоков дельты (рис. 3.3).

Гидрологические наблюдения в устьях Терека и Сулака обеспечивает устьевая гидрологическая сеть из шести гидрологических постов Дагестанского ЦГМС: пять в устье Терека и один – в устье Сулака. Однако они не производят наблюдения за уровнем моря.

3.5. Мониторинг среднего уровня моря по данным спутниковой альтиметрии

Уникальность экосистемы и биоресурсов Каспийского моря на фоне активизации хозяйственной деятельности, особенно добычи углеводородов, остро ставит вопрос контроля и прогноза его состояния. На фоне сокращающейся сети гидрометеорологических наблюдений на побережье и акватории Каспийского моря, морально и технически устаревшего оборудования, сложностей обмена данными между государствами Каспийского региона все более широкое распространение для исследования динамики вод Каспийского моря получила спутниковая альтиметрия [4, 12, 22, 29, 34, 35].

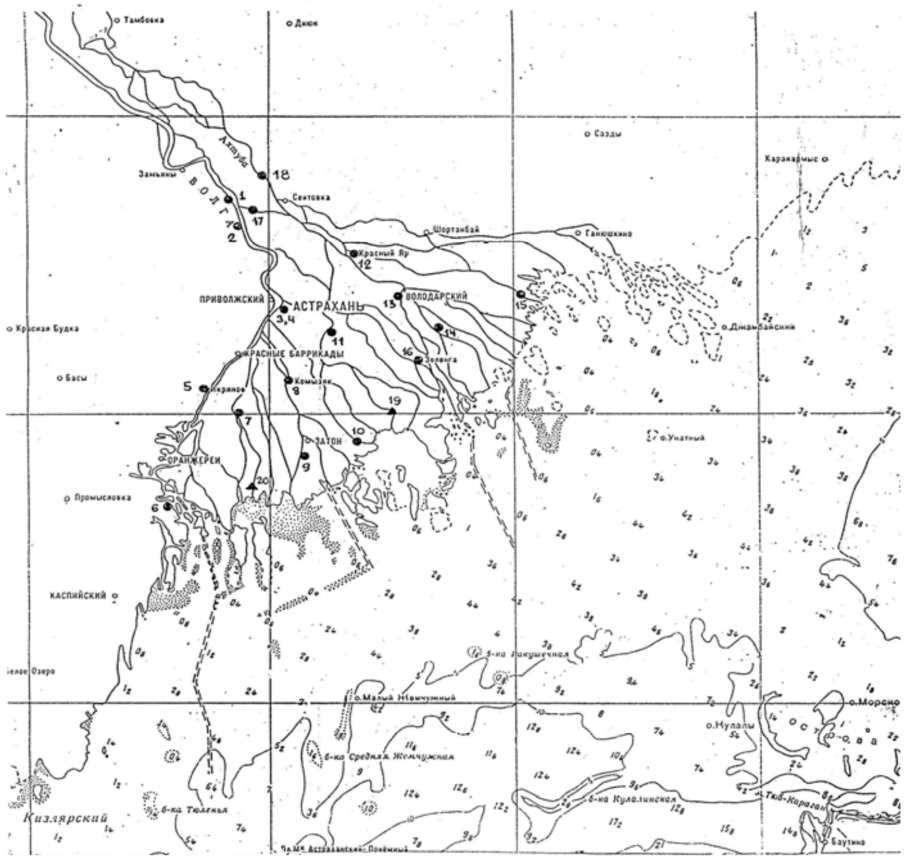


Рис. 3.3. Гидрологическая сеть наблюдений в устье Волги.

НИЦ «Планета» является основным поставщиком спутниковой информации, данные и продукция которого по региону Каспийского моря используются Гидрометцентром России, ГОИНом, КаспМНИЦ и другими организациями. Данные спутниковых наблюдений среднего и высокого разрешения используются для мониторинга состояния устьев рек и акваторий Каспийского моря с 2001 года.

Методы спутникового нивелирования используются для привязки уровнемерных устройств. В 2002–2004 гг. в рамках проекта «Оценка изменчивости базовых термогидродинамических параметров вод Каспийского моря и ее влияния на эволюцию его экологического состояния» был организован постоянно действующий комплексный спутниковый мониторинг Каспийского моря, который включал и спутниковую альтиметрию [4].

Начиная примерно с середины 70-х гг. прошлого столетия на Каспийском море проводились авиационные наблюдения за загрязнением поверхности моря нефтяной пленкой, которые охватывали в основном акватории морских нефтяных промыслов. Несколько позже для исследования устьев рек береговой и шельфовой зоны стала использоваться космическая фотосъемка. Основным предметом этих исследований были геоморфологические процессы в прибрежной зоне в связи с колебаниями уровня моря.

Одной из важных проблем Каспия является проблема получения сопоставимых данных прикаспийских стран по уровню моря. Раньше эта проблема решалась с помощью дорогостоящего и не очень точного метода водной нивелировки. В настоящее время для этой цели используют методы спутниковой геодезии для определения пространственного распределения уровня моря.

Специалисты ГОИНа совместно со специалистами Роскартографии разработали технологию, использующую спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС для привязки нулей уровнемерных постов к Балтийской системе высот. Был выполнен комплекс геодезических работ по привязке реперов и нулей морских уровенных станций и постов северо-западного побережья Каспийского моря к единой высокоточной государственной спутниковой высотной сети России [22]. Для этой цели были использованы измерения с американо-французского спутника Topex/Podeidon, обеспечивающего выполнение дискретных измерений высоты поверхности моря с точностью 2 см при 1-секундном осреднении и имеющего на борту аппаратуру для определения орбиты с такой же точностью в реальном масштабе времени (рис. 3.4).

Кроме того, ГОИНом в 2002 г. были проведены оценки площади затопления дельт Волги (при прохождении весеннего паводка) и Терека (в ходе экстремального высокого летнего паводка).

Использование спутниковой альтиметрии позволяет не только восполнить потерю традиционной информации, но и исследовать изменчивость уровня и динамики Каспийского моря на всей его акватории. Спутниковая альтиметрия обладает большими возможностями и преимуществами по сравнению с наземными средствами наблюдений. Прежде всего, это мгновенная съемка обширных акваторий моря, высокая оперативность получения данных, возможность ежедневного повтора наблюдений, высокое пространственное разрешение, возможность организации оперативного комплексного мониторинга моря. Перечисленные факторы делают данные спутниковых наблюдений высокоэффективными для мониторинга и прогнозирования гидрометеорологического состояния Каспийского моря.

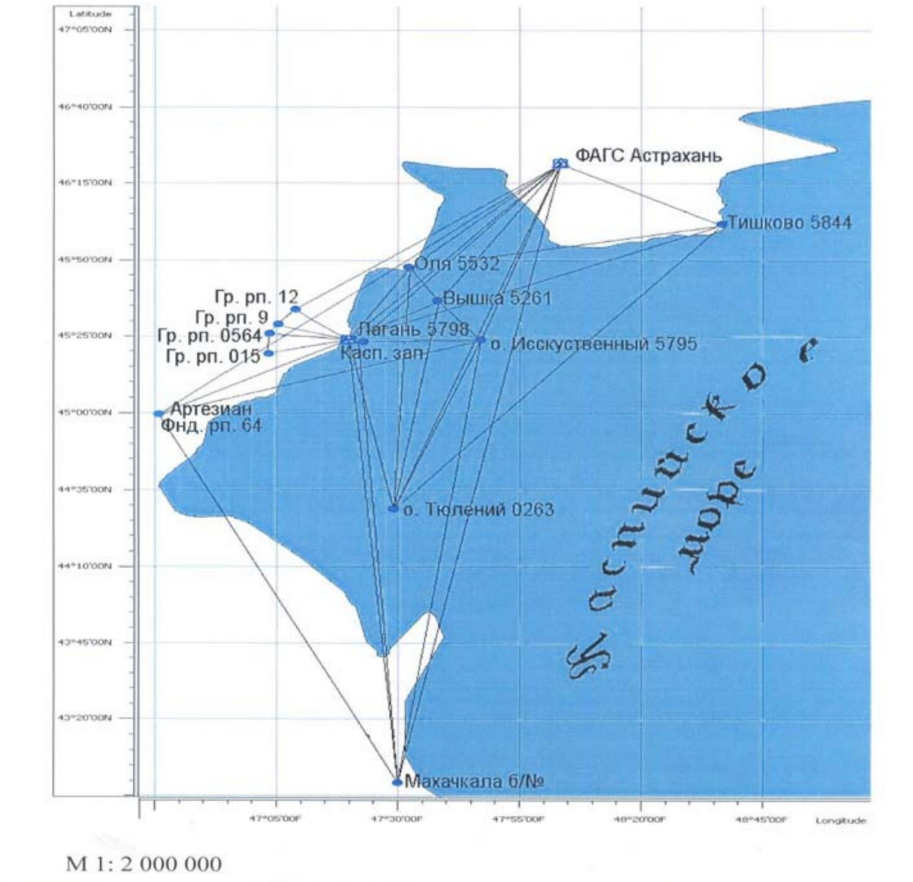


Рис. 3.4. Спутниковая сеть реперов морских уровенных постов на северо-западном побережье Каспийского моря: 5532 – номер пункта, репера; ФАГС Астрахань – пункт спутниковой сети; Гр. рп. – репер уровенной сети.

Для мониторинга уровня Каспийского моря была создана компьютерная база данных альтиметрических измерений высоты поверхности моря за период с 1993 по 2000 г. Для создания базы данных с помощью СУБД dBASE III Plus использовались предварительно обработанные данные альтиметрических измерений, полученные из Геофизического центра РАН. Годовая серия альтиметрических измерений на восьми треках, пересекающих открытую часть моря, включает 36 последовательных циклов с общим числом измерений более 20000. Из этих данных были отфильтрованы случайные «выбросы», связанные с воздействием различных возмущающих факторов (рис. 3.5).

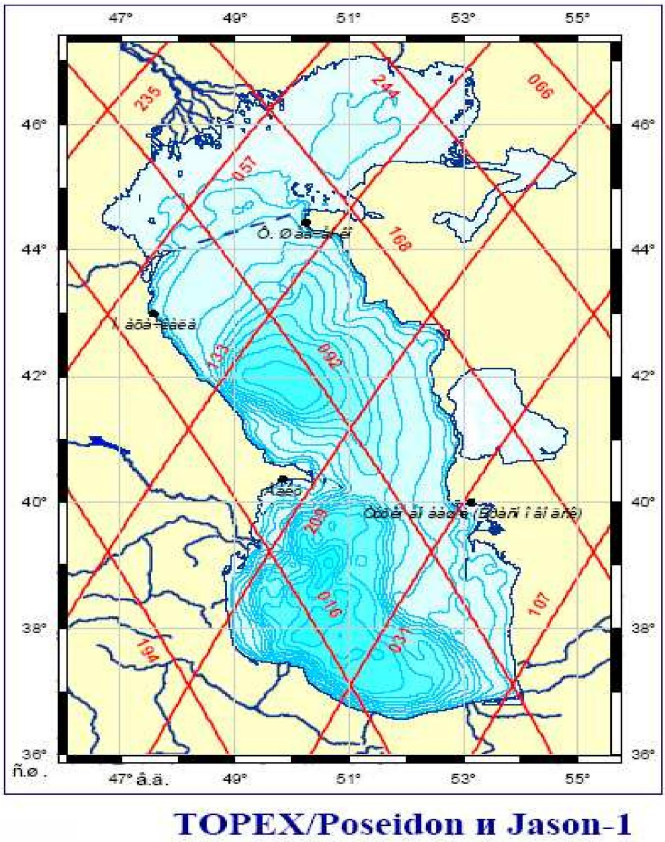


Рис. 3.5. Расположение треков спутников Topex/Podeidon и Jason-1 для Каспийского моря.

Значения средних годовых уровней Каспийского моря, полученные по данным уровенных постов и по альтиметрическим измерениям, тесно связаны между собой; коэффициент корреляции равен 0,97.

Технология спутниковой альтиметрии была также применена группой специалистов Азербайджана, России, Италии и Франции в рамках проекта ALTICOR в 2006 г. для измерения уровня моря всего бассейна Каспия [35]. С этой целью в порту Апшерон (Азербайджан) была открыта опорная пилотная станция по измерению уровня моря с целью создания качественной базы данных для контроля результатов спутниковой альтиметрии на Каспийском море при проведении GPS измерений.

В [12] разработан алгоритм регионального адаптивного ретрекинга (анализа формы отраженных импульсов альтиметра) для обработки

данных спутниковой альтиметрии, созданы специализированные базы данных альтиметрических измерений и цифровая модель средних высот морской поверхности (ВМП) Каспийского моря. Впервые было проведено исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня, скорости приводного ветра, высоты волн и динамики поверхностных течений для различных частей Каспийского моря (включая залив Кара-Богаз-Гол) с использованием спутниковых альтиметрических данных.

На основе анализа межгодовой изменчивости уровня моря по данным альтиметрических измерений выделены периоды роста УКМ (1992–1995 и 2000–2005 гг.) и падения (1995–2001 и 2005–2012 гг.). Для каждого периода рассчитаны скорости изменения уровня, которые варьировали от +20 до -22 см/год.

Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости УКМ лучше всего подходят данные спутников Topex/Poseidon и Jason-1, так как они представляют собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.) с возможностью его продления данными спутника Jason-1 (с января 2002 г. по настоящее время) [12] (рис. 3.6).

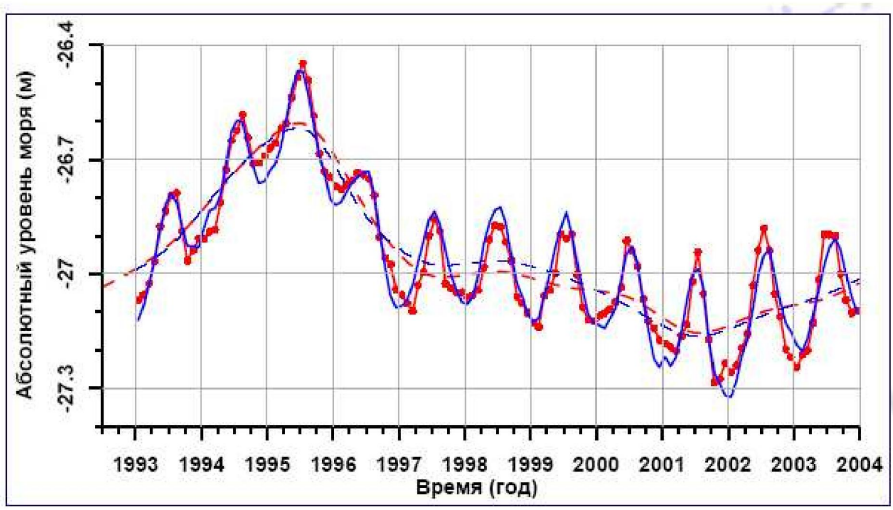


Рис. 3.6. Изменчивость абсолютного уровня Каспийского моря (м) за период с января 1993 г. по декабрь 2003 г. по данным альтиметрических измерений спутников Topex/Poseidon и Jason-1 (синий цвет) и данным уровнемерных постов (красный цвет).

На основе этой информации были получены оценки скорости изменения уровня в разных частях Каспийского моря (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Скорость изменения уровня в разных частях Каспийского моря по данным альтиметрических измерений [11]

Временной интервал	Скорость изменения уровня, см/год			
	Северный Каспий	Средний Каспий	Южный Каспий	Море в целом
Октябрь 1992 – март 1995 г.	18,8 ± 1,8	22,2 ± 1,7	20,4 ± 2,4	20,4 ± 2,2
Ноябрь 1995 – сентябрь 1996 г.	-24,2 ± 2,0	-17,4 ± 2,4	-26,1 ± 2,1	-23,1 ± 2,4
Октябрь 1997 – июнь 1998 г.	-2,5 ± 1,0	-6,9 ± 2,0	-6,3 ± 2,1	-5,3 ± 2,1
Декабрь 1998 – апрель 2001 г.	-7,9 ± 1,3	-6,7 ± 1,6	-12,5 ± 1,8	-9,1 ± 1,9
Декабрь 2002 – декабрь 2003 г.	11,9 ± 2,4	11,8 ± 1,7	17,5 ± 2,9	13,7 ± 2,3

Для залива Кара-Богаз-Гол выделены периоды заполнения залива морской водой с 1992 по 1996 г. и повышения уровня со скоростью 168 см/год, а также периоды роста (2002–2006 гг.) и падения (1996–2001 и 2006–2012 гг.) после выхода водного баланса залива на естественный режим. При этом скорости изменений уровня залива варьировали от +7 до -20 см/год. Создана региональная модель средних ВМП Каспийского моря, на основе которой показана пространственная неоднородность скорости межгодовой изменчивости УКМ, которая хорошо согласуется с особенностями гидрологического режима моря. Кроме того, авторами были построены карты вероятности максимального роста или падения уровня и установлено, что зоны с максимальной изменчивостью уровня расположены в западной части Южного Каспия и в юго-восточной части Среднего Каспия [12].

Для исследования синоптической изменчивости динамики поверхностных течений Каспийского моря использовались карты синоптической динамической топографии, которая определяется как суперпозиция среднеклиматической динамической топографии и аномалий уровня. В качестве среднеклиматической динамической топографии для Каспийского моря использовались результаты расчетов уровня по трехмерной гидродинамической бароклинной модели со свободной поверхностью, созданной сотрудниками лаборатории морских прикладных исследований Гидрометцентра России (2001 г.). Чтобы исключить в случае необходимости межгодовую изменчивость уровня Каспийского моря для расчета аномалий уровня предлагается использовать модель средней высоты морской поверхности, разработанную в Геофизическом центре РАН (рис. 3.7).

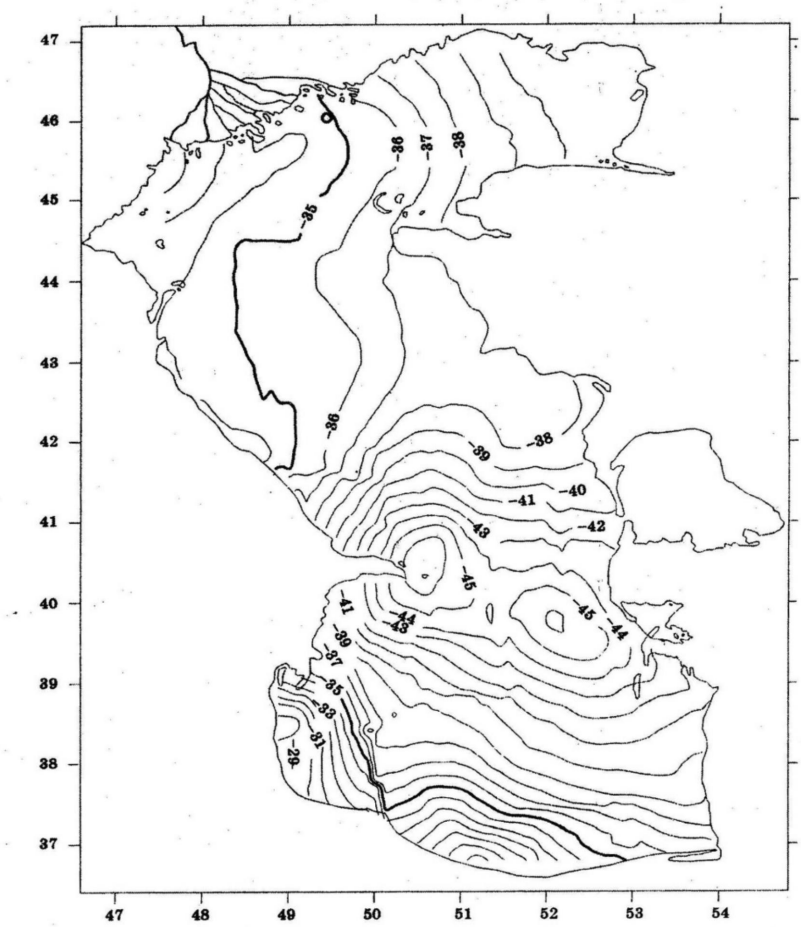


Рис. 3.7. Топография поверхности среднего уровня Каспийского моря (м) относительно поверхности эллипсоида.

Кроме того, на основе данных спутниковой альтиметрии впервые в России проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости стока Волги по изменчивости высоты водной поверхности в устье реки. Полученные данные сравнивались со среднемесячными величинами сброса воды в створе Волгоградской ГЭС. Эффективность комплексного мониторинга Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии показала, что полученный опыт может быть перенесен на многие внутренние и окраинные моря России.

В Геофизическом центре РАН в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований была создана Интегрированная

база данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА). Принцип построения ИБДСА показан на блок-схеме (рис. 3.8). ИБДСА зарегистрирована в Государственном регистре баз данных в Федеральном агентстве по информационным технологиям Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации (свидетельство № 4989 от 19.04.1999 г.).

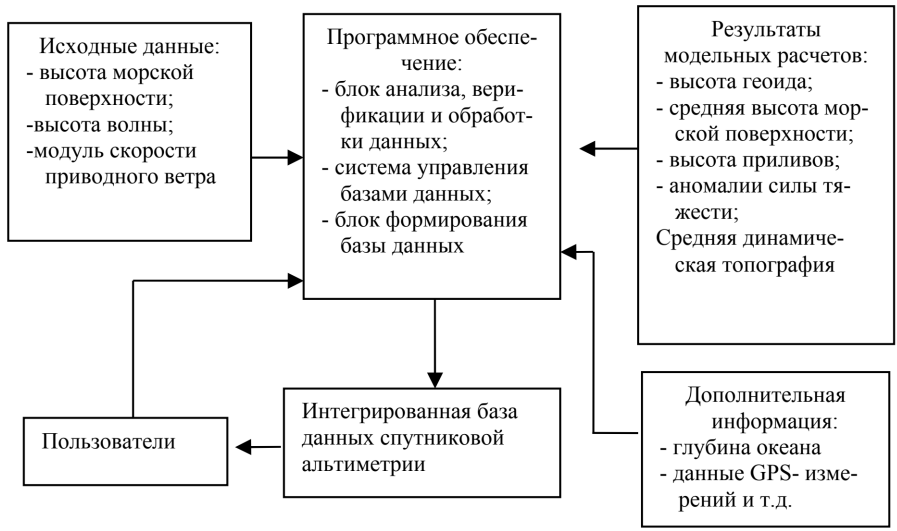


Рис. 3.8. Блок-схема ИБДСА [12].

3.6. Мониторинг загрязненности морской среды Каспия

Загрязнение вод Каспийского моря за последние 40 лет возросло вследствие активной хозяйственной деятельности на его акватории и на водосборной территории [14]. Замкнутость моря предопределяет повышенную опасность загрязнения водной среды и берегов.

Чтобы разработать систему мер, направленных на минимизацию последствий аварийных ситуаций, принимая во внимание гидрометеорологические условия региона, наличие сил и средств, предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти, необходимо до возникновения аварийной ситуации сделать оценки возможных последствий разливов для экосистемы региона. С этой целью необходимо для каждого региона российского шельфа, где проводятся работы по разведке, добыче или транспортировке нефти, провести оценку риска аварийных разливов нефти.

Инструментом для такого анализа служит расчетно-модельный комплекс (РМК) «SPILLMOD», созданный специалистами ГОИНа для решения задач, связанных с оценкой распространения аварийных разливов нефти [21]. РМК «SPILLMOD» позволяет рассчитывать размеры, толщину, конфигурацию и положение нефтяного разлива в море и отображать результаты на электронных картах. В 2008 г. была введена в опытную эксплуатацию система оперативной поддержки реагирования на аварийные ситуации, связанные с разливом нефти и нефтепродуктов на Каспийском море, путем размещения РМК «SPILLMOD» на вычислительных средствах Гидрометцентра России.

В 2012 г. на Северном Каспии были возобновлены полномасштабные экспедиционные исследования состояния загрязненности морской среды в северо-западной части Каспийского моря в соответствии с Программой мониторинга трансграничных водных объектов Каспийского моря на 2012–2014 гг., утвержденной Росгидрометом. Объектом исследований в соответствии с данной программой являлась северо-западная часть Каспийского моря, ограниченная со стороны суши береговой линией в пределах Российской Федерации, а со стороны моря – международными линиями разграничения морского дна в целях недропользования, установленными в соответствии с соглашениями, которые Российская Федерация заключила с Республикой Казахстан и Азербайджанской Республикой в период с 1998 по 2002 г. Данная акватория именуется российским сектором недропользования Каспийского моря (РСНП). Соответственно к трансграничным водным объектам Каспийского моря относятся Северный и Средний Каспий – части моря, имеющие черты собственного режима, в пределах которых расположен РСНП.

Основные задачи Программы мониторинга трансграничных водных объектов Каспийского моря на 2012–2014 гг. определены следующим образом:

– возобновление систематических наблюдений за загрязнением морской среды на вековых разрезах Северного Каспия, где они были прекращены в начале 90-х годов прошлого столетия;

– расширение сети наблюдений за загрязнением морской среды за счет станций, расположенных по периметру РСНП, и станций международной программы мониторинга;

– совершенствование методов и технологий диагноза загрязненности, оценки качества морской среды;

– увеличение полноты, достоверности и значимости информации о состоянии и загрязнении Каспийского моря, предоставляемой потребителям;

– выполнение международных обязательств Российской Федерации по осуществлению совместного мониторинга Каспийского моря.

В 2013 г. в рамках этой программы были проведены три экспедиции и выполнен большой объем лабораторных исследований, в которых принимали участие специалисты оперативно-производственных и научных учреждений Росгидромета: Астраханского и Дагестанского ЦГМС, КаспМНИЦ, ГОИН, научно-производственного объединения «Тайфун». На основе полученных материалов был подготовлен 4-томный научно-технический отчет. Экспедиционные работы выполнялись в 10 районах и включали семь разрезов (в т. ч. три «вековых») и 104 океанографических станции (рис. 3.9).

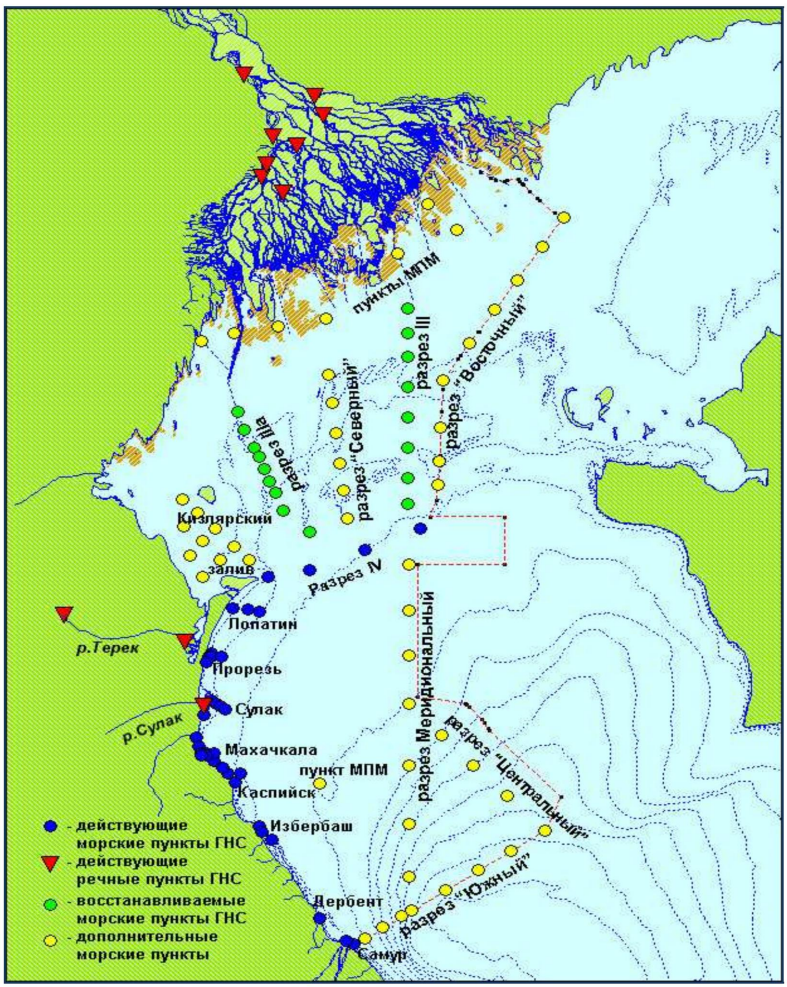


Рис. 3.9. Схема расположения пунктов наблюдений за состоянием и загрязнением трансграничных водных объектов Каспийского моря в 2013 г.

Экспедиционные работы выполнялись в три этапа. Первый этап охватывал период с 18 июля по 5 августа, второй – с 5 сентября по 2 октября, третий – с 10 ноября по 16 декабря 2013 г. На втором этапе исследования проводились по полной программе, на первом и третьем – по сокращенной (летом район исследований покрывал открытую часть Северного Каспия и прибрежную акваторию Среднего Каспия; поздней осенью – Северный Каспий и прибрежную акваторию Среднего Каспия). Для удобства акватория РСНП была разбита на две зоны ответственности: 1) зона ответственности Астраханского ЦГМС, которая включает в себя Северный Каспий (за исключением Кизлярского залива); 2) зона ответственности Дагестанского ЦГМС, которая включала в себя Кизлярский залив и Средний Каспий.

В экспедиционных работах принимали участие суда, оборудованные всем необходимым для проведения экспедиционных работ в мелководных и глубоководных районах Каспийского моря (спутниковой навигационной системой, метеорологической станцией, приборами для отбора проб и проведения химических анализов). Все судовые метеорологические, гидрологические и гидрохимические наблюдения, а также отбор проб воды, донных отложений и взвеси проводились в соответствии с требованиями нормативно-технических документов, наставлениями, руководствами, методическими указаниями. Для проведения наблюдений и измерений использовались поверенные средства, аттестованные в Государственном реестре средств измерения. Организационно-методическое и научно-техническое обеспечение работ осуществлялось КаспМНИЦ. К научно-техническому обеспечению работ привлекались ГОИН, НПО «Тайфун» и ООО «Инфомар».

3.7. Концепция развития интегрированной системы гидрометеорологического мониторинга в бассейне Каспийского моря

В связи с периодическими многолетними повышениями и понижениями уровня Каспийского моря, постоянными изменениями положения береговой линии, для решения социально-экономических и экологических проблем побережья Каспия необходимо разработать систему гидрометеорологического мониторинга для решения задач природно-хозяйственного комплекса этого региона. Основой системы мониторинга служит сеть гидрометеорологических станций и постов и данные спутниковых наблюдений.

Существующие в системе Росгидромета прогностические технологии, современные автоматизированные средства обработки данных,

а также опыт, накопленный при создании и эксплуатации прогностических моделей и технологий, позволяют сформулировать задачу создания региональной системы информационного обеспечения природнохозяйственной деятельности на Каспийском море [31]. Основой такой системы является оперативный гидрометеорологический мониторинг в бассейне Каспийского моря. Результаты этого мониторинга необходимы как для уточнения основных составляющих водного и теплового балансов Каспийского моря, так и для решения задач краткосрочного и долгосрочного прогноза уровня моря и штормовых нагонов, волнения, течений и др.

Любой мониторинг нуждается в наиболее высокой степени автоматизации. Он должен быть тщательно спланирован и осуществлен. Поэтому необходимо

– контролировать и улучшать полноту, качество и своевременность поступления данных;

– извлекать максимум данных на стадии их усвоения прогностическими моделями;

– сводить к минимуму потери данных при их прохождении по каналам связи.

Использование этих резервов может существенно удешевить расходы на поддержание системы мониторинга и прогноза гидрометеорологических параметров морской среды. В соответствии с этими задачами оперативная система гидрометеорологического мониторинга в Каспийском регионе должна состоять из

– технологической линии приема и предварительной обработки данных гидрометеорологических наблюдений (раскодировка телеграмм, контроль качества данных, обработка первичной спутниковой информации);

– сопряженных подсистем глобального и регионального четырехмерного усвоения данных наблюдений;

– интегрированной технологической линии метеорологических и морских прогнозов;

– банка оперативной гидрометеорологической информации (данные наблюдений, анализы и прогнозы) (рис. 3.10).

Система должна работать в режиме, близком к реальному времени. Информация по диагнозу и прогнозу гидрометеорологических элементов должна обновляться ежесуточно и быть доступной по электронным каналам связи для всех пользователей в Каспийском регионе. Система должна быть привязана к

– каналам связи ГСТ;

– оперативным моделям циркуляции атмосферы и моря, к системе усвоения данных;

– приемным системам первичной спутниковой информации.



Рис. 3.10. Блок-схема гидрометеорологического мониторинга на Каспийском море.

Основой для системы мониторинга может послужить комплекс Авиаметтелеком – ГВЦ – НИЦ «Планета» – Гидрометцентр России, располагающий современными средствами автоматизированного приема и обработки наземной и спутниковой информации. Техническим ядром этого комплекса являются быстродействующие ЭВМ, которые связаны с периферийными системами ГИС-Метео, ПЭВМ, рабочими станциями и базами данных с выходом на внешние каналы связи МЕСОМ, Интернет.

Структура мониторинга должна включать разнообразную климатическую информацию. В этой связи необходимо отметить созданный во ВНИИГМИ-МЦД в рамках ЕСИМО Электронный атлас Каспийского моря и прибрежных территорий, который позволил получить новые оценки климатических характеристик, в том числе по основным гидрометеорологическим параметрам, а также проанализировать тренды изменений важнейших гидрометеорологических параметров по данным

прибрежных гидрометеостанций [5]. По этим данным выявилось, что характерной особенностью изменчивости характеристик Каспийского моря в последние десятилетия является повышение температуры воды, повышение уровня моря, уменьшение солености. Наиболее значимо эти изменения проявляются в Северном Каспии, причем скорость изменения имеет тенденцию к повышению в последние десятилетия.

Для оценки многолетней изменчивости уровня на базе Электронного атласа были выполнены расчеты тренда многолетнего хода среднегодовых высот уровня моря на сети прибрежных гидрометеорологических станций. Используя технологию формирования Электронного атласа, были проведены работы по контролю исходных данных с учетом изменения «нуля поста», поэтапное осреднение данных наблюдений, расчет различных статистических характеристик и получение выходной продукции в табличном и графическом видах (рис. 3.11). Из рис. 3.11 видно, что за период 1977–2003 гг. рост уровня составил 2 м.

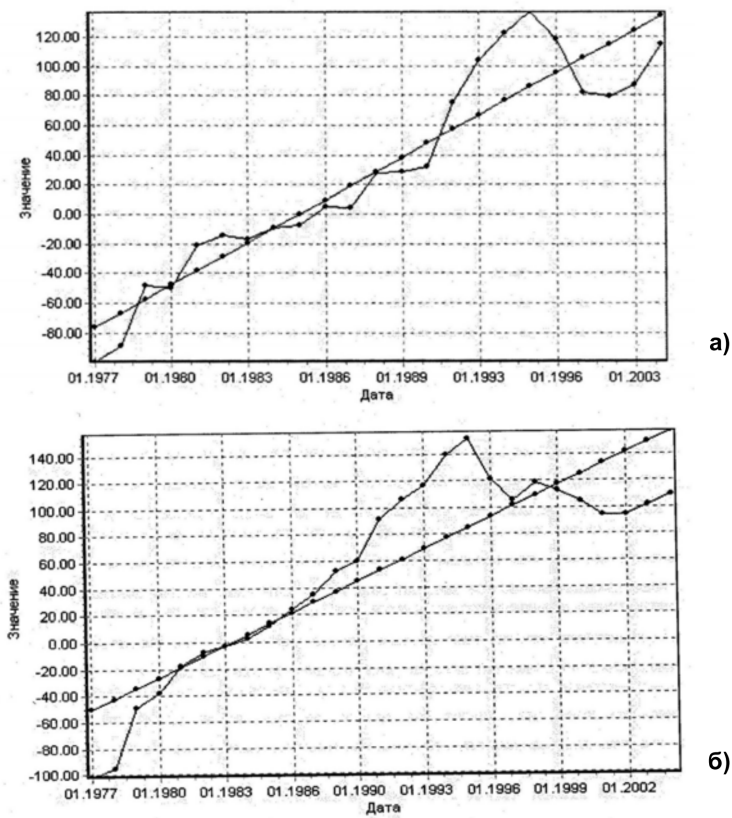


Рис. 3.11. Многолетний ход уровня моря и его тренд на ГМС: о. Тюлений (а); Махачкала (б).

Глава 4.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

4.1. Общие положения

Изменения уровня моря могут быть двух типов. К первому типу относятся, так называемые эвстатические изменения. К ним относятся вековые, многолетние, межгодовые и сезонные колебания, отражающие изменение объема вод моря, интенсивность которых определяется непостоянством водного баланса. Ко второму типу относятся непериодические колебания уровня, обусловленные сгонно-нагонными явлениями вследствие действия ветра и влияющие только на перераспределение водных масс по акватории моря. Оба типа колебаний в комплексе создают сложный пространственно-временной режим уровня моря.

Изучению разномасштабной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря посвящено большое количество работ. Как показывают исследования, колебания УКМ представляют собой типичный полициклический процесс с широким спектром, имеющим пики на частотах суточных, сезонных, межгодовых и вековых колебаний.

Статистические характеристики УКМ – среднегодовой, максимальный и минимальный уровень, характеристики временной и пространственной изменчивости – определяются многими физико-географическими и геофизическими факторами. Например, годовой ход уровня моря зависит от годового хода притока речных вод, осадков и испарения на водосборном бассейне Каспия. В свою очередь, осадки и испарение определяются общими процессами циркуляции атмосферы: положениями циклонов и антициклонов и траекториями их движения, а также метеорологическими факторами: температурой, влажностью воздуха и скоростью ветра. Все они подвержены пространственно-временной изменчивости и комплексно воздействуют на режим

уровня Каспийского моря. Таким образом, формирование уровенного режима моря является сложным многофакторным процессом.

В настоящее время существуют методы, позволяющие оценить влияние этих факторов на речной сток, осадки и испарение, и следовательно, и на колебания уровня моря. Для этого используются измерения уровня в различных пунктах моря, данные о стоке рек, впадающих в Каспийское море, и метеорологическая информация. Таким образом, колебания уровня моря, будучи зависимыми от изменчивости большого числа факторов, представляют собой стохастический процесс и должны изучаться методами теории вероятностей и математической статистики.

4.2. Многовековая и вековая изменчивость

Вопросам многовековой и вековой изменчивости уровня Каспийского моря посвящено значительное количество исследований [1–9, 11–16, 25–28, 32–34]. Существует много точек зрения относительно вековых колебаний УКМ. Считается, что процесс формирования уровня Каспийского моря, с одной стороны, определяется глобальными геологическими процессами, а с другой – региональными климатическими особенностями. Если в раннем неогене преобладающее влияние на уровень моря оказывали тектонические и в меньшей степени климатические факторы, то на современном этапе на первый план выступают климатические, техногенные и антропогенные факторы [7–9, 13, 25–28, 32–34].

По мнению П.В. Федорова [33, 34], периодические колебания уровня Каспийского моря характерны для всей его новейшей геологической истории. Превращение Каспия в изолированный бассейн в конце среднего плиоцена (6 млн лет назад) привело к возникновению озерного режима, где объем водной массы (уровень) стал определяться глобальными и региональными климатическими изменениями. Он отмечает, что в плейстоцене было несколько трансгрессивно-регрессивных циклов, обусловленных крупными климатическими колебаниями (ледниковые и межледниковые эпохи), а также циклы с более мелкими осцилляциями.

Многолетнее изучение плейстоценовой истории Каспия показало, что трансгрессиям предшествовали регрессии, часто довольно глубокие (ниже 100 м от современного уровня). Трансгрессивные циклы происходили в эпохи таяния ледников и в первую половину последующего межледниковья. Тектонические движения, деформировавшие Каспийскую впадину, проявлялись главным образом в изменениях ее формы и в перераспределении водной массы, но не играли существенной роли в изменениях объема водной массы и уровня.

Трансгрессии и регрессии моря в дочетвертичный период определялись в основном тектоническими процессами и горообразовательными движениями, а в четвертичный период колебания уровня были обусловлены исключительно климатической изменчивостью.

С VII по IV в. до н. э. уровень Каспийского моря был на 20 м выше уровня Мирового океана и море по размерам было значительно больше современного. В конце IV в. до н. э. Каспий имел наивысший уровень за историческое время. Затем он начал падать. Свидетельства об этом есть в работах Эратосфена (I в. до н. э.), Плиния Старшего (I в. до н. э.) и других географов и историков древнего мира. Они объясняли это тем, что климат в бассейне Волги становился суше, сток Волги и других рек, впадающих в Каспийское море, уменьшался. Так продолжалось более тысячи лет и уже в VII в. н.э. уровень Каспия был на 56 м ниже уровня Мирового океана. Затем в VIII веке началось значительное увлажнение климата, и Волга начала нести больше воды, что привело к повышению уровня моря. В XIV веке море поднялось на 44 м относительно уровня VII века.

Палеогеографические реконструкции, основанные на данных детальных геолого-геоморфологических исследований каспийского побережья, проведенные в последние десятилетия С.И. Варущенко и др. [7–9], Г.И. Рычаговым [25–28] показали, что в плейстоцене (последние 700–500 тыс. лет) уровень Каспийского моря претерпел крупномасштабные колебания в диапазоне около 200 м: от -140 до +50 м БС, и за этот отрезок времени Каспий «испытал» четыре крупных трансгрессии. Материалы геоморфологических исследований показали, что в плейстоценовой истории развития Каспийского моря выделяются четыре основных этапа (эпохи): бакинский (700–500 тыс. лет назад), хазарский (350–70 тыс. лет назад), хвалынский (35–10 тыс. лет назад) и новокаспийский (8–0 тыс. лет назад). Эти этапы соответствуют трансгрессивно-регрессивным ритмам водоема (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Изменение уровня Каспийского моря за последние 400 тыс. лет (по С.И. Варущенко и др. [8]).

Каждый этап включал несколько трансгрессий и регрессий. В эпоху бакинской трансгрессии уровень моря поднимался до отметки 5 м БС. Во время хазарского этапа были две трансгрессии: раннехазарская (250–300 тыс. лет назад, максимальный уровень 10 м БС) и позднехазарская (100–200 тыс. лет назад, наивысший уровень -15 м БС). Хвалынский этап в истории Каспия включал две трансгрессии: самую крупную за период плейстоцена раннехвалынскую (40–70 тыс. лет назад, максимальный уровень 47 м БС, что на 74 м выше современного) и позднехвалынскую (10–20 тыс. лет назад, подъем уровня до 0 м БС). Эти трансгрессии разделила глубокая енотаевская регрессия (22–17 тыс. лет назад), когда уровень моря был на 37 м ниже современного. Значительные колебания уровня Каспия происходили и во время новокаспийского этапа его истории, совпавшего с голоценом (последние 10 тыс. лет) от -34 до -20 м БС. После мангышлакской регрессии (10 тыс. лет назад, понижение уровня до -50 м БС) отмечались пять стадий новокаспийской трансгрессии, разделенные небольшими регрессиями. За историческое время (2000 лет) диапазон изменения среднего уровня Каспийского моря составил примерно 7 м (от -32 до -25 м БС) (рис. 4.2).

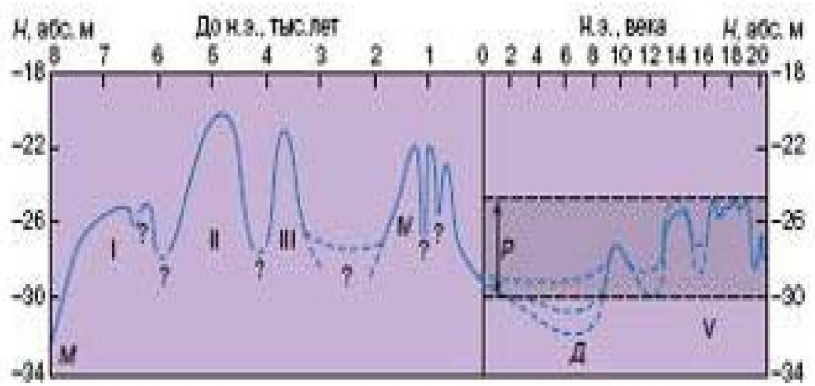


Рис. 4.2. Колебания уровня Каспийского моря за последние 10 тыс. лет [25]. *Р* – естественный размах колебаний уровня Каспийского моря при климатических условиях, свойственных субатлантической эпохе голоцена (зона риска); I–IV - стадии новокаспийской трансгрессии; *М* – мангышлакская, *Д* – дербентская регрессии.

Минимальный уровень в последние 2000 лет был во время дербентской регрессии (VI–VII в. н. э.), когда он снижался до -32 м БС. За время, прошедшее после дербентской регрессии, средний уровень моря изменялся в еще более узком диапазоне от -30 до -25 м БС. Этот диапазон изменения уровня Г.И. Рычаговым назван «зоной риска», которая

должна учитываться при хозяйственном использовании береговой зоны Каспия. Этот вывод имеет прогностическое значение, свидетельствующее о том, что если в ближайшее время не произойдет экстраординарных изменений климатических условий в бассейне Каспийского моря, то по Рычагову не следует ожидать поднятия его уровня выше отметки -25 м БС, а с учетом хозяйственной деятельности – выше -26 м БС.

Материалы геоморфологических исследований показывают, что размах колебаний УКМ при уменьшении анализируемых периодов времени сокращается. За последние 500–700 тыс. лет он превышал 100 м, в голоцене (последние 10 тыс. лет) достигал 15 м (между отметками -20 и -35 м БС), за последние 2 тыс. лет 12 м, а за время инструментальных наблюдений (с 1830 г. по настоящее время) примерно 4 м.

В эти периоды площадь моря по сравнению с современной увеличивалась в несколько раз, и в несколько раз сокращалась. Наиболее низкие уровни, достаточно достоверно установленные, наблюдались в предновокаспийское, предхвалынское, предхазарское и особенно предбакинское время (более 500 тыс. лет назад), когда уровень моря располагался на абсолютных отметках -150 м БС.

Эпохи наиболее низкого стояния уровня были переломными в эволюции Каспийского бассейна, так как каждая трансгрессия, следовавшая за низким стоянием уровня, характеризовалась своими специфическими особенностями. На границе хазарского и хвалынского этапов уровень моря понижался до -50 м БС, а в период позднехвалынской трансгрессии повышался до отметки +75 м БС. Хвалынская трансгрессия (около 60 тыс. лет назад) и все последующие, значительно меньшие по степени повышения уровня моря, зависели, в основном от глобальных изменений климата. На общем фоне крупномасштабных изменений уровня моря отмечались второстепенные, более мелкие и частые колебания уровня, подчиненные общей тенденции трансгрессии или регрессии моря. С третичного периода до наших дней на месте Каспийского моря сменилось четыре различных по своим очертаниям и характеру бассейна: Понтическое, Киммерийское, Акчагыльское и Апшеронское моря. Еще более изменяясь в бакинский и новокаспийский этапы, море постепенно принимало современные очертания.

Таким образом, современный облик Каспийского моря сложился, вероятно, в последние 10–12 тыс. лет (в голоцене). Реконструкции колебаний уровня Каспийского моря за 10–12 тыс. лет, выполненные рядом исследователей [8, 9, 13, 25–28] на основании геологических, палеогеографических и исторических данных, свидетельствуют о значительных колебаниях уровня моря, связанных в основном с изменениями климатических условий в голоцене. Вероятный размах колебаний уровня Каспийского моря за этот период достигал 15 м

(от максимальных отметок в среднем -20 м БС, наблюдавшихся около 7 тыс. лет назад, до -35 м БС в середине первого тысячелетия нашей эры).

За последние 10 тыс. лет уровень Каспия менялся в пределах от -20 до -40 м. В IV–II вв. до н. э уровень Каспия был весьма низок несмотря на то, что, по данным эллинистических авторов, воды Амударьи достигали Каспийского моря. Следует отметить, что уровень моря в IV–II вв. до н. э. находился на отметке не выше -36 м БС, в VI в. стоял на отметке -34 м БС, в X в. на отметке -29 м БС, в начале XIV в. на отметке -19 м БС, а в настоящее время на отметке около -27 м БС.

Древние источники дают крайне противоречивые сведения о Каспийском море, что связано с различными стадиями его развития. Поэтому археологические исследования, как на суше, так и на шельфе Каспия, приобретают особую значимость в плане расшифровки наиболее древних пластов истории народов Каспийского региона.

С понижением УКМ часть древних людей возвращались в прежние места обитания. Каждый раз с поднятием уровня Каспия они вынуждены были покидать благодатную территорию и переселяться в другие области, не занятые водой. Учитывая динамику уровня Каспийского моря, подобные волны расселения людей, ранее компактно проживающих на территории Северного Каспия, были неоднократными.

На протяжении исторического периода (3600 лет) максимальные подъемы уровня фиксировались в XIII, VII и II вв. до н. э. и в II, IV, XI, начале XIII, конце XVIII и начале XIX вв. н. э. Так, например, на протяжении 1580–1780 гг. уровень в целом повышался, но в отдельные периоды (1699–1720 и 1743–1765 гг.) понижался. После 1780 г. уровень моря в основном понижался, но в отдельные периоды (1796–1804 и 1978–1995 гг.) повышался. За последнее тысячелетие самый низкий уровень был в XI–XIII вв. По данным П.А. Православлева и М.Ф. Розена, тогда уровень моря был на 4–5 м ниже, чем в 1925 г., так как только в этом случае можно было добраться по суше до Караван-Сарая, остатки которого сейчас затоплены водами Бакинской бухты. Постройка Караван-Сарая относится к 1234–1235 гг. Конечно, древние строители знали, что на памяти нескольких поколений, холм, на котором построено это сооружение, не затапливался морем. На основании своих исследований Караван-Сарая Н.В. Ханыков дает отметку уровня моря для XII века -29,18 м. Близкую к этой цифре (-30,00 м) принимает и Б.А. Аполлов [4].

На рис. 4.3 хорошо просматриваются основные особенности хода УКМ за различные исторические периоды: тысячелетние (верхняя кривая), вековые (средняя кривая) и межгодовые (нижняя кривая) колебания.

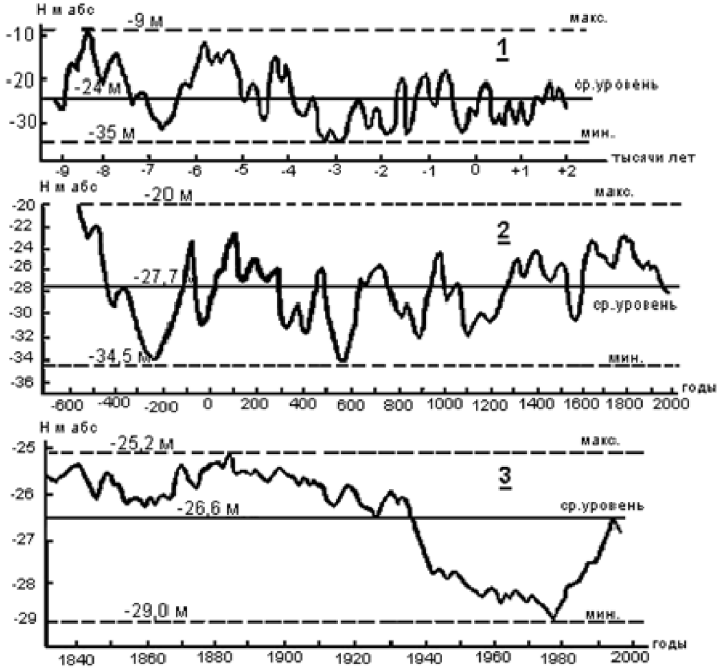


Рис. 4.3. Изменчивость уровня моря и его характеристики за различные периоды времени.

Верхняя кривая указывает на наличие колебаний с максимальной амплитудой 25 м (за последние 10 тыс. лет), средняя кривая, охватывающая последние 2,5 тыс. лет, указывает на наличие максимальной амплитуды 15 м. Только в течение последних 2 тыс. лет наблюдалось шесть крупных трансгрессий уровня моря с амплитудой колебаний в пределах 5–10 м. На современном этапе развития, начало которого связывают с окончанием последней стадии новокаспийской трансгрессии, Каспийское море представляет собой бассейн, пребывающий в глубокой регрессионной стадии. Ее начало относится ко второй половине хвалынской эпохи, когда отступающее море миновало отметку 0 м БС. С этого времени и в течение голоцена уровень Каспия падал, лишь временами испытывая небольшой по длительности и амплитуде подъем, никогда не достигавший 0 м БС.

Скудные сведения об уровне Каспийского моря с XП в. до н. э. в работах многих ученых, географов и литераторов того времени были получены на основании косвенных и весьма ненадежных данных, имеющих различное толкование. Вполне естественно, что все сведения

об отметках уровня моря в геологическом прошлом носят условный характер. Современные археологические раскопки указывают лишь на ориентировочные значения отметок уровня моря за этот период. Тем не менее палеогидрологические исследования режима Каспийского моря могут оказать определенную помощь как в оценке современного режима и объяснении колебаний уровня, так и в поиске новых путей подхода к разработке методов его сверхдолгосрочного прогноза.

Ретроспективный геолого-геоморфологический анализ за последние 2–2,5 тыс. лет позволил определить естественный ход уровня Каспийского моря в голоцене. Результаты этого анализа однозначно свидетельствуют, что с начала субатлантической эпохи голоцена уровень моря, после дербентской регрессии (-32…-34 м БС) в I тысячелетии н. э не поднимался выше -25 м БС и не опускался ниже -29…-30 м БС. Размах колебаний уровня моря за этот период составил около 5 м [25–28].

От начала нашей эры до X в. описания колебаний уровня моря носят более достоверный характер по сравнению с предшествующим периодом. Появляются уточненные карты Каспийского моря, позволяющие относительно объективно определить отметки уровня за первое тысячелетие нашей эры, восстановленные также по косвенным данным. Установлено, например, что наиболее низкое положение, на отметке -32 м БС, уровень моря занимал в XI–XП вв., а самое высокое -24 м БС в начале X1X в. (1805 г.). В XVI–XIX вв. размах колебаний уровня Каспийского моря не превышал 5 м. Было установлено, что в отдельные периоды с X по XVI в. уровень опускался ниже современного на 12 м [5, 33].

Основная причина значительного понижения уровня Каспия между X и ХШ вв., по мнению многих авторов, заключалась в прекращении стока Амударьи в Каспийское море, который существовал в течение 14 веков (с V в. до н. э. до X в. н. э). С первой половины ХШ века до середины XVI в. сток Амударьи в Каспий возобновился, и уровень моря заметно повысился: размах его колебаний составил за эти три неполных столетия около 6 м.

Данные отметок уровня моря, полученные для отдельных лет и периодов от начала нашей эры до середины XVI века, показывают, что уровень колебался в значительно меньшем диапазоне, чем до нашей эры: размах вековых колебаний уровня за 16 столетий, по Б.А. Аполлову [4], составил около 8 м (-24,5...-32,5 м), а за 12 веков до н.э. размах колебаний уровня моря достигал 15 м. В I в. до н.э., т. е. более 2 тыс. лет тому назад уровень моря находился на отметках выше -14 м БС.

Наиболее важное практическое значение имеет изучение колебаний уровня Каспийского моря за последние 500 лет, в течение которых

происходила неоднократная смена периодов низкого и высокого его положения. Восстановленный Л.С.Бергом ход уровня моря с середины XVI в. до начала организации инструментальных наблюдений (1550–1830 гг.) свидетельствует, что за историческое время уровень Каспия не повышался более чем на 5 м относительно уровня 1925 г. (-26,6 м БС) [5] (рис. 4.4).

Кривая на рис. 4.4 показывает, что в течение последних 500 лет ход УКМ был очень неравномерным. Начиная с 1550 г. уровень моря поднялся почти на 2 м, около 1680 г. достигнув максимального значения (-25 м БС), после чего резко понизился также на 2 м, достигнув отметки -27,0 м БС, т. е. стояния уровня около отметки -25 м БС не наблюдалось. В то время как относительная продолжительность максимального стояния уровня в период с 1750 по 1820 г. составляла примерно 70 лет (при максимальном уровне -22,5 м БС), относительная продолжительность максимального стояния уровня в период с 1820 по 1930 г. составляла порядка 90 лет (при максимальном уровне -26 м БС). Периоды понижения и повышения уровня также различаются.

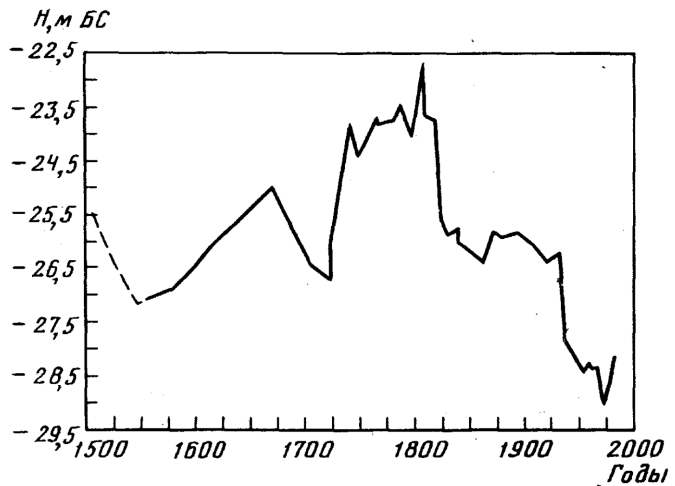


Рис. 4.4. Вековые изменения УКМ за 1500–1900 гг. по данным Л.С. Берга [5] и дополненные за 1901–1983 гг. данными ГОИНа.

В середине XVI в. уровень моря находился на отметке -26,6 м, через столетие произошло повышение уровня до отметки -23,9 м, затем он вновь стал падать и в начале XVIII в. достиг минимального значения -26,0 м. После резкого падения начался длительный период высокого стояния уровня, достигшего в начале XIX в. наиболее высоких отметок -22,5 м БС. После этого уровень моря стал падать и к 1830 г. опустился до -25,9 м БС.

Е.А. Шлямин, анализируя кривую хода уровня моря, построенную Бергом, обнаружил одну интересную особенность в многолетнем ходе УКМ. Годы с наибольшим уровнем группируются около 1650, 1770 и 1900 гг., а годы с низкими уровнями – около 1590, 1710 и 1840 гг., т. е. длительность циклов составляет примерно 120 лет. Если экстраполировать эту особенность, то к годам с низким стоянием уровня можно отнести 1960 и 2080 гг., а к годам с высоким стоянием уровня 2020 и 2140 гг. В 1962 г. уровень Каспия находился в периоде временной относительной стабилизации, и, согласно гипотезе Е.А. Шлямина, были основания ожидать, что лет через 15, т. е. в 1977 г., начнется подъем уровня, что и произошло с точностью до одного года.

4.3. Многолетняя и межгодовая изменчивость

Исследованиям многолетней и межгодовой изменчивости УКМ посвящено много работ [1, 4, 6, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 31]. С начала инструментальных наблюдений (1830 г.) до начала XX в. колебания уровня моря были незначительными и варьировали около средней отметки -25,8 м БС. Наиболее низкое положение уровня моря (на отметках ниже -26,5 м БС) отмечалось в 1850-х и середине 1920-х гг., а наиболее высокое (-25,5 м БС) в начале 1880-х годов.

На рис. 4.5 [32] представлены эмпирические кривые повторяемости и обеспеченности среднегодовых значений уровня моря за 1837–2012 гг.

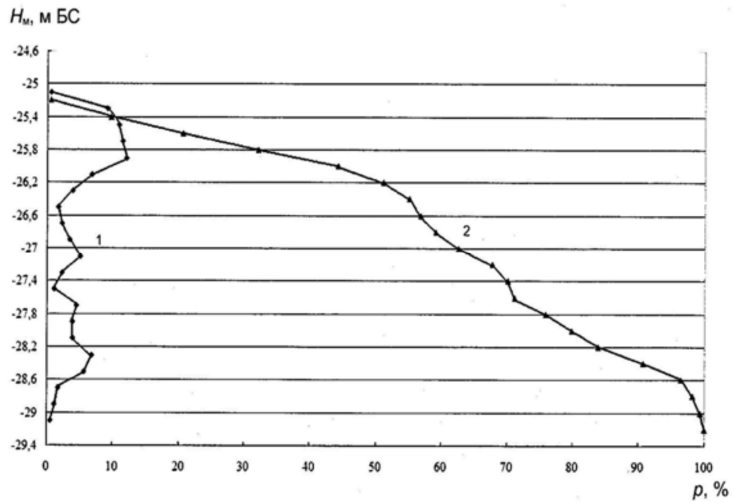


Рис. 4.5. Эмпирические кривые повторяемости (1) и обеспеченности (2) среднегодовых УКМ (ГП Махачкала) за 1837–2012 гг. [32].

На кривой повторяемости уровней четко проявляются два диапазона отметок, около которых уровень моря наблюдается наиболее часто. Так, основной диапазон находится между отметками -25,2 и -26,2 м БС, а второй – между отметками -28,0 и -28,6 м БС.

За 1837–2012 гг. уровень моря испытал как длительное и значительное понижение до 1977 г., так и резкое и продолжительное повышение с 1978 по 1995 г. Подробное разделение полного ряда наблюдений за уровнем моря по посту Махачкала представлено в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Изменение среднегодовых значений уровня Каспийского моря (ГП Махачкала) в характерные периоды с 1837 по 2012 г. [31]

Период (число лет)	Уровень, м БС		Изменение уровня	
	в начале периода	в конце периода	м	см/год
1837–1853 (17)	-25,25	-26,08	-0,83	-4,9
1854–1882 (29)	-26,08	-25,12	+0,96	+3,3
1883–1929 (47)	-25,12	-25,88	-0,76	-1,6
1930–1941 (12)	-25,88	-27,84	-1,96	-16,3
1942–1977 (36)	-27,84	-29,01	-1,17	-3,2
1978–1995 (18)	-29,01	-26,66	+2,35	+13,1
1996–2012 (17)	-26,66	-27,57	-0,91	-5,4
1882–1977 (96)	-25,12	-29,01	-3,89	-4,1
1837–2012 (176)	-25,25	-27,57	-2,32	-1,3

Из данных табл. 4.1 видно, что скорость изменения среднегодовых значений уровня достигала больших величин: -16,3 см/год в период снижения уровня в 1929–1941 гг. и 13,1 см/год во время подъема уровня в 1978–1995 гг.

Начиная с 1890 г. уровень моря характеризовался непрерывным снижением. На общем фоне понижения уровня моря отчетливо выделяются характерные периоды падения и повышения уровня, отражающие состояние водного баланса моря и тесно связанные с развитием различных эпох атмосферной циркуляции. В начале XX столетия (1900–1929 гг.) высокое и относительно стабильное положение уровня было связано с развитием западной формы циркуляции и активностью циклонических процессов в водосборной части бассейна, что, в свою очередь, определило обильное выпадение атмосферных осадков, многоводность Волги и, как следствие, высокое положение уровня моря. Незначительные колебания уровня моря (±0,5 м) происходили около отметки -26,20 м. Слабо выраженная тенденция снижения уровня моря составила за 30-летний период -0,34 м.

Значительное снижение уровня в 1929–1941 гг. было обусловлено антициклоническим режимом погоды, установившимся в пределах всего бассейна Каспия. Дефицит приходной составляющей водного баланса за счет маловодности волжского стока составил около 500 км^3.

С начала 1940-х годов понижение уровня моря продолжалось более медленными темпами. В 1960-е годы наблюдалась непродолжительная стабилизация его уровня около отметки -28,40 м БС: в 1957–1969 гг. в море ежегодно поступало приблизительно на 7 км^3 воды больше, чем ее испарялось и стекало в залив Кара-Богаз-Гол.

В 1970-е годы в бассейне моря сложились климатические условия, аналогичные периоду 1930-х годов. Сокращение речного стока стало основным фактором падения уровня, так как испарение в эти годы было ниже нормы. Количество атмосферных осадков (220 мм/год), выпавших на морскую поверхность в 1970–1977 гг., значительно превышало среднемноголетнюю норму, и их величина наибольшая в XX столетии. Но поскольку вклад осадков в межгодовую и сезонную изменчивость уровня сравнительно мал по сравнению с величиной объема речного стока, то их количество не могло существенно повлиять на интенсивность снижения уровня моря в эти годы. Дефицит водного баланса (свыше 140 км^3) стал причиной снижения уровня моря с 1970 по 1977 г. на 0,7 м. В 1977 г. уровень моря находился на 3,2 м ниже, чем в начале XX в. Самое низкое положение уровня моря (-29,00 м БС) было зафиксировано в 1977 г., впервые за последнее тысячелетие, а самое высокое (-24,00 м) наблюдалось в 1805 г. Таким образом, в текущем тысячелетии размах колебаний уровня моря составил 5 м, в т. ч. в XX в. – 3,2 м (с 1930 по 1941 г. – 1,8 м, с 1942 по 1977 г. – 1,2 м). Наиболее интенсивно падение уровня происходило в 1930–1941 и 1970 –1977 гг. (в среднем соответственно на 16 и 8 см/год).

С 1978 г. уровень моря стал резко повышаться. Интенсивность подъема уровня в отдельные годы превышала 30 см (в 1990 г. – 36 см), а в среднем была около 14 см/год. Современный подъем УКМ, непрерывно продолжавшийся 18 лет, – наиболее продолжительный за весь 180-летний период инструментальных наблюдений. Среднегодовая отметка уровня моря повысилась на 2,4 м относительно уровня 1977 г. и в 1995 г. достигла значения -26,60 м БС. После незначительного понижения с 1996 по 2001 г. (на 0,5 м), а с 1996 по 2013 г. на 1,0 м уровень моря в последние годы продолжает еще находиться на высоких отметках. В 2013 г среднегодовая отметка уровня достигла значения -27,60 м БС.

Условно можно считать, что до начала 1930-х гг. составляющие водного баланса Каспийского моря формировались в основном в естественных условиях (при малой антропогенной нагрузке), их колебания и многолетняя изменчивость уровня моря отражали влияние только

климатических факторов, однако в последующие годы антропогенное воздействие на речной сток стало возрастать.

На протяжении XX столетия интенсивность снижения УКМ под влиянием различных водохозяйственных мероприятий в бассейне Каспийского моря значительно менялась. В 1930–1940 гг. снижение не превышало 2–3 см/год, в 1950–1960 гг., в период заполнения водохранилищ Волжско-Камского каскада, составляло в среднем 7 см/год. Максимальные объемы безвозвратного изъятия речного стока в конце 1970–1980-х гг. приводили к снижению уровня на 10–12 см/год. В настоящее время ежегодное снижение уровня моря, обусловленное безвозвратными изъятиями, не превышает в среднем 4–7 см.

Повышение УКМ в конце XX столетия обусловлено не только снижением объемов безвозвратных изъятий речного стока, но и частично антропогенным воздействием на гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол. Естественным и антропогенным изменениям подверглась и такая расходная составляющая водного баланса Каспийского моря, как сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Длительное падение уровня моря привело к сокращению стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол вследствие уменьшения сечения и пропускной способности пролива. В начале XX столетия в залив поступало около 30 км^3 морских вод в год (что приводило к ежегодному снижению уровня в среднем на 7–9 см), а в середине 1970-х – начале 1980-х годов – 5–6 км^3.

В марте 1980 г. залив Кара-Богаз-Гол с целью уменьшения расходной части водного баланса и поддержания уровня Каспийского моря был отделен от моря глухой насыпной дамбой. Это позволило ежегодно "экономить" в среднем около 5–6 км^3 при перекрытии пролива и 14–15 км^3 в год в начале 1990-х гг., когда произошло значительное повышение УКМ. С сентября 1984 г. был восстановлен незначительный регулируемый сток морских вод в залив в объеме 1,5–2,0 км^3/год.

Перекрытие пролива Кара-Богаз-Гол и последующая регулируемая незначительная подача морских вод в залив в 1980–1992 гг. способствовали повышению уровня моря примерно на 40 см, или 20 % его современного подъема. В июле 1992 г. дамба, отделявшая залив от моря, была разрушена. В результате ликвидации плотины и возобновления естественного поступления в залив морской воды повышение уровня было меньше возможного примерно на 30 см. Наиболее значительное снижение уровня, связанное со стоком в Кара-Богаз-Гол, составило около 13 см в 1995 г., когда в залив поступило около 50 км^3 морской воды. Это снижение обусловлено в основном антропогенным воздействием. В естественных условиях многоводных лет и при более высоких отметках уровня максимальное снижение уровня, вызванное

оттоком морских вод в залив, составляло в начале XX столетия, как отмечалось, 7–9 см. После 1995 г. ежегодное снижение уровня за счет влияния этой отрицательной составляющей водного баланса происходило в среднем на 5 см (4–7 см).

Следует обратить внимание еще на один аспект антропогенного воздействия, недостаточно изученный в настоящее время. Это касается прежде всего того, что хозяйственная деятельность человека способствует увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере, что может оказать влияние на изменение климатических характеристик и, следовательно, гидрометеорологический режим каспийского бассейна. В частности, некоторые исследователи считают, что наступившее потепление в 80-х гг. XX столетия связано с антропогенной деятельностью. Антропогенное потепление климата может вызвать определенные изменения в количестве осадков в бассейне Волги, притоке речных вод к морю и испарении с его акватории и, следовательно, оказать влияние на колебания УКМ в ближайшие десятилетия.

В естественных условиях современный подъем уровня моря (1978–1995 гг.) произошел бы примерно на 3,0 м (на 0,5–0,6 м выше фактического подъема). В целом в конце XX столетия уровень моря мог находиться на 1–1,2 м выше и соответствовал бы высоким отметкам, наблюдавшимся в XIX в. В предшествующие два столетия изменения уровня моря происходили в интервале от -25,00 до -29,00 м БС (размах естественных его изменений составил около 3 м), а за последнее тысячелетие от -24,00 до -29,00 м БС.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что колебания УКМ обусловлены сочетанием климатических и антропогенных факторов. Тектоническое влияние на колебания уровня ничтожно мало и не может быть соизмеримо с климатическим и антропогенным воздействием. Тектонические процессы вызывают разнонаправленные вертикальные смещения дна и берегов моря и в большинстве случаев не превышают ±2,5 мм/год, что существенно меньше современной межгодовой изменчивости уровня (-40 – +36 см за период с 1978 по 2013 г., в т. ч. за счет антропогенного воздействия в среднем не более 4–7 см ежегодно).

Анализ данных показывает, что многолетний ход уровня Каспийского моря представляет собой процесс поочередной смены серий лет последовательного понижения и повышения уровня моря, испытывая квазициклические колебания с периодом от нескольких лет до нескольких десятков лет. Есть основания считать, что именно эти серии лет (или отдельные годы) в значительной степени определяют закономерности и особенности многолетних колебаний УКМ. В табл. 4.2 приведены периоды наиболее интенсивного понижения и повышения уровня в XX веке.

Таблица 4.2. Периоды интенсивного понижения и повышения УКМ (в скобках указана продолжительность понижения и повышения уровня в годах)

Падение		Повышение	
Период	**Величина, см**	**Период**	**Величина, см**
1880–1913	92 (34)	1978–1995	240 (18)
1914–1932	Стабилизация	2003–2005	30 (4)
1933–1940	172 (8)		
1941–1956	61 (9)		
1957–1970	Стабилизация		
1971–1977	62 (7)		
1996–2002	56 (7)		
2005–2015	88 (11)		

Из табл. 4.2 видно, что наиболее интенсивное понижение УКМ происходило в период с 1933 по 1940 г., когда уровень за 8 лет упал на 172 см, в то время как с 1941 по 1977 г. (за 37 лет) – только на 123 см. Наиболее интенсивное повышение УКМ происходило в период с 1978 по 1995 г., когда уровень за 18 лет поднялся на 240 см со средней скоростью 13,3 см/год. Ранее такого темпа подъема уровня не наблюдалось. Такие колебания уровня моря вызваны в целом глобальными процессами, но на коротких интервалах времени могут частично зависеть и от региональных гидрометеорологических особенностей.

Одной из фундаментальных проблем Каспийского моря является выявление разномасштабной изменчивости УКМ, обусловленной взаимодействием процессов, происходящих в атмосфере и в море. Исследование и количественное описание разномасштабных колебаний УКМ необходимо для достоверного выделения изменений уровня разных масштабов и прогнозирования этих изменений.

С начала проведения инструментальных наблюдений и до XX века УКМ колебался в среднем около отметки -28,80 м БС. В XX в. в многолетнем ходе УКМ можно выделить несколько характерных периодов, соответствующих различному состоянию водного баланса моря. На фоне общей тенденции понижения уровня моря, наблюдающейся с 1880-х годов, в начале XX столетия (1900–1929 гг.) изменения УКМ были незначительными и происходили около средней отметки -26,2 м БС.

Высокое положение уровня и относительная его стабильность в начале XX в. были обусловлены благоприятными гидрологическими условиями, определяющими многоводность рек и относительным равновесием между элементами водного баланса моря. Последовательно

чередующиеся 4–5-летние циклы многоводных и 5–8-летние циклы маловодных лет приводили к соответствующим повышениям и понижениям уровенной поверхности моря. Тенденция снижения уровня моря в этот период была незначительной (0,34 см за 30-летний период).

Состояние относительно равновесного положения УКМ сменилось периодом его резкого падения в 1930–1941 гг. Дефицит водного баланса, в среднем около 60 км^3/год, способствовал значительному понижению уровня моря на 1,8 м. Такое резкое падение было вызвано крупномасштабными климатическими изменениями. На значительной территории ЕТР, включая и водосборный бассейн Каспийского моря, отмечались засушливые условия. Дефицит атмосферных осадков в бассейне Каспия в сочетании с интенсивно развитыми процессами испарения с поверхности моря и привели к резкому падению УКМ в среднем со скоростью 16 см/год.

В 1940–1950 гг. при более умеренных климатических условиях в бассейне Каспия темпы падения уровня замедлились. Аномально развитые процессы меридиональной формы циркуляции способствовали увеличению увлажненности. В 1949–1956 гг. дефицит водного баланса составлял около 19 км^3/год, а в 1957–1969 гг. воды в море поступало примерно на 7 км^3 в год больше, чем ее испарялось и стекало в залив Кара-Богаз-Гол.

В начале 1970-х годов прошлого столетия в бассейне моря вновь сложились неблагоприятные условия, аналогичные периоду 1930-х годов. Дефицит баланса за 1970–1977 гг. составил 50 км^3 и привел к падению УКМ в 1977 г. до отметки -29,0 м БС – самой низкой отметке не только за период инструментальных наблюдений, но и за последние 500 лет, в течение которых размах колебаний УКМ составил 7 м. В среднем за 1942–1977 гг. дефицит баланса составлял 13,7 км^3/год, что соответствовало ежегодному снижению УКМ на 3,7 см слоя, а за весь период уровень опустился на 1,2 м. Общее понижение УКМ в XX столетии составило 3,2 м. Снижение УКМ происходило с интенсивностью в среднем 4 см/год, а в 1930–1941 и 1970–1977 гг. – 16 и 14 см/год соответственно.

С конца 1977 г. начался быстрый подъем УКМ, который продолжался в течение 18 лет со средней скоростью 14 см/год, а в отдельные годы эта цифра достигала 30 см и более. В 1995 г. уровень моря достиг своего максимального значения -26,60 м БС, т. е. по отношению к уровню 1977 г. поднялся на 2,4 м.

Однако начиная с 1996 г. в режиме УКМ начался обратный цикл его непрерывного понижения вплоть до 2002 г. За 1996 и 1997 гг. уровень моря понизился на 36 см, затем его падение замедлилось. За период с 1998 по 2002 г. уровень моря понизился всего на 8 см, достигнув

в 2002 г. абсолютной отметки, равной -27,15 м. За 2003–2005 гг. уровень снова повысился на 30 см, достигнув в 2005 г. отметки -26,76 м, после чего началось устойчивое понижение уровня в среднем на 9,7 см в год. К 2013 г. уровень понизился на 78 см и достиг абсолютной отметки -27,54 м БС.

4.4. Внутригодовая изменчивость

Внутригодовые (сезонные) колебания уровня моря определяются так же, как и многолетние, изменчивостью составляющих водного баланса [17, 19, 21, 22, 29]. В сезонном ходе уровня моря основная роль принадлежит речному стоку, эффективному испарению (испарение минус осадки) и их распределению внутри года. Именно эти факторы определяют общий характер (фон) внутригодового распределения уровня моря. Как известно, наибольшую роль в этом играет сток Волги. Внутригодовой ход УКМ в различных пунктах имеет свои особенности, отражающие в то же время и общие закономерности, характерные для Каспия в целом:

– в прибрежных районах наблюдаются значительные сгонно-нагонные колебания;

– в глубоководных районах изменение уровня обусловлено главным образом изменениями составляющих водного баланса.

Достаточно полное представление о масштабах колебаний УКМ по акватории моря можно получить из табл. 4.3, в которой даны средние месячные уровни для лет с максимальной и минимальной амплитудой уровня (1977 и 1995 гг.) по ряду пунктов Каспийского моря.

Таблица 4.3. Статистические характеристики внутригодовой изменчивости среднего уровня моря за период с 1924 по 2013 г. для семи базовых пунктов

Стат. характ.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред. год
Махачкала													
$\overline{H}$	35	35	36	41	48	56	57	53	46	40	38	37	43
$H_{макс}$	210	201	192	198	206	211	231	236	220	218	211	214	212
$H_{мин}$	-107	-103	-104	-103	-97	-90	-92	-97	-102	-116	-108	-110	-101
A	317	304	296	301	303	301	323	333	322	334	319	324	313
S	83	82	82	81	81	81	82	83	82	83	82	82	82
M_E	20,5	18,5	18,5	21,5	27,5	39,0	45,0	40,5	34,0	32,0	29,0	24,0	26,5
A_S	0,28	0,27	0,24	0,24	0,26	0,26	0,26	0,31	0,30	0,25	0,26	0,26	0,27
Э	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0

Таблица 4.3 (продолжение)

Стат. характ.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред. год
Баку													
$\overline{H}$	35	30	32	37	45	56	60	55	45	36	32	31	41
$H_{макс}$	177	176	176	178	18	196	213	209	203	190	186	180	189
$H_{мин}$	-102	-104	-101	-94	-88	-77	-76	-83	-95	-106	-107	-106	-92
A	279	280	277	272	274	273	289	292	298	296	293	286	281
S	76	75	75	74	74	74	75	75	75	76	75	75	75
M_E	5,5	6,5	6,0	11,0	19,0	32,0	41,5	37,0	25,5	15,5	12,0	8,0	17,0
A_S	0,25	0,22	0,23	0,24	0,23	0,24	0,27	0,27	0,25	0,23	0,24	0,24	0,24
Э	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2
о. Жилой													
$\overline{H}$	31,9	32,3	33,3	38,0	45,5	57,3	61,3	56,1	47,2	37,7	35,1	32,9	42,8
$H_{макс}$	199	200	197	201	207	218	241	232	228	212	208	205	212
$H_{мин}$	-115	-117	-112	-108	-100	-97	-91	-99	-95	-106	-115	-118	-104
A	314	317	309	309	307	315	332	331	323	318	323	323	316
S	86	85	85	83	83	83	84	86	85	84	84	85	84
M_E	12,0	12,5	14,0	15,0	25,0	37,5	45,0	41,0	33,0	22,0	21,5	16,0	23,5
A_S	0,22	0,20	0,21	0,22	0,24	0,22	0,25	0,25	0,26	0,25	0,21	0,23	0,22
Э	-1,2	-1,2	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1
Куули-Маяк													
$\overline{H}$	21,0	22,9	23,4	28,3	35,6	45,3	51,0	47,1	36,1	27,0	23,6	22,0	31,9
$H_{макс}$	189	186	187	192	200	208	231	228	216	209	203	200	204
$H_{мин}$	-112	-120	-114	-109	-98	-99	-84	-90	-106	-110	-117	-115	-99
A	301	306	301	301	298	307	315	318	322	319	320	315	303
S	80	79	79	78	80	80	81	81	80	80	80	80	79
M_E	6,0	10,5	11,0	12,0	20,0	34,0	41,0	38,5	27,5	18,5	12,0	9,5	20,5
A_S	0,44	0,37	0,40	0,41	0,47	0,42	0,44	0,46	0,46	0,45	0,45	0,45	0,45
Э	-0,9	-0,9	-1,0	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8
Туркменбаши													
$\overline{H}$	20,4	21,5	22,5	27,4	34,9	44,8	51,4	47,6	35,5	25,3	22,4	21,0	31,1
$H_{макс}$	195	195	192	196	206	215	238	233	219	209	209	197	208
$H_{мин}$	-126	-129	-120	-116	-109	-100	-92	-105	-116	-121	-125	-124	-113
A	321	324	312	312	315	315	330	338	335	330	334	321	321
S	83	83	82	81	81	82	83	83	83	82	82	82	82
M_E	8,0	9,0	10,0	11,5	20,0	32,0	43,0	39,0	27,5	19,0	14,5	9,0	20,5
A_S	0,39	0,36	0,38	0,40	0,41	0,39	0,44	0,43	0,43	0,40	0,41	0,42	0,41
Э	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8

Таблица 4.3 (окончание)

Стат. характ.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред. год
Кара-Богаз-Гол													
$\overline{H}$	22,3	22,2	25,5	31,1	38,2	47,4	50,8	45,9	35,5	27,4	23,6	22,1	32,7
$H_{макс}$	188	188	189	196	199	206	225	221	211	201	192	199	200
$H_{мин}$	-128	-133	-123	-114	-106	-100	-97	-106	-115	-121	-125	-125	-114
A	316	321	312	310	305	306	322	327	326	322	317	324	314
S	83	83	82	81	81	81	82	82	82	82	82	83	82
M_E	8,0	7,0	12,0	15,5	20,0	34,0	40,0	34,0	27,0	18,0	12,0	11,0	20,0
A_S	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	03	0,3	0,3	0,3	0,3
Э	-1,0	-1,0	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,9	-09	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0
Форт-Шевченко													
$\overline{H}$	32,9	32,3	34,4	39,7	47,7	56,3	58,3	53,1	45,1	38,6	35,5	34,1	42,3
$H_{макс}$	206	199	203	205	214	224	240	239	227	221	212	208	216
$H_{мин}$	-105	-105	-107	-96	-87	-82	-86	-92	-102	-106	-104	-108	-97
A	311	304	310	301	301	306	326	331	329	327	316	316	313
S	80	81	80	79	79	80	81	82	82	81	80	79	80
M_E	19,0	21,0	20,5	24,5	32,0	44,0	49,0	43,0	34,5	27,5	24,0	21,5	29,5
A_S	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Э	-0,8	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7

Примечание: $\overline{H}$ – средний уровень; $H_{макс}$ – максимальный уровень; $H_{мин}$ – минимальный уровень; A – амплитуда; S – среднеквадратичное отклонение; M_E – медиана; A_S – коэффициент асимметрии; Э – коэффициент эксцесса.

В соответствии с изменениями объема стока, самые высокие уровни наблюдаются в июне-июле, а самые низкие в феврале-марте, когда приток речных вод минимален. Наиболее значительные сезонные колебания отмечаются в мелководной части устьевого взморья Волги, где в среднем они достигают 1 м и постепенно уменьшаются в сторону моря до значений, характерных для сезонного хода уровня всего Каспийского моря (30–40 см).

Статистические характеристики внутригодовой изменчивости среднего уровня моря за период с 1924–2013 гг., представленные в табл. 4.3, позволяют обнаружить, что положительные приращения уровня моря в среднем многолетнем начинаются в марте и сохраняются до июля.

На рис. 4.6 приведен помесячный ход уровня в различных пунктах, осредненный за период 1978–2013 гг.

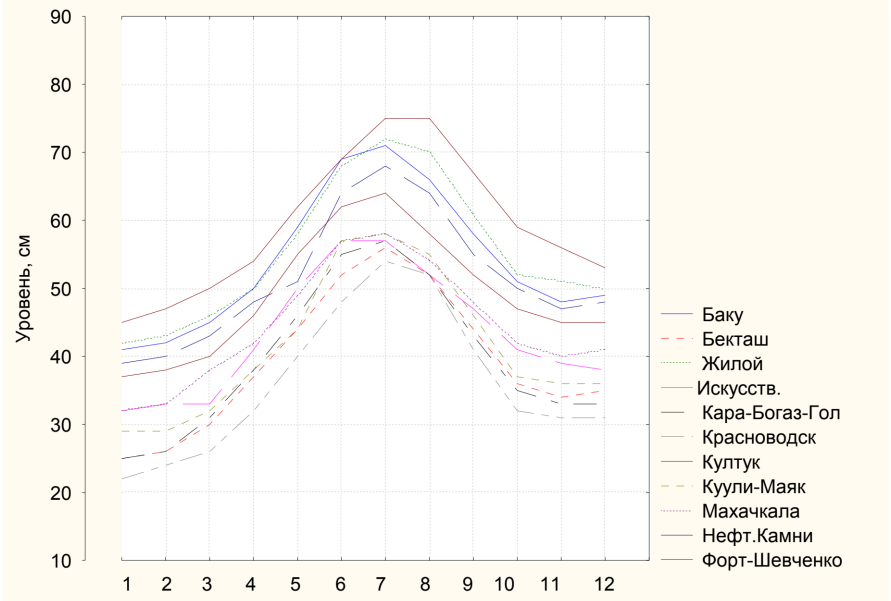


Рис. 4.6. Внутригодовой ход уровня по 11 пунктам.

На рис. 4.6 обнаруживается большой разброс значений уровня моря между пунктами западного и восточного побережья моря. Максимальные различия между ними достигают 25–30 см. Вследствие преимущественного поступления речных вод в северную часть Каспийского моря и влияния силы Кориолиса, уровенная поверхность моря имеет наклон с севера на юг и с запада на восток, который наиболее ярко выражен весной в период половодья.

На внутригодовой ход уровня моря также оказывают влияние сгонно-нагонные явления, приводящие в отдельные месяцы к значительным отклонениям от нормального внутригодового хода уровня, причем в мелководных районах Северного Каспия их влияние проявляется более ярко и приводит к резкому и значительному подъему и спаду уровня моря по сравнению с более глубоким западным побережьем Среднего и Южного Каспия. Отклонения уровня моря при сгонно-нагонных явлениях от их среднемесячных величин соизмеримы с размахом (амплитудой) внутригодовых колебаний уровня моря и составляют в среднем 30–70 см. Наибольшие отклонения уровня моря от среднемесячных значений наблюдаются в северной мелководной части Каспийского моря.

Средний размах уровня моря за 1900–2013 гг. составил около 30 см. Наибольшие подъемы уровня отмечались в многоводные годы,

к которым относятся 1914, 1926, 1947, 1978, 1981, 1995 гг. (с положительным приращением уровня от 42 до 54 см), а наибольшие спады уровня – в маловодные 1910, 1934, 1937, 1958, 1975, 2010 гг. (с отрицательным приращением уровня от 41 до 45 см). На сезонном ходе уровня моря также сказалось сокращение, а с марта 1980 г. по сентябрь 1984 г. прекращение стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Внутригодовое распределение стока морских вод в залив до 1984 г. было аналогично годовому ходу уровня моря. До 40 % годового стока в залив приходилось на июнь-сентябрь. В период повышения уровня моря сток в залив уменьшал его в среднем на 1–2 см/год, а в период падения – увеличивал на 0,5 см/год. Ежегодное снижение уровня моря за счет стока вод в залив в среднем за прошлое столетие составляло около 3,5 см (от 7 до 1 см), а в настоящее время – менее 1 см, т. е. на сезонный ход уровня не влияет.

Роль испарения во внутригодовых колебаниях уровня моря стоит на втором месте после стока. Отклонение испарения от среднего многолетнего значения в отдельные годы достигает ±10–20 см, что соответствует примерно 30–50 % амплитуды внутригодовых колебаний уровня. За счет испарения уровень моря понижается в среднем за год на 97 см.

Роль атмосферных осадков в сезонных колебаниях уровня моря по сравнению со стоком рек и испарением относительно невелика. Ежегодный прирост уровня моря в результате выпадения осадков составляет примерно 20 см. Отклонения количества осадков от нормы могут обуславливать отклонения в годовых приращениях уровня на ±3–7 см, что составляет 10–15 % размаха его внутригодовых колебаний.

Сезонный ход уровня моря в основном определяется речным стоком, отличающимся большой межгодовой и внутригодовой изменчивостью. Сезонные подъемы и спады уровня моря обусловлены прежде всего объемом волжского половодья, его интенсивностью, характеризуемой значительной изменчивостью. Отклонения средних месячных значений стока от средних многолетних существенны в период паводка (апрель-июль), когда сток рек может колебаться от 15 до 20 км^3 в месяц, а в межень (декабрь-февраль) от 5 до 29 км^3 в месяц, т. е. объем стока рек может увеличиваться или уменьшаться в 2–3 раза. Наибольшая межгодовая изменчивость стока характерна для июня и декабря, когда наблюдаются соответственно максимальный и минимальный среднемесячные объемы стока. Сток с апреля по июнь, когда его объем наибольший, играет решающую роль в весенне-летнем подъеме уровня моря.

Именно в эти месяцы уровень моря достигает своих максимальных начений. Среднемесячный максимум чаще всего отмечается в июле.

В средней и южной части моря более высокие повторяемости июльского пика уровня характерны для западного побережья. В целом наступление максимума и минимума имеет довольно широкий временной диапазон. С июля-августа в связи с уменьшением речного притока и увеличением испарения с поверхности моря уровень моря постепенно понижается до минимального значения в декабре-феврале. Сезонный ход уровня в основном определяется речным стоком, отличающимся большой изменчивостью. Наибольшие величины положительных отклонений средних месячных значений уровня моря от их средних годовых значений отмечаются с мая по август, и особенно в июне-июле (рис. 4.7).

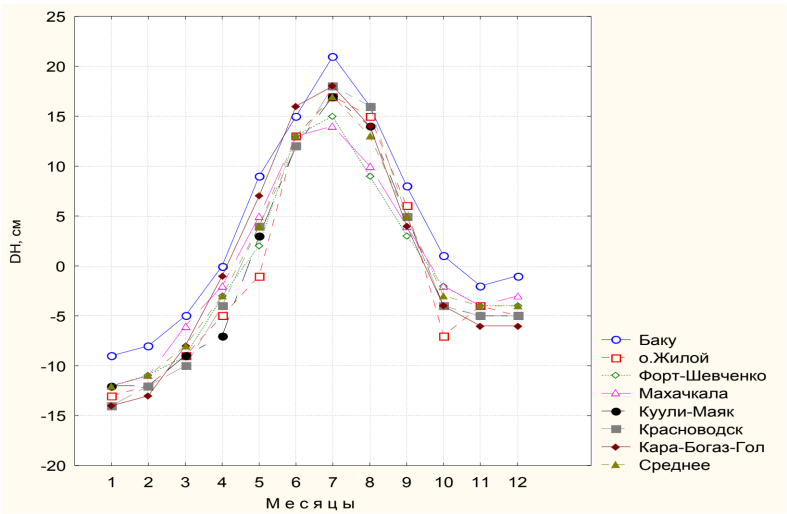


Рис. 4.7. Годовой ход отклонений средних месячных значений уровня DH от среднего годового уровня, осредненных за период с 1978 по 2003 г. для семи пунктов.

На рис. 4.8 показаны графики отклонений средних месячных значений уровня Каспийского моря от среднегодовых значений за характерные периоды XX–XXI столетий.

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

Внутригодовой ход отклонений среднемесячных значений уровня от среднего уровня моря довольно сильно различается от пункта к пункту (рис. 4.9).

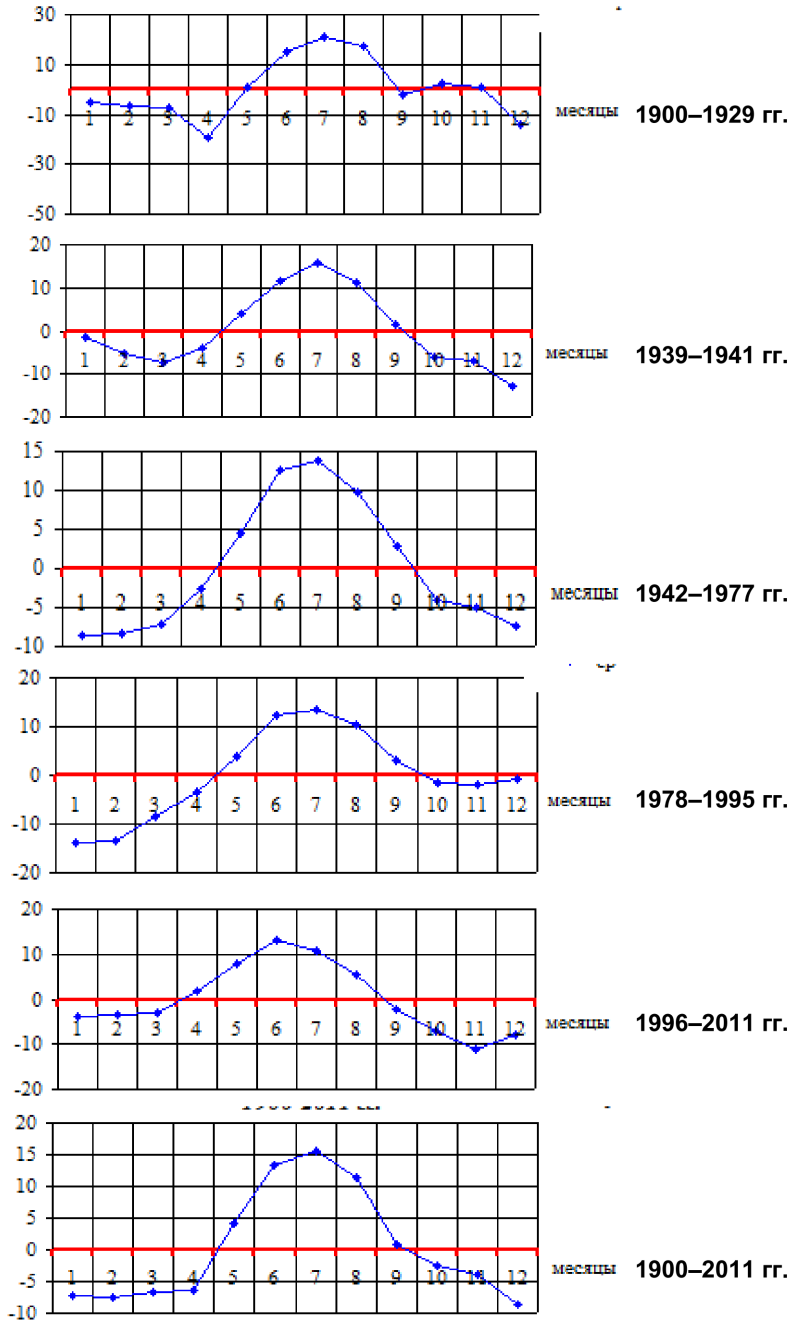


Рис. 4.8. Отклонения средних месячных значений уровня Каспийского моря (см) от среднегодовых значений за характерные периоды XX-XXI столетий [23].

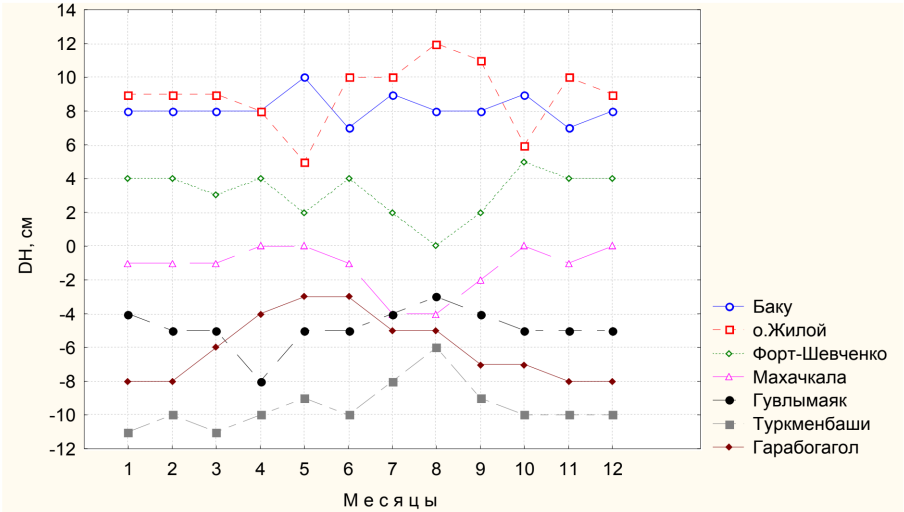


Рис. 4.9. Внутригодовой ход отклонений среднемесячных значений уровня (DH) по семи пунктам от среднего уровня моря (период осреднения 1978–2003 гг.).

Что касается месячных приращений УКМ, то они достигают наибольших положительных значений в мае-июне, а наибольших отрицательных значений в сентябре-октябре (рис. 4.10).

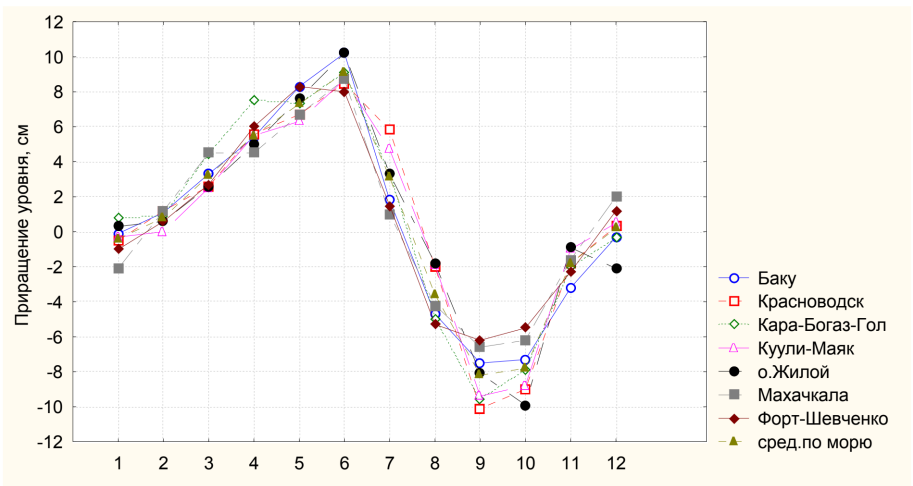


Рис. 4.10. Месячные приращения УКМ для семи пунктов, осредненные за период 1978–2003 гг.

Величина размаха внутригодовых изменений уровня моря за 1900–2013 гг. составила в среднем по морю около 30 см, а в Северном Каспии – до 40 см. В отдельные годы размах внутригодовых колебаний может существенно отличаться от среднего многолетнего значения (табл. 4.4).

Таблица 4.4. Средние месячные приращения уровня (см) по семи пунктам Каспийского моря для двух аномальных лет (1977 и 1995 гг.)

Пункт	Год	Месяцы												Сред. год.
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Баку	1995	2	1	3	-4	12	10	6	-9	-6	-13	-3	-5	-0,5
	1977	2	-1	5	6	5	5	1	-7	-12	-11	-1	1	-1,6
о. Жилой	1995	-1	-10	5	3	17	2	10	1	-11	-16	-7	5	-0,2
	1977	3	2	1	4	8	3	6	8	5	-11	-4	1	2,2
Форт-Шевченко	1995	2	2	-7	2	13	2	2	-4	-1	-7	-2	0	0,2
	1977	-6	5	1	7	5	5	-4	-6	-10	-4	2	-4	-0,8
Махачкала	1995	-4	-7	10	2	4	16	2	1	-17	-11	-2	-1	-0,6
	1977	-8	4	0	6	7	0	-2	-5	-5	-14	6	-1	-1,0
Куули-Маяк	1995	-4	0	2	4	10	9	2	-3	-10	-10	-6	1	-0,4
	1977	-4	5	2	3	1	1	5	-10	-16	-4	-7	-2	-2,2
Красноводск	1995	-1	0	2	4	-9	6	7	-2	-14	-10	-7	1	-1,9
	1977	-3	2	7	3	7	3	8	-13	-11	-5	-4	1	-0,4
Кара-Богаз-Гол	1995	2	-2	10	10	4	14	7	-1	-4	1	-5	2	3,2
	1977	-3	8	2	9	5	4	3	-9	-9	-6	-4	0	0
Среднее	1995	-1	-2	4	3	7	8	5	-2	-9	-9	-5	0	
	1977	-3	4	3	5	5	3	2	-6	-8	-8	-2	-1	
Макс. разн. между пунктами	1995	6	12	17	14	26	14	8	10	16	17	5	10	13
	1977	10	9	7	7	7	5	12	21	17	10	13	5	10

Основной причиной сезонной изменчивости УКМ являются сезонные изменения составляющих водного баланса моря, главным образом стока рек, на которые накладываются влияния деформационных изменений уровня. Для характеристики сезонной изменчивости уровня обычно используются такие статистические характеристики, как среднее, максимальные и минимальные его значения и среднеквадратичные отклонения изменения уровня моря от месяца к месяцу за период 1925–2013 гг. Форма кривой годового хода УКМ имеет примерно одинаковый вид для всех пунктов моря. В отдельные годы и месяцы вид кривой отличен для различных пунктов от кривой, полученной в целом для всего моря. В период интенсивного падения уровня моря

(1933–1939 гг.) сезонный ход уровня моря отличен от периода относительно стабильного стояния уровня. Нарушения в сезонном ходе уровня вносят сгонно-нагонные явления.

Наибольшие месячные приращения уровня характерны для весенне-летних месяцев, когда сток рек максимальный. В это время за счет речного стока уровень от месяца к месяцу может повышаться от 6 до 22 см. С июля по декабрь происходит понижение уровня моря за счет увеличения расходной статьи водного баланса (в основном испарения). В отдельные годы понижение уровня за один месяц может составлять 20 см. Максимальная амплитуда годового хода уровня в многоводные годы достигает 56 см, в маловодные – 15 см (1950 г.). Так, в период 1900–1983 гг. средний размах уровня составил 30 см, максимальный размах наблюдался в 1926 г. – 50 см, а минимальный размах 25 см – в 1975 году.

Величина сезонных изменений уровня уменьшается с севера на юг. Паводочная волна распространяется по площади моря с запаздыванием от одного до двух месяцев, поэтому время наступления максимальных уровней в пунктах, расположенных на южном побережье моря происходит с таким же опозданием [30]. Сгонно-нагонные колебания сильно искажают плавный сезонный ход уровня моря, особенно в северной мелководной части моря.

Сезонная изменчивость температуры и солености морской воды обуславливают изменение плотности, а следовательно, и ее объем, что, в свою очередь, отражается на сезонном ходе УКМ. Весенне-летний прогрев обуславливает увеличение объема воды, а осенне-зимнее охлаждение вызывает его уменьшение. Эти изменения могут достигать 2–3 см в июне-июле и 0,5–1,0 см в другие месяцы. В северной части моря из-за ее мелководности плотностные изменения очень малы. Увеличение объема вод моря за счет плотностного расширения наблюдается с марта по август, а уменьшение – с сентября по февраль (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Среднемноголетние плотностные изменения уровня моря по месяцам в мм слоя воды

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

Наибольшие плотностные приращения уровня в Среднем и Южном Каспии достигают 3 см в месяц (с мая по июль), а в Северном Каспии не превышают 1 см. В зависимости от температуры воды значения плотностных изменений уровня могут меняться в Среднем Каспии

до 3,5 см в месяц, а в Южном Каспии до 4,8 см в месяц. В отдельные годы размах сезонного хода плотностных изменений уровня достигает 8–9 см в месяц. В результате в теплый период года плотностные изменения уровня могут уменьшать на несколько сантиметров наклон уровенной поверхности вдоль меридиональной оси Каспия, который формируется стоком рек в Северный Каспий и другими составляющими водного баланса.

Сезонные изменения УКМ обуславливаются также сезонной изменчивостью атмосферных процессов над морем. В холодный безледный период над Северным Каспием преобладают ветры восточных направлений, в результате чего в среднем уровень моря у восточного побережья на несколько см ниже, чем у западного, тогда как в теплый период года преобладают ветры западных румбов и уровень моря у восточного побережья в среднем на несколько см выше, чем у западного. Испарение же с поверхности моря происходит в течение всего года. В среднем за год с поверхности испаряется слой воды толщиной около 980 мм. Больше всего испаряется воды в теплую часть года, когда температура воды достигает своих максимальных значений, причем количество поступающей в море воды оказывается больше, чем количество испаряющейся воды.

4.5. Структура многолетней изменчивости уровня Каспийского моря и стока Волги

В КаспМНИЦ выполнено исследование многолетней изменчивости уровня Каспийского моря и стока Волги. Исходными материалами для исследования послужили данные о средних, максимальных и минимальных месячных и годовых значениях уровня Каспийского моря на различных постах.

Основным критерием при выборе постов была продолжительность непрерывных рядов наблюдений; в работе не использовались временные ряды продолжительностью менее 30 лет. Данному критерию соответствовали 13 постов (табл. 4.6). Наряду со средним годовым уровнем моря (СГУМ) анализировались временные ряды минимального (МИНГУМ) и максимального (МАКСГУМ) годового уровня моря, непрерывная продолжительность которых, как правило, была меньше, чем рядов СГУМ. На их основе строились ряды годового диапазона изменения уровня моря (ГДИУМ), для чего из рядов МАКСГУМ вычитались ряды МИНГУМ.

Временные ряды СГУМ анализировались на всех постах, а МИНГУМ, МАКСГУМ и ГДИУМ – только на четырех «вековых» постах

(Форт-Шевченко, Махачкала, Красноводск, Баку). Кроме годовых рядов использовались месячные ряды: СМУМ – среднемесячный уровень моря; МИНМУМ – минимальные месячный уровень моря; МАКСМУМ – максимальный месячный уровень моря; МДИУМ – месячный диапазон изменения уровня моря. Продолжительность месячных рядов, как правило, совпадала с продолжительностью соответствующих им годовых рядов. Всего было проанализировано 325 временных рядов уровня моря.

Таблица 4.6. Продолжительность временных рядов УКМ на различных постах

Пост	СГУМ	МИНГУМ	МАКСГУМ	ГДИУМ
Форт-Шевченко	1921–1988	1957–1988	1957–1991	1957–1988
Кулалы	1947–1989	–	–	–
о. Пешной	1972–2004	–	–	–
о. Тюлений	1938–2011	–	–	–
Куули*	1921–1975	–	–	–
Бекдаш*	1930–1988	–	–	–
Кара-Богаз-Гол*	1921–1997	–	–	–
Актау	1961–2011	–	–	–
Махачкала	1900–2011	1900–2011	1947–2011	1947–2011
о. Огурчинский*	1938–1988	–	–	–
Красноводск*	1921–2011	1921–1988	1921–1988	1921–1988
Баку	1900–2010	1921–2010	1951–2010	1951–2010
о. Жилой	1924–1976	–	–	–

Примечание: * для постов приведены их исторические наименования.

Кроме того, использовались месячные, квартальные и годовой ряды стока Волги в вершине дельты (Верхнее Лебяжье) продолжительностью 77 лет (1938–2014 гг.).

В соответствии с современными представлениями, основной вклад в изменчивость УКМ и основных факторов, формирующих его водный баланс (стока и испарения), играют ультранизкочастотные колебания с периодом более 20–25 лет. Спектры рядов уровня моря и стока Волги, приведенные на рис. 4.11, подтверждают это представление. Эти колебания представляют собой сложную «смесь» колебаний с различными периодами (от 30 и более лет), для анализа которой недостаточно имеющихся инструментальных рядов наблюдений.

Поиск гармоник, важных для прогноза уровня моря, по-видимому надо вести среди низкочастотных колебаний с периодом от 5 до 20 лет

и высокочастотных колебаний с периодом менее 5 лет. Для выделения этих колебаний из рядов уровня моря и стока Волги использовались две процедуры: 1) взятие первой разности; 2) высокочастотная фильтрация. Под высокочастотной фильтрацией в данном случае подразумевается выделение колебаний, имеющих частоту выше установленного предела. В данном исследовании отфильтровывались все колебания с периодом менее 20 лет. Временные ряды, модифицированные путем взятия первой разности, обозначились литерами «ПР», а путем высокочастотной фильтрации – литерами «ВЧФ».

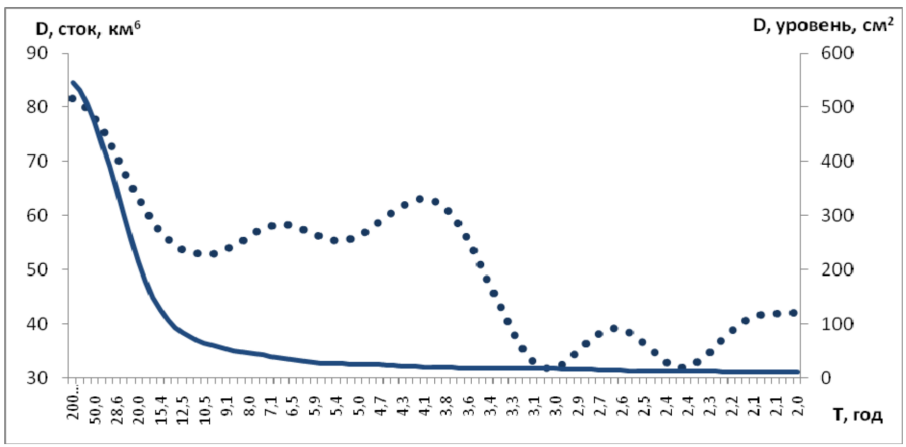


Рис. 4.11. Спектр колебаний среднегодового УКМ (Махачкала, 1900–2011 гг.) и годового стока Волги (1938–2014 гг.).

В отношении всех временных рядов, как исходных, так и модифицированных, проводился автокорреляционный анализ. Но основным объектом изучения явились периодограммы модифицированных рядов уровня и стока (всего было проанализировано 684 периодограммы). На каждой периодограмме определялось количество пиков и дисперсия каждого из них, при этом выделялись две главные гармоники (первая и вторая), отличающиеся повышенной дисперсией. Для локализации спектральных плотностей использовалась ручная процедура группировки гармоник, выявленных в различных рядах.

В целях обобщения результатов анализа периодограмм строились графики распределения по месяцам дисперсии и частоты главных гармоник и зависимости повторяемости гармоник по месяцам от их частоты. Повторяемость гармоник по месяцам оценивалась как низкая (менее 6 месяцев), средняя (от 6 до 9 месяцев) и высокая (более 9 месяцев). Далее гармоники, выявленные на периодограммах, группировались

по частоте (периоду) и повторяемости, среди них выделялись характерные гармоники (к таковым относились главные гармоники, отличающиеся высокой повторяемостью).

Структура многолетней изменчивости годового, среднемесячного, максимального и минимального уровня Каспийского моря, размаха его колебаний

Рассмотрим многолетнюю изменчивость уровня моря на примере поста Махачкала. Непрерывный ряд среднегодового уровня моря на посту Махачкала имеет продолжительность 112 лет (1900–2011 гг.). В периодограмме ряда после взятия первой разности обнаружено шесть гармоник. Обе главные гармоники относятся к разряду низкочастотных, при этом первая из них имеет период 12,2 лет, вторая – 6,5 лет. В периодограмме ряда после высокочастотной фильтрации обнаружено четыре гармоники. Главные гармоники относятся к разряду низкочастотных, при этом первая гармоника имеет период 7,0 лет, вторая – 12,4 лет.

В спектре ряда СГУМ-ПР присутствуют четыре низких пика с периодами 2,4; 3,5; 5,7 и 14,3 лет (рис. 4.12). В спектре ряда СГУМ-ВЧФ присутствуют два низких пика с периодами 2,4 и 3,5 лет и один высокий пик с периодом 13,3 лет. Размах колебаний у обоих модифицированных рядов возрастает по мере увеличения периода (уменьшения частоты). На своем максимуме дисперсия ряда СГУМ-ВЧФ почти в 2 раза выше, чем максимальная дисперсия ряда СГУМ-ПР.

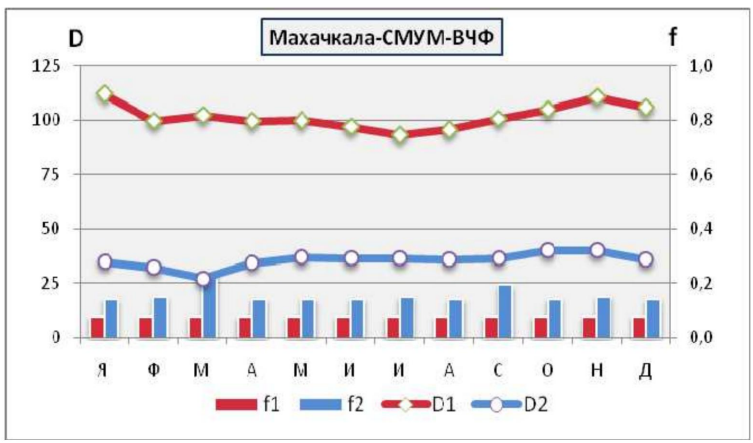


Рис. 4.12. Спектр временных рядов среднегодового уровня моря на посту Махачкала, модифицированных путем взятия первой разности (ПР) и высокочастотной фильтрации (ВЧФ).

Изменчивость среднемесячного уровня моря на посту Махачкала оценим с использованием временных рядов, модифицированных путем высокочастотной фильтрации. Как следует из рис. 4.13, ведущую роль в изменчивости среднемесячного уровня моря на данном посту играют низкочастотные колебания с периодом более 5 лет ($f < 0{,}2$). Первая гармоника рядов СМУМ после высокочастотной фильтрации во все месяцы была низкочастотной, вторая – во все месяцы, кроме марта. У ряда СМУМ-ВЧФ различие между первой и второй гармониками по уровню дисперсии было существенным (в 2 раза и более) на протяжении всех месяцев года.

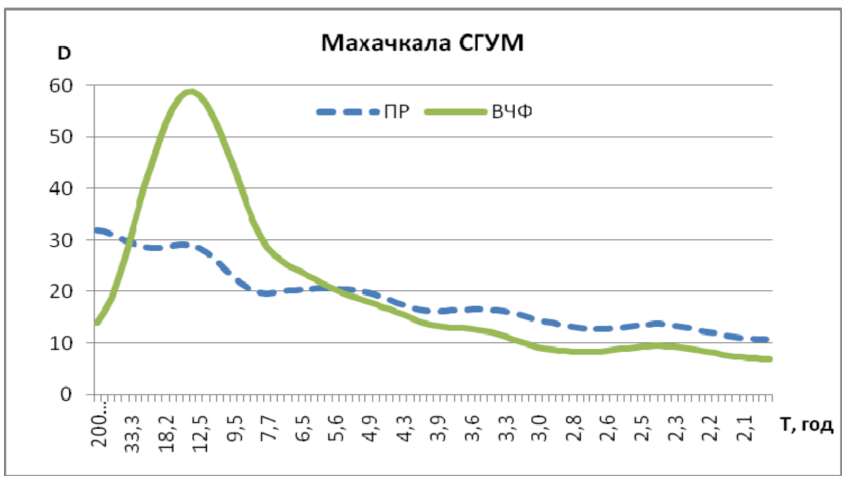


Рис. 4.13. Дисперсия (D) и частота (f) первой (1) и второй (2) гармоник временных рядов среднего месячного уровня моря на посту Махачкала после их модификации путем высокочастотной фильтрации.

В периодограммах каждого из рядов СМУМ-ВЧФ обнаружено от четырех до семи гармоник. Низкая повторяемость (от 3 до 6 месяцев) была присуща высокочастотным гармоникам с периодом 2,1; 2,9; 3,4 и 3,6 лет (рис. 4.14). Средняя повторяемость (от 6 до 9 месяцев) свойственна высокочастотным гармоникам с периодом 2,4 и 2,7 лет и низкочастотной с периодом 7,0 лет. Высокой повторяемостью (от 9 до 12 месяцев) отличалась низкочастотная гармоника с периодом 12,4 лет.

Было условлено считать существенными те главные гармоники, которым помимо высокой энергии свойственна высокая повторяемость. К таковым гармоникам рядов СМУМ на посту Махачкала следует отнести колебания с периодом 6,5 и 12,2 лет для рядов СМУМ-ПР и с периодом 12,4 лет для рядов СМУМ-ВЧФ (рис. 4.14).

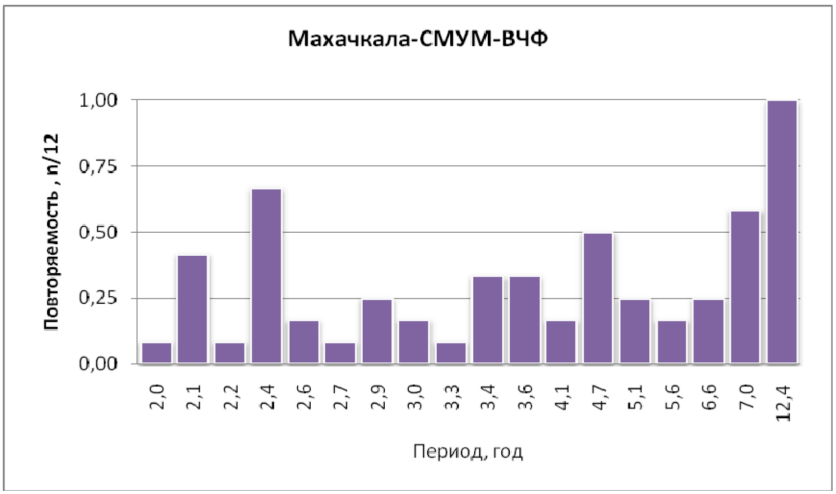


Рис. 4.14. Взаимосвязь между повторяемостью (n/12) и периодом (в годах) гармоник временных рядов среднего месячного уровня моря на посту Махачкала после их модификации путем высокочастотной фильтрации.

Данные, приведенные в табл. 4.7, характеризуют структуру временной изменчивости среднемесячного уровня в различных частях Каспийского моря и на его акватории в целом.

Таблица 4.7. Распределение характерных сгруппированных гармоник по повторяемости и частоте, выявленных на периодограммах временных рядов среднемесячных уровней Каспийского моря

Часть моря	**Повторяемость сгруппированных гармоник**					
	низкая		средняя		высокая	
	высоко-част.	низко-част.	высоко-част.	низко-част.	высоко-част.	низко-част.
Северный Каспий	3,1	–	2,2–2,7; 3,8–4,0	10,0–10,5	–	7,0–8,4; 12,0–13,3; 17,0; 21,0
Средний Каспий	2,8; 4,7	6,4	3,4	5,4	–	12,2–12,9; 18,0–19,3
Южный Каспий	–	–	3,7	–	2,2	5,2–5,5; 12,2–12,9; 17,3–18,0
Каспийское море	–	–	–	–	–	12,0–13,3 17,3–19,3

Как видно из табл. 4.7, для Северного Каспия характерны имеющие высокую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 7,0–8,4 лет, имеющие среднюю повторяемость низкочастотные колебания с периодом 10,0–10,5 лет и высокочастотные колебания с периодом 2,2–2,7 лет и 3,8–4,0 лет, а также имеющие низкую повторяемость высокочастотные колебания с периодом 3,1 лет. Для Среднего Каспия характерны имеющие среднюю повторяемость низкочастотные колебания с периодом 5,4 лет и высокочастотные с периодом 3,4 лет, а также имеющие низкую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 6,4 лет и высокочастотные колебания с периодом 2,8 и 4,7 лет. Для Южного Каспия характерны имеющие высокую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 5,2–5,5 лет и высокочастотные с периодом 2,2 лет, имеющие среднюю повторяемость высокочастотные колебания с периодом 3,7 лет.

Для всей акватории моря характерны имеющие высокую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 12,0–13,3 и 17,3–19,3 лет.

Данные, приведенные в табл. 4.8, характеризуют структуру временной изменчивости максимального и минимального месячного уровня Каспийского моря, размаха его колебаний, а также общие черты, свойственные этой изменчивости.

Таблица 4.8. Распределение характерных сгруппированных гармоник, выявленных на периодограммах временных рядов максимального и минимального месячного уровня Каспийского моря, размаха его колебаний

Часть моря	Повторяемость сгруппированных гармоник					
	низкая		средняя		высокая	
	высокочаст.	низкочаст.	высокочаст.	низкочаст.	высокочаст.	низкочаст.
МИНМУМ	2,9; 3,1–3,2; 4,2	5,2; 7,5; 12,4–13,2	2,0–2,7	–	–	–
МАКСМУМ	–	6,7-6,8	2,0–2,3; 2,9	17,0	–	7,3–8,0; 11,6–13,2
МДИУМ	3,2–3,7; 4,5	10,0	2,0–2,5	–	–	–
Общие гармоники	–	–	2,0–2;7	–	–	–

Как видно из табл. 4.8, для изменчивости минимального месячного уровня Каспийского моря характерны имеющие низкую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 5,5; 7,5 и 12,4–13,2 лет и высо-

кочастотные с периодом 2,9; 3,1–3,2 и 4,2 лет. Для изменчивости максимального месячного УКМ характерны имеющие высокую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 7,3–8,0 и 11,6–13,2 лет; имеющие среднюю повторяемость низкочастотные колебания с периодом 17,0 лет и высокочастотные с периодом 2,9 лет; имеющие низкую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 6,7–6,8 лет.

Для изменчивости месячного диапазона изменения уровня Каспийского моря характерны имеющие низкую повторяемость низкочастотные колебания с периодом 10,0 лет и высокочастотные с периодом 3,2–3,7 и 4,5 лет. Общими для многолетней изменчивости всех названных параметров уровня Каспийского моря являются имеющие среднюю повторяемость высокочастотные колебания с периодом 2,0–2,7 лет.

Структура многолетней изменчивости стока Волги

Непрерывный ряд годового стока Волги имеет продолжительность 77 лет (1938–2014 гг.). В периодограмме ряда после взятия первой разности обнаружено три гармоники. Главные гармоники относятся к разряду высокочастотных, при этом первая гармоника имеет период 2 года, вторая – 3,6 лет. В периодограмме ряда после высокочастотной фильтрации обнаружено четыре гармоники. Первая гармоника относится к разряду высокочастотных (период 3,7 лет), вторая – к разряду низкочастотных (период 10,0 лет).

В спектре ряда СТОКГОД-ПР присутствуют три пика с периодом 2,0; 2,4 и 3,6 лет (рис. 4.15).

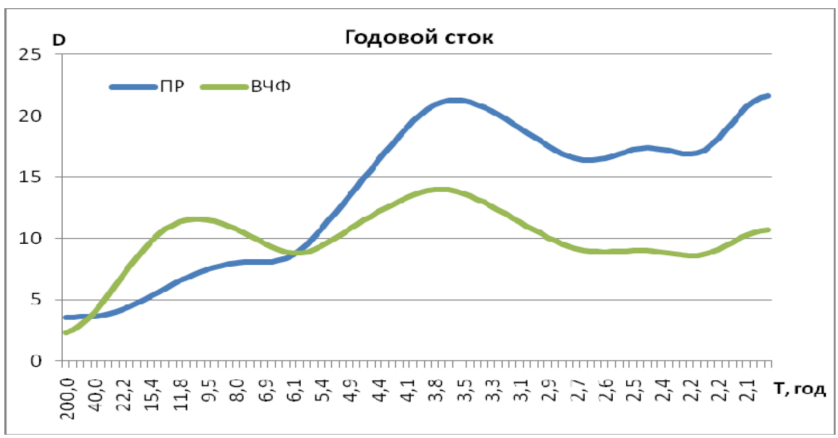


Рис. 4.15. Спектр временных рядов годового стока Волги, модифицированных путем взятия первой разности (ПР) и высокочастотной фильтрации (ВЧФ).

В спектре ряда СТОКГОД-ВЧФ присутствуют четыре пика с периодом 2,0; 2,5, 3,7 и 10,8 лет. При этом самыми высокими (и при этом одинаковыми по высоте) у ряда СТОКГОД-ПР два пика с периодом 2,0 и 3,6 лет, у ряда СТОКГОД-ВЧФ – пик с периодом 3,7 лет, при этом пики ряда СТОКГОД-ПР заметно выше пика ряда СТОКГОД-ВЧФ. Размах колебаний у ряда СТОКГОД-ПР повышается по мере уменьшения периода (увеличения частоты). У ряда СТОКГОД-ВЧФ такой зависимости не наблюдается.

Как следует из рис. 4.16, ведущую роль в изменчивости месячного стока Волги играют высокочастотные колебания с периодом менее 5 лет ($f > 0{,}2$). У ряда, модифицированного путем высокочастотной фильтрации (СТОК-ВЧФ), первая гармоника была высокочастотной во все месяцы, за исключением февраля, марта, августа и сентября, а вторая гармоника во все месяцы, но за исключением июня, июля и декабря.

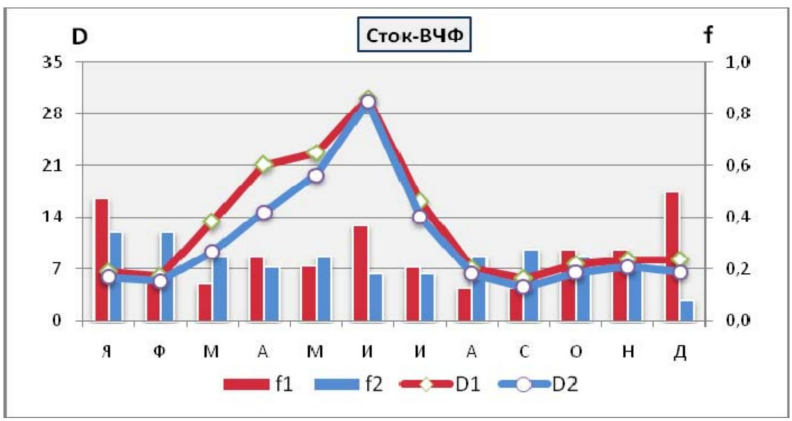


Рис. 4.16. Дисперсия (D) и частота (f) первой (1) и второй (2) гармоник временных рядов месячного стока Волги после их модификации путем высокочастотной фильтрации.

Дисперсия стока имела четко выраженный сезонный ход, возрастала в период половодья (март-июль) и достигала максимума в июне. Первая и вторая гармоники рядов практически не отличались друг от друга по уровню дисперсии как у ряда СТОК-ПР, так и у ряда СТОК-ВЧФ.

В периодограммах каждого из рядов СТОК-ВЧФ обнаружено от 4 до 10 гармоник (рис. 4.17). Низкая повторяемость (от 3 до 6 месяцев) была присуща высокочастотным гармоникам с периодом 2,0; 2,1; 2,2; 2,7; 2,9 и 4,8 лет и низкочастотным с периодом 5,4; 6,9; 7,6; 10,9 и 19,0 лет. Средняя повторяемость (от 6 до 9 месяцев) была свойственна

высокочастотным гармоникам с периодом 3,6 и 4,0 лет и низкочастотной с периодом 12,7 лет. Высокая повторяемость (от 9 до 12 месяцев) не выявлена ни у одной гармоники.

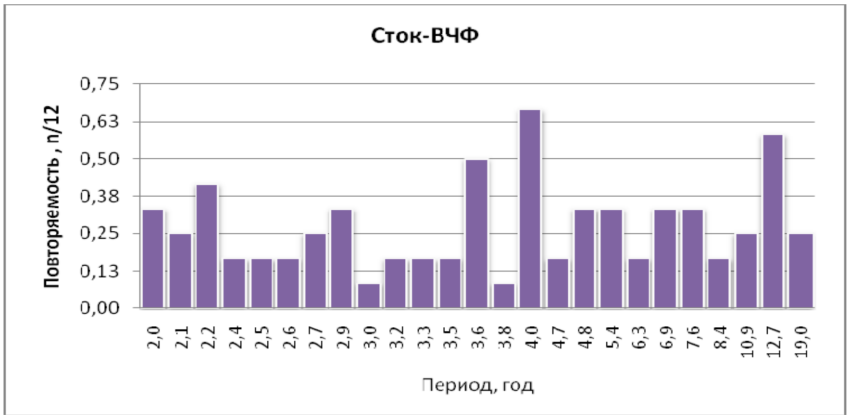


Рис. 4.17. Взаимосвязь между повторяемостью (n/12) и периодом (в годах) гармоник временных рядов среднего месячного стока Волги после их модификации путем высокочастотной фильтрации.

Если гармоники, выявленные в ходе анализа, оценивать по дисперсии, повторяемости и присутствию в модифицированных рядах (табл. 4.9), то главную роль во временной изменчивости стока Волги играют высокочастотные колебания с периодом 3,6 и 4,0 лет, присутствующие в обоих рядах и имеющие повышенную повторяемость и дисперсию.

Таблица 4.9. Распределение гармоник, выявленных на периодограммах модифицированных временных рядов месячного стока Волги

Часть моря	**Повторяемость сгруппированных гармоник**					
	низкая (3–6 месяцев)		средняя (6–9 месяцев)		высокая (9–12 месяцев)	
	высоко-част.	низко-част.	высоко-част.	низко-част.	высоко-част.	низко-част.
СТОК-ПР	**2,0**; **2,1**; **2,2**; 2,4; **2,9**; 4,8	6,9; 12,7	**3,6**; **4,0**	7,6	–	–
СТОК-ВЧФ	**2,0**; **2,1**; 2,2; **2,7**; 2,9; **4,8**	5,4; **6,9**; **7,6**; 10,9; 19,0	**3,6**; **4,0**	12,7	–	–

Примечание: СТОК-ПР – ряд стока после взятия первой разности; СТОК-ВЧФ – ряд стока после высокочастотной фильтрации). Жирным шрифтом выделены первые гармоники, подчеркиванием – вторые.

Также следует отметить присутствующие в обоих рядах высокочастотные колебания с периодом 2,0–2,2; 2,9 и 4,8 лет, имеющие повышенную дисперсию, но низкую повторяемость, и низкочастотные колебания с периодом 6,9; 7,6 и 12,7 лет, также имеющие либо повышенную дисперсию и низкую повторяемость, либо повышенную повторяемость и низкую дисперсию.

Когерентность колебаний уровня моря и стока Волги

В период 1938–2011 гг. степень когерентности колебаний среднего годового уровня моря на посту Махачкала с колебаниями годового стока Волги в общем была высокой ($R > 0,6$) (рис. 4.18). На графике выделяются: а) широкое плато, охватывающее колебания с периодом более трех лет и высокой степенью когерентности; б) ложбина, соответствующая колебаниям с периодом 2,6 лет и низкой степенью когерентности ($R < 0,4$); в) горб, соответствующий колебаниям с периодом 2,2 лет и средней степенью когерентности ($0,4 < R < 0,6$). Наибольшая степень когерентности свойственна колебаниям с периодом 10,5 лет (рис. 4.18).

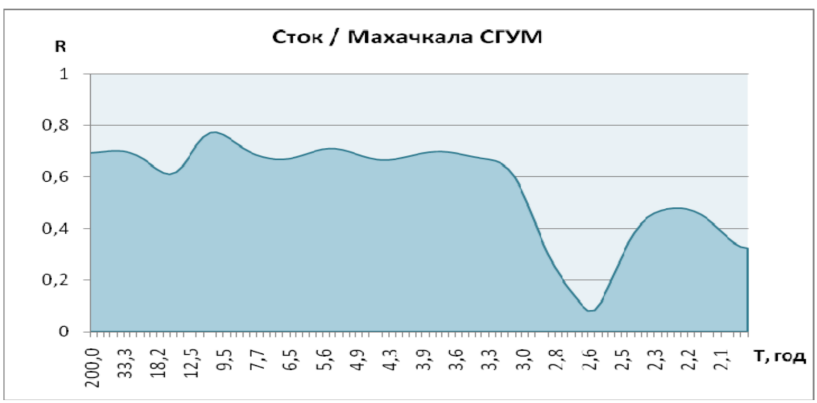


Рис. 4.18. Когерентность временных рядов годового стока Волги и среднегодового уровня моря на посту Махачкала.

Основные результаты

Как было показано выше, из числа гармоник, выявленных на периодограммах временных рядов среднемесячных уровней моря, характерными для всей акватории Каспия являются низкочастотные гармоники с периодом 12,0–13,3 и 17,3–19,3 лет. Эти периоды также характерны для среднегодового уровня моря на различных постах.

Первые гармоники, повторяющиеся во временных рядах уровня Каспийского моря и стока Волги, представлены в виде матрицы в табл. 4.10. В рядах СГУМ, МИНГУМ, МАКСГУМ повторяются низкочастотные гармоники с периодом 12–13 и 17–19 лет. Ряд ГДИУМ с остальными рядами уровня моря объединяет только одна низкочастотная гармоника с периодом 12–13 лет. В низкочастотной области не обнаружены первые гармоники, повторяющиеся в рядах уровня моря и стока Волги. В рядах МИНГУМ, МАКСГУМ, ГДИУМ и СТОК-ГОД повторяется высокочастотная гармоника с периодом 2,0–2,2 лет, отсутствующая в рядах СГУМ.

Таблица 4.10. Повторяющиеся первые гармоники в различных временных рядах уровня Каспийского моря и стока Волги. Выше диагонали приведены высокочастотные, а ниже низкочастотные гармоники (период в годах)

	СГУМ	МИНГУМ	МАКСГУМ	ГДИУМ	СТОК-ГОД
СГУМ		–	–	–	–
МИНГУМ	12–13; 17–19		2,0–2,2	2,0–2,2	2,0–2,2
МАКСГУМ	12–13; 17–19	12–13; 17–19		2,0–2,2	2,0–2,2
ГДИУМ	12–13	12–13	12–13		2,0–2,2
СТОК-ГОД	–	–	–	–	

Рассмотренные выше временные ряды отличаются друг от друга также по распределению энергии колебаний между различными частотами (табл. 4.11). Энергия колебаний среднего уровня моря в основном сосредоточена в низкочастотной области, годового диапазона уровня моря и стока Волги – в высокочастотной области, а энергия колебаний минимального и максимального уровня моря рассеяна по всему спектру.

Таблица 4.11. Распределение энергии колебаний УКМ и стока Волги между различными частотами

Ряды	**Низкочастотная область**	**Высокочастотная область**
СГУМ	+	
МИНГУМ	+	+
МАКСГУМ	+	+
ГДИУМ		+
СТОК-ГОД		+

Из сказанного выше следует, что у многолетней изменчивости минимального и максимального уровня, диапазона его колебаний общих черт с изменчивостью стока Волги больше, чем у изменчивости среднего уровня моря. Однако, как это следует из данных, приведенных табл. 4.12, степень когерентности стока Волги с рядом СГУМ выше, чем с рядами МИНГУМ, МАКСГУМ и ГДИУМ. Это противоречие можно объяснить тем, что общие черты изменчивости устанавливались по результатам анализа модифицированных рядов, а для анализа когерентности использовались исходные ряды. Для последних характерна высокая энергия колебаний на ультранизких частотах, которая, по-видимому, «просачивалась» в низкочастотную область, о чем свидетельствуют кривые когерентности рядов СТОК/СГУМ, которые в низкочастотной области выглядят как широкое плато (рис. 4.18).

Таблица 4.12. Когерентность колебаний уровня моря и стока Волги

Ряд	Пункт	Средняя степень когерентности для всех частот	Пики на кривой когерентности, период в годах	
			высокие	средние
СГУМ	Форт-Шевченко	Низкая	4,8	–
	Махачкала	Высокая	10,5*	2,2
	Красноводск	Высокая	5,3*	–
	Баку	Высокая	5,6*	2,2
МИНГУМ	Форт-Шевченко	Средняя	2,0; 6,3; 25,0	2,9
	Махачкала	Средняя	10,0; 50,0	2,3; 4,0
	Красноводск	Низкая	4,9	2,5
	Баку	Низкая	9,5	2,1
МАКСГУМ	Форт-Шевченко	Средняя	3,4	2,2
	Махачкала	Высокая	11,2	2,2
	Красноводск	Низкая	5,4	–
	Баку	Средняя	2,1; 11,4	–
ГДИУМ	Форт-Шевченко	Низкая	2,2; 9,1	2,7
	Махачкала	Средняя	2,2; 9,1	3,1
	Красноводск	Низкая	2,6; 3,9	–
	Баку	Средняя	2,1; 7,1	4,9*

Примечание: * пики на платообразных участках кривой когерентности; при наличии нескольких высоких пиков самый высокий из них обозначен подчеркиванием.

Полученные результаты позволяют частично определить условия, которым должны соответствовать многолетние колебания УКМ для их включения в схему сверхдолгосрочного прогноза УКМ. Во-первых, они должны вносить большой вклад в общую изменчивость уровня моря

на отрезке времени, равном заблаговременности прогноза. Во-вторых, они должны иметь высокую повторяемость в пространстве (на различных постах) и времени (в различные месяцы года). В-третьих, они должны иметь «двойников» (совпадающие по частоте гармоники) во временных рядах минимального, максимального уровня моря и диапазона его колебаний. В-четвертых, они должны быть согласованы с колебаниями стока Волги.

Из результатов выполненных исследований следует, что последним трем требованиям удовлетворяют только колебания с периодом 12–13 и 17–19 лет. Они удовлетворяют и первому требованию, если заблаговременность прогноза не превышает 20–25 лет.

4.6. Особенности рельефа уровенной поверхности Каспийского моря

Уровенная поверхность Каспийского моря даже при многолетнем осреднении наблюдений не является строго горизонтальной плоскостью, а представляет собой сложный рельеф, меняющийся во времени и по площади. Поэтому объективное суждение о пространственном изменении уровня моря можно получить при наличии большого количества уровнемерных постов, равномерно расположенных по периметру моря и островах. К сожалению, существующей сети уровенных наблюдений для этой цели недостаточно. Рельеф поверхности моря в различных районах формируется под влиянием главным образом гидрометеорологических факторов, таких как распределение атмосферного давления, ветра и течений, сгонно-нагонные явления, речной сток и др., которые создают специфические особенности рельефа поверхности моря. Однако существуют некоторые общие закономерности в распределении уровня моря по площади.

В [10] на основе анализа разностей уровней между отдельными пунктами северной и южной частей Каспийского моря за период 1925–1967 гг. показано, что уровень Северного Каспия выше среднего по морю. Разности отметок на северном и южном побережьях моря изменяются от нескольких сантиметров до 30 см. Наибольшая разность среднемесячных значений уровня моря по меридиану моря отмечается в годы с большим стоком Волги в половодье. Минимум перепада уровней между постами о. Тюлений и о. Искусственный практически всегда наблюдается перед началом половодья в апреле.

Существующий наклон уровенной поверхности с севера на юг и с запада на восток, объясняется физико-географическим положением моря и тем, что реки, определяющие основную приходную часть водного

баланса (Волга, Урал, Сулак, Терек), расположены в северной и средней частях моря. По оценке Н.А. Скриптунова [29] уклон водной поверхности от Бирючьей Косы до дебаркадера «Донбасс», которые расположены на расстоянии 86 км друг от друга, в штиль и в межень составляет 0,84 м, т. е. 0,98 см на 1 км. Средний наклон уровня за период с 1950 по 1993 г. составил 96 см на 105 км, т. е. 1,1 см на 1 км. Разность средних годовых уровней моря на двух опорных постах восточного побережья моря – Форт-Шевченко и Туркменбаши за весь период наблюдений составила 2,2 см на 100 км, а разность между постами западного побережья моря – Махачкала и Баку (также за весь период наблюдений) составила 2,4 см на 100 км. Следует отметить, что все вышесказанное относится к среднему годовому уровню, полученному осреднением за 10–15, а иногда и больше лет.

Величина наклона водной поверхности меняется также и по сезонам. Как уже отмечалось, наибольшие сезонные колебания отмечаются в мелководной части устьевого взморья Волги, где в среднем они достигают 1 м и постепенно уменьшаются к югу до значений, характерных для сезонного хода всего Каспийского моря (30–40 см). В весенние месяцы, когда происходит таяние снега и сток рек максимальный, наклон с севера на юг максимальный. Летом, когда паводочная волна уже успела распространиться по морю, наклон минимальный. Зимой и осенью разность уровней с севера на юг опять увеличивается за счет сгонно-нагонных явлений и широтной неравномерности испарения с поверхности моря. По линии Форт-Шевченко – Махачкала разность уровней в среднем за весь период наблюдений составляет примерно 5 см, а в направлении Баку – Туркменбаши наклон с 1950 года поменял знак.

Глава 5.

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

5.1. Общие положения

Что же служит причиной столь значительных колебаний УКМ, приносящих большие неприятности для населения прибрежных районов Каспия, и можно ли их прогнозировать с достаточной надежностью на годы вперед? Поиск ответов на эти вопросы является предметом многочисленных исследований ученых и специалистов. Понимание причин многолетних колебаний УКМ даст возможность создания эффективных моделей, с помощью которых можно получить информацию об УКМ на перспективу, что в свою очередь даст возможность уменьшить размер ущерба от значительных изменений уровня.

На неустойчивость уровенного режима Каспийского моря исследователи обратили внимание давно. Немецкий естествоиспытатель и путешественник А. Гумбольдт, посетивший Каспий в 1829 г., высказал гипотезу, что причиной колебаний уровня моря является периодическое повторение очень сухих и очень влажных лет. Его соотечественник Паллас, возглавлявший в 1768–1774 гг. экспедицию Петербургской академии наук в центральной области России, включая Прикаспийскую низменность, указал на зависимость колебаний УКМ от гидрометеорологических факторов: температуры воздуха, ветра, количества атмосферных осадков и количества приносимой реками воды. Особое значение эта проблема приобрела в XX в. в результате значительного падения уровня более чем на 3 м с 1929 по 1977 г., а затем столь же значительного его подъема на 2,4 м с 1978 по 1995 год.

Вопросами изучения причин аномальных колебаний УКМ и их прогнозированием занимались известные климатологи, геофизики, гидрологи, океанологи, геоморфологи, среди них Э.Х. Ленц, А.И. Воейков, Н.М. Книпович, А.И. Михалевский, Г.И. Терфильев, Л.С. Берг,

Л.Ф. Рудовиц, С.А. Ковалевский, Г.Р. Брегман, Б.А. Аполлов, А.А. Каминский, В.С. Ковалевский, Б.Д. Зайков, М.И. Будыко, Н.А. Белинский, Г.П. Калинин, М.С. Эйгенсон, Е.Г. Архипова, Г.С. Голицын, И.А. Шикломанов, Л.А. Вительс, Г.С. Гирс, Р.К. Клиге, А.Н. Косарев, С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, Д.А. Раткович, А.В. Мещерская, В.Н. Михайлов, Г.И. Рычагов, М.Г. Хубларян, Г.П. Панин, В.Е. Привальский, К.И. Смирнова, Ф.С. Терзиев, Р.Е. Никонова, В.Ю. Георгиевский, В.Н. Малинин, Б.А. Шлямин и многие другие.

Несмотря на интенсивные исследования причин разномасштабных колебаний УКМ, которые проводятся в России и других странах в последние годы, на наличие международных проектов и общепризнанных фундаментальных теоретических и прикладных результатов, проблема адекватного математического моделирования и прогнозирования уровня остается открытой. Сложность проблемы долгосрочного прогноза УКМ заключается в отсутствии ясного понимания механизмов формирования долгопериодных колебаний УКМ. Все типы колебаний (месячные, сезонные, межгодовые, многолетние, вековые и тысячелетние) зависят от большого количества факторов гидрометеорологического, тектонического и антропогенного характера, которые непрерывно меняются во времени и в пространстве, сложным образом взаимодействуя друг с другом. Трудно оценить относительный вклад каждого из этих факторов в колебания УКМ.

В настоящее время в научном сообществе господствуют две основные гипотезы относительно причин многолетних колебаний УКМ: климатическая и геологическая. Согласно первой гипотезе, колебания уровня моря объясняются изменениями климата, от которого зависят составляющие водного баланса, в первую очередь речной сток и испарение с поверхности моря, на которые накладываются антропогенные факторы. Согласно второй гипотезе, многолетние колебания уровня обусловлены реакцией моря на геологические процессы, происходящие в ложе Каспийского моря.

Существование долгое время двух принципиально отличных гипотез породило большое количество сверхдолгосрочных прогнозов, часто противоречивых и далеких от реальной картины. К настоящему времени сформировался более или менее общий взгляд на причины многолетних колебаний УКМ в пользу превалирующей роли климатического фактора. Другие факторы, такие как тектоника, антропогенные воздействия, хотя и оказывают определенное влияние на многолетние колебания УКМ, но, по-видимому, не являются определяющими в относительно небольших масштабах времени.

Ниже более подробно рассматриваются различные концепции относительно причин многолетних колебаний уровня.

5.2. Климатическая водно-балансовая концепция колебаний уровня моря

5.2.1. Исследование связей между колебаниями уровня моря и изменчивостью общей циркуляции атмосферы

Уровень Каспийского моря, являясь индикатором глобальных климатических изменений, охватывающих значительные территории земного шара, представляет собой интегральную характеристику сложного взаимодействия элементов водного баланса, различных по физическим свойствам и условиям формирования. Климатические факторы, оказывающие влияние на характер формирования элементов водного баланса, приводят к постоянно изменяющемуся соотношению между приходными (поверхностный приток и атмосферные осадки, выпадающие на морскую поверхность) и расходными (испарение и сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол) его частями. Непостоянство соотношений элементов водного баланса определяет циклические колебания уровня моря различной продолжительности, нерегулярный характер которых затрудняет их предсказание на будущее.

Наиболее информативной характеристикой климатической системы является атмосферная циркуляция – один из основных климатообразующих факторов, который определяет не только направление переноса воздушных масс, синоптические и погодные условия, термический режим на водосборном бассейне Каспия, но и многие другие характеристики атмосферы и гидросферы. Влияние циркуляции атмосферы оказывается на всех процессах, которые определяют колебания уровня Каспийского моря (сток рек, испарение, осадки и др.). Сама циркуляция атмосферы определяется многими факторами, среди которых наиболее важным является лучистая энергия Солнца, неравномерное распределение которой по земному шару является причиной глобальной циркуляции. В многообразии видов атмосферных процессов трудно выявить повторяющиеся процессы или установить какие-либо закономерности в последовательности смены одних процессов другими.

Опубликовано много работ, в которых показывается, что крупномасштабные циркуляционные процессы формируют особенности климатических и погодных условий над Северным полушарием и его отдельными регионами [1–5, 7, 8, 10–12, 14–17, 19, 21, 22, 24–30, 34, 36–44, 46–49, 55, 57, 58, 60–73, 80, 83–85, 88, 91, 95–97, 103, 109–119].

Наиболее зримо эти процессы отражены в изменчивости характеристик центров действия атмосферы (исландский и алеутский минимумы, сибирский и гавайский максимумы). Ярко выраженная географическая зональность климатических составляющих обуславливает

зональность в распределении годовых осадков и испарения. Влагооборот является главным процессом, который наряду с другими климатообразующими процессами играет большую роль в формировании климата Земли и, в частности, климата водосборного бассейна Каспийского моря. Отдельные составные элементы влагооборота (адвекция влаги, осадки, речной сток), также связаны с характером радиационного баланса, атмосферной циркуляцией и свойствами подстилающей поверхности.

Результаты исследований последних лет достаточно убедительно показывают, что проблема прогноза многолетних колебаний УКМ тесно связана с проблемой прогноза климатических изменений на земном шаре и в его отдельных районах и ее решение зависит от понимания физических механизмов, которые управляют процессами в климатической системе. Изолированность Каспийского моря от океана определяет чувствительность его уровня к изменениям климатических условий в бассейне, оно четко реагирует на изменения общей циркуляции атмосферы, которая, в свою очередь, зависит от глобального термодинамического взаимодействия океана и атмосферы. Достоверное представление о будущем уровне Каспийского моря может быть составлено на основе анализа его водного баланса. Вследствие изменений составляющих водного баланса (осадков, испарения, речного стока и др.) непрерывно меняется гидрологический режим моря, гидрографические и геоморфологические условия его отдельных районов.

Впервые колебания уровня Каспия были объяснены изменением климатических условий (конкретнее – влиянием стока рек, испарения и атмосферных осадков на поверхность моря) еще Э.Х. Ленцем и А.И. Воейковым. Позже это направление развивалась Б.А Аполловым, Б.Д. Зайковым, Н.А. Белинским, Г.П. Калининым, И.А. Шикломановым, Е.Г. Архиповой, В.Н. Бортником, Р.Е. Никоновой и др.

Они также показали, что реалистичный долгосрочный прогноз УКМ может быть составлен на основе надежной климатической модели водного баланса. К сожалению, в настоящее время, несмотря на успехи в исследовании климата земного шара, моделей, способных с достаточной степенью точности описать глобальные, а тем более региональные изменения параметров климатической системы, пока не существует. Вместе с тем чрезвычайная актуальность проблемы долгосрочного прогноза УКМ заставляет искать пути ее решения на основе существующей, хотя и нередко противоречивой информации о причинах многолетних колебаний УКМ.

Существует большое количество исследований, в которых показана связь между многолетними колебаниями УКМ и атмосферными процессами не только в бассейне Каспия, но и далеко за его пределами.

Большая роль в этом принадлежит российскому ученому В.В. Шулейкину [107, 108], отчетливо показавшему роль океана в формировании климата материков.

В последние годы в рамках международной программы AMIP в ГГО были выполнены численные эксперименты с моделями общей циркуляции атмосферы по воспроизведению составляющих водного баланса Каспийского моря [2–4, 56, 86, 87, 117]. Цель этих экспериментов состояла в проверке и обосновании гипотезы, согласно которой изменения влагооборота на ЕТР, а следовательно, и на водосборе Каспийского моря, связаны с глобальными колебаниями в системе взаимодействия океан-атмосфера. Исследования проводились на основе численных экспериментов с физически полными моделями общей циркуляции атмосферы и океана на длительные сроки, включающие периоды устойчивого роста и падения уровня Каспийского моря.

На начальном этапе по результатам моделирования глобального климата за 1979–1988 гг., полученным с помощью 21 модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА) в рамках международной программы сравнения моделей AMIP, выполнено сравнение годового хода общей облачности, осадков, массы снега и испарения с данными наблюдений на водосборе рек Волга и Урал. Оценены средние ошибки и ошибки годового хода в расчетах указанных характеристик на водосборе для каждой модели. Проведено сравнение расчетных изменений уровня моря с наблюдаемыми величинами [86, 87, 117]. Сравнение показало, что модели ОЦА в целом достаточно реалистично воспроизводят гидрологический и термический режим региона. Однако большинство моделей переоценивают количество выпадающих осадков. Одной из лучших моделей оказалась модель ОЦА ECHAM3 Метеорологического института Макса Планка (Гамбург, Германия). Неплохие результаты продемонстрировала и модель ОЦА ГГО.

Согласно расчетным и наблюденным данным, приведенным в [86], на протяжении XX в. на водосборе Каспийского моря, охватывающем значительную часть ЕТР, наблюдался рост приземной температуры воздуха (на 1,2 ºС в холодный период и на 0,6 ºС в теплый период года) и значительные вариации гидрологического цикла, что приводило к большим изменениям уровня Каспия. Изменения климата на водосборе в первые два десятилетия XXI в. оцениваются на основе статистического метода, который дает небольшой рост уровня Каспийского моря, а далее используются результаты расчетов с помощью 7 моделей общей циркуляции атмосферы и океана, разработанных в ведущих мировых центрах исследования климата.

Модели показывают существенный рост температуры приземного воздуха в XXI в., в частности на акватории Каспийского моря

температура возрастает к концу века на 2–4 ºС в зависимости от рассматриваемого сценария эмиссии парниковых газов, а на водосборе Волги – на 3–5 ºС. Региональный гидрологический режим также значительно изменяется. Существенно возрастают осадки на водосборе Волги, однако их рост компенсируется одновременным ростом испарения; в итоге сток рек увеличивается к концу века примерно на 10–20 км^3/год. На акватории Каспийского моря осадки практически не меняются, но сильно увеличивается испарение с морской поверхности (примерно на 20–30 км^3/год).

Среди основных результатов можно отметь наличие воспроизводимой моделями ОЦА статистически значимой связи между изменениями УКМ и аномалиями температуры в тропической части Тихого океана, тесно связанными с явлением Эль-Ниньо и Южным колебанием. Эта связь подтверждается данными наблюдений. В частности, коэффициент корреляции между среднегодовой температурой поверхности океана (ТПО) в секторе 15º ю. ш. – 15º с. ш., 160–120º з. д. и среднегодовыми изменениями уровня Каспийского моря равен 0,52, что показывает наличие существенной статистической связи.

По результатам анализа сделан вывод, что изменения атмосферной циркуляции в бассейне Каспийского моря, вызванные положительными аномалиями ТПО в тропической зоне Тихого океана, ведут к увеличению стока Волги и уменьшению видимого испарения с поверхности моря, а суммарный эффект этих двух факторов приводит к более сильной связи аномалий ТПО с изменениями уровня Каспийского моря. Аномалии температуры Тихого океана оказывают влияние на влагооборот в регионе в основном через вызываемое ими изменение циклонической активности. Заметим, что связь между аномалиями ТПО в тропическом Тихом океане и изменениями стока Волги в равной степени хорошо воспроизводится как моделью ECHAM4, так и моделью ОЦА ГГО.

Показано, что основной вклад в изменение УКМ, вносят среднегодовые осадки на водосборе рек Волги и Урала и испарение с акватории Каспийского моря.

Каспийское море находится в зоне влияния различных типов циркуляции атмосферы: влажных воздушных масс, формирующихся над Северной Атлантикой, сухих континентальных воздушных масс, формирующихся над восточными районами России и Казахстана, теплых субтропических масс воздуха, приходящих со Средиземного моря и Малой Азии, а также воздушных масс, непосредственно формирующихся над Каспийским морем. Все эти типы циркуляции непрерывно меняются и, взаимодействуя друг с другом, создают стохастический (вероятностный) характер изменчивости погоды.

5.2.2. Влияние Северной Атлантики на климат и погоду водосборного бассейна Каспия

Вопросу влияния Северной Атлантики на развитие атмосферных процессов и погоды на ЕТР посвящена обширная литература [22, 55, 61–64, 72, 107]. В ней показано значительное влияние Атлантического океана на климат Европы. Обнаружена достаточно тесная зависимость между тепловым состоянием Северной Атлантики и погодой на ЕТР.

Согласно исследованиям Л.В. Клименко [43], вековая (1891–1990 гг.) динамика увлажнения ЕТР проявляется в чередовании продолжительных сухих и влажных периодов и обуславливает соответствующую повторяемость осадкообразующих процессов. При этом в холодном полугодии эти периоды, как правило, более продолжительные, чем в теплом. Так, сухие периоды наблюдались в 1926–1935 и в 1941–1965 гг., когда в отдельных пятилетиях повторяемость сухих процессов превосходила повторяемость дождливых на 26 %. Но самым отличительным явлением холодного периода был 10-летний влажный период 1981–1990 гг., когда повторяемость дождливых процессов превысила повторяемость сухих более чем на 20 %, а в пятилетии 1986–1990 гг. разность повторяемости достигла экстремальной величины – 38 %. В теплом полугодии более короткие сухие и влажные периоды до 1940 г. сменялись часто, но затем с 1941 по 1975 г. преобладали сухие периоды.

Анализ многолетних данных показал, что многоводные и маловодные периоды стока рек, главным образом Волги, связаны с развитием циклонической циркуляции в ее бассейне, а интенсивность процессов испарения находится в прямой зависимости от развития процессов антициклонической циркуляции. Тенденции роста атмосферных осадков, выпадающих в водосборной части волжского бассейна, согласуются с тенденцией роста стока Волги. Изменчивость основных составляющих водного баланса и элементов гидрометеорологического режима тесным образом связана с изменчивостью барико-циркуляционного режима. Значительная увлажненность водосборного бассейна Каспийского моря, обусловленная активизацией западной формы циркуляции в 1970-е годы и аномальным развитием циклонической циркуляции в пределах всего Атлантико-Европейского сектора – основная причина многоводности Волги и резкого подъема уровня моря. Эти выводы впоследствии были подтверждены в [35, 38, 43, 106].

Во многих работах последних лет [5, 20, 23, 26, 31, 33, 42, 83, 89, 91] показано, что изменчивость УКМ связана со сменой циркуляционных эпох, характеризующихся зональными, меридиональными или смешанными процессами в атмосфере. Однако колебания

циркуляционных эпох не цикличны и носят случайный характер. На пути решения задачи сверхдолгосрочного прогноза УКМ очень важно знать, какая на данный момент действует циркуляционная эпоха и как далеко мы отстоим от начала этой эпохи. С этим связаны не только заблаговременность прогноза уровня моря, но и его точность. К сожалению, для установления закономерностей в смене циркуляционных эпох недостаточно статистического материала.

Одним из путей решения этой проблемы является анализ временного распределения частот резких изменений хода УКМ. В [11] была замечена концентрация таких изменений около лет с наиболее резкими изменениями циркуляции атмосферы. Аналогичная концентрация оказалась и для ряда других гидрометеорологических характеристик (атмосферные осадки, давление, циркуляция, температура воздуха). Поэтому основное внимание исследователей было направлено на получение достаточно надежных статистических оценок значимости связей резких изменений хода УКМ.

Л.С. Берг и В.Ю. Визе [12, 18] произвели сопоставление поведения УКМ за историческое время и условий плавания в арктических морях. Они обнаружили, что легким условиям плавания в Арктике отвечает понижение уровня, а тяжелым условиям – повышение. При этом они также обнаружили, что если над бассейном Волги зимой устанавливается антициклон, обуславливающий более сухую погоду, что приводит к сокращению стока рек и, как следствие, понижению уровня моря, то в это время в Арктике наблюдаются теплые зимы и более легкие ледовые условия. Если траектории циклонов проходят над бассейном Волги, обуславливая там обильные осадки, то это приводит к увеличению стока Волги и, как следствие, к повышению уровня. В Арктике в это время устанавливается антициклон, обуславливая там суровые зимы и тяжелые ледовые условия. Этот факт был также подтвержден Н.А. Белинским [11], который показал, что ледовитость арктических морей, в частности Баренцева моря, определяется главным образом интенсивностью цикло-антициклонической деятельности.

А.А. Гирс [25, 26], основываясь на типизации форм атмосферной циркуляции Северного полушария, разработанной Г.Я. Вангенгеймом и его школой, изучил особенности стока волжских вод в Каспий и колебаний уровня моря в зависимости от западной (W), восточной (E) и меридиональной (C) форм атмосферной циркуляции и их вариаций и показал, что низкий уровень Каспия наблюдается в эпоху с преобладанием восточной формы E, а высокий уровень – с преобладанием меридиональной формы C. Процессы западной формы циркуляции W способствуют или относительной стабилизации уровня Каспия, или повышению его.

Установленные связи А.А. Гирс объясняет тем, что при процессах формы W циклоны с Атлантики смещаются на восток, в том же направлении смещается и азорский максимум. В результате в северных частях водосбора Волги количество выпадающих осадков превышает норму, а в южных районах отмечается дефицит осадков. Граница между зонами избытка и дефицита осадков изменяется в зависимости от разновидности процесса формы W. Если северная зона избытка осадков окажется интенсивнее и займет большую площадь водосбора Волги, чем южная зона дефицита осадков, то уровень Каспия при процессах W будет расти. И наоборот, в случае обратного соотношения указанных зон, уровень Каспия будет понижаться.

Более однозначной эта связь проявляется при процессах форм Е и С. В случае процессов Е на водосборе Волги будет преобладать антициклонический режим погоды и значительный дефицит осадков и, как следствие, уменьшение стока рек и понижение уровня Каспия. При процессах формы С характерен выход средиземноморских циклонов на водосбор Волги, в результате там выпадает большое количество осадков, сток резко возрастает и, как следствие, повышается уровень Каспия.

Пользуясь изложенными выше связями между формами W, С, Е и уровнем Каспия, Гирс объяснил поведение УКМ на различных временных этапах. Так, по Гирсу в период с 1891 по 1928 г. не должно было быть существенного падения уровня, так как процессы формы Е в этот период были ослаблены (ниже нормы). В период с 1929 по 1939 г. процессы формы Е были аномальными, что обусловило резкое снижение уровня на 148 см. За предыдущие 37 лет (1891–1928 гг.) уровень снизился на 52 см. С 1940 по 1948 г. наблюдалось аномальное развитие процессов меридиональной формы, поэтому уровень Каспия испытывал незначительные колебания. В 1949 г. снова активизировались процессы формы Е, при этом уровень моря с 1949 по 1955 г. понизился на 45 см. После этого активизировались процессы формы С и уровень Каспия повысился к 1959 г. на 125 см. С 1960 г. снова усилились процессы формы Е и уровень моря к 1962 г. снизился на 94 см.

И.С. Ким и С.П. Никулина [41] обнаружили связь колебаний уровня моря с различными формами атмосферной циркуляции (по классификации Вангенгейма-Гирса) и показали, что увеличение повторяемости зональных процессов W ведет к росту уровня моря, а увеличение повторяемости процессов Е и С – к его понижению, причем влияние повторяемости формы С на уровень моря значительно слабее. По прогнозу, составленному авторами в 1994 г., в ближайшие годы уровень должен был расти со средней скоростью 8–9 см/год, после чего стабилизироваться с незначительными колебаниями, а затем, примерно с 2025 г., вновь должен последовать рост уровня Каспия.

А.Н. Кренке и В.В. Попова [50] выполнили корреляцию между колебаниями УКМ и повторяемостью типов циркуляции атмосферы по классификации Дзердзеевского и показали, что подъем уровня моря связан с усилением меридиональной циркуляции, а его падение – с активизацией зональной. В годы преобладания меридиональной циркуляции атмосферных осадков выпадает больше, как летних, так и особенно зимних, по сравнению с годами преобладания зональной циркуляции.

Н.С. Сидоренков и В.И. Швейкина [83] трансгрессии и регрессии УКМ связывают с длительностью климатических эпох, обусловленных долгопериодной неравномерностью вращения Земли с характерным временем около 70 лет. Авторами были выделены четыре основных периода с различными отклонениями от норм осадков и температуры воздуха, представленные в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Периоды с отклонениями от норм температуры воздуха и осадков

Период	Отклонение от нормы
1891–1903	ниже нормы
1911–1935	выше нормы
1939–1971	ниже нормы
1976–1991	выше нормы

Анализ климатического режима бассейна Волги показал, что в 1891–1911 и 1936–1975 гг. (период понижения уровня), осадки были в основном ниже нормы, а в 1912–1935 и 1976–1991 гг., т. е. в период повышения уровня моря – выше нормы. Если рассматривать весь период наблюдений, то до 1975 г. преобладали отрицательные аномалии облачности, а с 1976 по 1983 г. – положительные. Этим авторы объясняют начавшийся в 1978 г. подъем уровня моря. До 1976 г. осадки в бассейне Волги и, вероятно, над морем, были ниже нормы, что привело к уменьшению стока Волги. После 1976 г. осадки стали превышать норму, а испарение стало ниже нормы, что привело к увеличению стока и, как следствие, к повышению уровня моря.

А.В. Мещерская с соавторами [57] на основе анализа влияния климатических изменений на водосборе Волги на волжский сток показали, что при годовом осреднении существует высокая корреляция между осадками на водосборе и стоком, что дает определенную уверенность в возможности модельного воспроизведения волжского стока. Рассмотрены корреляционные зависимости между стоком Волги, приращениями уровня Каспийского моря и осадками, осредненными по сезонам,

периодам и за год, и их изменения на протяжении XX столетия. Показано, что на сток Волги в текущем году влияют осадки за три предшествующих года, причем наибольшее влияние оказывают осенние и летние осадки прошлого года и зимние осадки текущего года. Предложен способ выявления оптимального периода учета осадков для прогноза приращений уровня Каспийского моря, который зависит от способа расчета приращений.

Выполнен анализ сезонных аномалий осадков и годового стока Волги за маловодные и многоводные периоды. Показано, что дефицит осадков в 1933–1940 и в 1971–1977 гг. в подавляющей части, а избыток осадков в 1978–1990 гг. практически полностью определялся осадками теплой части года. Оценены линейные тренды сезонных сумм осадков за весь период с 1891 по 1998 г. и за отдельные периоды. Тренды осадков за весь период слабы и статистически незначимы. Период подъема УКМ в 1978–1990 гг. характеризовался ростом осадков теплого и уменьшением осадков холодного периода. В 1978–1999 гг. положительный тренд осадков теплого периода сменился на отрицательный тренд за счет очень засушливых летних условий на водосборе Волги в 1996, 1998 и 1999 гг. [4].

По мнению С.Н. Родионова [73], основные черты климата и соответствующая реакция УКМ достаточно хорошо связаны с североатлантическим колебанием (САК). Так, фаза ослабления САК в 1970-е годы привела к резкому снижению уровня моря, а фаза активизации САК после 1977 г. привела к росту УКМ.

Н.А. Белинский [11], И.Ф. Гетман [24], В.Н. Лепешко [51] и др. указывают на существенную роль южных циклонов в формировании составляющих водного баланса УКМ, а также на зависимость между повторяемостью южных циклонов и различными индексами циркуляции атмосферы. Так, Гетман [24] считает, что на фоне общей циркуляции атмосферы необходимо рассматривать группы южных циклонов, приходящих на водосборный бассейн Каспия. Они зарождаются, как правило, над Средиземным морем (средиземноморские циклоны) и Малой Азией, а иногда над Черным и Каспийским морями. Южные циклоны, обладая большим влагосодержанием, выходя на водосборный бассейн Каспия обуславливают там обильные осадки в виде дождя (летом) и снега (зимой). Нередки случаи, когда с выходом южного циклона может выпасть месячная норма садков (табл. 5.2, 5.3).

Источниками крупных климатических аномалий, в частности, одним из условий формирования засух, являются процессы блокирования. Высокие и обширные блокирующие антициклоны и иногда гребни над Восточной Европой в конце зимы и начале весны создают условия для формирования засух в бассейне Волги. Типичной ситуацией была

засуха 1937/1938 гг., приведшая к резкому падению уровня Каспийского моря. Область повышенного давления охватывала почти всю Европу от Черного и Каспийского моря до Арктики, обусловив дефицит осадков. В это время в районе азорского максимума располагалась область пониженного давления. Достаточно подробный анализ этой ситуации был описан в [11]. К аналогичным ситуациям относятся также засухи 1975 и 2010 гг.

Таблица 5.2. Среднее годовое число дней с южными циклонами над водосборным бассейном Каспия [24]

Период	Бассейн Волги		Каспийское море	
	число дней	%	число дней	%
1938–1996	11,4	5,2	7,7	5,5
1938–1977	10,3	4,8	4,9	3,7
1978–1996	12,2	5,3	13.7	8,7

Таблица 5.3. Повторяемость дней с южными циклонами над бассейном Волги и Каспийским морем за 1938–1999 гг. [24]

		Месяцы												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Бассейн Волги с учетом южных циклонов	n	50	64	56	73	91	60	67	48	48	36	46	41	680
	%	7,4	9,4	8,2	10,7	13,4	8,8	9,8	7,1	7,1	5,3	6,8	6,0	100
Бассейн Волги без учета южных циклонов	n	50	62	56	67	70	45	58	42	45	33	46	41	615
	%	8,1	10,1	9,1	10,9	11,4	7,3	9,4	6,8	7,3	5,4	7,5	6,7	100
Выход южных циклонов на Каспийское море	n	26	29	50	56	45	57	32	18	23	50	49	36	471
	%	5,5	6,2	10,6	11,9	9,6	12,1	6,8	3,8	4,9	10,6	10,4	7,6	100

И.С. Зайцева [36, 37], проанализировав 100-летний ряд по степени засушливости климата путем выделения групп лет с определенными отклонениями температуры воздуха от нормы и сопоставив эти отклонения с условиями формирования стока Волги, пришла к выводу, что начиная с 1978 г. в бассейне Волги началась фаза повышенной водности.

А.В. Шнитников [106], проанализировав период многовековой изменчивости общей увлажненности Евразии за 1850 лет, пришел к выводу, что трансгрессии Каспия происходят во время максимумов увлажненности (прохладно-влажных фаз цикла), а минимумам увлажненности (сухим и теплым фазам цикла) соответствуют регрессии Каспийского моря.

В.Н. Малинин [55] считает, что увлажненность в бассейне Волги в холодный период года полностью обусловлена процессами влагообмена в Северной Атлантике. Если эффективное испарение в Северной Атлантике оказывается выше нормы, то на европейский континент будет переноситься большее количество влаги и, соответственно, большее количество осадков выпадет в бассейне Волги, что приводит к увеличению годового стока и росту уровня моря. Обратная картина наблюдается при ослаблении эффективного испарения над Северной Атлантикой. Эта концепция послужила автору методологической основой для построения физико-статистической модели сверхдолгосрочного прогноза составляющих водного баланса моря (стока Волги, притока речных вод, изменений объема моря) и его уровня.

5.2.3. Основные причины повышения уровня Каспийского моря в период с 1978 по 1995 год

Анализ климатообразующих факторов и оценка их влияния на гидрометеорологические условия каспийского бассейна показал, что формирование гидрометеорологических процессов в бассейне Каспия в XX–XXI столетиях связано с крупномасштабными процессами взаимодействия океана и атмосферы, развивающимися над Северной Атлантикой. Было установлено, что длительные однонаправленные изменения уровня – регрессии или трансгрессии – происходят в условиях глобальной климатической изменчивости, проявляющейся в пределах всего Атлантико-Европейского сектора Северного полушария. Так, в условиях аномального развития процессов антициклонической циркуляции в 1930–1941 и 1970–1977 гг. происходило понижение уровня моря, соответственно, на 1,8 и 0,7 м. Установление циклонических процессов в 1978–1995 гг. привело к его резкому повышению (на 2,4 м). Рассматриваемое повышение уровня обусловлено главным образом климатическими и частично антропогенными факторами, изменившими соотношение между составляющими водного баланса. Произошло увеличение объема приходных и уменьшение его расходных составляющих.

Объем суммарного речного стока, поступившего в море (около 309 км^3/год) за период 1978–1996 гг., был значительно больше

среднего объема за предшествующие 50 лет и по величине может быть сопоставим с многоводным периодом начала XX столетия, когда в море поступало до 330 км^3 речной воды в год. В отдельные годы (1979, 1985, 1990, 1991, 1993 и 1994 гг.) в море поступало свыше 350 км^3 речных вод. Волга приносила в море свыше 260 км^3/год, в отдельные, наиболее многоводные годы, – более 300 км^3. Сток рек за период с 1978 по 1995 г. в отдельные годы составлял 3–4 % обеспеченности (в среднем около 30 % обеспеченности).

С начала XX столетия в многолетнем ходе атмосферных осадков прослеживалась тенденция роста (особенно в 1940-х гг.), а в 1978–1996 гг. их количество значительно превысило норму (свыше 200 мм/год). Значительный рост атмосферных осадков, выпадающих на водосборном бассейне и над морской акваторией с 1978 по 1996 г., обусловили не только многоводность рек, но и увеличение доли приходной составляющей водного баланса: в море поступало примерно на 40 км^3 воды больше, чем ее испарялось и стекало в залив Кара-Богаз-Гол. Аномальное развитие процессов циклонической деятельности в Атлантико-Европейском секторе обусловило значительную увлажненность не только в пределах водосборного бассейна Каспийского моря, но и над его поверхностью. В результате этого интенсивность процессов испарения в 1970–1990-е гг. была значительно ниже предшествующих лет и не превысила нормы. За период повышения уровня с морской поверхности испарялось в среднем около 920 мм слоя, а в отдельные годы значительно меньше. Практически на всех станциях, расположенных в различных частях Каспийского моря, в многолетнем ходе годовых и сезонных величин испарения прослеживаются статистически значимые тенденции спада, хорошо согласующиеся с аналогичным характером изменчивости интенсивности антициклонической циркуляции и скорости ветра.

Сокращение расходной части водного баланса Каспийского моря происходило не только под влиянием климатических факторов, определивших незначительную интенсивность процессов испарения, но также усугубилось перекрытием пролива Кара-Богаз-Гол глухой плотиной и прекращением поступления стока морских вод в залив в 1980–1984 гг. Перекрытие пролива Кара-Богаз-Гол и последующая регулируемая незначительная подача морских вод в залив в 1980–1992 гг. способствовали повышению уровня моря примерно на 40 см, или 20 % его современного подъема.

Повышение уровня моря, начавшееся в 1978 г. и продлившееся до 1995 г., было не аномальным по своей природе. Аналогичные изменения уровня наблюдались как в конце прошлого столетия, так и в начале текущего: с 1862 по 1869 г. и с 1873 по 1878 г. повышение уровня моря

достигало, соответственно, около 1,0 и 0,6 м, а с 1914 по 1917 г. и с 1926 по 1929 г. – 0,5–0,6 м. Длительное падение уровня моря с конца прошлого столетия по 1977 г. привело к сокращению площади морской поверхности. При более значительных размерах акватории моря, соответствующих, например, площади моря в начале 1900-х гг., современное повышение уровня происходило бы медленнее. Однако следует отметить, что происходящий подъем уровня моря самый продолжительный за весь период инструментальных наблюдений.

Значительная увлажненность водосборного бассейна, обусловленная активизацией западной формы циркуляции в первой половине 1970-х гг. и аномальным развитием циклонической циркуляции в пределах всего Европейского естественного синоптического района – основная причина многоводности Волги и резкого подъема уровня моря. Проведенные исследования пространственно-временной изменчивости уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря еще раз подтвердили их климатическую обусловленность, на фоне которой влияние антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим моря носит второстепенный, хотя и все более ощутимый характер.

По мнению Г.И. Рычагова [75], уровень моря, близкий к современному (-28,0 м БС), является нормальным уровнем Каспия для межледниковых эпох и может служить своеобразным репером, на который следует ориентироваться при определении тенденции развития Каспийского бассейна. Этот уровень обеспечивает такую площадь зеркала моря, которая обуславливает его относительную стабильность. Современный уровень моря с отклонениями ±1,0–1,5 м может быть принят оптимальным при разработке хозяйственных мероприятий как на ближайшее время, так и на более отдаленную перспективу.

5.2.4. Влияние колебаний циркуляции атмосферы на изменения уровня Каспийского моря

Известно, что колебания циркуляции атмосферы оказывают влияние на различные характеристики атмосферы и океана, в том числе на УКМ. Наиболее часто исследовалось влияние на УКМ североатлантического колебания. На возможность такого влияния, в частности, указано в работах К.В. Кондратовича [46], В.Н. Малинина [55], С.Н. Родионова [73, 74]. Вместе с тем на изменчивость УКМ могут оказывать влияние и другие колебания.

Е.С. Нестеров [63, 64] исследовал связи различных индексов циркуляции атмосферы с УКМ. Использовались значения индексов, рассчитанных по данным геопотенциала H_{700} за период 1950–2000 гг.: NAO – североатлантическое колебание, EA – восточно-атлантическое

колебание (ВАК), EA-Jet – ВАК-струйное течение, EA/WR – колебание Восточная Атлантика – Западная Россия, SCA – скандинавское колебание, POL – колебание Полярная область – Евразия, PNA – колебание Тихий океан – Северная Америка, SOI – Южное колебание.

Исходными данными для анализа изменчивости уровня Каспийского моря послужили среднегодовые значения УКМ по пункту Махачкала за период 1950–2000 гг. В расчетах использовался ряд из межгодовых приращений уровня (ΔУКМ). Для оценки зависимостей между индексами колебаний и ΔУКМ были рассчитаны взаимные корреляционные функции $r(\tau)$, где τ – сдвиг в годах. Предварительно из всех рядов были исключены линейные тренды. При анализе было принято, что $\tau = 0$ соответствует влиянию циркуляции атмосферы в n-м году на приращение уровня между годами n и n+1.

В табл. 5.4 приведены взаимные корреляционные функции для сдвигов 0–4 года, поскольку в этом диапазоне отмечаются наибольшие коэффициенты корреляции. Одним из основных результатов табл. 5.4 является существенное влияние Южного колебания на изменчивость УКМ в диапазоне до 5 лет. Это совпадает с результатами [113], где показано хорошее соответствие между ходом УКМ и интегральной аномалией зимнего индекса SOI за период 1880–1997 гг.

Таблица 5.4. Взаимные корреляционные функции между приращениями УКМ и предшествующими значениями индексов циркуляции

Сдвиг τ, год	NAO	EA	EA-Jet	EA/WR	POL	SCA	PNA	SOI
-4	0,04	0,21	0,16	0,06	-0,25	0,06	0,10	-0,29
-3	-0,08	0,11	0,05	0,09	-0,05	0,21	0,04	-0,25
-2	0,18	0,05	-0,07	0,10	0,01	-0,10	-0,03	-0,11
-1	0,04	0,24	0,27	**-0,32**	-0,08	-0,07	0,12	-0,27
0	0,07	-0,05	0,08	0,17	-0,03	-0,18	0,01	**-0,42**

Примечание. Выделены коэффициенты корреляции, значимые на 5%-ном уровне

Вторым результатом является влияние на УКМ при сдвиге $\tau = -1$ колебаний EA/WR, EA-Jet и EA, т. е. тех колебаний, основные узлы которых расположены в восточной части Северной Атлантики. Интересно, что наибольшее влияние на УКМ оказывает колебание EA/WR ($r = 0{,}32$), один из узлов которого расположен над Каспийским морем.

Несмотря на то, что корреляция между колебанием EA-Jet и ΔУКМ при $\tau = -1$ оказалась незначимой, многолетний ход индекса EA-Jet

оказался самым близким к ходу УКМ среди всех рассматриваемых индексов.

Этот результат представляется неожиданным, поскольку колебание EA-Jet – единственное из колебаний, которое выражено только в теплую часть года, а во многих исследованиях (см., например, [8]), низкочастотная изменчивость УКМ связывается с количеством циклонов, вышедших на бассейн Волги в холодную часть года. На основе анализа межгодовой изменчивости над Каспийским морем ветра, температуры воздуха и индекса засушливости Палмера, который характеризует сухие и влажные периоды, было показано, что на изменчивость УКМ оказывают сильное влияние процессы испарения и осадков в летний период, интенсивность которых косвенно определяется индексом EA-Jet. [64].

На основе полученных результатов и с использованием среднегодовых значений УКМ в пункте Махачкала за 1950–2000 гг. Нестеровым [63] было получено уравнение множественной регрессии для расчета межгодовых приращений УКМ, где в качестве предикторов использовались индексы циркуляции из табл. 5.4.

Коэффициент множественной регрессии для уравнения оказался равным 0,61, а коэффициент детерминации 0,37, т. е. построенная регрессия объясняет 37 % разброса межгодовых приращений УКМ относительно среднего, что недостаточно для использования полученного уравнения в целях прогноза.

Вместе с тем, подстановка в уравнение значений предикторов за 2000 г. дало отрицательное значение приращения, равное -13,1 см. Фактическое понижение уровня в Махачкале в 2001 г. по сравнению с 2000 г. составило 13 см. Это можно рассматривать как случайное совпадение, однако полученные результаты свидетельствуют о том, что использование индексов колебаний циркуляции атмосферы в качестве предикторов может быть полезным при оценке возможных изменений УКМ.

5.2.5. Исследование связей гидрометеорологических процессов и уровня моря с солнечной активностью

Исследование космических воздействий на погоду и климат имеет почти двухсотлетнюю историю. Было установлено, что связь между солнечной активностью и атмосферной циркуляцией планетарного масштаба и воздействие последней на климатические процессы в бассейнах рек, впадающих в Каспий, характеризуется некоторыми ритмами изменений водности этих рек и соответствующими колебаниями уровня моря.

Многие ученые, занимающиеся солнечно-земными связями [6, 11, 18, 23, 66, 80–82, 84, 85, 99, 111], пришли к выводу, что первопричиной глобальных изменений атмосферной циркуляции, а следовательно, и многолетних колебаний уровня моря, является цикличность в ходе солнечной активности, однако эта цикличность не является строго периодичной. Физический механизм влияния солнечной активности на циркуляцию атмосферы недостаточно ясен, хотя это влияние никем не оспаривается. Это связано с тем, что условия воздействия большого числа факторов на нижнюю атмосферу осложняются существованием в системе атмосфера – гидросфера, криосфера – биосфера недостаточно исследованных прямых и обратных связей.

В целом ряде исследований Б.А. Аполлова, Г.П. Калинина, Н.А. Белинского, Л.А. Вительса, А.И. Дуванина, А.Л. Кац, И.М. Соскина, М.С. Эйгенсона и других показано, что усиление солнечной активности ведет к активизации общей циркуляции атмосферы, и наоборот. В них постулируется главная идея, заключающаяся в том, что если существует цикличность в колебаниях солнечной активности, то должна существовать цикличность и в колебаниях общей циркуляции атмосферы, следовательно, и многолетний ход УКМ также должен быть подвержен циклическим колебаниям.

Открытие солнечной активности, как известно, принадлежит Г. Швабе, который на основе анализа результатов своих 20-летних наблюдений впервые показал, что ряды наблюдений за солнечными пятнами подвержены циклическим колебаниям с периодом от 8 до 14 лет (в среднем 11 лет). Позднее эта цикличность была подтверждена Р. Вольфом и получила название закона Швабе – Вольфа, который гласит, что относительные числа солнечных пятен испытывают циклические изменения со средним периодом 11,1 года. Этот результат неоднократно подтверждался другими исследователями [11, 111]. Были обнаружены также и другие циклы солнечной активности: 80–100 лет (в среднем 89 лет), 20–45 лет (в среднем 33 года). Возможно, что существуют ритмы в несколько сот лет, но недостаточно длинные ряды наблюдений не позволяют их выявить. Все эти ритмы, накладываясь друг на друга, создают весьма сложную картину колебаний солнечной активности. Так, некоторые ученые считают, что 33-летняя цикличность является результатом сложения 5 и 11-летнего цикла солнечной активности. Локьер с помощью анализа периодограмм установил цикл в 33,4 года, а Лицнер в 33 года. Брикнер по климатическим данным установил цикл в 34,8±0,7 года, а Дуглас по кольцам деревьев определил цикл в 32,8 года. Позже Эйгенсон, Максимов и др. указывали на наличие вековых колебаний в солнечной активности. Максимов на основе анализа периодограмм пришел к выводу о существовании циклов в 80 и 250 лет.

Шустер, впервые применивший метод анализа периодограмм к исследованию солнечной активности, установил циклы в 4,76, 8,32, 11 и 13 лет. Ряд циклов в изменениях солнечной активности, были определены Л.А. Вительсом [19, 20].

М.А. Боголепов в 1907 г. впервые высказал гипотезу, что сложный вид кривой многолетнего хода уровня Каспийского моря обусловлен интерференцией нескольких вынуждающих сил различной периодичности.

Н.А. Белинский и Г.П. Калинин в 1946 г. пришли к выводу о том, что ритм вынужденного колебания должен совпадать с ритмом внешней силы, вынуждающей это колебание. Н.А. Белинский установил наличие 3, 5, 6, 11 и 12-летних ритмов в колебаниях интенсивности общей циркуляции атмосферы и солнечной активности.

Концепция цикличности солнечной активности и цикличности общей циркуляции атмосферы многими использовалась для разработки сверхдолгосрочных прогнозов УКМ, причем одни авторы искали зависимости хода уровня моря непосредственно от солнечной активности, другие через циркуляцию атмосферы.

Н.А. Белинский [11] убедительно показал, что над Северным полушарием с увеличением солнечной активности в вековом и 11-летнем цикле наблюдается усиление циклонической деятельности и ослабление антициклонической. Он обнаружил цикличность в ходе циклоантициклонической деятельности в районе азорского максимума и дал объяснение причины понижения УКМ в 1930-х гг. Обнаруженная Белинским цикличность в ходе атмосферных процессов характеризуется тем, что среди других циклов наиболее отчетливо, как по амплитуде, так и по продолжительности, выделяется 11-летний цикл, который Белинский использовал для долгосрочного прогноза УКМ. Он полагал, что главным районом, питающим влагой бассейн Волги, является район азорского максимума. На основе анализа карт аномалий циклоантициклонической деятельности для зимних периодов многоводного 1928-1929 гг. и маловодного 1937-1938 гг. им было показано, что многоводный год характеризуется значительным развитием азорского максимума. В это время вся Европа находилась в области низкого давления.

Совершенно иная картина наблюдалась в маловодный год. В районе азорского максимума располагалась область пониженного давления. Область повышенного давления охватывала почти всю Европу от Черного и Каспийского моря до Арктики. Очевидно, что эти синоптические условия привели к дефициту осадков. По этим двум схемам отчетливо прослеживается роль одного из основных центров действия атмосферы и источников влаги – азорского максимума – в формировании

водности рек на ЕТР. На основе этого Белинский сделал вывод: чем сильнее антициклоническая деятельность в районе азорского максимума, тем больше в зимнее время выпадает снега на водосборном бассейне Каспия и тем больше будет весенний сток рек. Чем сильнее циклоническая деятельность у Азорских островов, тем меньше выпадает снега на водосборном бассейне Каспия и тем меньше будет весенний сток рек. Наличие циклических колебаний, соответствующих циклическим изменениям солнечной активности продолжительностью около 11 лет, позволило установить количественную зависимость колебаний УКМ от изменений цикло-антициклонической деятельности в районе азорского максимума со сдвигом по фазе, равным 5–6 годам, что составляет половину солнечного цикла.

Исследования П.С. Гасюкова и Н.П. Смирнова [23] свидетельствуют о том, что при усилении солнечной активности с 11-летним циклом происходит повышение давления в области стационарных барических депрессий и понижение давления в области антициклонов, что должно приводить к ослаблению зонального переноса и усилению меридионального переноса. Такие изменения в атмосферной циркуляции влияют на интенсивность процессов переноса тепла и влаги в атмосфере и, следовательно, на величину стока рек и колебания уровня внутренних водоемов, к каковым относится Каспийское море. Однако исследовать конкретные механизмы изменчивости УКМ с 11-летним, а тем более вековыми периодами, в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия длительных рядов наблюдений над гидрометеорологическими элементами на Каспии.

Исследования солнечно-земных связей, выполненные Л.А. Вительсом [19, 20], позволили ему сделать вывод о том, что на восходящей ветви векового цикла солнечной активности увеличивается повторяемость глубоких циклонов и уменьшается повторяемость мощных антициклонов. А.А. Гирс [26] нашел связь интегральных кривых годовых значений чисел Вольфа с числом дней с восточной формой циркуляции.

М.А. Нуждина [66] показала существование зависимости уровенного режима моря от солнечной активности, при которой регрессия уровня приходится на эпохи с сочетанием сверхвековых периодов с нормальной и максимальной солнечной активностью. В частности, подъем уровня в 1978–1995 гг., по мнению Нуждиной, приурочен к 21 и 22-летнему циклам солнечной активности.

А.Н. Афанасьев [6] указывал на неоднозначность связи между положением уровня Каспия и характеристиками солнечной активности в период максимума 1776–1798 гг. и минимума 1799–1823 гг. векового цикла солнечной активности.

Н.Н. Соловьева [85] на основе результатов исследования зависимости колебаний уровня Каспийского моря от солнечной активности разработала методологию сравнения многолетних стока Волги и уровня Каспийского моря с солнечной активностью предшествующих лет и на этой основе разработала прогнозы стока Волги и уровня Каспийского моря до середины XXI века.

5.3. Геолого-тектоническая концепция вековых колебаний уровня Каспия

Согласно геологической концепции причинами изменения УКМ являются две группы процессов. Процессы первой группы, по мнению геологов, ведут к изменению объема Каспийской впадины и, как следствие, к изменению уровня моря. К таким процессам относятся вертикальные и горизонтальные тектонические движения земной коры, накопление донных осадков и сейсмические явления. Процессы второй группы оказывают влияние на подземный сток, то увеличивая, то уменьшая его в результате периодического выдавливания или поглощения вод, которые насыщают донные отложения под воздействием изменяющихся тектонических напряжений [44, 52–54, 59, 75–79, 93–95, 104, 105]. Современные тектонические процессы приводят к разнонаправленному вертикальному смещению дна и берегов, в большинстве случаев не превышающему ±2,5–11 мм/год, в то время как современная межгодовая изменчивость уровня более значительна и достигает нескольких десятков см/год (в среднем около 7 см).

Согласно исследованиям П.В. Федорова [93, 94], периодические колебания Каспийского моря характерны для всей его новейшей геологической истории (см. раздел 4.2).

Биостратиграфические исследования, проводившиеся на побережье вокруг Каспия, в том числе палеоэкологический анализ фауны моллюсков, показали, что трансгрессивные циклы: бакинский, раннехазарский, хвалынский и новокаспийский сопровождались некоторым опреснением, что связывается с разбавлением водной массы притоком талых ледниковых вод с суши. При сравнительно низких уровнях, как, например, в позднехазарской трансгрессивной фазе, наблюдается некоторое осолонение за счет повышения концентрации углекислого кальция. На основании этого Федоров делает вывод о том, что трансгрессии Каспийского моря в плейстоцене (а возможно, и в позднем плиоцене) определялись глобальным и региональным водообменом. Современные колебания уровня по своей природе аналогичны трансгрессивно-регрессивным циклам плейстоцена.

По мнению Н.А. Шило и М.И. Кривошей [104, 105], колебания уровня Каспийского моря обусловлены процессами сжатия и растяжения в земной коре, воздействующими на подземный сток в море, то увеличивая, то уменьшая его за счет периодических «выдавливаний» или «поглощений» вод, насыщающих донные отложения под воздействием тектонических напряжений (смены периодов сжатия и растяжения). В качестве индикатора напряжений в земной коре авторы выбрали показатели землетрясения и связали их с невязками водного баланса. Коэффициент корреляции составил 0,97. Авторы утверждают, что последняя трансгрессия уровня моря на 50 % обусловлена разгрузкой в море подземных вод в результате тектонических движений ложа моря.

Д.А. Лилиенберг [52, 53] спад и подъем уровня Каспийского моря связывает со сменой напряжений в земной коре. Вклад только вертикальных тектонических движений по Лилиенбергу оценивается в 10–20 %, а вклад горизонтальных движений – еще больше, так как скорость горизонтальных движений существенно превышает скорость вертикальных движений. Изменение объема Каспийской впадины происходит как за счет вертикальных, так и горизонтальных тектонических движений земной коры, достигающих 5–7 см/год и за счет отложения донных осадков. Лилиенберг выделил регулярную и нерегулярную ритмичность вертикальных движений порядка 100–120, 50–60, 35–40, 25–30, 10–15, 5–7, 2–3 лет и 1 года (табл. 5.5).

Таблица 5.5. Внутригодовые квазиритмы (в годах) современной эндо- и экзодинамики [53]

Флуктуация уровня Каспийского моря							
100–120	50–60	40	25–30	10–15	5–7	3–4	1
Вертикальные движения по мареографическим данным							
100–110	55–65	35–40	25–30	9–12	5–7	2–3	1
Сейсмичность							
100–120	50–60	35–40	20–30	10–15	5–7	3–5	1
Грязевый вулканизм							
100–120	50–60	40	25–35	10–12	4–5	2–3	1
Флюидодинамика (нефть, газ, подземные воды)							
	50–60	35–40	20–25	10–12	3–5	2–3	1

Аналогичная ритмичность выделяется и по другим геодинамическим составляющим: вариациям добычи нефти и газа, грязевому (газонефтяному) вулканизму, сейсмичности и флюидодинамике, что

позволяет сопоставить эти вариации с инструметально измеренными флуктуациями УКМ и изменениями гидрологических и климатических процессов. Несмотря на некоторое совпадение частот эндо- и экзодинамики, отмечаются также и смещения в динамике их изменчивости. В 1978 г. произошла смена знака движения земной коры, что совпало с радикальными изменениями УКМ.

Этапам трансгрессий (с некоторым опережением их во времени) обычно соответствовали периоды регионального сжатия, интенсивного складкообразования, сокращения пространства, перестройка морфологии и объема Каспийской впадины. Соответственно, регрессионные фазы связаны с эпохами растяжения. Активизация грязевого вулканизма и сейсмичности приходятся на фазы растяжения и понижения УКМ. Резкие скачки высвобождения сейсмической энергии сопровождаются импульсными фазами снижения или подъема уровня моря, а сильные землетрясения – значительными невязками водного баланса. Катастрофический подъем уровня моря с 1978 по 1995 г. совпал по времени с крупномасштабными процессами активизации сейсмичности в Карпатах, в Крыму, Кавказе, Копетдаге, юге Русской равнины. Катастрофическое понижение уровня в 1930-е годы совпало с активизацией тектонических процессов в северо-восточной Турции, Закавказье, Северном Иране, Западной Туркмении.

В.В. Ковалев и С.Г. Парада [44], проанализировав климатические, антропогенные и геологические факторы изменений уровня Каспийского моря, пришли к выводу, что не во всех случаях водно-балансовая методика расчетов объясняет его резкие повышения и понижения. Они обратили внимание на то, что 11 и 22-летние солнечные циклы хорошо связаны с периодами активности землетрясений и проявлений грязевого вулканизма. Авторы это объясняют возбуждением астеносферного слоя Каспийской впадины под влиянием солнечных магнитных потоков, что приводит к активизации тектонических движений – подъемам или опусканиям участка земной коры и соответствующим изменениям уровня моря, т. е. в пределах акватории и побережья Каспийского моря действует пульсационный механизм тектонического сжатия – растяжения, зависящий от солнечной активности. Этот механизм способен влиять на объем осадочного бассейна, вызывать приток или отток подземных вод и изменение высотного положения уровня моря.

Многие исследователи придерживаются другого мнения. Они считают, что механизм, описанный Ковалевым и Парадой, не играет решающей роли в процессах колебания УКМ. Дело в том, что в различных частях морского побережья тектонические процессы приводят к разнонаправленному вертикальному смещению дна и берегов, в большинстве случаев не превышающие нескольких мм в год, т. е.

межгодовые изменения уровня под влиянием тектонических процессов ничтожно малы и не соизмеримы с колебаниями уровня моря, обусловленными климатическими факторами. Вместе с тем, нельзя совершенно отрицать тектоническую концепцию как причину изменения уровня моря. Ее роль может быть существенна при рассмотрении вековых и многолетних изменений УКМ.

Однако в настоящее время нет убедительных доказательств связи геологических факторов с колебаниями уровня моря, так же как и нет причин считать, что изменения уровня моря связаны с изменением объема его впадины за счет накопления донных осадков. Во-первых, темпы заполнения котловины моря донными отложениями, среди которых основную роль играют выносы рек, оцениваются по современным данным величиной порядка 1 мм/год, что на два порядка меньше наблюдаемых изменений уровня моря. Во-вторых, процесс этот однонаправленный, накопление осадков должно было бы вести к постоянному повышению уровня, в действительности же поведение уровня моря носит колебательный характер.

5.4. Роль антропогенных и техногенных факторов в формировании речного стока и уровня Каспийского моря

Что касается роли антропогенного фактора как причины, влияющей на колебания речного стока и уровня Каспия, то как показано в [9, 13, 29, 32, 36, 45, 100–102], она не столь значительна, как роль климатического фактора. Влияние человеческой деятельности на колебания уровня Каспия, прежде всего, связано с сокращением стока рек из-за безвозвратных изъятий воды на заполнение водохранилищ, на орошение и другие хозяйственные нужды. Все это приводит к сокращению притока речных вод в Каспий и дополнительному снижению его уровня.

Период 1882–1930 гг. относят к естественному периоду, когда хозяйственная деятельность не влияла на гидрологический режим моря. Период 1931–1955 гг. относят к так называемому переходному периоду, когда сток изменился незначительно, но в некоторые годы отмечалось существенное перераспределение стока. В этот период на режим водности рек, впадающих в Каспий, стала оказывать влияние деятельность человека. На водосборном бассейне Каспия началось строительство и эксплуатация водохранилищ и гидроэлектростанций. В последующие годы это влияние становится все более активным. Период с 1956 г. по настоящее время относится к так называемому периоду зарегулированного стока. Водность всех периодов примерно одинакова:

244 и 237 км^3; а внутригодовое распределение стока изменилось: весенний сток уменьшился с 160 до 107 км^3, зимний сток увеличился с 29,7 до 63,5 км^3.

Что же явилось причиной снижения уровня в 1930–1977 гг.? То, что оно произошло в основном под действием природных факторов, можно подтвердить следующими обстоятельствами. Сток Волги, как известно, дает в среднем около 80 % притока воды в Каспийское море и в значительной степени определяет положение его уровенной поверхности. Сток Волги до 1942 г. можно считать естественным. Между тем уровень Каспийского моря в 1930–1941 гг. упал на 196 см, что составляет в среднем около 16 см/год. Как было показано Б.Д. Зайковым в 1946 г., это падение было обусловлено уменьшением осадков в бассейне Волги.

После 1941 и особенно 1955 гг. заборы воды на хозяйственные нужды, а также на заполнение водохранилищ существенно выросли. Если в 1942–1954 гг. уменьшение стока Волги в Каспийское море в результате хозяйственной деятельности было в среднем того же порядка, что и раннее, то с 1955 г. оно возросло до 14–26 км^3/год [92]. За 1942–1956 гг. уровень Каспия понизился на 35 см, в среднем на 3 см/год. В 1955–1976 гг. уровень понизился на 59 см, или в среднем на 2,7 см/год. Из этого следует, что значительное снижение уровня Каспия в 1930–1941 гг. произошло до того, как начались значительные изъятия стока Волги на хозяйственные нужды.

Объемы водопотребления (км^3/год) и величина хозяйственного изменения стока рек, впадающих в Каспийское море, приведены в табл. 5.6.

В 80-е годы XX столетия водопотребление речного стока в бассейне моря достигло наибольших объемов (70–72 км^3/год, в том числе безвозвратное потребление – 40–42 км^3/год). По расчетам И.А. Шикломанова и др. [100–102], в отдельные годы объем безвозвратного потребления в бассейне Каспия доходил до 40–50 км^3/год. К концу 1980-х годов в результате антропогенного воздействия речной сток уменьшился примерно на 13 % по отношению к естественному его значению. Однако в начале 90-х годов прошлого столетия картина резко изменилась. Уже в 1992 г. в различных областях Поволжья не поливалось 20–40 % орошаемых земель из-за резкого удорожания стоимости электроэнергии и услуг водохозяйственных организаций. Объем водопотребления на орошение снизился также и за счет существенного сокращения оросительных норм.

Анализ ретроспективных данных позволяет сделать следующие выводы о динамике водопользования. Общий забор водных ресурсов в бассейне Волги медленно повышался до конца 1980-х гг. и достиг

36–37 км^3, но в начале 1990-х годов стал снижаться. До конца 1980-х гг. отмечался рост используемых объемов воды в промышленности с 15 до 17,5 км^3, однако в дальнейшем в связи с сокращением объемов промышленного производства снизилось и потребление воды промышленностью.

Таблица 5.6. Объемы водопотребления и величина изменения стока рек, впадающих в Каспийское море, под влиянием хозяйственной деятельности (км^3/год) [92]

Река	Характеристика	1981–1985	1986–1990	1992–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2009
Урал[4]	Водозабор[1]	3,019	4,87	2,529	2,264	1,965	2,014
	Водоотведение[2]	0,637	2,330	2,997	1,932	1,633	1,843
	Разность	2,382	2,357	0,532	0,332	0,332	0,171
	Изменение стока[3]	2,374	2,331	0,385	0,442	0,195	0,100
Волга	Водозабор[1]	36,694	34,774	32,054	26,631	23,523	22,311
	Водоотведение[2]	23,530	23,621	22,545	20,692	19,067	18,096
	Разность	13,164	11,153	9,509	5,939	4,456	4,215
	Изменение стока[3]	15,290	18,116	9,823	9,744	4,454	7,815
Терек	Водозабор[1]	9,007	7,928	6,199	5,471	5,610	5,287
	Водоотведение[2]	1,768	1,099	0,779	0,474	0,406	0,399
	Разность	7,239	6,829	5,420	4,997	5,204	4,888
	Изменение стока[3]	6,952	6,606	5,149	4,692	5,064	4,752
Сулак	Водозабор[1]	1,478	1,698	1,499	1,338	1,205	1,260
	Водоотведение[2]	0,231	0,418	0,135	0,132	0,038	0,051
	Разность	1,247	1,280	1,364	1,206	1,167	1,209
	Изменение стока[3]	1,237	1,277	1,357	1,196	1,160	1,205
Кура[5]	Водозабор[1]	20,330	20,541	18,690	14,514	–	–
	Водоотведение[2]	3,724	5,003	–	–	–	–
	Разность	16,606	15,538	–	–	–	–
	Изменение стока[3]	15,392	15,039	–	–	–	–

Примечания: [1] из речной сети и из подземных источников; [2] в речную сеть; [3] дополнительно с учетом изменения стока реки водохранилищами (потерями на испарение и при многолетнем регулировании); [4] до 1990 г. данные по водопотреблению для территории России и Казахстана, с 1992 г. – только для России; [5] без учета водопотребления на территории Ирана и Турции.

Аналогичная картина наблюдалась и в сельском хозяйстве, причем сокращение объемов используемой воды происходило еще быстрее. Таким образом, объем безвозвратного водопотребления повысился в 1980-е гг. с 11 до 13 км^3, однако в 1990-е годы эта цифра сократилась на 12 %.

Согласно расчетам И.А. Шикломанова и В.П. Кожевникова [103], величина средних потерь стока Волги ниже Волгограда составляла в среднем за период 1933–1979 гг. 14,2 км^3/год и колебалась от 9–10 до 18–20 км^3/год. С 1936 по 1977 г. выросла площадь дельты Волги за счет снижения уровня моря (с 9000 до 11580км^2) и увеличилось испарение.

По данным ГГИ, в начале 1930-х гг. из рек бассейна безвозвратно изымалось на нужды хозяйства не более 5–7 км^3/год, а в середине 1950-х гг. на заполнение новых водохранилищ потребовалось около 200 км^3 речной воды. До середины 1950-х гг. уменьшение поверхностного притока к морю за счет хозяйственной деятельности составляло не более 3 % многолетней нормы и незначительно влияло на снижение уровня моря. Так, за 1942–1955 гг. суммарные безвозвратные изъятия речного стока составили около 113 км^3 (8,1 км^3/год), а с 1956 по 1969 г. – период строительства и эксплуатации крупных гидротехнических сооружений – море недополучило около 350 км^3 поверхностного притока (25 км^3/год).

С каждым годом объемы безвозвратных изъятий речного стока растут и в целом за время зарегулирования стока (1956–1990 гг.) составили, по данным ГГИ, около 30 км^3/год. В отдельные годы объем безвозвратного водопотребления в бассейне Каспия составлял 40–50 км^3/год. С 1942 по 1990 г. в хозяйственных целях было использовано около 1000 км^3 речной воды, в том числе в бассейне Волги около 600 км^3. Снижение уровня моря под влиянием водохозяйственных мероприятий в его бассейне в 1930–1940-х гг. не превышало 2–3 см/год, а в конце 1970-х – начале 1980-х гг. достигло 10–12 см/год. Скорость подъема уровня моря в последние годы составляла 20–30 см/год (в 1979 г. подъем составил 30 см, в 1981 г. – 26 см). Следовательно, в естественных, не нарушенных хозяйственной деятельностью условиях, уровень в настоящее время мог бы находиться значительно выше фактических отметок.

По И.А. Шикломанову [102] и В.Н. Малинину [55], к концу 1980-х гг. разница между фактическим и «естественным» уровнем моря достигла почти 1,5 м. При этом суммарное безвозвратное потребление в бассейне Каспия оценивалось в те годы в 36–45 км^3/год (из них на Волгу приходилось около 26 км^3/год). Авторы считают, что если бы не изъятие речного стока, повышение уровня началось бы не в конце 1977 года, а гораздо раньше.

В 1980-е годы водопотребление в бассейне рек, впадающих в Каспийское море, достигло своего максимального значения, суммарный водозабор из поверхностных и подземных источников в бассейне Волги, по данным В.Ю. Георгиевского (ГГИ), достиг 35–37 км^3/год, Терека и Сулака – 10–11 км^3/год. Снижение годового стока по отношению к естественной норме для Урала, Терека и Сулака составил 20–23 %. Современное уменьшение стока Волги составляет около 5 % (табл. 5.7).

Таблица 5.7. Снижение годового стока рек Каспийского региона под влиянием хозяйственной деятельности (по данным В.Ю. Георгиевского (ГГИ)

Бассейн рек	Естественный сток в устье, км^3/год	Снижение стока в устье, км^3/год, за разные периоды						
		1936–1940	1946–1950	1956–1960	1966–1970	1976–1980	1986–1990	1998–2000
Волга	245	4,8	6,3	26,0	13,0	21,0	25,0	12,0
Урал	9,3	0,3	0,6	1,2	1,5	2,3	2,9	2,0
Терек и Сулак	13,4	0,4	0,9	2,2	3,4	3,7	4,0	3,0

Необходимо отметить, что в советские годы в связи с интенсивным развитием промышленности прогнозы роста водопотребления оказались, как показали расчеты Г.В. Кругловой, А.В. Христофорова и К.К. Эдельштейна, сильно завышенными. В прогнозы закладывались повышенные темпы развития водопотребления отраслей народного хозяйства (особенно на орошение), которые оказались не только не реальными, но и сменились спадом производства в последние два десятилетия. В действительности, в настоящее время темпы водопотребления снизились до 30–35 км^3/год (в бассейне Волги до 24 км^3/год). Дополнительное влияние (правда небольшое) на уровень моря оказало перекрытие глухой дамбой пролива в Кара-Богаз-Гол. Поэтому в настоящее время роль антропогенного фактора не столь велика, как это казалось ранее.

Некоторые авторы считают, что колебания УКМ во многом связаны с техногенной дестабилизацией недр Каспия, обусловленной влиянием деятельности человека. Это и несанкционированные заборы стока поверхностных и подземных вод, и влияние разработок месторождений газа и нефти, гидротехнического строительства и т.д.

А.П. Демин [30] на основе анализа ретроспективных данных получил следующие выводы о динамике водопользования.

1. Общий забор водных ресурсов в бассейне Волги медленно повышался до конца 1980-х гг. и достиг 36–37 км^3, но в начале 1990-х гг.

стал снижаться. При этом забор из подземных вод стабильно повышался на 1–2 % в год, но его вклад в общий забор невелик (12–15 %). Потери при транспортировке воды от источника к потребителям в результате проведения противофильтрационных работ сократились с 4,5 до 3,5 км^3 несмотря на рост числа водопользователей.

2. Рост водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды с 6,1 до 6,9 км^3 свидетельствует об улучшении обеспечения городского населения водой. Аналогичная ситуация отмечается и в сельскохозяйственном водоснабжении.

3. До конца 1980-х гг. отмечался рост используемых объемов воды в промышленности с 15 до 17,5 км^3, однако в дальнейшем в связи с сокращением объемов промышленного производства снизилось и водопотребление промышленностью.

4. Объем безвозвратного водопотребления повысился в 1980-е годы с 11 до 13 км^3, однако в 1990-е гг. в связи с сокращением объемов промышленного и сельскохозяйственного производства эта цифра сократилась на 12 %.

Функционирование и развитие многих отраслей народного хозяйства в бассейне Каспия оказывает существенное воздействие на характеристики многолетних колебаний уровня. Кроме того, значительные и продолжительные колебания уровня (падение до -29,00 м БС с 1930 по 1977 г. и подъем до -26,50 м БС с 1978 по 1995 г.) стимулировали различные проекты, направленные на стабилизацию уровня моря. Примерами реализованных проектов можно назвать перекрытие и открытие пролива, соединяющего залив Кара-Богаз-Гол с морем, и строительство дамб значительной протяженности для защиты прибрежной инфраструктуры. Количественные оценки техногенных изменений характеристик уровня моря необходимы для решения ряда прикладных задач, в частности, при обосновании безопасных отметок строительства хозяйственных объектов на побережье моря.

Б.Н. Голубов [29] аномальный подъем УКМ в период 1978–1995 гг. связывает с техногенной дестабилизацией эндогенных и экзогенных геологических процессов в результате многолетнего и непрерывно усиливающегося вторжения технических средств в недра впадины Каспийского моря за счет деятельности нефтегазового комплекса, множества подземных ядерных взрывов, гидротехнического строительства и др.

Глава 6.
ВОДНЫЙ БАЛАНС КАСПИЙСКОГО МОРЯ И РАСЧЕТ ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

6.1. Общие положения

Как известно, колебания уровня Каспийского моря являются следствием непостоянства его водного баланса, зависящего от изменчивости климатических факторов (стока рек, температуры воздуха, испарения, осадков). Н.В. Ханыков, по-видимому, одним из первых предложил водобалансовый подход для объяснения причин колебаний УКМ. На роль климатического фактора в колебаниях уровня моря указывали Э.Х. Ленц, А.И. Воейков, Н.М. Филиппов и др. Они показали, что основой для анализа причин колебаний уровня Каспийского моря являются данные о его водном балансе. Позже водно-балансовая концепция получила развитие в трудах Н.М. Книповича, Л.Ф. Рудовица, А.И. Михайлевского, С.А. Ковалевского, Г.Р. Брегмана, Б.А. Аполлова, И.А. Бенашвили и многих других.

Наиболее обстоятельные исследования водного баланса Каспийского моря и многолетней изменчивости его основных составляющих были выполнены группой специалистов ГГИ под руководством Б.Д. Зайкова [26, 27]. В результате этих исследований были получены количественные оценки основных составляющих водного баланса Каспийского моря. В последние несколько десятилетий были продолжены расчеты основных составляющих водного баланса моря для характерных периодов времени [1–7, 13, 14, 18–20, 22, 24, 30–32, 40–42, 44–46, 48–52, 54, 55, 62, 65].

6.2. Уравнение водного баланса и диагноз его составляющих

В качестве модели многолетней и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря рассматривается уравнение водного баланса, которое обычно записывается в виде

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{пов}}{S} + \frac{Q_{подз.}}{S} - \frac{Q_{КБГ}}{S} + P - E \pm \frac{dH_{\sigma}}{dt}, \qquad (6.1)$$

где dH – изменение среднего уровня моря за время t; $Q_{пов}$ – объем суммарного поверхностного притока речных вод (Волги, Куры, Урала, Терека, Сулака, Самура, иранских рек и междуречья); $Q_{подз.}$ – объем подземного притока вод; $Q_{КБГ}$ – объем стока каспийской воды в залив Кара-Богаз-Гол; P – количество осадков, выпавших на поверхность моря; E – величина испарения с поверхности моря; dH_{σ} – плотностные изменения уровня; S – площадь моря, км^2.

Суть водобалансовой модели колебаний УКМ заключается в следующем. Колебания УКМ, как и любого замкнутого водоема, обусловлены непостоянством соотношения между основными приходными (речной сток, осадки) и расходными (испарение, сток в залив Кара-Богаз-Гол) составляющими водного баланса. Когда приходная часть баланса превышает расходную, уровень моря повышается, соответственно, увеличивается площадь зеркала моря, что приводит к росту испарения. И наоборот, когда расходная часть превышает приходную, уровень моря понижается, площадь зеркала моря уменьшается и уменьшается испарение. Это приводит к тому, что в стационарных климатических условиях уровень моря колеблется около положения, отвечающего равенству многолетних величин приходной и расходной частей водного баланса, так называемого «уровня тяготения». Однако такого «нормального» баланса для Каспийского моря не существует в связи с вековыми колебаниями его уровня. В практических расчетах уравнение (6.1) удобнее представить в терминах приращений уровня в виде

$$\Delta H_{\Delta t} = \frac{Q_{пов.сток}}{S} - \frac{Q_{КБГ}}{S} + \frac{Q_{подз.}}{S} + P - E \pm \Delta H_{\sigma}, \qquad (6.2)$$

где $\Delta H_{\Delta t}$ – приращение уровня моря, обусловленное изменением составляющих водного баланса за конкретный промежуток времени Δt.

Расчет водного баланса Каспийского моря сводится к определению объемных величин (км^3) его приходной и расходной частей за каждый месяц рассматриваемого года и последующего сравнения изменения уровня моря (в см слоя воды) с фактическими изменениями УКМ. Годовые величины получаются путем алгебраического сложения месячных значений прихода и расхода воды в море. Точность расчета составляющих водного баланса, а следовательно, и точность расчета и прогноза УКМ во многом определяется достоверностью наблюдений

за гидрометеорологическими элементами и площадью моря. Метод водного баланса позволяет контролировать качество исходных данных и понять, как уровень моря реагирует на изменения влияющих на него гидрометеорологических факторов. Кроме того, метод водного баланса может быть использован для выполнения ретроспективных расчетов испарения при известных значениях стока рек и уровня моря и для оценки стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол.

6.2.1. Поверхностный приток речных вод в море

Сток рек, определяющий поверхностный приток воды к морю – основная положительная составляющая водного баланса. В Каспийское море впадает около 130 рек, но основной объем стока приходится на реки Волга, Урал, Терек, Кура, Сулак, Самур, реки иранского побережья. Причем 80 % общего стока в Каспий поставляет Волга, которая в значительной степени определяет колебания УКМ. На огромной территории бассейна Каспийского моря, занимающего площадь около 3,5 млн км^2, характер ландшафта, климатические условия и типы рек весьма разнятся. Несмотря на обширность каспийского бассейна, только около 62,6 % его площади приходится на сточные области, около 26,1 % – на бессточные, а площадь самого Каспийского моря составляет 11,3 %.

Анализ многолетних колебаний стока основных рек, впадающих в Каспийское море, позволяет выделить три характерных периода, границы которых определяются крупным гидротехническим строительством и изменениями водопотребления в бассейнах рек. До середины 1950-х гг. режим стока рек Каспийского бассейна можно считать естественным, так как построенные в 1930-е годы водохранилища не оказывали на него существенного влияния. С 1932 по 1952 г. действовало одно крупное водохранилище – Рыбинское, практически не оказывавшее влияния на водный режим Нижней Волги.

Второй период связан с пиком строительства крупных водохранилищ на реках, впадающих в Каспий, прежде всего Волги и ее притока Камы. Он пришелся на 1950–1970-е годы. За это время появилось девять водохранилищ (табл. 6.1). Сток рек стал зарегулированным, что привело к существенному изменению гидрологического режима Каспийского моря.

В настоящее время водохранилища есть на всех реках, впадающих в Каспийское море, за исключением Терека. Третий период с 1970 г. по настоящее время – период зарегулированного режима и интенсивного водопотребления речных вод.

Таблица 6.1. Основные сведения о водохранилищах в бассейнах рек Каспийского региона [70]

Река	Водохранилище	Расстояние от моря, км	Годы заполнения	Площадь, км^2	Полный объем, км^3	Полезный объем, км^3	Тип регулирования
Волга	Иваньковское	3122	1937	327	1,12	0,81	сезон.
	Угличское	2973	1939–1943	249	1,25	0,81	недельн., суточн.
	Рыбинское	2723	1940–1955	4550	25,42	16,67	много.
	Горьковское	2283	1955–1957	1591	8,82	2,78	сезон.
	Чебоксарское	1947	1980–1982	1080	4,6	0	сезон.
	Куйбышевское	1474	1955–1957	6448	58,0	34,6	сезон.
	Саратовское	1040	1967–1968	1831	12,9	1,8	недельн., суточн.
	Волгоградское	540	1958–1960	3117	31,5	8,3	недельн, суточн.
Кама	Камское	938	1954–1956	1915	12,2	9,2	сезон.
	Воткинское	566	1961–1964	1120	9,4	3,7	сезон.
	Нижнекамское	–	1978–1979	1000	2,8	0	–
Урал	Верхнеуральское	2324	1964	75,5	0,6	0,6	суточн.
	Ириклинское	1810	1958–1966	260	3,3	2,8	много.
Сулак	Ирганайское	185	1996–2008	18	0,7	0,4	сезон.
	Чиркейское	140	1974–1976	42,5	2,8	1,3	сезон., много.
Кура	Шамхорское	–	1981–1982	115	2,7	–	–
	Мингечаурское	654	1953–1959	605	15,7	8,2	много.
Аракс	Араксинское	506	1970–1971	145	1,35	1,15	сезон., много.

Регулирование стока водохранилищами изменило внутригодовой водный режим низовьев и устьев Волги, Сулака, Куры и в меньшей мере Урала. Изменение режима сезонного притока в море повлияло на сезонный ход уровня Каспийского моря – весенне-летний максимум несколько сгладился, значения уровня моря в зимний период оказались повышенными.

Статистические характеристики стока основных рек, впадающих в Каспийское море, в характерные периоды представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Характеристики стока основных рек, впадающих в Каспийское море в характерные периоды [70]

Река	Период	Объем стока, км^3		
		средний	максимальный	минимальный
Волга	1930–2005	236	328 (1994)	162 (1973)
Урал	1930–2005	8,49	20,59 (1948)	2,86 (1937)
Терек	1930–2005	9,26	13,6 (1932)	6,43 (1986)
Сулак	1930–2005	4,73	7,76 (2002)	2,69 (1996)
Кура	1930–2003	15,24	25,83 (1963)	6,81 (1986)

Согласно табл. 6.2, средний суммарный сток пяти рассматриваемых рек за период 1930–2005 гг. равен приблизительно 273,7 км^3/год. Если, согласно [70], водный сток всех рек, впадающих в Каспий, считать за 1930–2005 гг. равным 288 км^3/год, то на долю пяти основных рек приходится около 95 % стока и только 5 % на долю всех остальных рек.

На рис. 6.1 представлены графики многолетнего хода среднегодовых расходов воды с линейными трендами и разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годового стока для пяти основных рек.

За весь период гидрометрических наблюдений (с 1881 г.) в колебаниях годового стока Нижней Волги можно выделить несколько характерных по водности климатических периодов. Согласно приведенным данным в [70], маловодными годами были 1904–1913 (224 км^3/год), 1919–1921 (195), 1930–1940 (195), и 1959–1977 (219), 1971–1977 (199), а многоводными – 1881–1889 (279 км^3/год), 1914–1918 (278), 1922–1929 (291), 1978–2005 гг. (268). Средними по водности были годы 1890–1903

(242 км^3/год), 1941–1958 гг. (252). Маловодье 1950–1960-х гг. связывается с водохозяйственными мероприятиями и, в первую очередь, с заполнением крупных водохранилищ Волжско-Камского каскада.

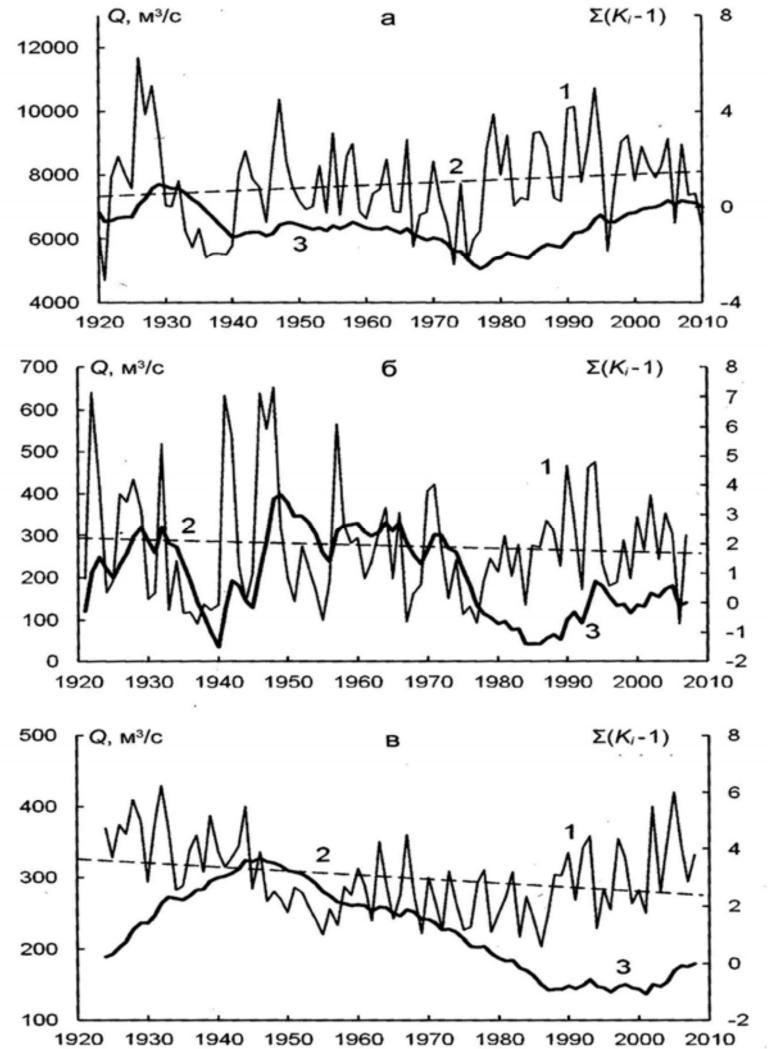


Рис. 6.1. Многолетние изменения среднегодовых расходов воды (1) с линейными трендами (2) и разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годового стока (3): Волга – Верхнее Лебяжье (а), Урал – Тополи (Махамбет) (б), Терек – Степное (в) [70].

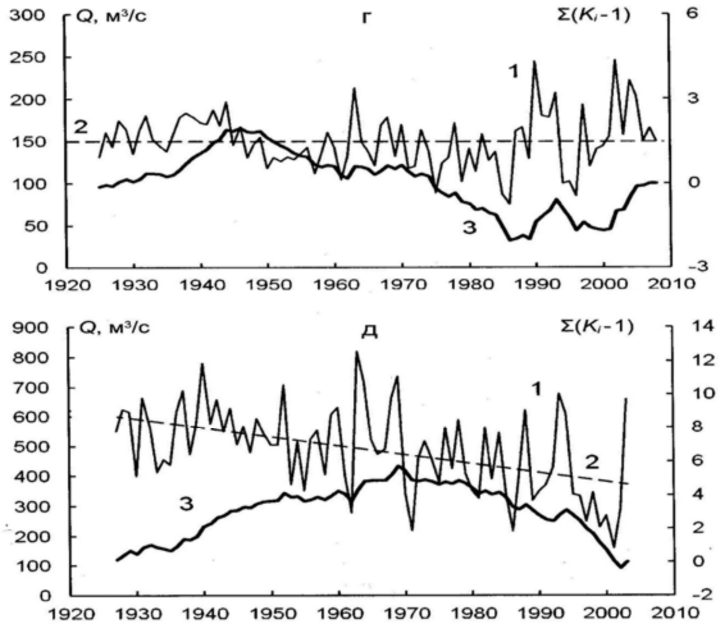


Рис. 6.1. Многолетние изменения среднегодовых расходов воды (1) с линейными трендами (2) и разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годового стока (3): Сулак – Сулак (г), Кура – Сальяны (д) [70].

Наиболее ощутимое антропогенное воздействие Каспийское море стало испытывать в последние десятилетия прошлого столетия. Роль антропогенных факторов в изменении гидрологического режима рек не одинакова: в довоенные годы уменьшение речного стока происходило за счет проведения агротехнических мероприятий в бассейне моря, в 1950–1960-е гг. наибольшему снижению притока к морю способствовали в основном сооружение и эксплуатация водохранилищ, в 1970-е и последующие годы ведущую роль играло орошаемое земледелие. Сток почти всех рек Каспийского бассейна к началу 1970-х гг. был зарегулирован. Вследствие изъятия речных вод на хозяйственные нужды приток вод в Каспийское море уменьшился на 8 % по отношению к норме притока в естественных условиях. За период с 1956 по 1990 г. приток вод уменьшился почти на 12 %.

В 1930-е гг. прошлого века море недополучило около 50 км^3 речной воды, а в период наполнения водохранилищ 350 км^3. Всего с 1936 г. по настоящее время сумма безвозвратных изъятий речного стока составила свыше 1000 км^3, что может быть соизмеримо с трехлетним

стоком рек в многоводных условиях. В бассейнах Терека, Сулака и Куры снижение водности произошло главным образом в связи с развитием площадей орошаемого земледелия. Годовой сток этих рек снизился к середине 1970-х гг. по сравнению со стоком в естественных условиях на 17–25 %.

Как уже указывалось, значительную часть основного объема поверхностного стока в море составляет Волга (до 80 %), доля стока остальных рек незначительна: Урал – около 5 %, Терек, Сулак, Самур – в сумме до 5 %, Кура – около 6 %, сток рек иранского побережья, малых рек Кавказа и прочих составляет 4–5 % (табл. 6.3).

Таблица 6.3. Доля помесячного стока отдельных рек в общем поверхностном стоке вод в Каспийское море (%) [70]

Река-створ	Сток	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред. год
Волга – Дубовка	макс.	90	89	85	84	93	94	90	88	89	91	89	93	90
	мин.	67	66	51	45	72	68	61	61	59	63	64	55	61
	сред.	80	80	70	68	84	88	78	78	77	80	82	78	80
Кура – Сальяны	макс.	13	16	21	27	10	12	15	12	15	18	16	24	17
	мин.	5	4	5	3	1	1	2	2	3	3	2	2	3
	сред.	9	8	10	10	5	4	5	5	6	7	6	10	6
Терек – Карголинская	макс.	5	5	7	4	3	6	14	16	13	8	7	10	8
	мин.	1	1	1	1	1	1	3	5	2	2	2	2	2
	сред.	3	3	3	2	1	2	6	8	6	4	3	4	3
Урал – Кушум	макс.	2	3	3	24	14	8	4	5	5	5	4	5	7
	мин.	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	сред.	1	1	1	8	6	2	3	2	2	2	1	2	3
Сулак – Миатлы	макс.	2	2	2	2	2	6	10	7	8	6	3	3	4
	мин.	1	0	0	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
	сред.	1	1	1	1	1	2	4	4	4	2	1	2	2
Самур – Усух	макс.	1	1	1	3	1	2	3	3	2	3	1	2	2
	мин.	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	сред.	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1	1	1	1
Иранские реки и междуречье	макс.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
	мин.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
	сред.	6	7	15	11	3	1	3	2	4	4	6	5	5

В приходной части водного баланса речной сток достигает в среднем 74–85 %, при этом в многоводные периоды эта доля возрастает,

а в маловодные – уменьшается. На долю волжского стока приходится около 80 %, поэтому колебания уровня моря в значительной степени обусловлены его изменчивостью.

Анализом многолетних колебаний стока Волги занимались многие исследователи [16, 21, 29, 52, 60, 63, 70, 73]. При расчетах водного баланса Каспийского моря многолетний период сток Волги обычно определяется по гидрометрическому створу у г. Волгограда (Дубовка), расположенному на расстоянии 500 км от моря. На этом участке Волга протекает в засушливой зоне и не имеет притоков. В половодье в пойме и дельте имеют место большие потери на испарение. Площадь поймы и дельты составляет 25 тыс. км^2. Годовое количество осадков для поймы равно 370 мм, для дельты – 260 мм (зимой меньше, чем летом). Эти данные не учитывают время добегания воды до моря, потерю воды на фильтрацию, испарение и хозяйственные нужды в Волжско-Ахтубинской пойме.

Дельта Волги в период падения уровня моря интенсивно росла в результате отложения речных наносов и присоединения к дельте обсохших участков дна взморья. При стабильном стоянии уровня (период 1863–1914 гг.) линейное нарастание дельты составило 94 м/год. За последующие 11 лет при падении уровня на 0,4 м годовой прирост дельты увеличился до 190 м, а при падении уровня на 1,45 м в 1927–1940-х гг. до 370 м. С 1936 по 1977 г. площадь дельты Волги за счет снижения уровня выросла с 9000 до 11580 км^2. Поэтому в оценке величины потерь воды на участке от Дубовки до моря данные различных авторов сильно расходятся. По некоторым данным, потери волжского стока в дельте с 1940 по 1990 г. составляли в среднем около 8,6 км^3/год.

Расчеты потерь стока р. Волги на участке от Волгограда до устья по разным авторам составляет по Соколову – 9 км^3, Брегману – 5 км^3, Аполлову – 2,83 км^3, Кузину – 6,04 км^3, Бочкову – 13 км^3. Как видно, различия могут достигать 30 % и более. Фактические потери воды в дельте могут быть выше рассчитанных значений. Это может быть следствием недостаточно надежных расчетов, отсутствия достоверных сведений по заливаемости поймы и дельты и инфильтрации воды в почву, а также неучета испарения с различных угодий.

Большое влияние на дельтообразование оказывает деятельность человека. Человек вмешивается в процессы дельтообразования не только косвенно, но и путем гидротехнического строительства в бассейнах рек, изъятия части стока на орошение, преднамеренно создавая новые речные русла, спрямляя водотоки рек, прокладывая каналы. В результате уменьшается сток воды, изменяется его внутригодовое распределение (табл. 6.4).

Таблица 6.4. Сток и его потери в низовьях рек бассейна Каспийского моря [70]

Река	Приток вне зоны формирования, км³	Потери в нижнем течении		Приток в море, км³
		км³	%	
Волга	242	13,7	5,7	229
Урал	8,7	1,5	17,1	7,2
Терек	9,1	2,4	25,8	6,8
Сулак	5,5	1,3	24,2	4,2
Самур	2,0	0,3	15,1	1,7
Кура*	16,0	0,4	2,7	15,6
Побережье Ирана	16,1	5,4	33,4	10,7
Междуречье западного берега	2,3	1,1	47,8	1,2
Всего	302	26,1	8,6	277

Примечание: * для Куры расчет по створу у пос. Сальяны, приток в море выполнен с учетом коллекторов (1,3 км³/год)

К.И. Смирнова и О.И. Шереметевская [67] для приближенного расчета потерь воды в дельте Волги использовали эмпирическую зависимость

$$Q_n = 0{,}034Q_Д + 0{,}22\,, \tag{6.3}$$

где Q_n – потери воды в дельте Волги; $Q_Д$ – объем волжского стока в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС. Коэффициент корреляции равен 0,82.

Более точные результаты получаются по зависимости [68]

$$Q_n = 0{,}034Q_Д - 0{,}01P_A + 1{,}4\,, \tag{6.4}$$

где P_A – количество осадков в Астрахани (в мм) за период с апреля по октябрь. Коэффициент корреляции равен 0,88. Обеспеченность невыхода ошибок за 1 км³/год составляет 83 %.

Замыкающий гидроствор на реке Урал до 1972 г. был расположен в 200 км от морского края дельты, затем перенесен в с. Махамбет, находящееся в 145 км от дельты. Среднемноголетние потери стока в дельте за время инструментальных наблюдений (1936–1990 гг.) составили 0,4 км³/год. Площадь водосбора р. Урал равна 235 тыс. км².

Сток Терека, отличающийся большими естественными колебаниями, за последние годы существенно изменился. До 1973 г. сток Терека поступал через узкий Чаканный пролив в Кизлярский залив Северного

Каспия, а с 1973 г. непосредственно в Средний Каспий через искусственную прорезь Аграханского полуострова. В настоящее время Терек впадает в море общим рукавом на открытом побережье. Потери стока между станицей Каргалинской и устьем равны приблизительно 1 км^3.

Замыкающий гидроствор реки Сулак расположен в пос. Миатлы в 123 км от устья. Сулак впадает в море, образуя однорукавное русло. В 1957 г. река ниже пос. Главный Сулак была направлена по искусственной прорези на юго-восток. Потери стока между створом и морем не учитывались, так как створ расположен недалеко от устья.

Измерение расходов Самура проводится по гидроствору у с. Усух. Потери стока между с. Усух и устьем реки незначительны, поэтому в расчетах они не учитываются.

Река Кура впадает в море двумя рукавами: юго-восточным, по которому в море поступает около 95 % стока, и северо-восточным. Расходы измеряются на гидростворе в пос. Сальяны, находящемся на расстоянии 78 км от вершины устьевой области и 85 км от морского края дельты.

Данных об объеме стока рек иранского побережья и междуречий мало [35], поэтому при расчетах водного баланса эта величина принималась постоянной, равной в соответствии с данными С.С. Ремизовой 14 км^3/год.

Средняя величина поверхностного речного притока в Каспий в XX–XX1 вв. составила около 300 км^3/год, изменяясь в отдельные годы от 200 (1996 г.) до 459,8 км^3 (1926 г. – с экстремальным стоком Волги). Средний объем речного стока (315 км^3/год) за период непрерывного подъема уровня моря (1978–1995 гг.) может быть сопоставим со стоком в многоводный период начала XX века. В отдельные годы (1979, 1990, 1991 и 1994 гг.) его величина была более 350 км^3/год. В естественных, не нарушенных антропогенной деятельностью условиях, приток составил бы 380–390 км^3/год. Это соответствует стоку 3–4%-ной обеспеченности при среднемноголетней норме естественного притока к морю за 1900–2012 гг., равной 300 км^3/год.

Среднемноголетняя величина стока Волги (норма естественного стока) составила за период инструментальных наблюдений (1881–2012 гг.) около 250 км^3/год. Такой же объем волжского стока (248,2 км^3/год) поступал в море с 1996 по 2010 г., а с 1978 по 2010 г. его средний объем достигал 262,3 км^3/год. В этот период наибольший сток (340,7 км^3) наблюдался в 1994 г., а наименьший (177,6 км^3) – в 1996 г. В естественных, не нарушенных хозяйственной деятельностью условиях, сток Волги мог бы достигать и более значительных величин, в среднем на 20–30 км^3 (до 330 км^3/год). Многоводность рек наблюдалась

в условиях, когда площадь морской акватории сократилась на 50 тыс. км^2 по сравнению с началом XX столетия, что и определило значительный и интенсивный подъем уровня за короткий отрезок времени. Разница между максимальным и минимальным объемами стока всех рек составила около 260 км^3/год, что соответствует изменению уровня моря приблизительно на 1 м.

С начала XX столетия отмечалась тенденция сокращения поступающего в море речного стока. Так, многоводный период, наблюдавшийся в начале прошлого столетия (1900–1929 гг.), сменился катастрофической маловодностью Волги и Урала в 1930-е гг. Волжский сток сократился в 1930–1941-е гг. на 50 км^3/год по сравнению с предшествующим периодом. Наиболее катастрофический характер маловодности отмечался в 1930–е гг. в восточной половине бассейна Волги, в бассейне Камы, сток которой составляет 50 % объема волжского стока. В бассейнах верхней Волги и Оки маловодность, установившаяся в крайне засушливых условиях, сказалась в меньшей степени.

Основная роль в формировании многолетней изменчивости стока рек принадлежит крупномасштабным атмосферным процессам. Изменение климатических условий в 1940–1950-е годы способствовало увеличению увлажненности и, как следствие, повышению водности рек, что наиболее ярко проявилось в водосборных частях волжского бассейна: Верхней Волги, Оки и Камы. В 1941–1948 гг. объем стока Волги значительно увеличился, что существенно замедлило темпы снижения уровня моря. На рис. 6.2 показан график числа дней с основными формами атмосферной циркуляции и стока Волги за период с 1972 по 2012 год.

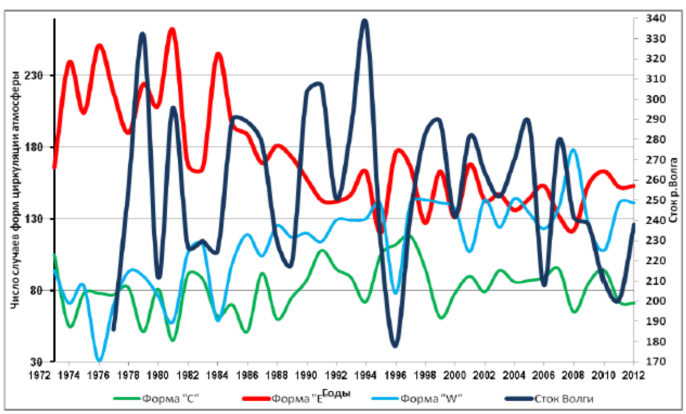


Рис. 6.2. Число дней с основными формами атмосферной циркуляции и сток Волги за период с 1972 по 2012 г. [73].

В первую половину 1970-х гг. в бассейне Каспия сложились неблагоприятные в гидрологическом отношении условия, аналогичные периоду 1930-х гг. В засушливых условиях 1970-х гг. произошло резкое падение уровня моря, вызванное крайней маловодностью рек, главным образом Волги. В 1970–1977 гг. в море поступало в среднем около 240 км^3/год речных вод, что значительно меньше, чем в 1930-е гг. Объем стока Волги сократился в среднем до 207 км^3/год (что практически соответствовало стоку в 1930–1941 гг.) и был на 8,5 % ниже среднемноголетней нормы.

В конце 1970-х гг. климатические условия в бассейне Каспийского моря резко изменились, что способствовало увеличению объема стока, обусловленного заметным ростом атмосферных осадков в водосборном бассейне Волги. Это привело к значительному повышению уровня моря, которое началось в 1978 г. и непрерывно продолжалось 18 лет.

Внутригодовое распределение общего поверхностного притока в море, несмотря на различие физико-географических условий речных бассейнов и особенности годового хода стока отдельных рек, почти полностью соответствует внутригодовому распределению стока Волги. В сезонном ходе волжского стока выделяется максимум в мае-июне в период прохождения пика половодья. В это время в море ежемесячно поступает от 13 до 26 % годового объема стока.

Зарегулирование речного стока в бассейне Каспийского моря привело к изменению его годового хода и некоторому сглаживанию сезонных колебаний уровня моря. В современных условиях половодье на Волге начинается на месяц-полтора раньше и проходит быстрее, чем до середины 1950-х гг. Так, по оценкам ГГИ, уменьшение объема стока весеннего половодья Волги за 1960–1980 гг. составило в среднем около 50 км^3/год. Наибольшее снижение объема весеннего половодья (около 70 км^3) наблюдалось в 1964 г., наименьшее (около 30 км^3) – в 1973 г. Следует отметить также, что интенсивность половодья и наступление его максимума определяются водностью рек. В многоводные годы наблюдается более раннее прохождение пика половодья и наибольшая его интенсивность. Исследование межгодовой изменчивости суммарного речного стока за характерные отрезки времени показало, что наибольшая изменчивость наблюдалась в многоводный период 1900–1929 гг., наименьшая – в современный многоводный период 1978–1995 гг. Сезонная изменчивость речного стока возрастает в многоводные годы.

Продолжительность волжского половодья за 1947–1990 гг. составляла в среднем 86 дней (минимум 38 дней в 1975 г. и максимум 161 день в 1947 г.), за это время в море поступило около 104 км^3 речной

воды (33–236 км^3) или до 40 % годового объема стока. В последние годы объем волжского половодья несколько увеличился по сравнению с 1970-ми гг., когда он составлял около 76 км^3/год, и равен в среднем 90 км^3/год. Межгодовые изменения продолжительности и объема волжского половодья довольно значительны. На фазе подъема половодья в море поступает в среднем около 55 км^3/год волжских вод, на фазе спада – 51 км^3/год. Самое раннее начало половодья наблюдалось 16 марта 1966 г., а самое позднее – 2 мая 1964 года. Меньше всего воды Волга приносит в море в зимние месяцы с декабря по февраль.

В последние годы существенно изменилась сезонная межгодовая изменчивость речного стока, главным образом Волги: произошло увеличение объемов стока в зимние месяцы (декабрь-февраль) и его сокращение в период половодья (май-июнь). Так, в начале XX столетия (1900-1929 гг.) в мае-июне в море поступало в среднем, соответственно, 20 % (50 км^3/год) и 27 % (66 км^3/год) годового объема стока, в последующие годы происходит не только количественное его изменение – уменьшение, но и изменение внутригодового распределения. В 1930-е гг. объем майского стока составил 23 % (45 км^3/год), а июньского – 26 % (50 км^3/год), в 1942–1977 гг. в эти месяцы в море поступал почти одинаковый объем волжских вод – около 20 % годового объема ежемесячно: 50 км^3/год в мае и 45 км^3/год в июне.

В период подъема уровня с 1978 по 1995 г. доля майского стока составляла 19 % (53 км^3/год) годового поступления, а июньского сократилась до 14 % (37 км^3/год). Объем зимних стоков (декабрь-февраль) увеличился с 3–4 до 6–7 % в 1978–2010 гг. Увеличение зимних объемов стока Волги и их снижение в летние месяцы свидетельствует об изменении характера циркуляционных процессов в атмосфере. Это также указывает на активизацию процессов взаимодействия атмосферы и океана и усиление атлантического переноса в осенне-зимний сезон (рис. 6.3).

Связь приращений уровня со стоком в наиболее многоводный период 1900–1929 гг. характеризуется коэффициентом корреляции 0,84, в 1940–2010 гг. – 0,80, в т. ч. 1940–1948 – 0,84; 1949–1969 – 0,73, 1970–1977 – 0, 67, 1978–1995 гг. – 0,75.

6.2.2. Атмосферные осадки

В приходную часть водного баланса входят, в том числе, атмосферные осадки, выпадающие на морскую поверхность. Объем осадков по сравнению с объемом речного стока незначителен, поэтому их влияние на межгодовую и сезонную изменчивость уровня менее значимо.

Метеорологические станции, осуществляющие наблюдения за атмосферными осадками на Каспии, расположены в основном на побережье и на некоторых островах. В открытом море наблюдения за осадками практически не проводятся. Поэтому сложность расчета количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Каспийского моря, связана прежде всего с ограниченностью числа метеорологических станций на побережье Каспия и его островах и с почти полным отсутствием данных наблюдений в открытой части моря.

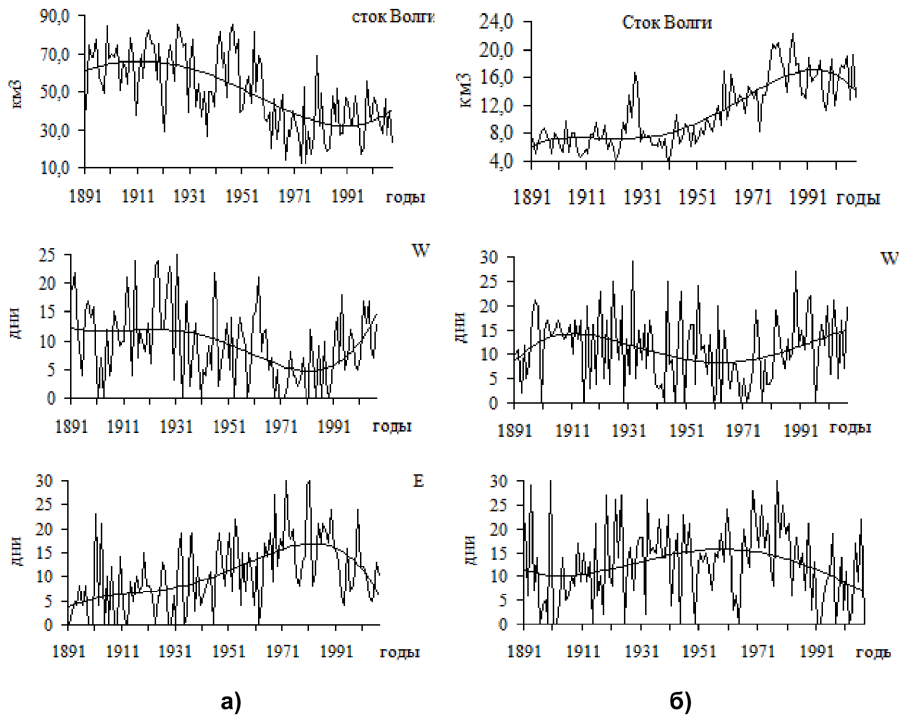


Рис. 6.3. Многолетняя сезонная изменчивость стока Волги (км³) (верхняя панель) и повторяемости атмосферной циркуляции западного (W) и восточного (E) типов (в днях): в июне (а), январе (б).

Для приближенного суждения о количестве осадков в открытом море обычно используются данные наблюдений на прибрежных и островных станциях. На основе анализа большого материала наблюдений над осадками на ЕТР было установлено, что основными параметрами, определяющими количество выпадающих осадков, являются температура воздуха и дефицит влажности.

Количество атмосферных осадков, выпадающих на акваторию моря, рассчитывается двумя способами – как среднеарифметическое (или средневзвешенное) значение по числу станций и по изогиетам. Результаты, полученные по первому способу, существенно зависят от количества выбранных для расчета станций. Поскольку станции расположены на побережье моря неравномерно, данные по осадкам отражают в большинстве случаев орографические особенности района. Карты изогиет, построенные разными авторами, также отличаются как по количеству использованных станций, так и по полученному результату.

Точность определения осадков на станциях зависит от учета систематических погрешностей, обусловленных потерей собранных осадков на смачивание стенок водосборного сосуда, испарение из сосуда за время между выпадением осадков и сроком их измерения, а также искажением поля ветра около осадкомера и изменением в связи с этим поля траекторий падения части осадков. При определении средних сумм осадков необходимо также учитывать поправку, связанную с приведением данных наблюдений за весь период к какому-либо одному из приборов: осадкомеру или дождемеру, если измерения осадков проводились разными приборами [10, 11].

За последние сто лет наибольшее количество осадков на Каспии (около 120 км^3) выпало в 1969 г., а наименьшее (около 50 км^3) в 1944 г. Таким образом, размах межгодовых колебаний количества атмосферных осадков составил 70 км^3, что соответствует изменению уровня на 18 см. Распределение осадков на Каспии имеет очень пеструю картину. Несовершенство методов наблюдения над осадками и почти полное отсутствие данных наблюдений в открытом море обуславливает большой разброс среднемноголетних значений осадков, рассчитанных различными авторами. Даже осредненные за много лет осадки на двух соседних станциях часто могут различаться весьма значительно. Причины этого, по-видимому, следует искать в характере рельефа местности, существенно влияющего на направление и интенсивность потоков воздуха, а следовательно, и на уровень конденсации паров воды. Средняя многолетняя величина осадков на акватории Каспия оценивается разными исследователями от 263 до 171 мм/год.

Осадки, наблюдавшиеся на станциях, расположенных на островах, во всех случаях превышают количество осадков, полученных путем расчета для открытого моря. Это можно объяснить, с одной стороны, шероховатостью подстилающей поверхности (острова увеличивают эту шероховатость, так как всякий остров представляет собой препятствие для воздушного потока), и с другой стороны – термической неоднородностью подстилающей поверхности, вызванной наличием суши среди большого водного пространства.

Наименьшее количество осадков выпадает в летний период. Ежегодное повышение уровня моря в результате выпадения осадков составляет примерно 20 см. Отклонения количества осадков от нормы могут обусловить отклонения в годовых приращениях уровня в среднем на ±3–7 см, что составляет 10–15 % размаха его внутригодовых колебаний. Помесячная статистика осадков за период 1978–1995 гг. приведена в табл. 6.5 и 6.6.

Таблица 6.5. Месячная и годовая сумма осадков (см) по отдельным пунктам за период 1978–1995 гг.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Кулалы	9	8	18	27	29	10	17	13	16	15	21	12	193
Пешной	14	12	9	10	15	12	10	13	9	11	8	12	144
Искусственный	10	10	12	19	23	17	21	10	14	15	12	10	173
Чечень	11	12	18	21	22	13	13	16	23	18	31	17	216
Махачкала	24	25	26	15	32	27	22	25	41	47	39	31	353
Изберг	13	26	18	16	24	21	18	20	33	29	29	24	270
Дебент	21	38	27	19	29	21	15	24	42	50	46	44	376

Таблица 6.6. Экстремальные значения годовых сумм осадков (мм) за период 1978–1995 гг.

Станция	Максимум	Год	Минимум	Год
Кулалы	330	1981	97	1984
Пешной	226	1982	88	1984
Искусственный	279	1989	86	1993
Чечень	503	1984	82	1982
Махачкала	640	1990	222	1986
Изберг	395	1980	186	1987
Дебент	520	1990	265	1986

Месячные и годовые суммы осадков по отдельным пунктам за период 1898–1965 гг. приведены в табл. 6.7.

Как видно из табл. 6.7, осадки в Ленкорани намного превышают осадки в других пунктах.

На западном побережье Каспийского моря, вследствие преимущественного переноса воздушных масс с Атлантики, выпадает наибольшее количество атмосферных осадков: от 160 мм на Северном Каспии

до 1600 мм в отдельных районах Южного Каспия. Повсеместно преобладающий вид осадков – дождь. На западном и южном побережье осадки выпадают в основном в прибрежной полосе и не распространяются далеко в море. Зона повышенного количества осадков располагается вдоль берега узкой полосой шириной не больше нескольких десятков километров.

Таблица 6.7. Среднее месячное и среднее годовое значение количества осадков (см) за период 1898–1965 гг.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Махачкала	29	28	26	26	28	31	28	29	50	45	52	39	411
Кулалы	9	10	10	14	14	19	14	14	16	12	11	17	176
Пешной	9	8	9	10	12	14	14	12	11	10	11	14	134
Искусственный	13	11	10	10	13	15	10	10	10	9	10	10	131
Тюлений	13	11	11	13	10	13	16	13	11	12	7	11	141
Чечень	10	9	9	18	21	19	18	20	21	20	14	11	190
Изберг	17	17	15	15	17	19	17	17	29	27	32	22	244
Дебент	25	23	23	23	20	22	16	21	48	48	50	36	355
Ленкорань	84	103	96	49	38	22	29	55	168	202	158	124	1125
Баку	22	23	20	22	17	8	3	5	17	27	30	28	224
Туркменбаши	21	19	18	16	18	8	5	5	23	30	33	25	219

На восточном побережье моря распределение осадков более равномерное, чем на западном. Крайне неравномерное количество осадков, выпадающих на морскую акваторию и на различные участки побережья, где их значительно больше, чем в центральных районах моря, обусловлено различием физико-географических условий. Коэффициент межгодовой изменчивости (Cv) количества атмосферных осадков в XX столетии составил 0,20, изменяясь в отдельные периоды от 0,09 до 0,20. Наибольшая межгодовая изменчивость осадков наблюдается на станциях восточного побережья в районе пустынь, а наименьшая – на станциях западного побережья Среднего и Южного Каспия, где их количество значительно в течение всего года.

Относительный вклад осадков в приходную часть водного баланса Каспия невелик, он изменялся в соответствии с гидрометеорологическими условиями от 15 % в начале XX столетия (1914–1917 гг.) до 25 %

в 1970-е гг. В годы с малым речным стоком относительная роль осадков в водном балансе моря возрастает.

С начала XX столетия в многолетнем ходе атмосферных осадков прослеживалась тенденция роста, особенно с 1940-х гг., а в 1978–2010 гг. их количество (в среднем 211 мм/год) превысило среднемноголетнюю норму (199 мм), приводя к ежегодному повышению уровня моря от 14 до 30 см слоя. В отдельные годы величина осадков изменялась от 109 мм/год (43,8 км^3/год) в 1920 г. и 122 мм/год (50 км^3/год) в 1994 г. до 326 мм/год (120 км^3/год) в 1969 г. Современная тенденция роста атмосферных осадков согласуется с ростом повторяемости западной формы атмосферной циркуляции, определившей в конце 1970-х гг. интенсивное развитие циклонических процессов. В результате этого произошло увеличение осадков практически по всему побережью и морю в целом. В отдельные месяцы количество выпавших осадков в 2–3 раза и более превышало среднемноголетнюю норму.

Во внутригодовом (сезонном) ходе осадков наблюдаются два максимума: осенне-зимний (сентябрь-январь) и весенний (март-апрель), когда на морскую акваторию выпадает 69–73 % годового количества осадков для моря в целом и 41–48 % для Северного Каспия, и два минимума: весенне-летний (май-август) и зимний (февраль). Причем в Северном Каспии внутригодовое распределение осадков более равномерно по сравнению со всем морем: в отдельные месяцы здесь выпадало в среднем от 5 (май-август) до 16 % (декабрь) годовой их суммы.

С 1940 по 2010 г. коэффициент корреляции приращений УКМ с атмосферными осадками составил +0,30, а с испарением -0,40. В 1972–1995 гг. связи приращений уровня с испарением, объемом речного стока и атмосферными осадками были более тесными по сравнению с другими периодами, характеризуясь коэффициентами корреляции -0,62, 0,67 и 0,49 соответственно.

Расчет осадков

Для расчета осадков, выпадающих на морскую акваторию, использовалась методика, разработанная Н.А. Белинским [8, 9]. Белинский для приближенных расчетов осадков в условиях Каспийского моря предложил формулу

$$P = \left[0{,}40(t_w - t_a) + 3{,}2\right]E_M - 8D - 0{,}25D^2, \qquad (6.5)$$

где P – количество осадков, выражаемое в мм слоя, при условии, что все другие величины, входящие в это равенство, выражаются в миллибарах; E_M – максимальная влажность воздуха (определяется

по средней температуре воздуха с помощью психометрических таблиц); D – дефицит влажности воздуха, определяемый также по осредненным данным температуры и влажности воздуха из психометрических таблиц. Формула (6.5) пригодна для расчета среднего количества осадков, выпадающих на больших территориях. Она выражает простую закономерность: чем больше может содержаться влаги в воздухе, тем больше выпадает осадков. В свою очередь, максимальное количество влаги, которое может содержаться в воздухе, определяется его температурой, но при этом увеличение дефицита влажности приводит к уменьшению количества осадков. К сожалению, часто из-за отсутствия данных о температуре воздуха и воды в открытой части моря формула (6.5) не всегда может быть использована в практических расчетах.

В Гидрометцентре России при практических расчетах количество осадков, выпадающих на поверхность Каспийского моря, оценивалось по данным 12 прибрежных гидрометеорологических станций (о. Тюлений, Махачкала, Форт-Шевченко, Нефтяные Камни, Туркменбаши, Куули-Маяк, Кара-Богаз-Гол, о. Жилой, Ленкорань, Баку, Сумгаит, Актау). При этом исходили из предположения, что средняя сумма осадков по 12 станциям с достаточной степенью точности характеризует осадки, реально выпадающие на поверхность моря.

Для перехода от количества осадков на прибрежных станциях к осадкам в открытом море, используется зависимость

$$P_м = 0{,}98P_{ГМС} + 1{,}7(t_w - t_a) - 1, \qquad (6.6)$$

где $P_м$ – месячная сумма осадков, выпадающих на поверхность моря (мм/мес); $P_{ГМС}$ – средняя месячная сумма осадков, выпадающих на станциях; $t_w - t_a$ – средняя месячная разность температуры воды и воздуха на станциях.

В ГОИНе для расчета осадков, выпадающих на морскую акваторию, использовалась методика, изложенная в работах [38]. Для каждой выбранной опорной сети станций (о. Тюлений, Кулалы, Форт-Шевченко, о. Огурчинский, Нефтяные Камни и Куули-Маяк) вычислялись среднемноголетние месячные и годовые суммы осадков $P_{ср}$, затем по наблюденным месячным суммам P_i для каждого месяца и года определялись показатели межгодовой изменчивости осадков (модульные коэффициенты) $K_i = P_i / P_{ср}$ в каждом пункте относительно их средних значений. Далее вычислялся средний из 6 пунктов показатель межгодовой изменчивости K_i. Умножением K_i на норму осадков для всего моря или отдельных его частей, которые были определены по картам изогиет, определялись месячные и годовые суммы осадков, выпадающие на акваторию моря за конкретный год.

6.2.3. Испарение с поверхности моря

Наряду с объемом стока рек, величина испарения является наиболее значимой слагаемой водного баланса моря. Колебания этой величины зависят от свойств воздушных масс, переносимых над морем, и в значительной степени определяются условиями подстилающей поверхности моря (скоростью ветра, температурой воды и воздуха, влажностью и др.). При понижении уровня моря площадь зеркала моря уменьшается и, соответственно, уменьшается и объем воды, испаряющейся с поверхности моря, снижая темп падения уровня. При этом большую роль играет выравнивание береговой линии в результате отсечения мелководных заливов, таких, например, как Кайдак и Мертвый Култук, которые испаряют много воды.

Исследованиям процессов испарения с поверхности Каспийского моря и его расчету посвящено много работ [4, 7, 12, 20, 21, 24, 25, 30, 31, 36, 37, 40–44, 48–50, 56–59, 62, 64]. Однако достаточно надежных методов расчета испарения с поверхности моря до настоящего времени не существует.

Определение величины испарения представляет сложную задачу. Для этого используются разнообразные методы, среди которых можно выделить два основных класса: методы, основанные на использовании уравнений водного и теплового баланса моря, и методы, основанные на использовании эмпирических и полуэмпирических соотношений. Балансовый метод дает интегральную величину видимого испарения, которая чаще всего и используется при водохозяйственных расчетах. Методы второго направления позволяют получить величины истинного, а не видимого испарения.

Наиболее распространенными являются балансовые методы. Однако возможности этих методов ограничены условием пространственной однородности испарения и теплообмена, которое в большинстве случаев не выполняется. Недостаток балансовых методов расчета испарения заключается и в том, что испарение определяется косвенно как остаточный член водного баланса, который содержит погрешности определения всех его составляющих. Использование метода теплового баланса, так же как и метода водного баланса, целесообразно при расчетах за длительный период времени, например за год, когда тепловой баланс моря равен или близок к нулю, поскольку между водоемом и атмосферой сохраняется относительное тепловое равновесие.

Методы второго класса представляют собой различные варианты диффузионного метода определения испарения и позволяют получить представление о пространственном изменении испарения, изучить его

региональные особенности. Их недостатки связаны с тем, что сложная природа взаимодействия водоема и атмосферы описывается полуэмпирическими соотношениями, отвечающими некоторым средним условиям или полученным в умеренных гидрометеорологических условиях. Недостатком эмпирических и полуэмпирических соотношений является то, что они не учитывают сложную природу процесса взаимодействия моря с атмосферой. В частности, оценка величины испарения производится без учета глубины моря. Более подробно методы расчета испарения описываются ниже.

В табл. 6.8 приведены статистические характеристики величин испарения в годовом ходе.

Таблица 6.8. **Статистика испарения с поверхности Каспийского моря (мм) по месяцам за период 1925–1980 гг.**

Статистич. характерист.	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	**Год**
Среднее	51	40	41	49	67	96	124	142	140	116	85	63	1008
Максимальн.	57	49	51	71	106	120	144	160	160	140	107	78	1066
Минимальн.	36	35	35	39	44	86	104	123	99	78	55	45	1008

В начале прошлого столетия испарение с поверхности моря составляло 390–395 км^3/год, а в последние годы из-за увлажненности климата оно снизилось до 344 км^3. Максимальная амплитуда испарения в последнем столетии составила 190 км^3, что соответствует изменению уровня моря на 49 см. Наиболее интенсивное испарение наблюдалось в 1930-е гг., чему способствовала засушливость климата, связанная с антициклоническим режимом погоды на значительной части ЕТР. Для испарения с поверхности Каспийского моря характерны незначительные межгодовые изменения, свидетельствующие об относительной устойчивости этой составляющей водного баланса. Однако в связи с понижением УКМ и соответствующим сокращением площади его зеркала происходит уменьшение объема испаряющейся воды. Имеет место значительная сезонная изменчивость испарения: в период с июня по декабрь испаряется около 70 % годового объема испарившейся воды.

В прибрежных районах испарение должно быть больше, чем в центральных районах моря. Анализ годового хода испарения с поверхности моря показывает, что наиболее интенсивное испарение происходит в холодную часть года, когда наблюдаются наибольшая скорость ветра и дефицит влажности. В теплую часть года интенсивность испарения

замедляется в связи с тем, что температура воздуха либо близка к температуре воды, либо выше ее. Вследствие этого дефицит влажности воздуха непосредственно у поверхности воды не может достигать больших значений.

Отклонения испарения от среднего многолетнего значения в отдельные годы достигает ±10–20 см, что соответствует примерно 30–50 % размаха внутригодовых колебаний уровня за счет испарения. Уровень понижается за счет испарения в среднем за год на 97 см. На протяжении прошлого столетия (до 1978 г.) влияние испарения на внутригодовой ход уровня в основном преобладало по сравнению с влиянием речного стока, объем которого постепенно сокращался. Различия между среднегодовыми значениями испарения, определенные по разным методикам в разные годы, достаточно велики. В среднем за год испарение составляет: в Северном Каспии – 101 см, в Среднем Каспии – 81 см и в Южном Каспии – 108 см.

В результате анализа многолетней динамики испарения с поверхности Каспия [17], рассчитанного методом водного баланса, а также по методу, разработанному в ГОИНе [5], установлено, что с начала XX века до 1940-х гг. отмечалась устойчивая тенденция повышения испарения с водной поверхности, а в последующие десятилетия наблюдался отрицательный тренд (табл. 6.9). По данным В.Ю. Георгиевского и В.С. Голубева [17], среднегодовое испарение с поверхности Каспия за 1900–1996 гг., вычисленное как остаточный член водного баланса, составило 961 мм, а рассчитанное по методике ГОИНа – 959 мм.

Таблица 6.9. Средние за десятилетние периоды слои испарения с поверхности Каспия [46]

Период	Слой испарения, мм	Период	Слой испарения, мм
1901–1910	941	1951–1960	986
1911–1920	942	1961–1970	975
1921–1930	975	1971–1980	940
1931–1940	988	1981–1990	924
1941–1950	1001	1991–1996	923

Испарение, являясь основной отрицательной составляющей водного баланса, хотя и отличается незначительной межгодовой изменчивостью ($Cv = 0{,}09$), но в XX в. величина испарения была сопоставима с объемом речного стока, а в отдельные периоды даже превышала его.

Это во многом определяло дефицит водного баланса и падение уровня моря с конца 80-х гг. X1X столетия до 1978 г. Сезонная изменчивость испарения более значительна и на 50 % определяет сезонную изменчивость уровня моря.

Исследование пространственно-временной изменчивости испарения показало, что в отдельных районах с аномальным распределением гидрометеорологических элементов, особенно в прибрежных районах, где наблюдаются такие явления, как выход холодных глубинных вод, преобладание малых или больших скоростей ветра, испарение значительно отличается от средней многолетней величины. В связи с изменением положения уровня моря, приводящим к изменению площади испаряющей поверхности, происходит соответствующее уменьшение или увеличение объема испаряющихся вод.

Как указывалось выше, наиболее интенсивно процессы испарения были развиты в 1930-е и в первую половину 1970-х гг. В начале XX столетия с поверхности моря ежегодно испарялось около 970 мм слоя воды, или 390 км^3 (что соответствует многолетней норме), а в 1930-е гг. море ежегодно теряло значительно больше (в среднем 1004 мм), что намного превышало ее поступление. С 1930 по 1941 г. море потеряло свыше 700 км^3 морских вод, что привело к интенсивному падению уровня моря на 1,8 м.

В 1940–1950 гг. объем испарившихся вод с поверхности моря в связи с сокращением его площади при снижении уровня составлял в среднем около 360 км^3 воды в год, испарение (964 мм слоя в год) было близко к среднемноголетней норме. В 1970–1977 гг. процессы испарения были наиболее интенсивными (1039 мм/год). В 1978–1995 гг. испарение заметно снизилось: с поверхности моря ежегодно испарялось в среднем около 919 мм слоя, или 348,7 км^3 воды, а в 1996–2010 гг. интенсивность процессов возросла, составляя в среднем 966 мм слоя в год (378,3 км^3).

Таким образом, ежегодная величина испарения с поверхности Каспийского моря в XX–XXI вв. изменялась от 920 до 1040 мм слоя, а в среднем море теряло около 970 мм слоя воды (около 375 км^3) в год. Размах годовых значений испарения составлял около 500 мм слоя, или 190 км^3 воды. Отклонения годового значения от многолетней нормы достигали ±27 % (±100–200 мм), что соответствует примерно 30–50 % размаха годового хода уровня Каспийского моря. Значительная межгодовая изменчивость испарения наблюдалась в периоды, когда его интенсивность возрастала, т. е. в засушливых климатических условиях 1930-х и в первой половине 1970-х гг. В периоды, отличающиеся повышенной увлажненностью (1978–1995 гг.), изменчивость испарения снижалась.

В связи со значительной меридиональной протяженностью моря и существенными различиями орографии отдельных районов воздушные массы при прохождении над морем трансформируются и их влияние на увлажненность различных районов моря неодинаково. Поэтому тенденции многолетних изменений влажности воздуха и испарения в отдельных частях моря могут быть различными.

Как правило, длительные тенденции в изменении влажности воздуха и испарения прослеживаются на многих станциях и районах моря одновременно в том случае, когда они связаны с развитием преобладающих типов атмосферной циркуляции – комплексных климатообразующих факторов. Анализ многолетнего хода испарения с поверхности моря и отдельных его частей показал, что в целом отмечалась тенденция к его снижению.

Наиболее интенсивно процессы испарения развиты в Северном Каспии, где ежегодно испаряется свыше 100 см слоя воды. Сезонная изменчивость испарения связана с сезонным ходом гидрометеорологических факторов: с поверхности моря с июня по декабрь испаряется около 70 % годового объема всех испарившихся вод, а с поверхности Северного Каспия с мая по сентябрь – 75 % годового объема.

Минимальные значения величин испарения в Северном Каспии отмечаются в зимние месяцы и начале весны (с января по март), максимальные – летом (в июне-августе). Почти во всех районах Северного Каспия в зимние месяцы, особенно в феврале, наблюдается обратный испарению процесс – конденсация. В результате интенсивного весеннего прогрева вод на мелководье испарение к началу мая резко возрастает. Наиболее интенсивны процессы испарения в июне-августе, что объясняется высокой температурой воды в сочетании с наименьшей относительной влажностью воздуха над морем. В районах Среднего и Южного Каспия процессы испарения наиболее развиты в августе-сентябре.

Значительная внутригодовая (сезонная) изменчивость испарения наблюдается в периоды прогрева и охлаждения моря, характеризующиеся наибольшей изменчивостью основных климатообразующих факторов, определяющих испарение: температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, температуры воды. Анализ статистических характеристик средних месячных значений испарения показал, что наибольшие значения среднеквадратических отклонений (σ = 20–40 мм слоя) характерны для сентября. В декабре–феврале наблюдаются наибольшие значения коэффициентов сезонной многолетней изменчивости испарения (Cv = 0,30–0,40), а наименьшие (Cv = 0,10–0,15) – в июле-августе, т. е., соответственно, в периоды охлаждения и прогрева морских вод.

Интенсивность испарения находится в тесной зависимости от состояния барико-циркуляционного режима каспийского бассейна и определяется главным образом развитием процессов антициклонической формы атмосферной циркуляции, повторяемость которой с начала XX столетия имела выраженную тенденцию спада. Исследования показали, что в различных частях Каспийского моря интенсивность процессов испарения имеет свои отличия.

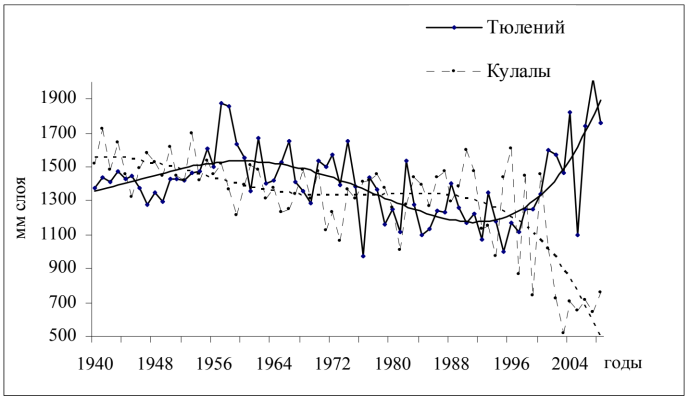
В последние годы в западной части Северного Каспия в районе ГМС о. Тюлений испарение стало более интенсивным, и отрицательная тенденция многолетней изменчивости его величин поменяла свой знак. В других районах испарение было значительно ниже нормы, и в многолетнем ходе его годовых и сезонных величин отмечаются статистически значимые тренды снижения, главным образом на восточном побережье Каспийского моря.

Тенденция уменьшения величин испарения хорошо согласуется не только с изменчивостью антициклонической формы циркуляции, но и со скоростью ветра: на всех ГМС наблюдались статистически значимые тренды ее снижения, за исключением ГМС о. Тюлений. Значительный рост скорости ветра, наблюдавшийся с начала 1990-х гг., стал, по–видимому, основной причиной более интенсивных процессов испарения в западной части Северного Каспия, в районе о. Тюлений (рис. 6.4).

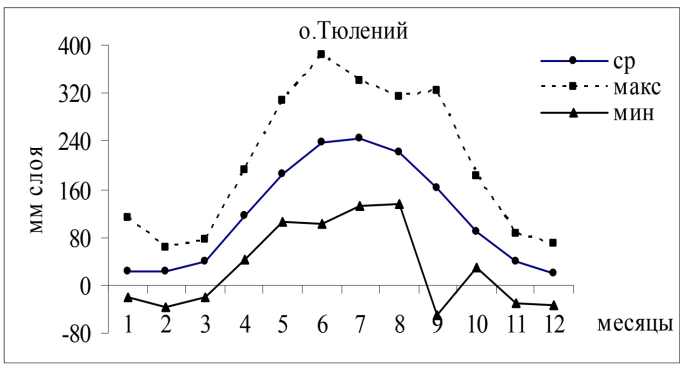
Величина испарения в 1970–1990 гг. не превышала среднемноголетней нормы (около 375 км^3/год, или 97,0 см слоя), а в период современного роста уровня она составила около 92,0 см/год. С 1996 по 2010 г. испарение приводило к ежегодному снижению уровня моря в среднем на 96,6 см (от 81 до 108 см), а наиболее значительное влияние испарение на снижение уровня оказывало в 1930-е гг. (94–107 см) и в 1942–1977 гг. (72–117 см).

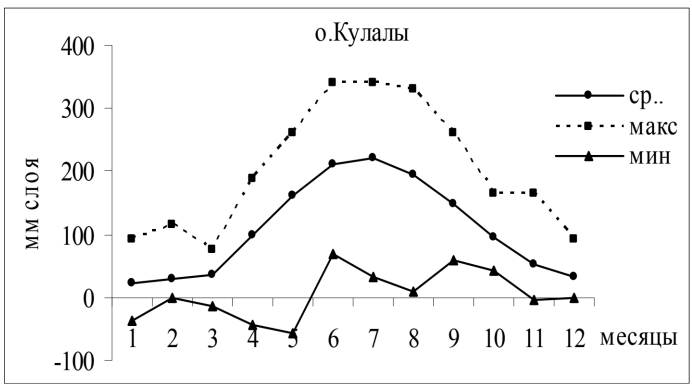
К числу климатообразующих факторов, определяющих интенсивность испарения, относится температура воздуха. На ГМС Каспийского моря с конца 1970-х – начала 1980-х годов наблюдались положительные отклонения годовых ее значений от среднемноголетней нормы. Сохранение этих тенденций в будущем может служить предположением о начале роста интенсивности процессов испарения.

Различия межгодовой изменчивости величин испарения в разных районах Каспийского моря обусловлены как физико-географическими условиями, так различным влиянием климатообразующих факторов. Коэффициент межгодовой изменчивости (Cv) с 1940 по 2010 г. на ГМС о. Кулалы составляет 0,22, о. Тюлений и о. Огурчинский – 0,15, Куули-Маяк – 0,23.



а)





б)

Рис. 6.4. Многолетняя (а) и сезонная (б) изменчивость испарения на ГМС Каспийского моря.

Методы расчета испарения с поверхности моря

Величина испарения с поверхности Каспийского моря непосредственно не измеряется, а рассчитывается. Существенным обстоятельством, затрудняющим расчет испарения с поверхности моря по имеющимся формулам, является отсутствие регулярных длительных наблюдений над температурой воды, влажностью воздуха и ветром в удаленных от берега районах моря. Регулярные наблюдения над этими элементами ведутся на прибрежных гидрометеорологических станциях, однако они не характеризуют их значений в открытом море, и расчет испарения по этим данным приводит к значительным ошибкам. Результаты расчетов, как правило, оказываются завышенными за счет более высокой температуры воды в районе станции по сравнению с температурой воды открытого моря. Поэтому предлагаются различные способы корректировки расчетов испарения для открытого моря. Например, Н.А.Белинский [9] предлагает расчетные величины испарения на прибрежных станциях увеличивать примерно на 20 %.

О.И. Шереметевская [72] для расчета испарения с поверхности моря использовала эмпирическую формулу

$$E = 7{,}6V\Delta\,, \tag{6.7}$$

где E – скорость испарения с поверхности моря, мм/мес; V – скорость ветра, м/с; Δ – дефицит влажности, мм, на уровне 1 м, вычисленный по поверхностной температуре воды.

В ГГО для расчета испарения используется эмпирическая формула

$$E = 5{,}2\,V\Delta\,. \tag{6.8}$$

Годовые суммы испарения с поверхности Каспия, рассчитанные по формулам (6.7) и (6.8) оказались близкими, равными 1011 и 1007 мм соответственно.

К.И. Смирнова [66] показала, что испарение с поверхности моря E, мм/мес, тесно связано с температурой воздуха

$$E = 4{,}9 \cdot t_a + 19{,}3\,, \tag{6.9}$$

где t_a – средняя за четыре предшествующих месяца температура воздуха по станциям Махачкала, Шевченко, Баку и Красноводск. Эта связь оценивается коэффициентом корреляции 0,93 при обеспеченности невыхода ошибок за 27, 15 и 10 мм, равной 94, 83 и 61 %. Формула (6.9) неявно учитывает зависимость скорости испарения от температуры подстилающей поверхности – главного фактора, регулирующего скорость процесса испарения.

Более точные результаты получаются по связи между величиной испарения с максимальной упругостью водяного пара, мб, вычисленной по температуре воды предшествующего месяца.

$$E = 4{,}29E_{t_W} + 8\,, \tag{6.10}$$

где E – скорость испарения, мм/мес; E_{t_W} – максимальная упругость водяного пара при температуре воды за предшествующий месяц. Коэффициент корреляции этой связи равен 0,95 при обеспеченности невыхода ошибок за 27, 15 и 10 мм, равной 91, 88 и 85 %. Уравнение (6.10) позволяет по средним месячным значениям температуры воды у прибрежных станций (Махачкала, Форт-Шевченко, Баку, Красноводск) приближенно вычислять испарение с поверхности моря для следующего месяца. Асинхронность этой связи объясняется тем, что для замкнутого водоема процессы прогрева и охлаждения в открытом море запаздывают по сравнению с теми же процессами в мелководных районах. Формулы (6.9) и (6.10) могут быть использованы для ориентировочных расчетов.

В ГОИНе [4] испарение с поверхности моря рассчитывалось по формуле:

$$E = 433{,}7\,(e_s - e)\cdot U_{10}\cdot\delta_s\,, \tag{6.11}$$

где E – среднее за месяц испарение (мм/мес); e_s – максимальная упругость водяного пара при температуре поверхности воды (мб); e – упругость водяного пара на высоте 10 м, мб; U – скорость ветра на высоте 10 м (м/с); δ_s – параметр, определяющий влияние температурной стратификации на скорость испарения и зависящий от числа Ричардсона $Ri = (t_w - t_a)/U_{10}^2$.

Расчеты испарения проводились по пяти ГМС, расположенным в различных частях Каспийского моря и наиболее полно отражающим испарение с поверхности моря. В качестве опорных станций были выбраны: в Северном Каспии ГМС о. Тюлений и о. Кулалы (Форт-Шевченко) в Среднем и Южном Каспии – Куули-Маяк, Нефтяные Камни и о. Огурчинский. При вычислении максимальной упругости водяного пара e_s учитывалось наличие ледяного покрова. Параметр шероховатости принимался равным 0,06 см.

Расчет испарения проводился таким же методом, как и осадков: по опорным станциям и по морю в среднем определялись коэффициенты межгодовой изменчивости испарения, а затем, с учетом нормы испарения для каждой части и моря в целом, значение испарения с акватории моря за конкретные месяцы и годы.

6.2.4. Сток в залив Кара-Богаз-Гол

Второй расходной составляющей водного баланса Каспийского моря (после испарения) является сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол. Морская вода поступает в залив через одноименный пролив, где и происходит ее испарение. Являясь огромным природным испарителем, залив Кара-Богаз-Гол оказывает большое влияние на уровенный режим Каспийского моря, его водный и солевой балансы. Объем стока морской воды в залив в естественных условиях зависит от высоты положения уровня в Каспийском море и в заливе.

Сток морской воды в залив подвержен значительным изменениям во времени. С 1878 по 1937 г., вследствие стекания воды в залив, уровень моря ежегодно понижался на 5,9 см, что соответствовало 7 % величины изменения уровня моря за счет поверхностного стока. В период зарегулированного режима стока рек объем стока из моря в залив колебался в пределах от 8,7 до 15,0 км^3/год. До начала 1930-х гг. в залив ежегодно поступало 20–25 км^3 морской воды. Уровень залива Кара-Богаз-Гол в прошлом находился на 0,3–3,5 м ниже уровня Каспийского моря. Так, например, в 1878–1933 гг. уровень залива был примерно на 0,4 м ниже уровня моря, к началу 1940-х гг. разность уровней моря и залива возросла до 0,8 м, а к середине 1950-х гг. эта разность составляла 2,8–2,9 м и продолжала постепенно увеличиваться. По мере снижения уровня моря сток в залив сокращался и к концу 190-х гг. он составлял 5–10 км^3. Ежегодное снижение уровня Каспийского моря за счет стока в залив составляло 7–9 см.

Внутригодовое распределение стока морских вод в залив до 1984 г. было аналогично годовому ходу уровня моря. До 40 % годового стока в залив приходилось на июнь–август и сентябрь. В период повышения уровня моря сток в залив уменьшал его в среднем на 1–2 см в год, а в период падения увеличивал на 0,5 см в год. Ежегодное снижение уровня моря за счет стока вод в залив в среднем за прошлое столетие составило около 3,5 см (от 7 до 1 см), а в настоящее время менее 1 см, т. е. на сезонный ход уровня сток в залив почти не влияет.

К середине 1960-х гг. площадь залива сократилась до 10 тыс. км^2, сток вод в залив уменьшился до 8–10 км^3. Падение уровня моря продолжалось почти до конца 1970-х гг., поэтому объем стока в залив сократился до 5–10 км^3, уровень залива снизился до отметки -32,00 м БС, объем вод уменьшился до 20–22 км^3 (в начале 1930-х гг. объем его вод составлял 130 км^3), максимальные глубины в заливе не превышали 3–4 м. Площадь залива при стоке в него 5–6 км^3/год, по оценкам В.Н. Бортника [12], должна составлять около 6–7 тыс. км^2.

Многолетний ход уровня залива Кара-Богаз-Гол в период с 1921 г., когда были начаты наблюдения, по 1979 г. отражает в целом изменения среднего уровня Каспийского моря, обусловленные в основном естественными климатическими и частично антропогенными факторами, и, как следствие их проявления, уменьшением стока впадающих в море рек.

В марте 1980 г. пролив Кара-Богаз-Гол был перекрыт глухой плотиной и морские воды перестали поступать в залив. Резкое повышение уровня моря, начавшееся сразу же после критической его отметки (-29,00 м БС в 1977 г.), было неожиданным и не предполагалось при сооружении плотины в проливе. За период полного прекращения стока морских вод в залив (1980–1984 гг.) ежегодная "экономия" вод составляла в среднем около 10 км^3, а всего было "оставлено" в море около 50 км^3, что обеспечило подъем уровня моря в среднем за год на 2,5–3,0 см слоя. Суммарная «экономия» морских вод за счет антропогенного фактора (отчленения залива и регулируемой подачи морской воды в незначительных объемах) составила за 1980–1990 гг. примерно 135 км^3, что способствовало дополнительному повышению уровня моря на 35–40 см, или на 25 % его фактического роста. В начале 1980-х гг., т. е. за период отчленения залива, максимальные глубины его снизились до 1,2 м при средней глубине 0,75 м, а объем поверхностной рапы в заливе сократился с 22 до 1,5 км^3. В 1984 г. завершился процесс усыхания поверхностных рассолов и превращение залива в "сухое озеро" [12, 53].

С целью сохранения перспективного гидроминерального сырья залива и учитывая возможность необратимых изменений его сырьевой базы, а также принимая во внимание относительно высокое положение уровня Каспийского моря, в сентябре 1984 г. сток морских вод в залив был возобновлен при помощи временного водопропускного сооружения. С этого времени в залив ежегодно поступало около 1,6 км^3 морской воды.

Ликвидация плотины в 1992 г. и возобновление естественного поступления в залив морской воды привели к некоторому снижению темпов современного повышения уровня Каспия. С 1992 по 1995 г. в залив поступило около 130 км^3 морской воды. Вследствие этого повышение уровня моря было меньше возможного примерно на 30 см. Значительное годовое снижение уровня (около 13 см), связанное со стоком в Кара-Богаз-Гол, произошло в 1995 г., когда впервые за всю историю наблюдений был зафиксирован максимальный объем стока (52,2 км^3) морских вод в залив.

Разрушение дамбы в проливе оказало заметное демпфирующее влияние на современный подъем уровня. Однако, как считает

А.В. Фролов [71], сохранение современного режима оттока в залив создает условия для снижения уровня Каспийского моря, что и происходит в последние годы. При наступлении маловодья в бассейне Каспия и современном режиме оттока в залив возможно снижение уровня моря более быстрое и значительное по сравнению с падением уровня в 1930–1940 гг. Поэтому он предлагает идею строительства регулирующего сооружения в проливе, соединяющем море и залив. Такое сооружение оказывало бы, как показывают результаты его исследования, эффективное регулирующее влияние на колебания УКМ. Он также оценил режим оттока в залив на уровень Каспия в период его подъема с 1978 по 1997 год (рис. 6.5).

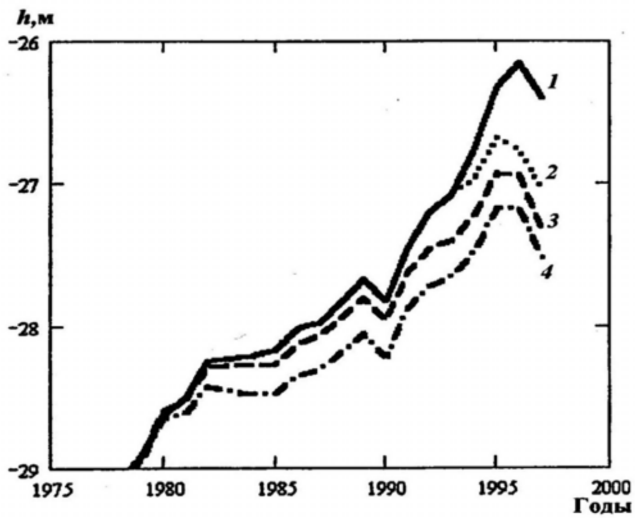


Рис. 6.5. Колебания уровня Каспийского моря в период 1978–1997 г. при разных режимах оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол [71]: при отсутствии оттока в залив (1); наблюденные отметки уровня (2); при режиме оттока в 1946–1980 гг. (3); при режиме оттока, предположительно сформировавшемся после разрушения дамбы (4).

Из рисунка видна очевидная эффективность возобновления оттока по отношению к подъему уровня моря: при отсеченном заливе подъем был примерно на 0,5 м больше наблюдавшегося. Заметное различие между кривыми 2 и 4 указывает на увеличение регулирующей способности оттока в залив после размыва пролива.

До 1995 г. воды из моря свободно вливались в залив и, вследствие этого, русло пролива подверглось наибольшему размыву и увеличению

его пропускной способности. В начале пролива ширина русла увеличилась на 120–140 м [34]. К 1996 г. чаша залива Кара-Богаз-Гол, практически высохшая в предыдущий период, заполнилась морской водой и между уровнями моря и залива установилась прямая связь. По мере последующего падения уровня моря и заполнения залива уровни в нем стали влиять на пропускную способность пролива.

По восстановленным данным, наибольший естественный сток в залив (38,2 км^3) наблюдался в 1878 г., а за период инструментальных наблюдений – в начале XX столетия (около 30 км^3). В конце 1970-х гг. естественный сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол был минимальным (около 5 км^3/год). С начала XX столетия по 2010 г. море «потеряло» свыше 1500 км^3 каспийских вод, поступивших в залив. Такому объему в пересчете на слой, отнесенный к средней площади моря за этот период, соответствует снижение уровня моря в среднем на 4,2 м.

Ежегодное снижение уровня моря, обусловленное стоком морских вод в залив Кара-Богаз-Гол, составляло в начале XX столетия около 7–9 см, в конце 1970-х – начале 1980-х гг. – 1,5 см. Так, например, за период с 1970 по 1977 г. около 20 % наблюдавшегося понижения уровня (на 0,65 м) было обусловлено стоком морских вод в залив. В условиях резкого повышения уровня моря (с 1978 по 1995 г.) антропогенное воздействие на сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол стало более ощутимым фактором, влияющим на гидрологический режим моря, в том числе и на его уровень. Это воздействие могло быть соизмеримо с ежегодными безвозвратными изъятиями волжского стока, как бы компенсирующего их. После 1995 г. ежегодное снижение уровня за счет этой отрицательной составляющей водного баланса происходило в среднем на 5 см (4–7 см).

На фоне общей тенденции понижения уровня залива в его многолетнем ходе можно выделить несколько периодов по характеру и интенсивности колебаний, аналогичных многолетнему ходу среднего уровня моря. Наиболее высокий уровень залива -26,0 м БС наблюдался в 1929 г., в 1977 г. уровень залива опустился до отметки -29,15 м БС. В июне 1992 г. была зафиксирована отметка уровня -33,9 м БС, а его среднегодовая отметка составила -33,4 м БС. Таким образом, за период инструментальных наблюдений размах годовых значений уровня залива Кара-Богаз-Гол составил 7,4 м.

Среди составляющих водного баланса сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол отличается наибольшей межгодовой изменчивостью (Cv = 0,48), его среднемноголетний сток за 1900–1979 гг. составил около 15 км^3/год, а с 1900 по 2010 гг. – 13,7 км^3/год. Наибольшая изменчивость (Cv = 0,44) многолетнего стока морских вод в залив наблюдалась

в 1930-е гг. В эти годы катастрофического падения уровня моря величина годового объема стока сократилась с 20 до 6 км^3. В период замедленного снижения уровня моря (1942–1977 гг.), когда в залив ежегодно поступало в среднем около 10 км^3 морских вод, межгодовая изменчивость была незначительной (Cv = 0,15). Сезонные изменения объема стока были невелики, уменьшение абсолютного значения стока на протяжении многих лет сопровождалось уменьшением и размаха его сезонных изменений. В среднемноголетнем плане сезонное распределение стока аналогично годовому ходу уровня моря. До 40 % годового стока в залив приходится на летние месяцы (июнь-август) и сентябрь, в феврале-марте в залив поступает незначительное количество вод – около 7 % годового объема. В расходной части водного баланса Каспия сток морских вод в залив Кара-Богаз-Гол достигает всего лишь около 5–6 % объема.

Расчет стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол

Определением величины стока в залив Кара-Богаз-Гол занимались многие авторы, использующие разные методы, поэтому и отмечались расхождения в данных. В отдельные годы (1933, 1945–1947, 1953–1955, 1970–1975 гг.) из-за отсутствия уровенных наблюдений или недостаточного количества проведенных измерений сток в залив восстанавливался. При восстановлении недостающих данных использовались разные методы, в частности метод линейной интерполяции, дающий ошибки в величинах стока до 0,1 км^3. Подсчеты стока осложнялись также и наличием в проливе переменного уклона, обусловленного эрозионными процессами и сгонно-нагонными явлениями.

Предложено несколько формул для определения стока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол для разных периодов времени. К.И. Смирнова и О.И. Шереметевская [67] по результатам анализа данных наблюдений за уровнем на водпосту Баку с 1946 по 1964 г. предложили приближенный расчет этой величины производить по эмпирической зависимости

$$Q_{КБГ} = 0{,}099H_Б + 0{,}065\Delta H_Б + 12{,}5, \qquad (6.12)$$

где $Q_{КБГ}$ - годовой приток в залив Кара-Богаз-Гол (км^3); $H_Б$ – величина среднегодового уровня моря в Баку; $\Delta H_Б$ – приращение среднегодовых уровней в Баку. Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0,89. Обеспеченность невыхода ошибок за 1,3 км^3 ($0{,}67\sigma$) составляет 84 %.

Мамедов показал, что зависимость между оттоком воды из моря в залив Кара-Богаз-Гол и уровнем моря является нелинейной и предложил следующую формулу

$$Q_{КБГ} = 0{,}000512H^{1{,}56}\sqrt{Q_c \exp(-0{,}00434)}\,, \qquad (6.13)$$

где H – средний уровень моря в Баку, см; Q_c – годовой приток в Каспийское море.

В результате перекрытия плотиной в 1980–1984 гг. залива Кара-Богаз-Гол и сокращения стока в залив в 1985–1992 гг. до 1,5 км^3/год, поступление морских вод в залив существенно уменьшилось по сравнению с условиями свободного стока. Это привело к дополнительному повышению УКМ примерно на 40 см. Ликвидация плотины в 1992 г. увеличила расход воды в заливе и замедлила повышение УКМ. После открытия дамбы разность уровней море-залив достигала 7 м, в результате чего залив быстро наполнялся, и уже к середине 1995 г. разность уровня море – залив составила около 1 м. После 1995 г. эта разность колебалась около среднего значения 0,442 м, а годовой сток в залив составлял около18 км^3. В 1993–1995 гг. за счет большого стока в залив уровень моря был примерно на 10 см меньше, чем в условиях регулирования стока через плотину. Месячные значения расхода воды в проливе Кара-Богаз-Гол приведены в табл. 6.10.

Таблица 6.10. Месячные значения расхода воды в проливе Кара-Богаз-Гол (км^3) за период с 1992 г. по июль 1999 г. [34]

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

Из таблицы видно, что расход воды в проливе имеет сезонный ход и связан с сезонным ходом уровня моря. Приведенные в таблице данные были использованы З.К. Абузяровым для получении зависимости:

$$Q_{КБГ} = 0{,}06667 H_{КБГ} - 4{,}6667, \qquad (6.14)$$

где $Q_{КБГ}$ – сток в залив; $H_{КБГ}$ – уровень моря по водпосту Кара-Богаз-Гол.

В связи с отсутствием оперативных данных об объеме стока в залив Кара-Богаз-Гол, оценка современного стока каспийской воды в залив Кара-Богаз-Гол осуществлялась на основе установленной эмпирической связи между расходом воды в проливе и уровнем моря на водпосту Кара-Богаз-Гол за период с января 1992 по июль 1999 года (рис. 6.6). Коэффициент корреляции этой связи составил 0,80.

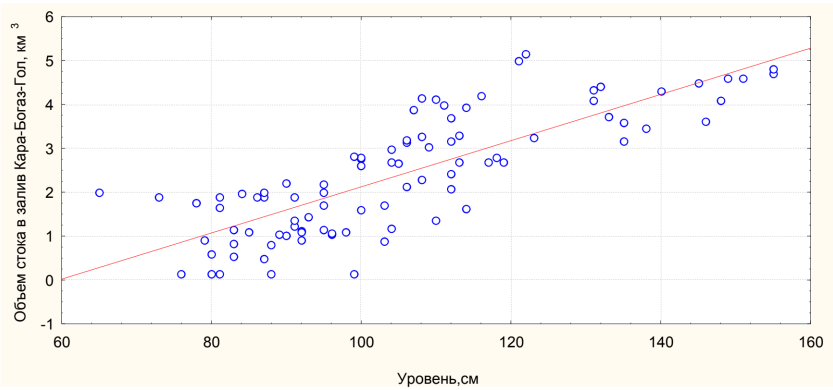


Рис. 6.6. Зависимость между уровнем моря и объемом стока воды в залив Кара-Богаз-Гол.

В ГГИ [15] для расчета стока воды из моря в залив Кара-Богаз-Гол была построена физико-статистическая модель, исходя из наблюденных данных в естественных условиях (до перекрытия), данных измерений расходов воды в проливе в 1996–2001 гг. (по материалам Д.А. Лаврова), а также следующих соображений:

– в результате размыва пролива его пропускная способность стала больше, чем в естественных условиях до сооружения плотины;

– отметка дна пролива составляет -30,6 м БС, при таком уровне моря сток в залив прекращается;

– при повышении уровня моря до отметки -26,8 м БС сток в залив плавно возрастает до величины 20 км^3/год;

– при дальнейшем повышении уровня рост стока резко замедляется, т. к. он ограничен испаряющей способностью залива. При отметке уровня -24,00 м БС площадь залива составляет 22,5 тыс. км^2. Учитывая,

что видимое испарение с поверхности залива составляет около 100 см, при такой отметке испаряющая способность залива составляет ~22 км^3/год. Эта величина была принята в качестве верхнего предела стока в залив.

Исходя из вышеизложенного была подобрана модель стока в залив Кара-Богаз-Гол в виде полинома 4-й степени в интервале уровня моря -30,6…-24,0 м БС (рис. 6.7).

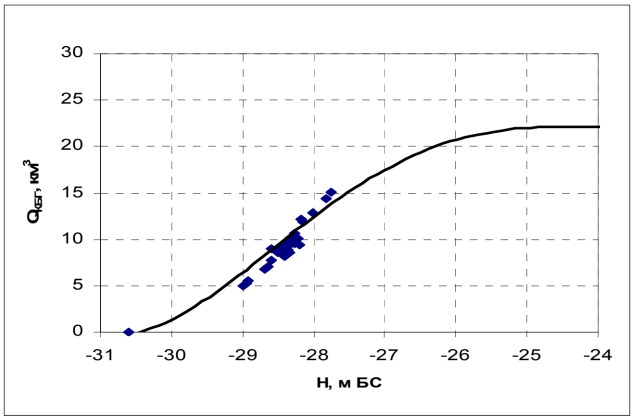


Рис. 6.7. Зависимость стока в залив Кара-Богаз-Гол от УКМ [15].

Как следует из рисунка, зависимость $Q_{КБГ} = f(H)$ носит ярко выраженный нелинейный характер, который, наряду с нелинейной зависимостью площади моря от его уровня, обусловливает и нелинейность уравнения водного баланса Каспия.

6.2.5. Подземный приток вод в море

Подземный приток вод в Каспийское море – наименее изученная составляющая водного баланса. По данным исследований [28, 61, 69], эта величина колеблется от 2 до 40 км^3/год. Имеется ряд признаков, указывающих на значительный сток подземных вод в море. Косвенно на это указывают расчеты невязки уровня между фактическими и рассчитанными по уравнению водного баланса. Коэффициент корреляции между годовым приращением уровня и годовым стоком Волги составляет 0,74; но при этом наблюдается значительный разброс приращений уровня при одном и том же стоке. Так для стока 300 км^3/год наблюдались следующие годовые приращения уровня -8, -2, +5, +18,

+32 см. При этом максимальная амплитуда годового видимого испарения не превышала 20 см. Следовательно, приведенный пример разброса приращений уровня нельзя объяснить только изменчивостью испарения и осадков.

Количественно оценить объем стока подземных вод суши в море очень трудно. В ряде работ, выполненных в 1960–1980-е гг., подземный сток в море рассчитывался по имеющимся гидрогеологическим данным каспийского побережья с использованием формулы Дарси. Все морское побережье разбивалось с учетом орографических, климатических, гидрогеологических и геологических условий на участки (от 15 до 19), по которым производился подсчет подземного стока. Каждый участок был выделен с учетом природных факторов, оказывающих влияние на формирование подземных вод.

Анализ выполненных работ по определению величины подземного стока в Каспий свидетельствует о том, что данные различных авторов отличаются друг от друга более чем в 160 раз (от 0,3 до 49,3 км^3/год). Основная причина этого – отсутствие достоверных гидрогеологических материалов, а также и ненадежность применяемых методов расчета. Однако большинство исследователей считает, что в море ежегодно поступает в среднем около 3–5 км^3/год подземных вод. Поэтому во многих случаях при расчетах водного баланса Каспийского моря объем подземного стока принимают постоянным и равным 4 км^3/год [61].

Необходимость проведения исследований по уточнению годовых и внутригодовых изменений подземного стока очевидна, так как использование в водобалансовых расчетах постоянного его значения снижает их точность и не отражает действительной роли подземного стока в формировании водного и солевого балансов Каспийского моря.

6.2.6. Плотностные изменения уровня моря

К числу составляющих водного баланса относятся также и изменения уровня моря, обусловленные изменчивостью объема моря вследствие колебаний плотности воды за счет изменения температуры и солености. Плотностные колебания уровня, как и сгонно-нагонные, влияют на сезонный ход уровня моря. Учет плотностных изменений уровня Каспийского моря представляется необходимым при расчетах водного баланса моря по среднемесячным данным, так как размах сезонного хода плотностных изменений уровня может достигать в отдельные годы 8–9 см.

Вследствие большой пространственно-временной изменчивости температуры и солености воды в Каспии происходят значительные

колебания плотности, которые приводят к изменению объема воды, а следовательно, и уровня моря. Сезонная изменчивость температуры воды и воздуха, а также солености морской воды обуславливают изменение плотности, а следовательно, и ее объема, что в свою очередь отражается на сезонном ходе УКМ. Весенне-летний прогрев обуславливает увеличение объема воды, а осенне-зимнее охлаждение вызывает его уменьшение. Изменения уровня за счет этих эффектов могут достигать 2–3 см в июне–июле и 0,5–1,0 см в другие месяцы [65]. В северной части моря из-за ее мелководности плотностные изменения очень малы.

Для определения плотностных изменений уровня Л.И. Галеркин [14] предложил следующую формулу:

$$H_\sigma = 0{,}1HV, \tag{6.15}$$

где H_σ – изменение уровня в столбе воды с единичным основанием за время t, см; H – толщина слоя воды, в котором рассчитываются плотностные изменения уровня, м; V – изменение условного удельного объема за время t.

Роль плотностных изменений уровня в его общих колебаниях оценивалась по-разному, и лишь немногие авторы учитывали эти изменения при расчетах водного баланса [67]. Наибольшие плотностные приращения уровня в Среднем и Южном Каспии достигают 3 см в месяц (с мая по июль), а в Северном Каспии не превышают 1 см. В зависимости от температуры воды значения плотностных изменений уровня могут меняться в Среднем Каспии до 3,5 см в месяц, а в Южном Каспии до 4,8 см в месяц. В отдельные годы размах сезонного хода плотностных изменений уровня достигают 8–9 см в месяц. В результате в теплый период года плотностные изменения уровня могут уменьшать на несколько см наклон уровенной поверхности вдоль меридиональной оси Каспия, который формируется стоком рек в Северный Каспий и другими составляющими водного баланса. В [67] были получены следующие величины изменения уровня (в мм) за счет изменения плотности: в январе -7, феврале -4, марте 0, апреле +3, мае +11, июне +19, июле +21, августе +11, сентябре -9, октябре -13, ноябре -20, декабре -12 мм.

В отдельные годы в зависимости от интенсивности прогрева и охлаждения вод в разных районах моря значения плотностных изменений уровня могут меняться. Как показали исследования [38], плотностные изменения уровня в основном обусловлены изменениями температуры воды, так как изменения солености незначительны. Размах внутригодовых (сезонных) плотностных изменений уровня в южной части моря в теплый 1966 г. составил 8,6 см, нормальный 1967 г. – 8,4 см,

холодный 1969 г. – 6,7 см. В средней части моря в теплый год размах плотностных изменений уровня достигал 6–7 см, в холодный год их величина сократилась до 5 см, а на границе между средней и северной частью моря – до 3 см.

С увеличением глубины деятельного слоя до 200 м размах колебаний плотностных изменений уровня уменьшается, что объясняется особенностями годового хода температуры воды на различных глубинах. Особенно четко это проявляется в годы с аномальными температурными условиями.

6.2.7. Определение площади моря

Для определения площади моря при расчете водного баланса сначала использовались данные Д.М. Кудрицкого [33], впоследствии уточненные Р.В. Николаевой [47]. Данные о площади и объеме вод северной, средней и южной частей Каспийского моря приведены в табл. 6.11, а данные о площади всего моря вместе с Кара-Богаз-Голом и без него – в табл. 6.12.

Зависимость площади зеркала Каспийского моря от уровня весьма близка к линейной, по крайней мере в диапазоне современных колебаний уровня, и аппроксимируется линейным уравнением вида [1]

$$S = 375 + 1{,}4H\,, \qquad (6.16)$$

где S измеряется в тыс. км^2, а уровень моря H отсчитывается от отметки -28,00 м, принимаемой за нуль поста.

Таблица 6.11. Площадь и объем вод Каспийского моря при разных отметках уровня

Уровень моря, м БС	Площадь, тыс. км^2				Объем вод, км^3			
	Северн. Каспий	Сред. Каспий	Южный Каспий	Все море	Северн. Каспий	Сред. Каспий	Южный Каспий	Все море
-24,0	141,0	139,1	153,8	433,9	856	27170	51857	7988
-24,5	134,5	139,0	153,2	426,7	787	27100	51780	79667
-25,0	128,0	138,9	152,6	419,5	722	27031	51704	79457
-25,5	121,6	138,8	152,0	412,4	660	26962	51628	79250
-26,0	115,2	138,6	151,3	405,1	601	26892	51552	79045
-26,5	109,6	138,4	150,6	398,6	545	26823	51477	78845
-27,0	104,6	138,2	149,8	392,6	492	26754	51402	78648
-27,5	99,4	137,9	149,1	386,4	442	26685	51327	78454
-28,0	90,1	137,7	148,5	376,3	397	26439	51245	78081

Таблица 6.12. Площадь моря (км^2 ·10^3) в зависимости от положения среднего уровня моря

Уровень моря в м БС	Только Каспийское море	Вместе с Кара-Богаз-Голом
-24,0	439,9	452,6
-24,5	426,7	445,4
-25,0	419,5	438,2
-25,5	412,4	431,1
-26,0	405,1	423,8
-26,5	398,6	416,9
-27,0	392,6	410,6
-27,5	386,4	404,2
-28,0	376,3	393,8
-29,0	357,0	374,0
-30,0	345,1	345,1

6.3. Расчет составляющих водного баланса и их оценка

Для расчета водного баланса в ГОИНе [46, 49] использовалось уравнение:

$$\Delta H_{бал} = Q_{пов}/S + Q_{подз}/S + P - E - Q_{КГБ}/S \pm \Delta H_{\sigma}, \qquad (6.17)$$

где $\Delta H_{бал}$ – приращение уровня моря, обусловленное изменением составляющих водного баланса, см; $Q_{пов}$ – суммарный объем речного стока, поступающий в море, с учетом потерь воды на испарение в дельтах рек, км^3; S – площадь моря, км^2; $Q_{подз}$ – подземный приток в море, км^3; P – атмосферные осадки, см; E – испарение или конденсация, см; $Q_{КГБ}$ – объем стока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, км^3; ΔH_{σ} – плотностные изменения уровня моря, см. Средний уровень моря определялся по данным четырех ГМС: Баку, Махачкала, Форт-Шевченко и Красноводск (в настоящее время Туркменбаши). Для определения площади и объема вод моря при различных отметках уровня использовались морфометрические характеристики, полученные Р.В. Николаевой [47].

В табл. 6.13 приведены статистические характеристики составляющих водного баланса и морфометрических показателей Каспийского моря по характерным периодам XX –XXI столетий, а в табл. 6.14 средние многолетние значения составляющих водного баланса и морфометрических характеристик Каспийского моря по характерным периодам.

Таблица 6.13. Статистические характеристики составляющих водного баланса и морфометрических показателей Каспийского моря по характерным периодам XX–XXI столетий [49]

Периоды (годы)	Стат. значен.	Площадь тыс.км^2	Объём вод, тыс.км^3	Сток рек				Осадки	
				суммарный		в т. ч. Волги			
				км^3	см	км^3	см	км^3	см
1900-1929*	ср.	404,2	78,81	332,4	82,3	251,2	62,1	70,0	17,3
	макс.	408,9	78,96	459,8	115,2	368,4	115,2	87,2	21,7
	мин. 1929"	397,8 406,0	78,62 78,89	221,1	55,1	148,6	55,1	43,8	10,9
1930-1941*	ср.	394,4	78,54	268,6	68,1	200,4	50,8	72,1	18,3
	макс.	404,3	78,81	359,5	89,1	257,6	79,4	89,5	23,6
	мин. 1941"	379,3 379,3	78,12 78,12	218,7	55,7	171,4	64,1	57,7	14,4
1942-1977	ср.	369,0	77,96	275,3	74,5	234,6	63,6	70,9	19,3
	макс.	381,3	78,16	373,0	98,0	327,7	98,0	118,4	32,6
	мин. 1977"	356,2 356,2	77,70 77,70	200,0	55,5	163,3	57,5	45,0	12,2
В т. ч. 1942-1969	ср.	371,2	78,00	285,2	76,8	242,5	65,3	68,4	18,5
	макс.	381,3	78,16	373,0	98	327,7	98,0	118,4	32,6
	мин. 1969"	362,6 363,2	77,89 77,89	227,0	61,8	182,7	61,8	45,0	12,2
1970-1977	ср.	361,3	77,85	240,4	66,5	206,8	57,2	79,3	22,0
	макс.	366,5	77,94	301,0	82,1	266,2	82,1	96.4	26,6
	мин. 1977"	356,2 356,2	77,70 77,70	200,0	55,5	163,3	57,5	65,2	17,8
1978-1995	ср.	379,1	78,16	315,0	83,1	274,1	72,3	86,1	22,7
	макс.	397,3	78,62	383,0	97,5	340,7	96,8	106,0	27,6
	мин. 1995"	357,0 397,3	77,74 78,62	268,0	70,3	222,4	72,7	57,8	15,5
1996-2010	ср.	391,7	78,46	287,4	73,4	248,2	63,4	75,3	19,2
	макс.	394,6	78,54	334,8	84,8	294,8	75,2	119,7	30,3
	мин. 2010"	390,2 390,2	78,39 78,39	204,5	52,4	177,6	45,0	53.6	13,7

Таблица 6.13 (окончание)

Периоды (годы)	Испарение		Сток в залив КБГ		$\Delta Q_б$	$\Delta H_б$	$\Delta H_ф$	$\Delta H_н$
	км^3	см	км^3	см	км^3	см	см	см
1900-1929*	390,3	96,6	21,8	5,4	-5,8	-1,4	-1,2	-0,2
	466,9	114,8	29,7	7,3	110,4	27,6	30,5	8,5
	343,3	85,4	12,6	3,2	-180,0	-44,5	-29,5	15,0
1930-1941*	397,0	100,7	12,4	3,1	-64,6	-16,4	-15,6	-0,9
	413,8	106,3	21,1	5,2	41,9	10,4	10,0	2,3
	378,0	93,7	6,1	1,6	-119,0	-30,2	-31,5	-4,5
1942-1977	354,7	96,1	9,8	2,7	-14,5	-3,9	-3,3	-0,6
	444,7	116,8	15,1	4,0	105,3	29,4	17,0	18,5
	262,3	72,2	5,0	1,4	-116,0	-30,4	-30,0	-20,4
В т. ч. 1942-1969	360,7	97,1	10,5	2,8	-13,5	-3,6	-2,0	-1,6
	444.7	116.8	15,1	4,0	105,3	29,0	17,0	18,5
	262,3	72,2	7,9	2,2	-116,0	-30,4	-17,0	-20,4
1970-1977	333,8	92,3	7,5	2,1	-17,6	-4,9	-7,8	2,8
	357,7	99,3	9,6	2.6	7,7	2,1	10.5	12,0
	306,6	84,8	5,0	1,4	-75,9	-21,1	-30,0	-8,8
1978-1995	348,7	91,9	8,6	2,2	47,8	12,7	13,6	-0,9
	408,8	102,9	46,4	11,7	110,8	30,0	36,0	7,0
	310,2	84,0	0	0	-49,9	-13,0	-14,5	-10,3
1996-2010	378,3	96,6	19,3	4,9	-26,4	-3,3	-6,8	0,1
	425,1	107,7	29,1	7,4	84,4	14,0	21,5	14,.8
	316.3	81,1	15,3	3,9	-158,1	-29,6	-40,2	-16,7

Примечание:

***** данные составляющих водного баланса использованы из [26];

" морфометрические характеристики на конец периода; подземный сток с 1942 г. принят равным 4 км^3 по данным [61];

$\Delta Q_б$ – изменение объёма, рассчитанное воднобалансовым методом, км^3,

$\Delta H_б$ – то же, см слоя;

$\Delta H_ф$ – фактические изменения уровня моря, см слоя;

$\Delta H_н$ – невязка между $\Delta H_б$. и $\Delta H_ф$.

Таблица 6.14. Средние многолетние значения составляющих водного баланса и морфометрических характеристик Каспийского моря по характерным периодам XX – начало XXI столетий [49]

Период (годы)	$H_м$, м БС	$V_м$ тыс.км³	$S_м$ тыс. км²	$Q_{рек}$ км³/см	В т. ч. Q Волги км³/см	$P_м$ км³/ см
1900-1929*	-26,1	78,81	404,2	332,4 82,3	251,2 62,1	70,0 17,3
1930-1941*	-26,8	78,54	394,4	268,6 68,1	200,4 50,8	72,1 18,3
1942-1977	-28,3	77,96	369,0	275,3 74,5	234,6 63,6	70,9 19,3
1978-1995	-27,8	78,16	379,1	315,0 83,1	274,1 72,3	86,1 22,7
1996-2012	-27,1	78, 65	391,0	283,0 72,4	244,2 62,4	75,2 19,2

Период (годы)	$Q_п$ км³/см	$E_м$ км³/см	$Q_{КГБ}$ км³/см	$\Delta H_б$ км³/см	$\Delta H_ф$ см	$\Delta H_н$ см
1900-1929*	5,0 1,2	390,3 96,6	21,8 5,4	-5,8 -1,4	-1,2	-0,2
1930-1941*	5,0 1,3	397,0 100,7	12,4 3,1	-64,6 -16,4	-15,6	-0,8
1942-1977	4,0 1,1	354,7 96,1	9,8 2,7	-14,5 -3,9	-3,3	-0,6
1978-1995	4,0 1,0	348,7 91,9	8,6 2,2	47,8 12,7	13,6	-0,9
1996-2012	4,0 1,0	381,6 97,6	19,5 5,0	-38,0 -3,3	-10,0	0,3

Примечание: * данные по водному балансу использованы из работы [26];

$H_м$ *БС* – средний уровень моря, рассчитанный по 4 ГМС: Баку, Махачкала, Ф. Шевченко, Туркменбаши (в прошлом – Красноводск), м абс. в Балтийской системе высот;

$V_м$ – объем водных масс моря, тыс.км³; $S_м$ – площадь моря, тыс. км²;

$Q_{рек}$ – суммарный объем речного притока в море, км³/см слоя;

Q Волги – сток Волги, км³/см слоя;

$P_м$ – атмосферные осадки, выпадающие на поверхность моря, км³/см слоя;

$Q_п$ – подземный сток, км³/см слоя;

$E_м$ – испарение с морской поверхности, км³/см слоя; $Q_{КГБ}$ – объем стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол, км³/см слоя;

$\Delta H_б$ – объемные изменения уровня, рассчитанные методом водного баланса, км³/см слоя; $\Delta H_ф$ – фактические изменения уровня моря, см слоя;

$\Delta H_н$ – невязка между $\Delta H_б$ и $\Delta H_ф$.

Полученные результаты расчетов водного баланса Каспийского моря подтвердили водно-балансовые причины изменения режима водоема в разные периоды XX–XXI столетий. Так, наблюдавшееся в 1900–1929 гг. высокое и относительно стабильное положение уровня моря, обусловленное относительно равновесным соотношением составляющих водного баланса, сменилось периодом резкого дефицита водных ресурсов и катастрофическим падением уровня в 1930–1941 гг. Затем, в 1942–1977 гг., последовал период незначительного дефицита, обусловленный влиянием не только климатической изменчивости, но и хозяйственной деятельностью (заполнением водохранилищ и безвозвратными изъятиями речного стока). В условиях аномального развития циклонических процессов и увеличения увлажненности в пределах всего Атлантико-Европейского сектора Северного полушария, в т. ч. в пределах водосбора моря, предшествующий период сменился периодом резкого увеличения объема вод моря и интенсивного подъема уровня Каспия в 1978–1995 гг. В последующие годы (1996–2012 гг.) режим моря не оставался стабильным, наблюдалась тенденция к уменьшению его объема и снижению уровня моря (на 1 м).

Выполненные исследования показали водно-балансовую обусловленность колебаний уровня Каспийского моря в результате разномасштабной климатической изменчивости и антропогенного воздействия на гидрологический режим Каспийского моря и его бассейна. Непостоянство соотношений приходных и расходных составляющих водного баланса – главная причина колебаний уровня моря различной продолжительности и направленности. Как правило, значительные колебания уровня моря происходят в условиях аномального развития барико-циркуляционных процессов (циклонических или антициклонических), охватывающих значительные территории первого естественного синоптического района – Атлантико-Европейского сектора Северного полушария. Так, в 1930–1941 и 1970–1977 гг. в условиях аномального развития антициклонических процессов и установления в связи с этим крайне засушливых условий, происходило значительное падение уровня, соответственно, на 1,8 и 0,7 м. Преобладающее развитие циклонических процессов с 1978 по 1995 г. в Атлантико-Европейском секторе – основная причина увлажненности каспийского бассейна и интенсивного и продолжительного, в течение 18 лет, подъема уровня. В последние годы климатическое влияние на условия формирования и разномасштабную изменчивость элементов водного баланса Каспийского моря и их интегральной составляющей – уровня моря – происходит в условиях ежегодного возрастающего воздействия различных видов антропогенной деятельности на гидрологический режим бассейнов рек Каспийского моря.

Сравнение современных тектонических движений земной коры на побережье Каспия с характеристиками, полученными за историческое прошлое, свидетельствует о том, что влияние тектоники на колебания уровня существенно меньше климатического и антропогенного воздействия. Современные разнонаправленные вертикальные смещения дна и берегов в различных частях морского побережья и на островах Каспийского моря в большинстве случаев не превышают ±2,5–11 мм/год. Эти оценки различных авторов в основном совпадают и свидетельствуют о незначительной изменчивости высотного положения нулей футштоков ГМС Махачкала, Форт-Шевченко, Куули-Маяк и Туркменбаши (Красноводск) и о более выраженном опускании нуля Бакинского футштока, продлившегося до 1978 г., после чего направление вертикальных смещений поменяло свой знак. За период с 1830 по 1977 г. вертикальное смещение отметки нуля Бакинского футштока, вызванное тектоническими процессами, составило около -50 см, в то время как общее снижение уровня моря за это время произошло на 3,2 м [51].

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что колебания УКМ обусловлены сочетанием климатических и антропогенных факторов. Тектоническое влияние на колебания уровня мало. Наиболее трудным и нерешенным остается вопрос о возможных тенденциях изменения уровня моря и продолжительности сохранения его современного положения. Это объясняется сложностью определения естественных изменений климата на ближайшие десятилетия, играющих основную роль в режиме уровня моря.

6.4. Источники неопределенностей при расчете составляющих водного баланса и уровня моря

Несмотря на то, что метод водобалансовых расчетов является наиболее физически обоснованным, на пути его практического применения возникают серьезные трудности, связанные прежде всего с отсутствием регулярных наблюдений в открытом море. Например, такие элементы водного баланса, как испарение и осадки, над открытым морем рассчитываются приближенно, в основном по данным береговых и островных станций.

Точность расчета составляющих водного баланса, а следовательно, и точность расчета и прогноза УКМ, во многом определяется достоверностью наблюдений за гидрометеорологическими элементами и площадью моря, на данных которых основывается расчет. К сожалению, данные наблюдений не всегда соответствуют необходимым

требованиям. Вместе с тем метод водного баланса позволяет контролировать качество исходных данных и понять, как уровень моря реагирует на изменения влияющих на него гидрометеорологических факторов. Кроме того, метод водного баланса может быть использован для выполнения ретроспективных расчетов испарения при известных значениях стока рек и уровня моря и для оценки стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол.

Сток в залив Кара-Богаз-Гол нестабилен и зависит от нескольких факторов: положения среднего уровня моря, скорости течений в проливе, которая в свою очередь зависит от разности уровней моря и залива, глубины и уклона дна в проливе. При высоком стоянии уровня в море разность уровней увеличивается, и сток в залив достигает 25 км^3/год. Так, при понижении уровня моря разность уровней «море-залив» к 1945 г. увеличилась до 2 м, а к 1957 г. почти до 4 м. Колебания уровня приводят к изменениям морфометрических характеристик пролива и, как следствие, к изменениям величины стока морской воды в залив. Таким образом, однозначной связи между высотой стояния уровня моря и стоком в залив не обнаруживается.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что даже в отношении многолетних норм основных составляющих водного баланса моря (поверхностного стока и видимого испарения) имеются значительные расхождения. Если же проанализировать данные расчетов за отдельные годы, то различия в оценках величин еще более ощутимы. Основная причина этого лежит, на наш взгляд, в различных подходах и качестве используемых материалов, а также в недостаточной надежности методов расчета водного баланса и применяемых для этого формул.

Глава 7.
МЕТОДЫ ПРОГНОЗОВ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ГОДОВОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ

7.1. Метод прогноза годового хода УКМ на основе приближенного решения уравнения водного баланса (метод Гидрометцентра России)

Возможность прогноза уровня Каспийского моря на год на основе приближенного расчета водного баланса впервые показал Г.П. Калинин в 1940-х гг. [15]. В основу метода прогноза были положены исследования водного баланса Каспийского моря, выполненные Б.Д. Зайковым. Анализируя водный баланс, Калинин пришел к выводу, что колебания УКМ определяются главным образом изменениями притока речных вод (прежде всего Волги) в весенний период. Ему удалось получить достаточно тесную связь между весенне-летним повышением уровня моря и количеством атмосферных осадков с сентября по март, а также температурой воздуха осенью (с сентября по ноябрь) и весной (март) в бассейне Волги. Характеристики осадков и температуры определяют объем весеннего половодья Волги, который играет главную роль в приходной части водного баланса моря. Полученная связь была положена в основу разработанной им методики прогноза уровня моря с годовой заблаговременностью. Этот подход получил дальнейшее развитие в [6–8, 16].

Прогнозы колебаний УКМ по методу Калинина выпускались в оперативном режиме для пункта Баку и были достаточно успешными. В 1966 г. К.И. Смирнова [35] методику Калинина распространила на пункты Махачкала, Красноводск и Форт-Шевченко.

Строительство водохранилищ на основных реках, впадающих в Каспийское море, нарушили естественный режим притока речных вод в море. Максимальные расходы воды стали зависеть не столько от водности рек, сколько от величины изъятия речных вод на хозяйственные

нужды [33, 34]. В этих условиях применение метода Калинина, рассчитанного на естественный режим стока, стало невозможным. Поэтому в 1966–1967 гг. Г.П. Калинин совместно с К.И. Смирновой и О.И. Шереметевской [17, 36] разработали метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря (метод КСШ) с учетом зарегулированности стока рек, основанный на приближенном решении уравнения водного баланса Каспийского моря.

Авторами были разработаны приемы учета составляющих водного баланса по имеющимся данным, исследована изменчивость и обеспеченность отдельных составляющих водного баланса и предложена расчетная схема оперативного прогноза годового хода и среднего годового уровня Каспийского моря. Прогноз составлялся в апреле на период с мая по декабрь текущего года и на I квартал следующего года и в виде гидрометеорологического бюллетеня доводился до потребителей.

Уравнение водного баланса Каспийского моря записывается в терминах приращений уровня моря (см. раздел 6.2)

$$\Delta H_t = \frac{Q_{пов}}{S} + \frac{Q_{подз.}}{S} - \frac{Q_{КБГ}}{S} + P - E \pm \Delta H_\sigma , \qquad (7.1)$$

где ΔH_t – приращение уровня моря, обусловленное изменением составляющих водного баланса за конкретный промежуток времени.

Полагая

$$\frac{Q_{пов}}{S} = (Q_{Волга} + Q_{Кура} + Q_{Урал} + Q_{Терек} + Q_{Сулак} + Q_{Самур} + Q_{иран.реки})/S = \sum \Delta H_{сток} , \qquad (7.2)$$

$$P - E - Q_{КБГ}/S + Q_{подз}/S \pm \Delta H_\sigma = \sum \Delta H' , \qquad (7.3)$$

уравнение (7.1) можно записать в виде

$$\Delta H_t = \sum \Delta H_{сток} + \sum \Delta H' , \qquad (7.4)$$

где $\sum \Delta H_{сток}$ – величина суммарного поверхностного притока речных вод; $\sum \Delta H'$ – остаточный член правой части, который ежегодно рассчитывается по величине фактического приращения уровня и сумме стоковых приращений.

Ввиду сравнительно малой изменчивости от года к году величины $\sum \Delta H'$ по сравнению с изменчивостью $\sum \Delta H_{сток}$, ее месячные значения в практических расчетах принимаются средними многолетними.

Прогноз годового хода среднего уровня по методу КСШ составляется по следующей схеме.

1. По данным планируемых сбросов ГЭС на реках Волга и Кура и прогнозов объема стока рек Урал, Терек, Аракс, Сулака и Самур с учетом среднего многолетнего стока иранских рек вычисляется объем поверхностного стока рек в море в км^3 с апреля по декабрь. Внутригодовое распределение стока принимается средним многолетним и определяется по табл. 7.1

Таблица 7.1. Внутригодовое распределение суммарного стока рек в Каспийское море

Месяц	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**
Сток, %	7,0	6,5	7,0	8,5	23	10,5	6,5	6,5	6,0	6,0	6,0	6,5

2. По суммарному объему притока поверхностных вод, отнесенному к площади моря, определяются стоковые приращения уровня ($\sum \Delta H_{сток}$).

3. Рассчитываются составляющие водного баланса за предшествующий год, по величине фактических приращений среднего уровня от месяца к месяцу и фактическим месячным значениям стока в прошедшем году определяются месячные значения приращения уровня за счет осадков, испарения, подземного притока, стока в залив Кара-Богаз-Гол и плотностных изменений ($\sum \Delta H'$).

5. По сумме стоковых приращений уровня за предшествующий месяц и норме $\sum \Delta H'$ по уравнению (7.4) вычисляются приращения уровня моря от месяца к месяцу за период с апреля текущего по март следующего года.

6. Для каждого из семи базовых пунктов (Махачкала, Баку, о. Жилой, Форт-Шевченко, Кара-Богаз-Гол, Куули-Маяк и Туркменбаши) по наблюденным значениям приращения уровня моря от месяца к месяцу и трансформированным стоковым приращениям пересчитывается остаточный член $\sum \Delta H'$ с учетом данных прошедшего года.

7. За начало отсчета принимается средний фактический уровень в апреле (H_0). Зная H_0 и приращения уровня от месяца к месяцу ΔH, определяются средние месячные значения уровня по формуле $H_i = H_{i-1} + \Delta H$.

8. По фактическому уровню с января по апрель и предвычисленным величинам уровня с мая по декабрь рассчитывается прогнозируемый средний уровень моря текущего года.

9. В июле или августе после корректировки графика режима работы ГЭС и уточнения прогноза водности рек, впадающих в Каспийское море, прогноз хода уровня на вторую половину текущего года при необходимости пересчитывается, при этом вся схема расчета сохраняется.

По этому методу с 1967 г. ежегодно весной выпускался официальный прогноз помесячного хода уровня с мая текущего года по апрель будущего года. Средняя оправдываемость прогнозов УКМ составила 88 %. Прогноз публиковался в бюллетене Гидрометцентра России вместе с обзором состояния уровня и водного баланса за прошлый год и рассылался потребителям. Выходными параметрами прогноза являлись помесячный ход уровня и средний годовой уровень моря по семи базовым пунктам, указанным выше, а также средний уровень моря, вычисленный как среднее арифметическое из значений уровня по семи пунктам.

В процессе многолетнего оперативного использования метода КСШ он неоднократно уточнялся. Так, было обнаружено систематическое занижение прогнозируемых величин уровня по сравнению с фактическими величинами. Авторы методики отнесли это за счет неучтенного приращения уровня моря в процессе трансформации весенней паводочной волжской воды по мере распространения к югу. В [35, 36] на основе совместного анализа стоковых приращений уровня $\Delta H_{сток}$ и фактических изменений уровня моря $\Delta H_{ф}$ было показано, что время добегания волжской воды неодинаково для разных районов моря. Для пунктов, расположенных ближе к устью Волги (Махачкала и Форт-Шевченко), оно, по предварительным данным, составляет около одного месяца, а для пунктов, значительно удаленных от устья Волги (Баку, о. Жилой, Туркменбаши, Куули-Маяк, Кара-Богаз-Гол), – около двух месяцев. Учитывая это обстоятельство, для корректировки прогноза уровня с 1987 г. в прогноз стали вводить поправку, учитывающую приращение уровня моря за счет трансформации весенней паводочной волжской волны. Эта поправка для пунктов Махачкала и Форт-Шевченко рассчитывалась по формуле

$$\Delta H_{сток} = (\Delta H^{i-1}_{сток} + 2\Delta H^{i}_{сток} + \Delta H^{i+1}_{сток}) / 4 ; \qquad (7.5)$$

а для пунктов Баку, о. Жилой, Куули-Маяк, Кара-Богаз-Гол и Туркменбаши по формуле

$$\Delta H_{сток} = (2\Delta H^{i-1}_{сток} + \Delta H^{i}_{сток} + \Delta H^{i+1}_{сток})/4 . \qquad (7.6)$$

Введение в расчеты поправки на трансформацию паводочной волны улучшило точность прогноза.

Возможные источники ошибок прогноза по методу КСШ

Возникающие ошибки в прогнозах имеют различные источники. Один из главных источников состоит в расхождении межу плановыми и фактическими объемами сброса воды из Волгоградского водохранилища в нижний бьеф Волгоградской ГЭС во время весеннего половодья, хотя эта величина, по сути, является основным фактором, определяющим качество прогноза (табл. 7.2).

Таблица 7.2. Планируемые ($Q_{пл}$) и фактические ($Q_{ф}$) объемы сброса воды из Волгоградского водохранилища (км^3) во II квартале 1980–2006 гг.

Год	**1980**	**1981**	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**
$Q_{пл}$	80-82 (81*)	105	77-80 (78*)	85	65	105	105	90	92
$Q_{ф}$	82	128	77	90	71	117	121	108	125
$Q_{ф} - Q_{пл}$	+1	+23	-1	+5	+6	+12	+16	+18	+33
Год	**1989**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
$Q_{пл}$	98	145	140	110	110	140	125	70	80
$Q_{ф}$	113	180	181	134	141	164	155	62	115
$Q_{ф} - Q_{пл}$	+5	+25	+41	+24	+31	+24	+30	+8	+35
Год	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**
$Q_{пл}$	110-130 (120)	125-145 (135*)	90-120 (105*)	115-125 (120*)	105-130 (115*)	120-140 (130*)	100-120 (110*)	125-144 (135*)	85
$Q_{ф}$	140	127	109	134	123	103	106	136	77
$Q_{ф} - Q_{пл}$	+20	-8	+4	+14	+8	-27	-4	+1	-8

Примечание: * принятые значения при составлении прогноза.

Из табл. 7.2 видно, что в 22 случаях из 27 фактические сбросы превышали плановые; среднее превышение фактических сбросов над плановыми составило 12,4 км^3. Максимальное превышение было в 1991 и 1997 гг. – 41 и 35 км^3 соответственно, а минимальное – в 1980 и 2005 гг. (1 км^3). В 1999, 2003, 2004 и 2006 гг. фактические сбросы были меньше плановых сбросов на 8, 27, 4 и 8 км^3 соответственно (рис. 7.1).

Из рисунка видно, что с 1985 по 1998 г. фактические сбросы воды превышали плановые. В предшествующие и последующие этому периоду годы фактические и плановые сбросы были достаточно близки друг к другу.

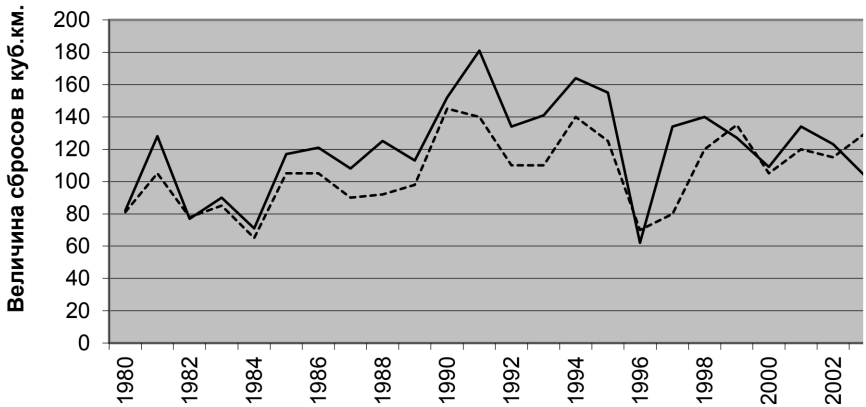


Рис. 7.1. Ход фактических (сплошная линия) и плановых (пунктирная линия) сбросов воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС (1980–2006 гг.).

Внутригодовое распределение величин стокового приращения уровня показывает, что профиль современного половодья формируется искусственными попусками. Хотя наибольший объем стока наблюдается с апреля по июнь, максимум четко выделяется только в мае. Колебания суммарного поверхностного стока вод в Каспийское море в апреле-июне играют решающую роль в величине весенне-летнего подъема уровня. Поэтому успешность прогноза уровня моря в значительной степени зависит от соблюдения планового графика попусков воды Волгоградского гидроузла.

Другой возможный источник ошибок прогноза связан с недостаточно точным учетом объемов речной воды, непосредственно поступающей в Каспий, при этом ошибки могут достигать 50 %. Дело в том, что часть стока теряется в процессе испарения и инфильтрации на участках от ГЭС до моря. Эти потери оцениваются приближенно из-за слабой изученности этого процесса и отсутствия необходимых данных наблюдений. В связи с изменением значений приращений среднего уровня моря от месяца к месяцу и стоковых приращений уровня между периодом продолжительного падения уровня и продолжительного подъема, изменились и средние значения суммы приращения за счет испарения, осадков и стока в залив Кара-Богаз-Гол, подземного стока и плотностных изменений. Повышение уровня моря в течение 1978–1995 гг. обусловило увеличение объема воды и привело к увеличению площади водной поверхности и изменению конфигурации береговой линии.

Третий источник ошибок прогноза связан с определением остаточного члена уравнения водного баланса (правая часть уравнения (7.3)). Эта величина определяется по среднемноголетним значениям гидрометеорологических характеристик и существенно зависит от периода осреднения. В табл. 7.3 показано, насколько существенно меняются средние статистические значения остаточного члена уравнения водного баланса за различные периоды, рассчитанные как средние значения по семи базовым пунктам.

Таблица 7.3. Средние многолетние месячные значения остаточного члена за различные периоды, мм

Период осреднения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1925–2006	-24	-22	-22	-30	-52	-85	-116	-133	-120	-86	-51	-35
1925–1964	-46	-31	-15	-2	-1	-89	-95	-123	-155	-124	-70	-58
1978–1988	-47	-48	-26	8	-6	-31	-82	-118	-129	-126	-63	-54
1978–2006	-34	-28	-25	-34	-53	-81	-108	-127	-126	-98	-65	-44
1980–1985	-52	-37	-31	5	3	-34	-82	-120	-115	-120	-62	-55
1940–1970	-32	-34	-21	-24	-40	-77	-90	-116	-126	-94	-68	-49
Среднее	-43	-37	-27	-16	-28	-68	-97	-124	-132	-113	-69	-54

Дополнительные ошибки возможны за счет недостаточно точного учета стока в залив Кара-Богаз-Гол и притока подземных вод. Следует отметить, что возможные неучтенные факторы имеют разнонаправленные знаки, которые в значительной степени компенсируются, приводя ошибки к минимальным значениям.

7.1.1. Алгоритм усовершенствованного метода Калинина – Смирновой – Шереметевской

В силу эмпирической природы метод КСШ неоднократно уточнялся. Последнее уточнение было выполнено в 1985 г. С тех пор произошли существенные изменения в гидрометеорологическом режиме моря. Изменились статистические характеристики составляющих водного баланса, месячных и годовых отклонений уровня от их средних многолетних значений для семи базовых пунктов, используемые при составлении прогноза. В связи с этим назрела необходимость очередного уточнения метода прогноза. Поэтому в 2009 г. метод КСШ был существенно модифицирован в плане упрощения процедуры расчетов

и уточнения некоторых исходных положений и полностью автоматизирован. Были пересчитаны с учетом данных последних лет средние многолетние значения составляющих водного баланса и допустимые погрешности по месяцам для семи базовых пунктов [1–3].

Были выполнены следующие усовершенствования существующего метода прогноза:

– уточнены статистические характеристики составляющих водного баланса и уровня моря, с учетом накопленных данных наблюдений за последние 30 лет;

– уточнены допустимые погрешности прогнозов уровня моря;

– предложена новая упрощенная схема составления прогноза уровня моря без учета приращения уровня в отдельных пунктах, обусловленного влиянием трансформации паводочной волжской воды;

– исключена поправка на приращение уровня за счет трансформации волжских паводочных вод.

По методу КСШ сначала рассчитывается уровень моря для каждого из семи базовых пунктов при одном и том же объеме стока рек, а затем путем арифметического осреднения получается средний уровень по морю. По усовершенствованной схеме сначала рассчитывается средний уровень моря, а затем, используя заранее рассчитанную таблицу средних многолетних отклонений уровня моря в отдельных пунктах от среднего уровня моря, определяется среднемесячный уровень моря в каждом отдельном пункте. В связи с уточнением метода КСШ были использованы следующие исходные материалы:

– средние месячные и средние годовые данные наблюдений за уровнем моря, температурой воды и воздуха, осадками по 12 прибрежным и островным станциям (Махачкала, Баку, Нефтяные камни, Сумгаит, о. Жилой, Ленкорань, Актау, о. Тюлений, Туркменбаши, Куули-Маяк, Кара-Богаз-Гол, Форт-Шевченко) за весь период наблюдений;

– средние месячные данные о расходах воды по замыкающим створам Волги, Куры, Урала, Терека, Самура и Сулака;

– данные о сбросах воды Волгоградской ГЭС и данные о водности основных рек, впадающих в Каспийское море.

По этим данным были сформированы многолетние ряды гидрометеорологических данных и рассчитаны их статистические характеристики (средние, среднеквадратические отклонения, тренды и др.) и основные составляющие водного баланса моря:

– поверхностный приток речной воды в море с учетом потерь воды в дельте Волги;

– испарение,

– осадки, объем стока морских вод в залив Кара-Богаз-Гол.

Для удобства расчетов все данные были сформированы в виде специализированного архива на персональном компьютере (ПК). Архив

содержит помесячные многолетние данные и статистические сведения об осадках, температуре воды, температуре воздуха, уровне моря по прибрежным и островным гидрометеорологическим станциям и постам, а также данные о суммарном многолетнем помесячном стоке рек, впадающих в Каспий, осадках и испарении. Статистика основных гидрометеорологических величин, использованных в работе представлена в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Статистика рядов значений уровня моря, температуры воды, температуры воздуха и осадков по 7 базовым пунктам Каспийского моря

Пункты	Статистич. характе-ристики	Гидрометеорологические элементы			
		Уровень, см	Температура воды, °С	Температура воздуха, °С	Осадки, мм
Баку	период	1890–2006	1960–2006	1966–2006	1960–2006
	миним.	-92	14,1	13,5	96
	максим.	225	17,7	17,4	365
	среднее	81	15,8	15,0	223
о. Жилой	период	1924–2006	1960–2006	1966–2006	1965–2006
	миним.	-104	13,6	13,3	38
	максим.	212	16,8	16,2	294
	среднее	35	14,8	14,6	161
Махачкала	период	1900–2006	1960–2006	1968–2006	1925–2006
	миним.	-102	11,5	9,7	217
	максим.	245	14,0	13,6	641
	среднее	75	12,7	12,2	364
Форт-Шевченко	период	1921–2006	1960–2006	1965–2006	1960–2006
	миним.	-97	10,6	10,6	71
	максим.	216	13,3	13,9	316
	среднее	43	11,6	12,2	144
Туркменбаши	период	1915–2006	1960–2006	1960–2006	1960–2006
	миним.	-113	13,9	15,1	66
	максим.	220	16,4	17,7	231
	среднее	43	15,3	16,4	147
Куули-Маяк	период	1900–2006	1960–2006	1960–2006	1970–2006
	миним.	-97	12,8	12,8	53
	максим.	243	16,1	15,8	227
	среднее	69	14,2	14,2	137
Кара-Богаз-Гол	период	1921–2006	1960–2006	1960–2006	1978–2006
	миним.	-114	12,2	12,8	57
	максим.	200	14,8	15,4	231
	среднее	31	13,3	14,2	119

Ниже описывается алгоритм усовершенствованного метода прогноза годового хода УКМ в отдельных пунктах моря с учетом планируемых объемов сброса воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС во II квартале года и стока других рек, впадающих в море. Прогноз составляется для семи базовых пунктов; средние месячные и средние годовые значения уровня моря определяются путем осреднения результатов расчета по всем пунктам.

В конце апреля текущего года Гидрометцентр России располагает средними месячными данными наблюдений над уровнем моря за период с января по апрель и данными о стоке рек, впадающих в Каспийское море, за этот же период.

Сток рек за текущий год (с января по декабрь) Q_{I-XII} рассчитывается в зависимости от сброса воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС за I и II кварталы Q_{I-VI} по формуле [17]:

$$Q_{I-XII} = 1{,}227 \cdot Q_{I-VI} + 62 . \qquad (7.7)$$

При этом на апрель приходится в среднем 21 % от объема сброса воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС во II квартале, на май 48 %, на июнь 31 %. Суммарный сток рек за III и IV кварталы $Q_{VII-XII}$ определяется как разность между величинами Q_{I-XII} и Q_{I-VI}:

$$Q_{VII-XII} = Q_{I-XII} - Q_{I-VI} . \qquad (7.8)$$

Среднее распределение объемов стока по месяцам в III и IV кварталах (в % от $Q_{VII-XII}$) определяется по табл. 7.5 [17].

Таблица 7.5. Среднее распределение объемов стока по месяцам

Месяцы	VII	VIII	IX	X	XI	XII
%	20	17	16	16	16	15

Для каждого месяца текущего года находится величина суммарного поверхностного стока $Q_{пов}$ (км^3):

$$Q_{пов} = Q_{сб} + Q_р , \qquad (7.9)$$

где $Q_{сб}$ – объем сброса воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС (км^3); $Q_р$ – объем стока остальных рек, впадающих в Каспийское море (км^3).

Средняя площадь моря S (км^2) определяется в зависимости от среднего уровня моря $\overline{H}$:

$$S = (0{,}151138\overline{H} + 375{,}034) \cdot 10^3 . \qquad (7.10)$$

Для периода январь-март текущего года используются фактические значения $\overline{H}$, а для последующих месяцев (апрель-декабрь) измененная площадь моря вычисляется с помощью коэффициентов S_i / S_{III} (табл. 7.6) [17].

Таблица 7.6. Коэффициенты для расчета площади моря

Месяцы	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**
S_i / S_{III}	1,000	1,008	1,008	1,012	1,014	1,011	1,007	1,004	1,003	1,003

Стоковые приращения уровня моря $\Delta H_{ст}$ (мм) вычисляются по формуле

$$\Delta H_{ст} = Q_{пов} / S , \tag{7.11}$$

где $Q_{пов}$ – объем суммарного поверхностного стока.

Сумма приращений за счет испарения, осадков, стока в залив Кара-Богаз-Гол, подземного притока воды и сезонных плотностных изменений уровня (правая часть уравнения водного баланса моря) в первом приближении может быть принята равной средней многолетней величине $\Delta H'$. Если принять, что

$$\Delta H' = Q_{подз} / S - Q_{КБГ} / S + P - E \pm \Delta H_{\sigma} , \tag{7.12}$$

то изменение уровня моря во времени ΔH_t можно рассчитать по формуле

$$\Delta H_t = \sum \Delta H_{ст} + \sum \Delta H' , \tag{7.13}$$

где ΔH_t – изменение среднего уровня моря от месяца к месяцу; $\Delta H_{ст}$ – изменение среднего уровня моря за счет стока рек.

Распределение суммы приращений за счет испарения, осадков, стока в залив Кара-Богаз-Гол, подземного притока воды и сезонных плотностных изменений уровня по месяцам и по семи пунктам представлено в табл. 7.7.

Для получения значений $\Delta H'$, приведенных в табл. 7.7, были использованы данные наблюдений за уровнем моря за период с 1925 по 2008 г. Следует отметить, что в данной работе используются значения уровня моря в см по отношению к единому нулю Каспийского моря, равному -28,00 м БС.

На заключительном этапе оперативных расчетов с помощью уравнения (7.13) и данных табл. 7.7 определяются средние месячные

и средние годовые значения уровня по каждому из семи пунктов в текущем году и в январе-апреле следующего года.

Таблица 7.7. Средние многолетние значения правой части уравнения водного баланса Каспийского моря для семи базовых пунктов (мм)

Пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Баку	-42	-28	-27	16	-35	-48	-112	-129	-146	-114	-72	-46
о. Жилой	-42	-40	-30	-30	-32	-45	-104	-116	-143	-120	-69	-46
Махачкала	-48	-29	-6	-20	-33	-47	-88	-101	-98	-95	-56	-39
Форт-Шевченко	-47	-34	-24	-21	-32	-64	-103	-122	-111	-92	-65	-38
Куули-Маяк	-52	-43	-26	-16	-42	-50	-86	-98	-136	-125	-67	-50
Туркменбаши	-46	-35	-26	-23	-42	-61	-96	-120	-153	-124	-64	-49
Кара-Богаз-Гол	-38	-39	-18	-16	-44	-50	-73	-116	-134	-119	-68	-49
Среднее	-45	-35	-22	-20	-37	-52	-95	-115	-132	-113	-66	-45

По фактическим значениям уровня с января по апрель и предвычисленным величинам уровня с мая по декабрь текущего года рассчитывается ожидаемый ход среднего месячного уровня текущего года и определяется ожидаемое среднее годовое значение уровня Каспийского моря.

Рассчитывается также ход средних месячных значений уровня по каждому пункту для периода январь-апрель следующего года. Усовершенствованный метод прогноза уровня моря существенно проще старого и не уступает ему по точности.

В конце каждого месяца рассматриваемого периода (с мая текущего года по апрель следующего года) оценивается оправдываемость прогнозов путем сопоставления предвычисленных величин уровня с фактическими данными.

Допустимая ошибка для каждого месяца определяется по среднему квадратическому отклонению σ изменений уровня за период заблаговременности прогноза (табл. 7.8).

Допустимые погрешности прогнозов ежемесячных уровней моря в зависимости от их заблаговременности изменяются в пределах от 11 до 20 см. Допустимые погрешности в соответствии с [30] составляют: при заблаговременности до 2 месяцев $0{,}67\sigma$, при заблаговременности от 2 до 6 месяцев $0{,}8\sigma$, при заблаговременности более 6 месяцев σ.

Таблица 7.8. Уточненные допустимые погрешности (см) по месяцам для семи базовых пунктов

Пункт	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV
Баку	11	11	14	14	14	13	16	16	16	17	16	16
о. Жилой	11	11	13	14	14	14	19	18	17	16	16	16
Махачкала	11	11	13	13	14	15	18	18	18	17	17	16
Форт-Шевченко	11	11	13	13	13	14	16	17	16	16	17	16
Куули-Маяк	11	11	13	16	15	13	20	19	0	20	14	15
Туркменбаши	11	11	13	14	14	14	17	16	15	20	18	16
Кара-Богаз-Гол	11	11	14	14	14	14	17	17	17	17	15	16
Средняя	11	11	13	14	14	14	18	17	17	18	16	16

7.1.2. Результаты прогнозов уровня моря по усовершенствованной методике Калинина – Смирновой – Шереметевской

За период с 1992 по 2005 г. было составлено 1008 прогнозов среднемесячных значений уровня в отдельных пунктах и средних по морю [37]. Средняя оправдываемость этих прогнозов составила 90 % (табл. 7.9). Помесячный ход средней оправдываемости УКМ по усовершенствованному методу и методу КСШ показан на рис. 7.2.

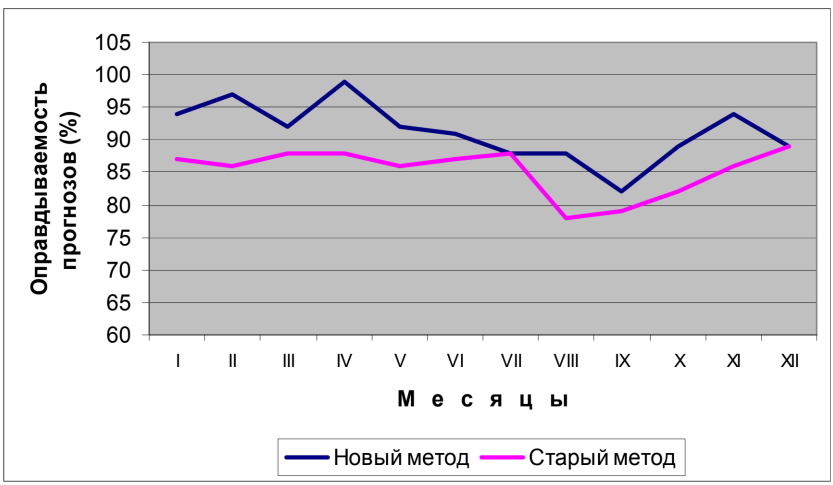


Рис. 7.2. Помесячный ход средней оправдываемости УКМ по усовершенствованному (новому) методу и методу КСШ (старый метод).

Таблица 7.9. Помесячная и среднегодовая оправдываемость (%) прогнозов уровня моря по усовершенствованному (новому) методу и методу КСШ (старому) за период с 1992 по 2005 г.

Год	Метод	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред. год.
1992	новый	86	100	100	100	86	86	71	71	86	86	100	86	88
	старый	100	88	88	75	100	88	88	86	88	75	100	100	90
1993	новый	86	100	100	100	100	86	100	100	100	100	86	86	95
	старый	100	100	100	88	88	88	75	100	88	85	85	100	91
1994	новый	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	старый	100	75	100	86	100	100	100	57	75	71	86	88	87
1995	новый	100	100	100	100	100	100	100	100	86	86	86	71	94
	старый	88	75	88	88	88	88	100	100	75	88	88	88	88
1996	новый	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	старый	62	62	62	100	75	75	75	75	88	100	88	86	79
1997	новый	86	100	57	100	100	100	86	100	71	100	100	100	92
	старый	88	88	88	75	75	80	83	71	86	71	75	88	81
1998	новый	100	100	100	100	100	86	71	43	57	57	71	43	77
	старый	88	86	100	100	100	63	62	50	50	62	71	88	77
1999	новый	57	57	57	86	86	71	43	71	43	71	86	100	69
	старый	62	75	75	75	88	88	75	75	62	86	75	88	76
2000	новый	100	100	71	100	86	100	100	100	86	100	100	100	95
	старый	100	75	75	75	88	100	100	100	100	100	100	100	93
2001	новый	100	100	100	100	86	86	100	100	86	71	100	100	93
	старый	100	100	100	100	100	87	100	75	62	38	50	71	82
2002	новый	100	100	100	100	88	100	88	88	88	100	100	100	98
	старый	71	100	88	100	88	100	88	88	88	100	100	100	93
2003	новый	100	100	100	100	86	100	100	100	100	100	100	100	99
	старый	100	88	88	88	88	88	88	75	88	100	100	100	91
2004	новый	100	100	100	100	86	100	100	86	86	100	100	86	95
	старый	100	100	100	100	62	85	100	75	100	100	100	100	94
2005	новый	100	100	100	100	86	71	57	57	57	71	86	71	80
	старый	62	88	88	88	75	83	88	62	60	75	88	60	76
Сред.	новый	94	97	92	99	92	91	88	88	82	89	94	89	91
	старый	87	86	88	88	86	87	88	78	79	82	86	89	85

Все перечисленные операции по подготовке исходной гидрометеорологической информации, расчету ожидаемого хода среднего месячного уровня Каспийского моря, оценке оправдываемости прогнозов

уровня полностью автоматизированы. Это позволило внести изменения в подготовку и выпуск гидрометеорологического бюллетеня Гидрометцентра России и создать его новую версию. Для полного представления о характере фактических и ожидаемых изменений уровня Каспийского моря в бюллетень включен график изменений уровня моря в прошедшем и текущем годах, а также в январе-апреле следующего года.

7.1.3. Технология автоматизированного прогноза годового хода уровня Каспийского моря

На основе усовершенствованного метода была создана технология автоматизированного прогноза годового хода УКМ [2]. Программный комплекс состоит из нескольких блоков, системно связанных друг с другом, начиная от блока ввода и контроля исходных данных и кончая блоком формирования бюллетеня. К бюллетеню прилагается график хода средних месячных уровней и средних годовых уровней.

Программное средство оформлено в виде рабочего места (РМ) «UROVNI», которое реализует возможность интерактивной работы в режиме «человек-машина». РМ «UROVNI» представлено как главное окно на рабочем столе ПК прогнозиста-океанолога. РМ «UROVNI» позволяет осуществить автоматизированный прогноз УКМ, а также сформировать гидрометеорологический бюллетень. В настоящее время РМ «UROVNI» установлено в отделе морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России. В процессе оперативной работы на ПК обеспечивается визуальный контроль и корректировка результатов расчета, если в этом появляется необходимость. Схема автоматизированного прогноза состоит из нескольких программных блоков, системно связанных друг с другом.

Блок «Расчет средних значений»

При выборе пункта меню «Получение средних значений элементов» запускается программа «Получение средних значений». Сначала определяется год и месяц, за которые должны быть вычислены средние месячные значения для каждой станции по трем элементам: уровень моря, температура воздуха и температура воды. Далее выбираются файлы, содержащие эти данные. Эти файлы формируются из телеграмм в коде КН-02 и располагаются в папке \OCEAN\UROVNI\TABLES. Происходит вычисление средних месячных значений по каждому из трех элементов. Данные вычислений помещаются в результирующий файл в папку \OCEAN\UROVNI\RESU, где накапливаются за год.

Одновременно с этим формируются таблицы средних месячных значений элементов, которые можно просмотреть на экране или распечатать на принтере.

Блок «Ввод данных о стоке рек»

Для вычисления прогноза годового хода среднего уровня Каспийского моря необходимы ежемесячные данные стока рек, впадающих в Каспийское море (за исключением Волги). Данные заносятся в специальную форму, затем выполняется программа формирования файла со сведениями по стоку рек.

Блок «Ввод и корректировка данных»

Результирующий файл со средними месячными значениями элементов может быть представлен на экране в виде специальной формы ввода. Для этого запускается программа «Ввод и корректировка данных». Данные в этой форме можно корректировать, дополнять отсутствующие величины. В результате этих действий файл со средними месячными значениями элементов будет обновлен.

Блок «Расчета прогноза»

Для прогноза уровня моря программа использует файл со средними месячными данными и файл с данными стока рек. Также нужны сведения о сбросе воды на Волгоградской ГЭС за январь, февраль, март текущего года и планируемом сбросе во II квартале текущего года. После ввода и обработки всех данных формируется прогноз уровня Каспийского моря на апрель-декабрь текущего года и январь-март следующего года. Прогноз представлен в виде таблицы, которую можно посмотреть на экране или напечатать на принтере.

Блок «Построение графика хода уровня моря»

В программном комплексе UROVNI предусмотрено представление данных прогноза в графическом виде. Для этого нужно выбрать пункт меню «График уровня моря». На экране монитора появляется графическое изображение хода уровня моря на прогнозируемый год и на январь – апрель следующего года, а также прогноз уровня Каспийского моря за предыдущий год и его фактические значения. Кроме того, на графике представлены средние значения уровня для каждого прогноза.

Блок «Формирование таблицы уровня моря»

Комплекс UROVNI содержит программу получения таблицы уровня моря за предыдущий год. В результате работы программы формируется таблица уровня моря за предыдущий год, сформированную таблицу можно посмотреть на экране или напечатать на принтере

Блок «Служебные программы»

РМ «UROVNI» содержит ряд служебных программ, предназначенных для облегчения работы пользователя с комплексом. В частности, есть программа настройки на полные пути размещения исходных и результирующих данных в компьютере, на выбор и настройку текстовых редакторов для просмотра результатов работы комплекса. Кроме того, есть программа для просмотра инструкции к комплексу «UROVNI».

Блочная структура программного комплекса позволяет проводить дальнейшую доработку технологии автоматизированного прогноза УКМ. Возможность работы с программным обеспечением в интерактивном режиме на ПК делает ее удобной в практической работе.

Таким образом, впервые полностью автоматизированы все подготовительные операции и последующие расчеты, начиная от сбора и обработки необходимой гидрометеорологической информации до выпуска официального бюллетеня Гидрометцентра России с результатами прогноза уровня. Разработана новая версия бюллетеня, в котором характеристики фактических и ожидаемых изменений уровня моря представлены как в табличной, так и графической форме. В Приложении 1 приведен образец бюллетеня с характеристиками фактических и ожидаемых уровней Каспийского моря в 2013–2015 гг., подготовленного по описанной выше технологии.

7.2. Метод прогноза приращений УКМ с годовой заблаговременностью по метеорологическим данным на водосборе Волги и Урала (метод ГГО)

В 1993 г. А.В. Мещерская и Н.А. Александрова [27] предложили метод прогноза среднегодового приращения уровня Каспийского моря (ΔУКМ) по метеорологическим данным на водосборах Волги и Урала. Этот метод прогноза можно рассматривать как развитие ранних работ Г.П. Калинина и А.А. Каминского [15, 18]. Статистический метод прогноза УКМ, разработанный в ГГО, имеет ряд преимуществ по сравнению с методом Калинина – Каминского. Прежде всего, это большая

заблаговременность прогнозов – больше года. Прогнозы УКМ на будущий год составляются в октябре текущего года. В качестве предикторов используются суммы осадков, осредненные по площади административных областей в пределах зоны прогноза. Первоначально зона охватывала Европейскую территории России, Украину, Белоруссию и Прибалтику. В настоящее время зона прогноза ограничена территорией ЕТР, включающей 28 административных областей [23–26].

Наряду с осадками, предикторами служат средние по области гидротермические коэффициенты (ГТК) по типу коэффициентов Г.Т. Селянинова [31] и значения температуры воздуха. Ежегодно составляются оперативные прогнозы приращений УКМ (ΔУКМ) как разностей среднегодовых уровней за два смежных года. При большой заблаговременности оправдываемость оперативных прогнозов ГГО среднегодовых приращений УКМ сопоставима с оправдываемостью аналогичных прогнозов Гидрометцентра России.

7.2.1 Характеристика исходной информации

Осадки

Методика подготовки и ряды средних по областям осадков приведены в справочниках – монографиях [19,28]. Исходной информацией послужили ряды наблюдений осадков на метеорологических станциях, прошедшие критический контроль и проверку на однородность. Данные 274 метеорологических станций по осадкам осреднялись по административным областям [19]. Число станций по каждой области колеблется от 6 до 22 [9, 10, 14, 19]. Средние значения осадков по областям за каждый конкретный месяц получены путем простого арифметического осреднения осадков на станциях данной области.

Следующий этап расчетов состоит в осреднении месячных (сезонных, годовых) сумм средних областных осадков с учетом площади областей по всей территории водосбора Волги и Урала. Для этого используется формула:

$$Q = \sum_{j=1}^{l} \sum_{i=1}^{m} \frac{P_i}{P} g_{ij}\,, \qquad (7.14)$$

где g_{ij} – количество осадков, мм, в i-й административной области в j-м месяце; P_i – площадь i-й области, км^3; P – суммарная площадь областей, включенных в рассматриваемую территорию, км^2; m – число административных областей.

При подготовке рядов осадков особое внимание уделялось их однородности, для достижения которой из рядов данных на метеорологи-

ческих станциях после 1965 г. исключались поправки на смачивание. По современным представлениям, вводимые в эти годы величины поправок на смачивание завышены, кроме того, они являются функцией числа сроков наблюдений, которые непостоянны во времени и в пространстве (зависят от номера часового пояса) [11]. Исключение поправок на смачивание снимает ряд этих трудностей, а ряды осадков становятся практически однородными. Вместе с тем абсолютные значения сумм осадков оказываются на 8–10 % меньше по сравнению с рядами осадков, в которые эти поправки введены [11].

Следует заметить, что описанная методика расчета среднего количества осадков по водосбору Волги и Урала в настоящее время сохранилась только для Уральского федерального округа. По остальной территории данные о средних областных осадках присылаются в ГГО из Гидрометцентра России, при этом из полученных данных поправки на смачивание также исключаются.

В последнее время специалистами ГГИ и ГГО разработана новая модель корректировки осадков, в которой учитываются основные погрешности измерений осадкомером Третьякова: это поправки на ветровой недоучет, потери осадков на смачивание осадкомерного ведра и испарение, а также ложные осадки, попадающие в осадкомер во время сильных метелей, что особенно существенно в полярных районах [9].

Температура воздуха

Ряды температуры воздуха (средние месячные и за год) получены по соотношению, аналогичному (7.14):

$$\Delta\bar{t}_{kj} = \frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{m}\frac{P_i}{P}\Delta t_{ij}\,. \qquad (7.15)$$

Здесь Δt_{ij} – аномалии температуры на k-й станции в j-м месяце, рассчитанные от норм температуры за период с 1891 по 1975 год.

В отличие от осадков, по которым включены данные 274 станций, по температуре использованы данные только 28 метеостанций (по одной на область), поскольку пространственная связность температуры воздуха неизмеримо больше, чем осадков. Впоследствии число метеостанций по температуре было сокращено до 22, чтобы уменьшить влияние урбанизации на ход температуры. Из расчетов были исключены данные городов с населением более миллиона человек (Москва, Нижний Новгород, Уфа), а также Гурьев, однородность ряда температуры в котором оказалась нарушенной вследствие постепенного удаления города от берега моря по мере падения уровня Каспия (вплоть до 1978 г.). Влияние других, менее крупных городов на аномалии температуры

воздуха невелико. В работах П.Я. Гройсмана, В.В. Кокнаевой, А.В. Мещерской, Н.А. Сперанской, М.П. Голод сделан вывод о незначительности (менее 10 %) вклада процесса урбанизации в повышение температуры, произошедшее за последнее столетие.

Гидротермические коэффициенты

Гидротермические коэффициенты, предложенные в 1928 году Г.Т. Селяниновым [31], очень широко и успешно используются в агрометеорологии. Они рассчитываются по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum Q}{0{,}1\sum t} \tag{7.16}$$

Здесь $\sum Q$ и $\sum t$, соответственно, сумма осадков и сумма температур за период с температурой выше 10 °С. Последнее условие Селянинов, как и многие другие авторы, выдерживали не всегда. В данной работе это условие выполнялось приближенно путем использования данных о температуре за теплый период. Суммы температур рассчитывались для периода с апреля по сентябрь. Для всех остальных месяцев знаменатель в формуле (7.16) оставался постоянным и равным суммам температур за апрель-сентябрь текущего года. Гидротермические коэффициенты в определенной мере являются аналогом испарения, которое наряду с количеством выпавших осадков является важнейшим фактором, определяющим колебания УКМ. Именно поэтому гидротермические коэффициенты были включены в число предикторов для прогноза ΔУКМ.

Гидрологические характеристики

Из гидрологических характеристик, следуя В.Д. Зайкову, использован ряд данных по уровню Каспийского моря, полученный в ГГИ путем осреднения результатов наблюдений в Баку, Махачкале, Форт-Шевченко и Красноводске. Ряд приращений уровня Каспийского моря рассчитан как ряд разностей среднегодовых значений УКМ за смежные годы.

Здесь необходимо сделать отступление, касающееся способов расчета приращений уровня. Дело в том, что приращения уровня моря разные авторы рассчитывают по-разному. Г.П. Калинин [15], К.И. Смирнова [32] и др. под годовым изменением (приращением) понимают изменения от минимального уровня текущего года до минимального уровня следующего. С.Н. Родионов, А.В. Мещерская, З.К. Абузяров и др. под годовым приращением имеют в виду разности

среднегодовых значений уровня за два смежных года (Δ'УКМ). В.Н. Малинин [20], К. Арпе и др. [4] в качестве приращений (ΔУКМ) используют разности между декабрьскими и январскими значениями уровня в данном году, полагая, что при таком расчете нивелируется влияние годового хода уровня.

Из трех способов расчета приращений УКМ преимущество за вторым (Δ'УКМ), поскольку он обеспечивает как более высокие, так и более устойчивые во времени значения коэффициентов корреляции с Волжским стоком (рис. 7.3.). Эта разница особенно ощутима в 1940–1960-х гг. при 20-летнем периоде расчета (рис. 7.3 а).

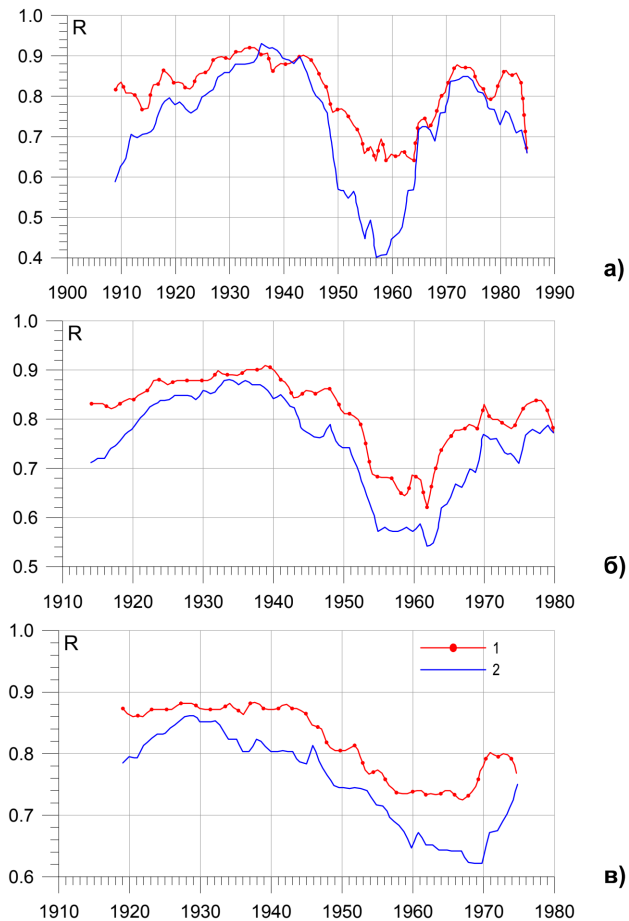


Рис. 7.3. Скользящие коэффициенты корреляции *R* между годовым стоком Волги и приращениями уровня Каспийского моря при 20-летнем (а), 30-летнем (б) и 40-летнем (в) периоде расчета: 1 - Δ'УКМ, 2 - ΔУКМ. По оси абсцисс цифрами обозначены годы, относящиеся к середине периодов расчета.

Зависимость между метеорологическими предикторами и приращениями уровня Каспийского моря оценивалась с помощью коэффициентов корреляции и взаимных корреляционных функций. На рис. 7.4 приведена карта географического распределения коэффициентов корреляции R между рядами двухлетних сумм средних по областям осадков за текущий и предшествующий ему годы и приращениями уровня моря от предшествующего к текущему году. На водосборы Волги и Урала, площадь которых на рис. 7.4 отмечена точками, приходится 40 административных областей или их частей.

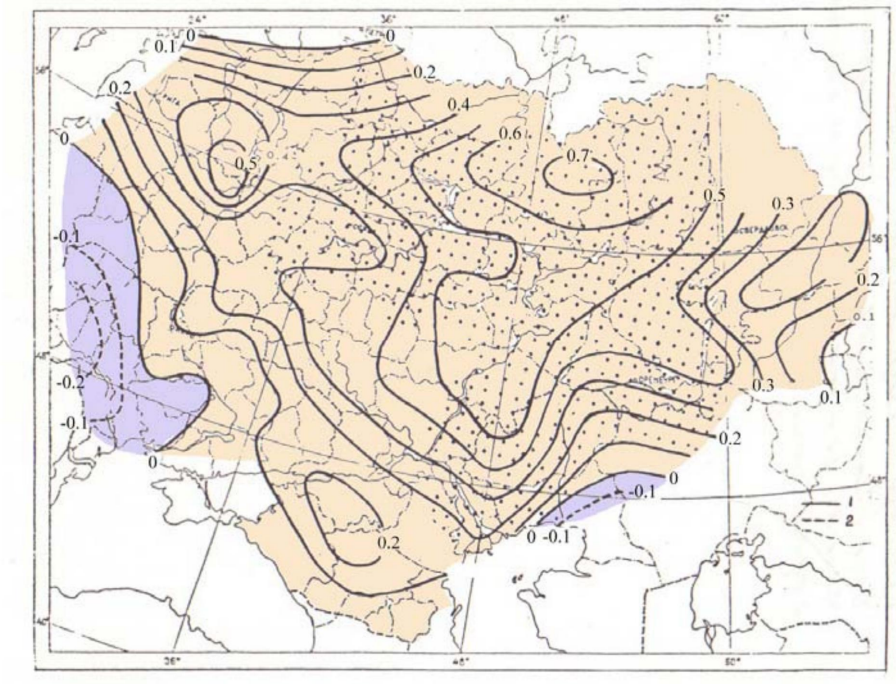


Рис. 7.4. Распределение коэффициентов корреляции между средними областными осадками за текущий год и приращениями уровня Каспийского моря между текущим и следующим годами.

Анализ рис. 7.4 показывает, что с изменениями УКМ теснее всего связаны осадки, выпавшие в верховьях Волги и Камы, что подтверждает ранее сложившиеся представления. Максимальные значения коэффициентов корреляции – для осадков в Кировской области ($R \approx 0{,}7$). К югу корреляция осадков с изменениями уровня быстро уменьшается, но остается статистически значимой, включая Саратовскую область и большую часть Уральского района (при длине ряда в 48 лет и 95%-ном уровне значимости к статистически значимым относятся значения

$|R| > 0{,}26$). На рис. 7.4 также видно, что статистически значимые коэффициенты корреляции между суммами осадков и ΔУКМ наблюдаются и за пределами водосборов Волги и Урала.

На рис. 7.5 представлено поле коэффициентов корреляции между средними аномалиями температуры в апреле-сентябре текущего $(n-1)$-го года и ΔУКМ. На картосхеме преобладают отрицательные коэффициенты корреляции, причем область их наибольших по абсолютной величине значений ($|R| \approx 0{,}4$) расположена на территории Белоруссии, северных районов Украины и западных районов центрально-черноземных областей, т. е. за пределами водосбора. На самом водосборе характерные значения коэффициентов корреляции $|R| \approx 0{,}3$, т. е. связи температуры воздуха и ΔУКМ довольно слабые, хотя статистически значимые. Исключение составляют восточные районы водосбора (Предуралье), где коэффициенты корреляции ниже предельного значения ($|R| < 0{,}26$).

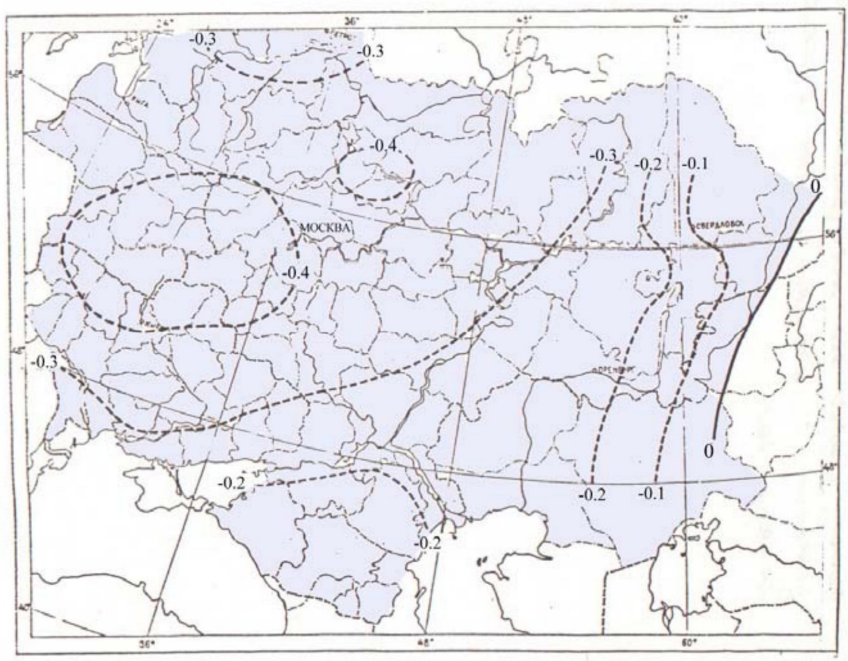


Рис. 7.5. Распределение коэффициентов корреляции между аномалиями температуры воздуха за текущий год и приращениями уровня Каспийского моря между текущим и следующим годами.

Карты на рис. 7.4 и 7.5 рассчитаны без исключения трендов из исходных рядов. При исключении трендов конфигурация изолиний меняется слабо, а значения коэффициентов корреляции незначительно уменьшаются на севере водосбора и несколько увеличиваются на остальной его части.

Карты на рис. 7.4, 7.5 целесообразно конкретизировать по природным зонам, рассчитав взаимные корреляционные функции между температурно-влажностными характеристиками на водосборе Волги и Урала (а также в прибрежных районах Каспия) и приращениями уровня Каспийского моря в отклонениях от квадратических трендов за 1947–1994 гг.

Согласно Атласу сельского хозяйства [5], на водосборе Волги и Урала прослеживается шесть природных зон. Поскольку некоторые из них имеют относительно небольшую протяженность по долготе, представлялось целесообразным объединить соседние зоны и рассмотреть влияние на приращения УКМ осадков в трех зонах (рис. 7.6): избыточно-влажной и достаточно влажной $Q_{\text{В}}$; слабо засушливой и засушливой $Q_{\text{З}}$; очень засушливой и сухой $Q_{\text{С}}$.

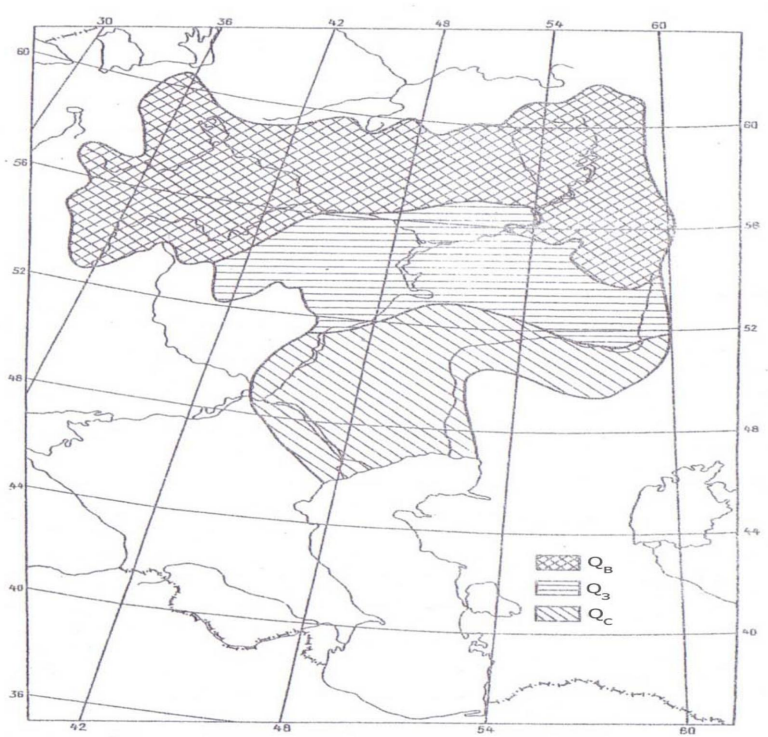


Рис. 7.6. Природные зоны на водосборе Волги и Урала.

Результаты расчетов взаимных корреляционных функций между предикторами по природным зонам и ΔУКМ приведены в табл. 7.10.

В [25] было показано, что осадки, выпавшие на водосборе Волги и Урала, влияют на УКМ в течение 2–3 лет, что учтено в табл. 7.10. Анализ табл. 7.10 показывает, что лучшими предикторами для прогноза ΔУКМ являются суммы осадков в избыточно влажной и достаточно влажной зоне, а также в слабо засушливой и засушливой зоне за два предшествующих года (n – 1) и (n – 2), если составляется прогноз приращений моря от года (n – 1) к году n. При временном сдвиге $\tau = 1$ год коэффициенты корреляции равны, соответственно, 0,72 и 0,70 (см. табл. 7.10). Тем самым количественно подтверждается известный факт, что осадки в верховьях Волги, Камы и Урала играют решающую роль в межгодовых колебаниях уровня моря.

Таблица 7.10. Взаимные корреляционные функции $R(\tau)$ между температурно-влажностными характеристиками на водосборе Волги и Урала по природным зонам, а также в прибрежных районах Каспия, и приращениями уровня Каспийского моря в отклонениях от квадратичных трендов за 1947–1994 гг.

τ, годы	Q и ΔУКМ				Δt и ΔУКМ	
	$Q_{24.В}$	$Q_{24.З}$	$Q_{24.С}$	$Q_{12.П}$	$\Delta t_{тпв}$	$\Delta t_{тпп}$
-3	0,01	-0,13	-0,17	0,26	-0,02	0,15
-2	-0,18	-0,21	-0,08	-0,14	-0,05	-0,02
-1	-0,07	-0,12	0,05	0,06	-0,02	-0,35
0	0,44	0,39	0,30	0,16	0,10	-0,14
1	0,72	0,70	0,47	0,34	-0,32	-0,38
2	0,25	0,25	0,13	-0,18	-0,15	-0,06
3	-0,04	-0,10	-0,12	0,14	0,06	0,08
4	-0,01	-0,05	-0,08	-0,24	0	0,05
5	-0,18	-0,21	0,04	0,03	-0,04	-0,08
6	-0,29	-0,28	-0,18	0,20	0	0
7	-0,22	-0,14	-0,27	0,08	0,25	0,10

Примечания: Подчеркнуты статистически значимые коэффициенты корреляции при 95%-ном уровне значимости.

$Q_{24..В}$; $Q_{24.З}$; $Q_{24..С}$ – двухлетние суммы осадков соответственно в избыточно влажной и достаточно влажной зоне (в); слабо засушливой и засушливой зоне (з); очень засушливой и сухой зоне (с);

$Q_{12.П}$ – годовые суммы осадков на прибрежных ($п$) станциях;

$\Delta t_{тпв}$ и $\Delta t_{тпп}$ – аномалии температуры теплого периода по водосбору Волги и Урала и на прибрежных станциях соответственно. Сдвиг по времени $\tau = 1$ год.

Роль осадков в очень засушливой и сухой зонах, а также осадков на прибрежных станциях в изменениях УКМ хотя практически значима, но намного слабее ($R = 0{,}47$ и $R = 0{,}34$). Особенно это относится к влиянию осадков на прибрежных станциях. Возможно, это связано с ограниченностью использованных материалов (4 прибрежные станции). Причем в отличие от осадков на водосборе Волги и Урала в данном случае рассматривались не двухлетние, а годовые суммы осадков, так как за пределами одного года влияние осадков прибрежных станций на ΔУКМ не прослеживается.

7.2.2. Методика определения оптимального периода учета осадков, температуры воздуха и гидротермических коэффициентов для прогноза приращений уровня с годовой заблаговременностью

Поскольку увеличение заблаговременности прогноза ΔУКМ является одной из основных задач, было поставлено ограничение для дат составления прогноза и используемой информации. Прогноз приращений УКМ от текущего года к следующему году составляется не позднее октября текущего года. Это означает, что используемая информация должна отсекаться по сентябрь текущего года.

Поиск оптимальных временных интервалов был выполнен с помощью коэффициентов корреляции между накопленными суммами предикторов и ΔУКМ. Специфика состоит в том, что накопленные суммы предикторов формируются назад от сентября текущего года, т. е. с постепенным учетом все более ранней информации. Оптимальная заблаговременность предикторов будет соответствовать максимальному значению коэффициента корреляции между накопленными суммами предикторов и ΔУКМ на всем отрезке ряда (рис. 7.7.).

Суть подхода легко проследить по рис. 7.7 а. Здесь приведен ряд коэффициентов корреляции между суммами осадков и ΔУКМ. Первое значение R соответствует коэффициенту корреляции между суммами осадков за сентябрь текущего года и ΔУКМ, второе значение R – между суммами осадков за сентябрь и август текущего года вместе и ΔУКМ, последнее значение R соответствует коэффициенту корреляции между ΔУКМ и суммами осадков за 33 месяца, предшествующие сентябрю текущего года.

В [24] показано, что метеорологические факторы на водосборе Волги и Урала влияют на уровень моря в течение 2–3 лет, т. е. в течение 24–36 месяцев. Исходя из этого, исполнители остановились на максимальной заблаговременности предикторов в 33 месяца, близкой к трем годам от сентября (n – 1)-го до декабря (n – 3)-го года (рис. 7.7).

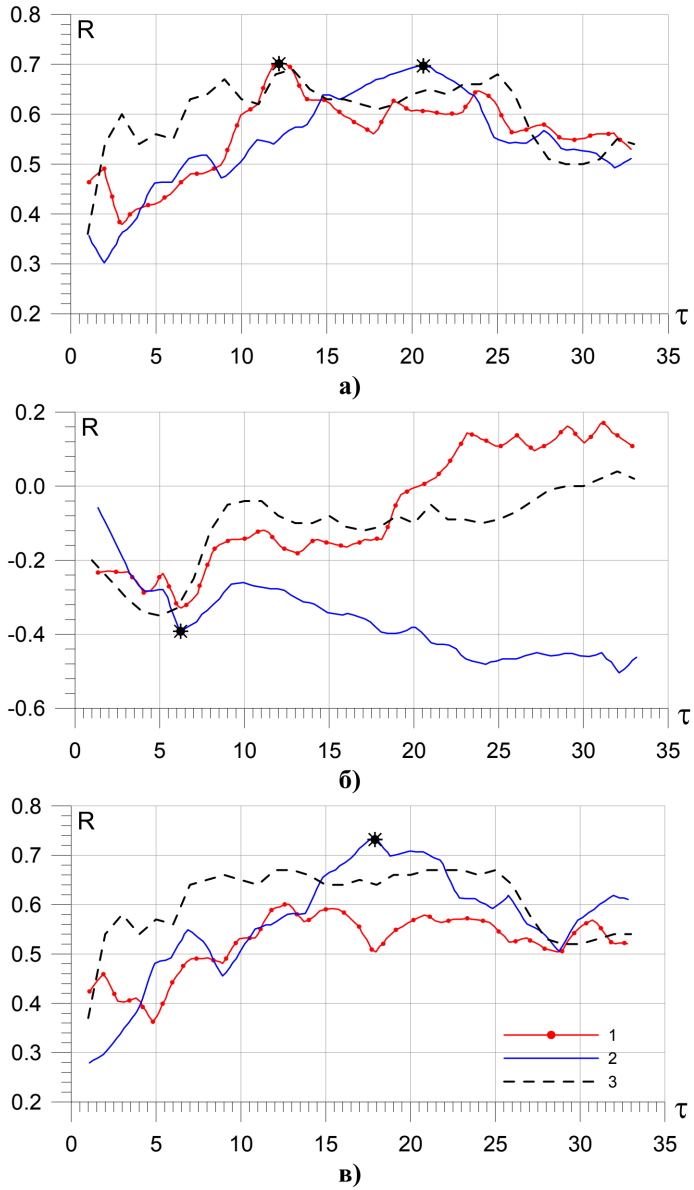


Рис. 7.7. Коэффициенты корреляции *R* между накопленными суммами осадков (а), температурой воздуха (б), гидротермическими коэффициентами (в) и ΔУКМ назад от сентября текущего (*n*-1)-го года (τ = 1) до декабря (*n*-3)-го года (τ = 33): 1 – 1901–1940 гг.; 2 – 1947–1986 гг.; 3 – 1980–2015 гг.

В целях большей достоверности результатов расчеты выполнены для трех периодов: 1901–1940, 1980–2015 и 1947–1986 гг. Первый соответствует условиям ненарушенного стока рек; второй – условиям сильных антропогенных влияний (строительство водохранилищ, орошение); третий использован при составлении независимых прогнозов ΔУКМ на 1987–1995 гг.

По мере увеличения временного интервала суммирования количества осадков, коэффициенты корреляции осадков с ΔУКМ растут, достигают максимума, а затем уменьшаются (см. рис. 7.7 а). Так, по рядам за 1947–1986 гг. максимум $R = 0{,}7$ достигается при использовании данных о суммах осадков за 21 месяц. Этот интервал суммирования в данном случае является оптимальным. Что касается периода с 1901 по 1940 г., то максимальное значение $R = 0{,}7$ соответствует суммам осадков за 12 месяцев с сентября $(n - 1)$ по октябрь $(n - 2)$-го года.

Заметим, что несмотря на различия в максимальных значениях R, результаты расчетов по данным за эти три периода (1901–1940, 1947–1986 и 1980–2015 гг.) достаточно хорошо согласуются между собой, особенно при больших временных интервалах суммирования осадков и ГТК (рис. 7.7 а, в).

На рис. 7.7 б приведены аналогичные оценки коэффициентов корреляции сумм температур и ΔУКМ. В отличие от осадков для температуры воздуха результаты расчетов для трех периодов более или менее хорошо согласуются только до временных интервалов в 16–17 месяцев. Для более длительных временных интервалов значения коэффициентов корреляции оказались даже разными по знаку, поэтому их рассмотрение нецелесообразно.

Максимальные по абсолютной величине значения R достигаются при временном интервале суммирования значений температуры, равном шести месяцам, – с сентября по апрель текущего года.

Наконец, на рис. 7.7 в приведены ряды R между ΔУКМ и гидротермическими коэффициентами. Оптимальный интервал заблаговременности гидротермических коэффициентов равен 18 месяцам. В итоге было сформировано три варианта прогнозов ΔУКМ: прогнозы по ГТК в качестве предикторов ($R = 0{,}72...0{,}73$ при $\tau = 17–21$ мес.); прогнозы по осадкам в качестве предикторов ($R = 0{,}67...0{,}70$ при $\tau = 17–21$ мес.) и прогнозы по температуре воздуха ($R = -0{,}43...-40$; $\tau = 6$ мес.). Лучшими предикторами являются гидротермические коэффициенты, исходя из наибольших значений R.

Учитывая низкие значения R между аномалиями температуры и ГТК, этот вариант прогноза можно использовать для консультаций при окончательном анализе результатов расчетов. Выбор оптимальных

заблаговременностей и соответствующих им наибольших R для каждого из трех вариантов прогноза – центральный момент метода.

В целях большей устойчивости результатов расчетов к предикторам при $\tau_{опт}$ добавляются предикторы за смежные годы с большими значениями R. По отобранным предикторам для каждого варианта прогнозов рассчитываются одномерные уравнения регрессии и прогнозы ΔУКМ, средние из которых плюс прогноз тренда ΔУКМ (см. ниже) являются прогнозом ΔУКМ на будущий n-й год. На рис. 7.8 приведены ряды накопленных сумм предикторов за 1899–2014 гг. для трех вариантов прогноза при оптимальных интервалах заблаговременности.

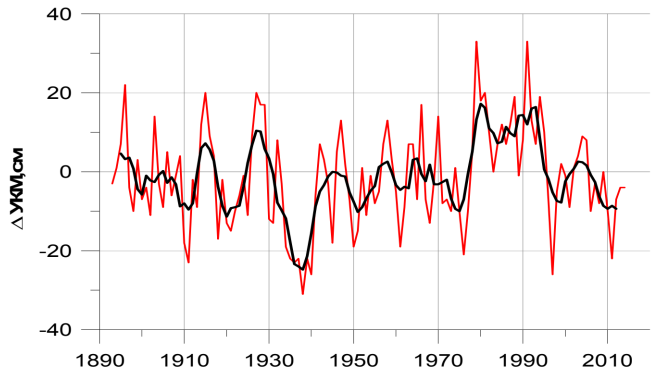


Рис. 7.8 а)

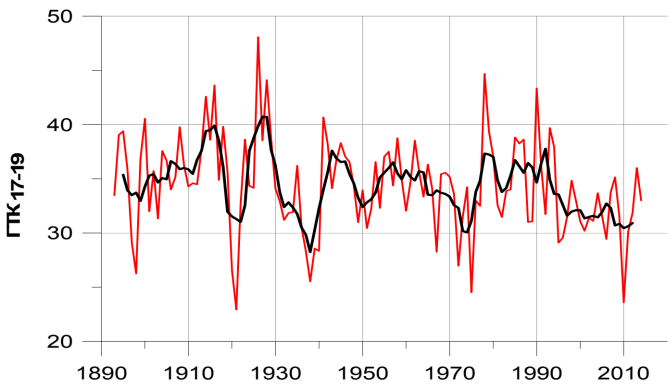


Рис. 7.8 б)

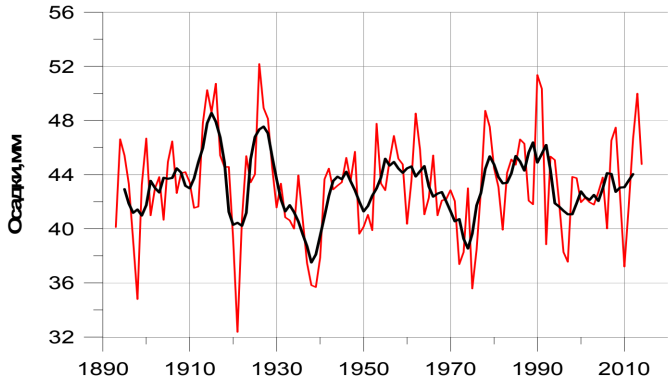


Рис. 7.8 в)

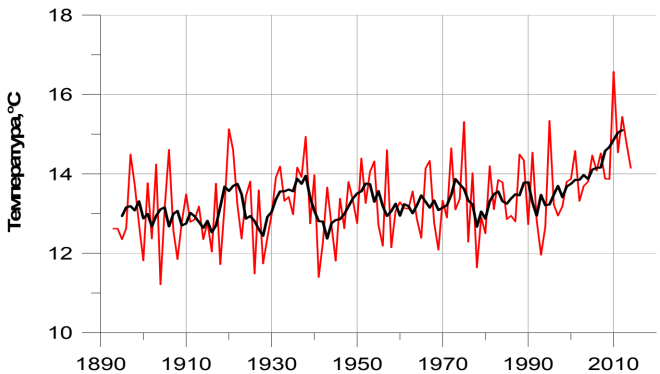


Рис. 7.8 г)

Рис. 7.8. Ряды накопленных сумм предикторов при оптимальной заблаговременности ($\tau_{опт}$) и пятилетние скользящие средние этих рядов: годовые приращения уровня Каспийского моря (а); (ΣГТК)/n при $\tau_{опт}$ = 17–19 мес.(б); (Σ осадков)/n при $\tau_{опт}$ = 20–22 мес. (в) ; (ΣΔT)/n за апрель-сентябрь (г).

7.2.3. Расчет трендовой составляющей изменений уровня Каспийского моря

Прогноз изменений УКМ складывается из прогноза отклонений ΔУКМ от тренда, которому был посвящен предыдущий раздел, и прогноза тренда ΔУКМ. Тренд получен путем аппроксимации ряда ΔУКМ параболой второго порядка. Прогноз тренда ΔУКМ от (n – 1) к n-му году рассчитывался по формуле:

$$T_{\Delta УКМ}(n) = T_{\Delta УКМ}(n-1) + [T_{\Delta УКМ}(n-1) - T_{\Delta УКМ}(n-2)]. \qquad (7.17)$$

Например, при расчете прогностического значения тренда ΔУКМ на 1987 г. аппроксимировался ряд ΔУКМ за 1947–1986 гг. При прогнозе тренда изменения уровня моря на каждый последующий год ряд ΔУКМ удлинялся на единицу и вновь аппроксимировался параболой.

Оценки оперативных прогнозов приращений уровня Каспийского моря с годовой заблаговременностью

В табл. 7.11 и на рис. 7.9 приведены прогнозы приращений уровня с учетом прогноза тренда и абсолютной ошибки прогнозов ε как разности прогностических $\Delta УКМ_{пр}$ и фактических $\Delta УКМ_{ф}$.

Таблица 7.11. Прогностические приращения (см) среднегодового УКМ за 1987-2014 гг. (а), фактические приращения (б) и ошибки прогнозов (а – б)

Год	**1987**	**1988**	**1989**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**
а	17,7	17,2	6,0	5,1	31,1	13,7	8,2	27,4	20,5	6,2	6,0	-6,0	6,7	-1,0
б	12,0	19,0	-1,0	8,0	33,0	13,0	7,0	19,0	10,0	-15,0	-23,0	-5,0	2,0	-2,0
а – б	5,7	-1,8	7,0	-2,9	-1,9	0,7	1,2	8,4	10,5	21,2	29,0	-1,0	4,7	1,0
Год	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
а	-4,0	-6,0	4,5	-7,5	4,5	2,5	-8,5	-3,5	0	-7,5	-22,0	-12,0	-9,0	-3,0
б	-9,0	1,0	4,0	9,0	8,4	-10,0	-3,0	-7,5	-2,0	-10,0	-22,0	-6,0	-4,0	-6,0
а – б	5,0	-7,0	0,5	-16,5	-3,9	12,5	-5,5	4,0	2,0	2,5	0	-6,0	-5,0	3,0

Успешность совокупности прогнозов оценивалась по средним $|\varepsilon|$ значениям абсолютных ошибок прогнозов

$$|\bar{\varepsilon}| = \frac{1}{n}\sum\left|\Delta УКМ_{пр} - \Delta УКМ_{ф}\right| , \qquad (7.18)$$

а также по средним квадратичным ошибкам S совокупности прогнозов:

$$S = \sqrt{\sum_{1}^{n}(\Delta УКМ_{пр} - \Delta УКМ_{ф})^2 / n - m} , \qquad (7.19)$$

где n – число прогнозов; $m = 2$.

Оценки первых десяти оперативных прогнозов за 1987–1996 гг. опубликованы в [24]. За этот период $|\bar{\varepsilon}| = 4{,}5$ см; $S = 6{,}2$ см. Согласно [30], каждый конкретный прогноз считается оправдавшимся, если $|\varepsilon| < \sigma_{\Delta УКМ}$ (за период с 1947 по 1995 г. $\sigma_{\Delta УКМ} = 10{,}8$ см). По этому

критерию оправдались все 10 прогнозов. Позднее фактическое значение ΔУКМ за 1996 год было уточнено, при этом оценки ухудшились: $|\bar{\varepsilon}| = 6{,}1$, $S = 9{,}5$, а оправдалось 9 прогнозов из 10, т. е. 90 %, что тоже является хорошим результатом (табл. 7.11).

В большинстве случаев за основной принимается прогноз по ГТК, либо среднее значение из прогнозов ΔУКМ по ГТК и осадкам. По всей совокупности из 28 прогнозов $|\bar{\varepsilon}| = 6{,}2$; $S = 9{,}3$. Оправдалось 25 прогнозов из 28 ($|\varepsilon| < 10{,}8$ см), или 89 %.

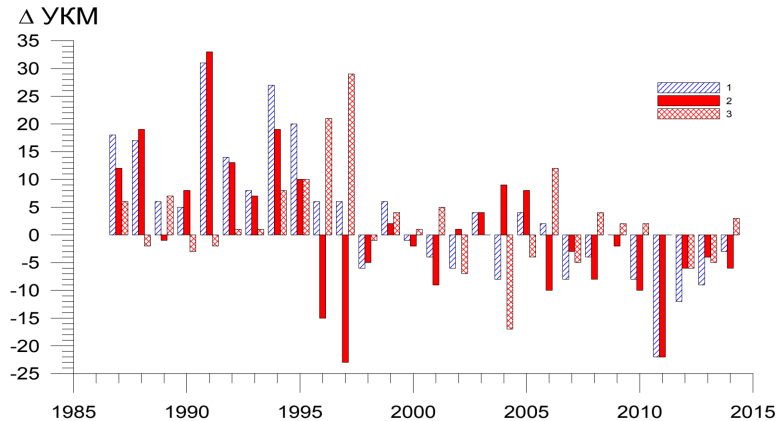


Рис. 7.9. Оперативные прогнозы приращений уровня Каспийского моря (см) по метеорологическим данным на водосборе Волги и Урала за 1987–2014 гг., составленные с годовой заблаговременностью, и оценки их успешности: оперативные прогнозы ΔУКМ (1); фактические значения ΔУКМ (2); абсолютные ошибки прогнозов ΔУКМ (3).

На рис. 7.9 приведены оперативные и фактические значения ΔУКМ, а также абсолютные погрешности ε. Фактические приращения ΔУКМ были положительными в течение 1987–1995 гг. В 1996 г. произошло резкое падение уровня, фактическое ΔУКМ составило -15 см в 1996 г. и -23 см в 1997 г. С 1998 по 2005 г. уровень Каспия слабо изменялся, а ΔУКМ колебалось в интервале от -10 до +10 см. В последний период с 2006 по 2014 г. уровень падал, $\Delta\text{УКМ}_ф$ отрицательные с наибольшим значением по абсолютной величине в 2011 году ($\Delta\text{УКМ}_ф$ = -22 см).

Анализ абсолютных ошибок прогнозов показывает, что самые большие их значения пришлись на годы слома положительной тенденции в изменении уровня моря (в 1996 г. $\varepsilon = 21{,}2$ см, в 1997 г. $\varepsilon = 29$ см). Неудачными были также прогнозы ΔУКМ в 2004 и в 2006 гг. Однако

с помощью представленного метода экстремально сильное падение уровня в 2011 г. (-22 см) было точно предсказано за год до осуществления этого падения ($\Delta УКМ_{пр}$ = -22 см). Стоит обратить внимание на тот факт, что самая сильная засуха столетия на ЕТР в 2010 г. проявилась в падении уровня Каспия только в следующем 2011 году.

Учет стока в залив Кара-Богаз-Гол

В работе В.Н. Бортника [12] показано, что в начале века сток в залив Кара-Богаз-Гол составлял примерно 30 км^3, что соответствовало ежегодному понижению уровня на 7–8 см. В последующие годы вследствие прогрессирующего падения уровня моря сток в залив уменьшался. В 1930–1940-х гг. он соответствовал уменьшению уровня моря на 3–4 см/год, а в конце 1970-х – всего на 1–2 см/год. В 1980 г. между морем и заливом была построена глухая дамба, так что сток в залив прекратился. С момента частичного разрушения дамбы в 1984 г. и до 1991 г. сток в залив не превышал 0,5 см/год. Положение кардинально изменилось после полного разрушения дамбы в июле 1992 г. Сток в залив Кара-Богаз-Гол, по данным Р.Е. Никоновой, составил 3,2 см в 1992 г., 8,1 см в 1993 г. и 10,6 см в 1994 г. Такой сток в залив сравним с ежегодным приращением уровня Каспия, что делает необходимым учет стока в Кара-Богаз-Гол при составлении прогнозов ΔУКМ.

По оценкам, приведенным в [13, 38] отчленение залива от моря обеспечивает повышение уровня Каспийского моря на 2–4 см/год. В первые годы эта величина была принята при составлении прогноза. Позже были использованы более детальные данные стока в залив Кара-Богаз-Гол, приведенные в работе Р.Е. Никоновой и В.Н. Бортника [29] (табл. 7.12).

Таблица 7.12. Сток в залив Кара-Богаз-Гол с 1987 по 2012 г. [29]

Год	**1987**	**1988**	**1989**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**
Сток, см	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	3,2	8	10,5	11,7	7,4	4,3	4,5	4,4
Год	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
Сток, см	4,1	4,7	4,1	4,7	5,4	5,1	3,2	5,1	4,8	5	5,2	5	5,9

Обращают на себя внимание большие значения стока в 1993–1996 гг. Экстремальные ошибки оперативных прогнозов ΔУКМ в 1994–1996 гг., по-видимому, в значительной мере связаны с недоучетом величины стока в залив.

Анализ абсолютных ошибок $\Delta УКМ_{пр}$ по всему ряду прогнозов показал, что учет стока в залив не всегда целесообразен. Логично предположить, что сток в залив имеет смысл при ожидаемом хорошем или избыточном увлажнении водосбора Волги и Урала в будущем году. При этом можно воспользоваться прогнозом ΔУКМ по предложенной методике, когда в качестве предикторов используются суммы осадков на водосборе. В табл. 7.13 и 7.14 отобрано шесть таких прогнозов. Критерием для отбора служило условие, при котором $\Delta УКМ_{пр} > 0{,}5\sigma_{\Delta УКМ}$. В начале XXI в. таким условиям удовлетворяют следующие годы: 1999, 2000, 2003, 2006, 2008 и 2009. Оценки сделаны для двух вариантов величины стока в залив Кара-Богаз-Гол. В первом варианте сток принят равным 3 см, во втором использована величины стока, приведенные в табл. 7.12.

Таблица 7.13. Прогнозы ΔУКМ (см) для лет ожидаемого избыточного увлажнения (предикторы: осадки)

I вариант						
Годы	**1999**	**2000**	**2003**	**2006**	**2008**	**2009**
$\Delta УКМ_{пр}$	9,8	6,3	6,2	4,7	8,7	8,7
$\Delta УКМ_{пр}$ минус сток 3 см	6,8	3,3	3,2	1,7	5,7	5,7
$\Delta УКМ_{ф}$	2,0	-2,0	4,0	-10,0	-7,5	-2,0
ε	4,8	5,3	-0,8	-11,7	13,2	7,7 $\lvert\bar{\varepsilon}\rvert = 7{,}3$
II вариант						
Годы	**1999**	**2000**	**2003**	**2006**	**2008**	**2009**
$\Delta УКМ_{пр}$	9,8	6,3	6,2	4,7	8,7	8,7
$\Delta УКМ_{пр}$ минус сток по[29]	5,4	2,2	1,5	1,5	3,9	3,7
$\Delta УКМ_{ф}$	2,0	-2,0	4,0	-10,0	-7,5	-5,7
ε	3,4	4,2	-2,5	11,5	11,4	5,7 $\lvert\bar{\varepsilon}\rvert = 6{,}5$

Анализ табл. 7.13 и 7.14 позволяет сделать следующие выводы относительно учета стока в залив Кара-Богаз-Гол.

1. Средние ошибки прогнозов ΔУКМ при использовании осадков в качестве предикторов и исключении из прогнозов ΔУКМ стока в залив по данным Бортника и Никоновой несколько меньше ($\lvert\bar{\varepsilon}\rvert$ = 6,5 см), чем при исключении постоянного значения стока, равного 3 см ($\lvert\bar{\varepsilon}\rvert$ = 7,3 см).

Таблица 7.14. Прогнозы ΔУКМ (см) для лет ожидаемого избыточного увлажнения (предикторы: ГТК, осадки, температура воздуха)

I вариант						
Годы	**1999**	**2000**	**2003**	**2006**	**2008**	**2009**
ΔУКМ$_{пр}$	9,0	2,9	7,0	2,5	-1,0	3,0
ΔУКМ$_{пр}$ минус сток 3 см	6,0	-0,1	4,0	-0,5	-4,0	0
ΔУКМф	2,0	-2,0	4,0	-10,0	-7,5	2,0
ε	4	1,9	0	9,5	3,5	2 $\lvert\bar{\varepsilon}\rvert$ = 3,5
II вариант						
Годы	**1999**	**2000**	**2003**	**2006**	**2008**	**2009**
ΔУКМпр	9	2,9	7	2,5	-1	3
ΔУКМ$_{пр}$ минус сток по[29]	4,6	-1,2	2,3	-0,7	-5,8	-2,0
ΔУКМф	2,0	-2,0	4,0	-10,0	-7,5	-2,0
ε	2,6	0,8	-0,7	9,3	1,7	0 $\lvert\bar{\varepsilon}\rvert$ = 2,5

Аналогичный вывод следует из сравнения средних абсолютных ошибок прогнозов ΔУКМ при использовании в качестве предикторов совокупности осадков, температуры воздуха и ГТК. В этом случае прогнозы ΔУКМ также успешнее при исключении стока в залив по данным Никоновой и Бортника ($|\bar{\varepsilon}| = 2{,}5$ см), чем при введении постоянной поправки, равной -3 см ($|\bar{\varepsilon}| = 3{,}5$ см).

7.3. Прогноз составляющих водного баланса и УКМ с годовой заблаговременностью (метод В.Н. Малинина)

В.Н. Малинин [20–22] видит первопричину колебаний УКМ в Северной Атлантике, а конкретнее в Норвежском море. Именно там увеличение испарения с поверхности моря приводит к увеличению количества влаги, переносимой на ЕТР, и соответственно, к возрастанию атмосферных осадков в бассейне Волги. В общем случае на изменения уровня моря воздействует большое число различных по своей природе факторов, анализ которых позволил установить, что определяющими являются процессы крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. При усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике и, прежде всего, в области

Исландской депрессии, происходит возрастание испарения и понижение температуры поверхности океана. При этом увеличивается влагосодержание атмосферы. Кроме того, усиление циклонической активности вызывает увеличение зональной составляющей эффективной скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующей количество переносимого водяного пара в системе средней циркуляции атмосферы и крупномасштабных синоптических вихрей. Генетическая схема формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря представлена на рис. 7.10.



Рис. 7.10. Генетическая схема формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря (по В.Н. Малинину [20]).

Наконец, при росте циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его пространственная миграция. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность североатлантического колебания, которое в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Все это вместе взятое должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на Европейский континент и Европейскую территорию России. В результате будет

повышаться количество выпавших осадков и, соответственно, увеличиваться сток Волги. Естественно, при ослаблении циклонической и возрастании антициклонической активности картина будет противоположной. Таким образом, межгодовая изменчивость переноса атмосферной влаги регулирует колебания годового стока Волги и, соответственно, уровня Каспия.

Данная модель формирования межгодовых колебаний УКМ послужила основой разработки физико-статистического метода его долгосрочного (с заблаговременностью до 1 года) прогноза. В общем случае прогностическая схема уровня Каспия состоит из трех последовательных этапов: 1) прогноз стока Волги; 2) прогноз внутригодовых изменений объема моря; 3) прогноз уровня. Опуская промежуточные результаты, обратимся сразу к результатам долгосрочного прогноза уровня. На рис. 7.11 дается сопоставление фактических и прогностических значений уровня. Использование независимых данных является крайне важным условием оценки точности метода прогноза. Хорошее согласование значений уровня по независимым данным свидетельствует о высоком качестве прогностической модели.



Рис. 7.11. Сопоставление фактических и прогностических значений уровня моря.

7.4. Метод прогноза уровня моря с полугодовой заблаговременностью

В [39] рассчитан водный баланс Каспийского моря и изменения его уровня в период с 1986 по 2011 г. на основе информации реанализа ERA-Interim (в том числе осадков и испарения). Осадки и испарение

в ERA-interim – это результат анализа гидродинамического прогноза этих характеристик на 12 ч, который считается 2 раза в сутки (0 и 12 ч ВСВ) с использованием атмосферной модели на сетке с шагом 0,7°, при этом наблюдения за осадками не используются. Разрыв во времени между выпадением осадков в бассейне Волги и их влиянием на сток Волги параметризуется. Для получения изменчивости уровня Каспийского моря интегрируются все компоненты водного баланса. Для уменьшения неопределенности вследствие ошибок абсолютных величин большинство результатов получено для аномалий путем исключения среднего годового хода. Коэффициент корреляции между рассчитанными и наблюденными значениями УКМ за 1986–2011 гг. составил 0,93.

Кроме того, с использованием ансамблевых долгосрочных метеорологических прогнозов двух версий модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды на 7 месяцев составлялись прогнозы УКМ на полгода. Из метеорологического прогноза брался прогноз осадков над бассейном Волги. Анализ полученных результатов показал, что использование только значений запаса влаги в бассейне Волги позволяет прогнозировать УКМ на несколько месяцев, а учет прогнозов осадков улучшает эти прогнозы.

Также были составлены экспериментальные прогнозы изменений УКМ на срок до 1 года. При этом использовалось предположение, что тренд в изменениях УКМ в последние 6 месяцев будет сохраняться и в последующие 6 месяцев. Сравнение годовых прогнозов УКМ за 1995–2010 гг. с аналогичными прогнозами ГГО и Гидрометцентра России показало, что успешность прогнозов всех центров примерно одинакова.

Глава 8.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

8.1. Общие положения

Трудность сверхдолгосрочного прогнозирования УКМ обусловлена тем, что все типы колебаний (месячные, сезонные, межгодовые, многолетние, вековые и тысячелетние) зависят от большого количества факторов гидрометеорологического, антропогенного и тектонического характера, которые непрерывно меняются во времени и в пространстве, сложным образом взаимодействуя друг с другом. Относительный вклад каждого из них в изменчивость УКМ можно оценить только статистически. Стохастичность колебания климата и гидрологического режима моря является основной причиной неопределенности при сверхдолгосрочном прогнозировании уровня моря и повышает риски хозяйственной деятельности на побережье Каспийского моря. В [15] рассмотрены некоторые источники неопределенности, возникающие при анализе колебаний климата и уровенного режима моря.

Проблема сверхдолгосрочного прогноза колебаний УКМ отождествляется с прогностической оценкой изменений уровня моря на годы или десятки лет вперед. Когда речь заходит о сверхдолгосрочном прогнозе уровня, прежде всего возникает вопрос о том, с какой заблаговременностью необходимо составить прогноз для решения тех или иных практических задач. Как показывают запросы потребителей, в зависимости от специфики хозяйственной деятельности нужны прогнозы разной заблаговременности. В обычной практике природно-хозяйственной деятельности в прибрежной зоне Каспия заблаговременность прогноза уровня моря в диапазоне 5–20 лет считается оптимальной, хотя для решения отдельных конкретных задач может возникнуть необходимость и в прогнозах большей заблаговременности. Задача эта чрезвычайно сложная, поскольку трудно предвидеть

физические процессы, определяющие колебания уровня моря на столь длительную перспективу, особенно процессы смены климатических эпох и связанных с ними периодов падения и подъема уровня моря.

Выпускаемые Гидрометцентром России официальные прогнозы помесячного хода уровня на год вперед и фоновый прогноз тенденции изменения уровня моря на 6 лет не удовлетворяют в полной мере всех потребностей практиков; также необходимы прогнозы с различной заблаговременностью на 10–20 лет и более.

В основе сверхдолгосрочного прогноза лежит оценка распределения вероятностей положения уровня моря за период прогноза. Возможность такой оценки и, соответственно, качество сверхдолгосрочного прогноза, зависят от изменчивости уровня моря в сравнении с изменчивостью обуславливающих ее факторов.

Вековые колебания УКМ и его современные изменения зависят от сложного взаимодействия естественных и антропогенных факторов [33–35, 44, 50, 70]. Внутренние факторы изменчивости УКМ связаны с проявлением крупномасштабных взаимодействий в климатической системе «атмосфера – гидросфера – литосфера – криосфера – биосфера», формирующих водный баланс Каспийского моря, а внешние факторы связаны с изменениями космических факторов: солнечной активностью, нутацией Земли и т. д.

До недавнего времени задача сверхдолгосрочного прогноза УКМ решалась исключительно на основе эмпирических и физико-статистических методов. Эмпирические методы, базирующиеся на ограниченных выборках данных наблюдений за прошедший период, позволяют учитывать лишь небольшую часть влияющих факторов. Вследствие этого обнаруженные связи оказывались неустойчивыми во времени. При этом предсказываемыми величинами являются обобщенные статистические или вероятностные характеристики за тот или иной временной интервал, т. е. фон или тенденция. Поэтому некоторые исследователи предпочитают говорить не о прогнозе уровня в общепринятом смысле, а о прогностических оценках характера изменения тенденции хода уровня (тренде) на том или ином отрезке времени.

В зависимости от требований практики сверхдолгосрочные прогнозы охватывают различные временные масштабы и, соответственно, требуют применения различных научно-методических подходов при их разработке. В этом смысле составление сверхдолгосрочного прогноза с той или иной заблаговременностью представляет собой самостоятельное научное исследование. Проблема сверхдолгосрочного прогнозирования усложняется тем, что за период действия прогноза могут существенно меняться геоморфологические, гидрометеорологические и антропогенные режимы моря. К сожалению, проблема прогноза смены

одних режимов на другие сложна и пока трудно решаема. Тем не менее принимаются многочисленные попытки ее решения. Так, в период понижения уровня появилось большое количество прогнозов УКМ, основанных на самых разных гипотезах. В качестве удачных можно назвать сверхдолгосрочные прогнозы, разработанные А.Н. Афанасьевым [10], К.И. Смирновой [88], М.С. Эйгенсоном [96].

После того как с 1978 г. уровень моря начал устойчиво расти, появились новые прогнозы, теперь уже о дальнейшем его повышении. Анализ таких прогнозов содержится, например, в монографии В.Н. Малинина [57]. В статье А.В. Мещерской с соавторами [60] приведены результаты прогнозов, основанных на предполагаемых сценариях изменения климата, на учете солнечной активности, на палеоаналогах и т.д. Все прогнозы были условно разделены на три типа. К первому типу относились детерминированные сверхдолгосрочные прогнозы УКМ с указанием значения уровня моря в конкретные периоды (прогнозы Б.А. Аполлова и К.И. Алексеевой [7], В.Н. Малинина [57], А.И. Дуванина [41], В.И. Голубцова и В.И. Ли [36, 37], А.В. Фролова [91], М.И. Будыко и др.[16]). Ко второму типу были отнесены прогнозы, содержащие возможный уровень моря безотносительно к дате его осуществления (прогнозы Г.И. Рычагова [78], А.Н. Варущенко [17], А.Н. Кренке и В.В. Поповой [51], С.Н. Родионова [77]). К третьему типу отнесены качественные прогнозы, указывающие, до какого года (пятилетия) следует ожидать дальнейшего подъема уровня моря (прогнозы О.А. Дроздова [39], Н.С. Сидоренкова и В.И. Швейкиной [86], В.А. Зубакова [43]).

Почти все авторы прогнозировали подъем уровня Каспийского моря по крайней мере до 2010 г. Однако в 1996–1997 гг. уровень Каспия начал снижаться, что не было предусмотрено ни одним из прогнозов, за исключением прогноза М.И. Будыко и др. [16].

Проблемами сверхдолгосрочного прогноза УКМ занимались также В.Н. Воробьев и В.Н. Малинин [19], О.Д. Куриленко и Д.К. Широкий [54], О.К. Леонтьев [55] и др. Так, например, по прогнозу Воробьева и Малинина, составленному в 1995 г., к 2000 г. уровень должен был выйти на отметку около -26,0 м БС, затем вследствие возрастающей роли морфометрического фактора скорость роста уровня должна была несколько замедлиться, и к 2020 г. уровень снова мог вырасти до отметки -25,0 м БС.

Учитывая неоднозначность прогнозов и примерно равную возможность как повышения, так и понижения уровня, предлагается искусственно регулировать гидрологический режим Каспия [91]. Как в период понижения, так и в период повышения уровня появилось большое количество проектов, направленных на стабилизацию уровня

Каспийского моря. Это и нереализованные проекты переброски части стока северных рек в Каспий, и неудачно реализованный проект отделения от моря дамбой залива Кара-Богаз-Гол, и частично реализованный проект строительства защитных дамб вдоль побережья Каспийского моря и т. д.

8.2. Методические подходы при сверхдолгосрочном прогнозировании уровня моря

Проблемам разработки сверхдолгосрочных прогнозов УКМ посвящено большое количество работ [1–4, 6, 7, 13, 14, 16, 19, 26, 47, 49, 54, 55, 63, 68, 76, 78, 82, 93–95], при этом используются различные подходы, которые можно условно разделить на две большие группы: физико-статистические и вероятностные.

Физико-статистические методы основаны на установлении асинхронных корреляционных связей между колебаниями УКМ и факторами, их обуславливающими. Заблаговременность прогноза в данном случае определяется временем запаздывания хода уровня моря по отношению к характеристикам, с которыми устанавливается связь (например, количественным показателям атмосферной циркуляции). Поискам таких связей были посвящены исследования Н.А. Белинского, Г.П. Калинина, А.А. Гирс, Б.А. Аполлова, И.М. Соскина, Б.А. Шлямина, В.С. Антонова, М.С. Эйгенсона, К.И. Смирновой, В.Н. Малинина, А.В. Мещерской, Р.Е. Никоновой, Е.С. Нестерова, З.К. Абузярова и многих других.

Следует отметить, что предсказуемость наблюдаемых вариаций в многолетнем ходе УКМ изучена слабо. Это связано с двумя основными причинами. Во-первых, ряды наблюдений ограничены, и для их анализа необходимы методы, дающие относительно эффективные результаты при коротких рядах наблюдений. Во-вторых, изучение предсказуемости тесно связано с решением задачи оптимального линейного прогноза. Процесс считается предсказуемым, если между предиктантом и предикторами существует статистически значимая связь. Относительно высокая предсказуемость может быть связана с двумя факторами: медленным изменением прогнозируемой характеристики во времени или присутствием в ее ходе хорошо выраженных циклических составляющих, которые выявляются с помощью метода корреляционно-спектрального анализа.

Основная проблема при разработке сверхдолгосрочного прогноза УКМ заключается в том, что для построения надежного научно обоснованного метода необходимо найти такие внешние факторы

(предикторы), изменения которых опережали бы изменения уровня моря или составляющих водного баланса на срок не менее упреждения (заблаговременности прогноза). Найти такие предикторы бывает трудно, поэтому исследователи часто прибегают к методу экстраполяции, что также представляет сложную задачу.

Более строгую теоретическую основу имеют вероятностные методы прогнозов. Исходя из того, что многолетние колебания гидрометеорологических характеристик, определяющих изменения основных составляющих водного баланса Каспия, в значительной мере имеют вероятностную природу, то, естественно, и прогноз уровня осуществляется в вероятностной форме. Стохастичность и слабая предсказуемость многолетней динамики УКМ вынуждает оперировать в вероятностных терминах характеристик будущего режима составляющих водного баланса. Суть такого подхода состоит в вероятностном описании колебаний уровня моря исходя из представлений о порождаемых их климатических и гидрологических факторах как о стохастических процессах. Теоретические основы вероятностного метода были заложены в работах С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [52], Д.Я. Ратковича [73, 74] и др. Расчеты вероятностных изменений уровня Каспийского моря на длительную перспективу, основанные на водно-балансовом методе, выполнялись Г.П. Калининым, С.Н. Крицким, Д.Я. Ратковичем, В.Ю. Георгиевским, И.А. Шикломановым, М.В. Болговым и другими.

К этой группе можно отнести и современные гидродинамические модели, которые учитывают большое число факторов и опираются на известные физические законы. Однако и они имеют ограничения, связанные с недостаточным пространственным разрешением, и исследователи вынуждены использовать приближенное описание мелкомасштабных (подсеточных) физических процессов.

В вероятностных методах прогноза (расчета) в качестве модели колебания УКМ используется уравнение водного баланса. Предполагается, что статистические характеристики основных составляющих водного баланса на многолетний период, для которого необходимо определить возможные изменения уровня, известны. При этом принимается гипотеза о стационарности изменчивости климатических процессов. Учитывая высокий уровень неопределенности в отношении возможных изменений климатических условий в бассейне Каспия и параметров его водного баланса, для оценки возможных изменений УКМ применяются сценарные подходы [23, 69, 92].

Вероятностный прогноз уровня моря дает математическое ожидание уровня и вероятные отклонения от него. При этом оценивается лишь положение уровня внутри некоторого интервала отметок в расчетный момент времени, длительность стояния уровня выше или ниже

заданной отметки и т. д. Границы доверительного интервала определяют интервал отметок уровня, внутри которого уровень будет находиться в заданный момент времени с соответствующей вероятностью.

Ввиду отсутствия календарных климатических прогнозов оценка статистических характеристик осуществляется на основе принятия тех или иных гипотез. В большинстве исследований, посвященных моделированию, в основу положена гипотеза стационарности естественных климатических условий. При этом было показано, что даже при устойчивых во времени нормах основных составляющих водного баланса моря – суммарного притока речных вод и слоя видимого испарения, – колебания уровня в результате их случайных вариаций около среднего значения будут весьма существенны. Разработаны соответствующие методы для расчета статистических характеристик уровня. Однако в настоящее время правомерность концепции стационарности многолетних колебаний гидрометеорологических характеристик подвергается сомнению в связи с глобальным потеплением. Вероятностно-статистические прогнозы дают широкую полосу вероятных отклонений положения уровня в каждый год прогнозируемого периода, что затрудняет их практическое использование.

Палеогеографические (аналоговые) методы прогноза состоят в разработке сценария климата в будущем на основе реконструкции климата прошлого и экстраполяции полученных результатов с помощью тех или иных математических методов [79, 81, 83, 84]. В аналоговом методе воспроизводится реальная ситуация, которая имела место в прошлом. Но это накладывает ограничения на использование метода, так как он не позволяет учесть влияние на изменение климата принципиально новых факторов, например, таких как деятельность человека.

Прогнозы, основанные на методе климатических аналогий (палеоаналогах) разрабатывались М.И. Будыко и др., А.А. Величко, С.И. Варущенко, В.А. Зубаковым и др. Так, по Величко наступившее потепление климата будет способствовать значительному росту уровня Каспийского моря. По Зубакову [43] на ближайшие 10–13 лет (исходный момент – начало 1990-х гг.) уровень Каспийского моря будет подниматься. М.И. Будыко и др. рассчитали изменения уровня моря по отношению к 1986 г. на основе палеоаналогов и получили следующие прогностические оценки изменения уровня моря: к 2000 г. падение уровня на 0,3 м; к 2025 г. рост уровня на 0,4 м; к 2050 г. рост уровня на 3,9 м.

Свердолгосрочный прогноз, основанный на выявлении скрытой периодичности в многолетнем ходе уровня моря и факторах, его обуславливающих, был разработан К.И. Смирновой [88]. Для выявления скрытых периодичностей в многолетнем ходе УКМ был применен

спектрально-корреляционный метод анализа. Это позволило выявить наличие циклов с 3, 5–6, 7, 11–12, 17–19-летней продолжительностью как в кривых хода уровня моря и основных составляющих водного баланса моря, так и в кривых хода индексов атмосферной циркуляции в пределах атлантико-евразийского сектора Северного полушария. Анализ взаимно-корреляционных функций показал, что наибольшие коэффициенты корреляции между колебаниями уровня моря и циркуляцией атмосферы получились при сдвигах 5 и 19 лет.

На основе использования цикличности в многолетнем ходе УКМ и показателей атмосферной циркуляции К.И. Смирновой был разработан прогноз изменений УКМ на 18 лет [88]. Для этого была использована статистическая связь между скользящими интегральными величинами УКМ и, соответственно, такими же величинами показателей индексов циркуляции Белинского, рассчитанными для 8 районов Северного полушария. Связь характеризовалась коэффициентом корреляции 0,95. Прогноз, составленный в 1972 г., пожалуй, лучше других уловил дату перелома в ходе уровня моря с фазы падения на фазу подъема. Расчетный минимум уровня запоздал всего на 3 года относительно фактического, который наблюдался в 1977 г., и оказался на 13 см ниже фактического.

Используя тот же принцип, З.К. Абузяров [2,4] в 1997 г. разработал сверхдолгосрочный прогноз на 18 лет (до 2014 г.), а в 2005 г. – на 12 лет (до 2017 г.). На рис. 8.1 и 8.2 представлены графики хода фактического и прогнозируемого уровня на 12 и 18 лет.

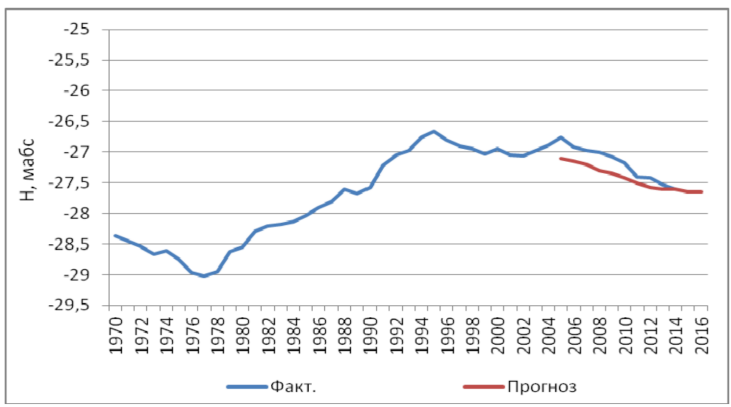


Рис. 8.1. Сверхдолгосрочный фоновый прогноз УКМ на 12 лет, составленный в 2005 г., и фактический ход УКМ.

В соответствии с прогнозом на 12 лет, уровень моря будет колебаться в пределах абсолютных отметок -27,08–27,58 м БС (от 92 до

42 см в относительных отметках) с небольшой тенденцией к понижению со средней скоростью около 4 см/год. Ожидается, что к 2016 г. уровень моря может понизиться в среднем на 50 см, достигнув абсолютной отметки -27,50 м БС. Данный прогноз в целом согласуется с прогнозами, независимо разработанными в ГГО и ГГИ примерно на эти же сроки.

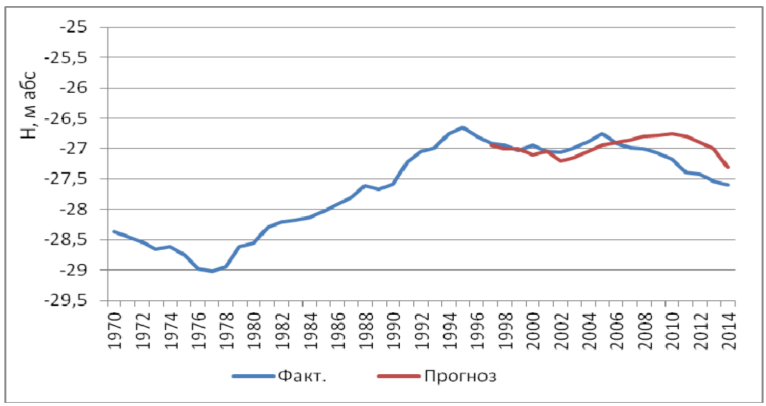


Рис. 8.2. Сверхдолгосрочный фоновый прогноз УКМ на 18 лет, составленный в 1997 г., и фактический ход УКМ.

Что касается сверхдолгосрочного прогноза на 18 лет, то, как видно на рис. 8.2, хорошее согласование прогностических и фактических значений сохранялось в течение 7 лет; в последующие годы прогноз УКМ оказался завышенным. Вместе с тем прогнозы на 12 и 18 лет достаточно удовлетворительно уловили тенденцию изменения хода уровня несмотря на большую заблаговременность. Приведенные здесь прогностические оценки характеризуют только фон. В отдельные годы уровни могут существенно отклоняться от указанных выше средних отметок.

8.3. Фоновые прогнозы уровня, основанные на учете общей циркуляции атмосферы (Гидрометцентр России)

8.3.1. Метод прогноза уровня на 5 лет (метод Белинского – Калинина – Смирновой)

Метод сверхдолгосрочного прогноза уровня на 5 лет впервые был разработан Н.А.Белинским и Г.П.Калининым [12, 13]. В его основу положена гипотеза о том, что многолетние колебания УКМ формируются в течение продолжительного времени различными по характеру

атмосферными процессами. При этом реакция УКМ на те или иные воздействия атмосферных процессов наступает не сразу, а с некоторым запаздыванием. Время запаздывания интерпретируется как характерное время адаптации УКМ к изменяющимся формам циркуляции атмосферы и имеет прогностическое значение. Оно может варьировать в широких пределах – от года до нескольких лет – и зависит от того, процессы каких пространственно-временных масштабов в конкретном случае рассматриваются. На основе этой гипотезы изучались асинхронные статистические связи между характеристиками колебаний УКМ и предшествующими им показателями атмосферной циркуляции. Белинскому и Калинину удалось получить достаточно тесную асинхронную связь между колебаниями среднегодовых значений УКМ и индексами циркуляции атмосферы в форме Белинского, взятыми над атлантико-европейским регионом. Полученная связь была положена в основу метода сверхдолгосрочного прогноза УКМ на 5–6 лет. Для количественной характеристики развития атмосферных процессов использовались индексы Белинского, рассчитанные для восьми районов по схеме Вительса (рис. 8.3).

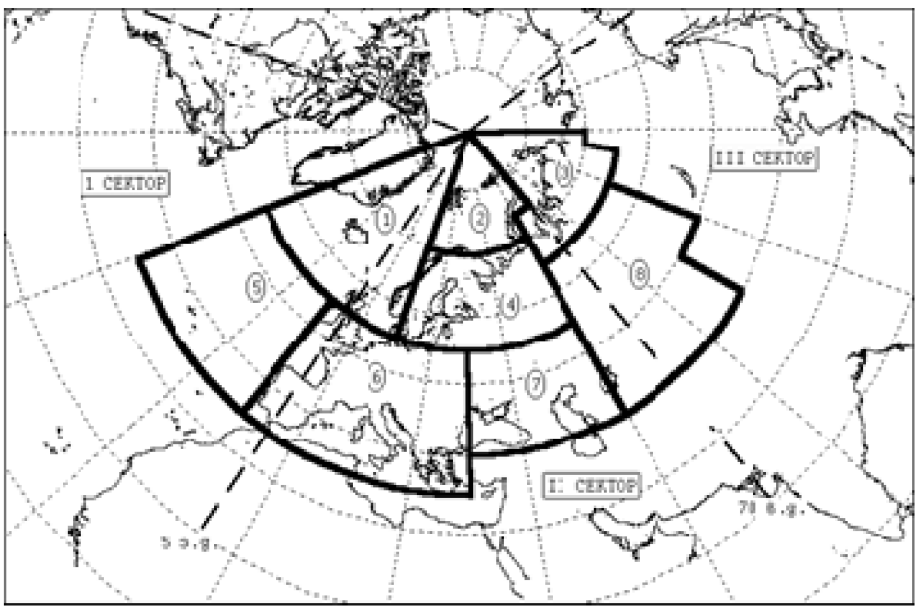


Рис. 8.3. Районы Вительса для расчета индексов Белинского (цифры в кружках –номера районов).

Исходя из анализа конкретных особенностей атмосферных процессов в отдельных районах Северного полушария дается соответствующая интерпретация статистическим зависимостям. При этом делается два основных вывода. Первый заключается в том, что информативность того или иного района меняется во времени и связана с климатическими особенностями Северного полушария. Второй вывод заключается в том, что атмосферные процессы в разных районах, независимо от их географического положения, комплексно воздействуют на процессы многолетних колебаний УКМ. При этом в различные периоды времени превалирующая роль районов меняется в зависимости от климатических условий рассматриваемого периода.

Так, например, в период с 1930 по 1970 г. превалирующую роль играл 5-й район, расположенный в Северной Атлантике и включающий азорский максимум. В многолетних изменениях циклонической и антициклонической деятельности над Северным полушарием были выявлены циклические колебания во временном ходе индексов Белинского. Исследование зависимости цикло-антициклонической деятельности от солнечной активности позволило Белинскому подметить в районе азорского максимума 12-летнюю цикличность, с которой связаны колебания стока Волги и других рек ЕТР, а следовательно, и колебания уровня Каспийского моря. На этой основе Белинским было получено прогностическое уравнение связи между интегральными значениями отклонения от нормы индекса циркуляции атмосферы и уровнем Каспийского моря

$$H_{прог.} = 352 - 0{,}83 \sum_{1900}^{n-6} (i + 320), \qquad (8.1)$$

где $H_{прог.}$ – уровень моря на момент прогноза; $\sum_{1900}^{n-6} (i + 320)$ – сумма интегральных отклонений от нормы значений индекса атмосферной циркуляции в районе азорского максимума в (n–6) году (n – текущий год); i – индекс циркуляции. Пользуясь уравнением (8.1), по соответствующим значениям индекса циркуляции i вычисляются средние годовые величины уровня моря на каждый год. Зависимость (8.1) успешно использовалась в оперативной работе в течение многих лет. В 1946 г. с помощью этого уравнения впервые был дан прогноз изменений уровня моря на 5 лет, и в дальнейшем этот прогноз выпускался ежегодно.

Однако в последние годы вычисленные по зависимости (8.1) значения уровня моря систематически занижались. Причина этого заключалась в том, что в уравнении (8.1) не учитывался «реактивный фактор» в изменении уровня моря за счет изменения площади моря. Дело

в том, что при одних и тех же объемах поверхностного притока и испарения, но при разных стояниях уровня, приращение уровня будет разным за счет переменной площади моря. Г.П. Калинин предложил формулу, учитывающую переменную площадь моря

$$\Delta H_i = \left[(F_0/F_i)(Z-P)_i\right], \tag{8.2}$$

где F_0 – площадь моря при неизменном стоянии уровня, равная 398 тыс км^2; F_i – площадь моря, соответствующая стоянию уровня конкретного года в определенном интервале времени; Z – испарение с поверхности моря за конкретный год в мм слоя; P – осадки на зеркало моря в мм слоя.

К.И. Смирнова [88] произвела уточнение формулы (8.1) для приращений уровня за период прогноза

$$\Delta H_{n+6} = f(\Delta \sum \Delta J)_{n-6}, \tag{8.3}$$

где ΔH_{n+6} – приращение уровня за последующие 6 лет; $\Delta \sum \Delta J$ – изменение интегральной суммы отклонений индекса циркуляции от нормы за предшествующие 6 лет.

Эти уточнения сводились к трем основным моментам. Расчеты по формуле (8.2), выполненные Калининым, показали, что интеграл приращения уровня за счет переменной площади с 1900 по 1967 г. составил 127 см, что и явилось одной из причин несовпадения прогнозируемых значений уровня с фактическими значениями по уравнению (8.1). Другой причиной явилось то, что в уравнении (8.1) нашли отражение особенности векового хода как в ходе показателей атмосферной циркуляции, так и в колебаниях уровня моря.

Третья причина регулярного занижения вычисленных значений по формуле (8.1) заключалась в том, что это уравнение учитывает перенос влаги, поступающей на ЕТР только с Северной Атлантики, и не учитывается перенос влаги из других районов Северного полушария. Так, например, испарение с поверхности Каспийского моря связано в основном с процессами в районе отрога сибирского антициклона. Учет изменения атмосферных процессов на большом пространстве Северного полушария позволяет полнее характеризовать изменения климата в бассейне моря и, как следствие, изменения основных составляющих его водного баланса и уровня моря.

Одно из преимуществ составления прогностических зависимостей в терминах приращений состоит в том, что интервалы допустимых погрешностей сужаются. Так, величины средних квадратичных отклонений среднегодового уровня моря и его изменений за пятилетие составляют, соответственно, 90 и 36 см.

По методу Белинского – Калинина, впоследствии уточненного К.И. Смирновой, с 1951 по 1982 г. в Гидрометцентре России официально выпускались прогнозы УКМ на 5 лет, которые неплохо оправдывались (рис. 8.4). Средняя оправдываемость прогнозов при допустимой погрешности ±40 см с 1966 по 1983 г. составила 78 %. Однако к концу указанного периода методика, в силу ее эмпирической природы, стала давать неудовлетворительные результаты, и в 1982 г. официальный выпуск прогнозов на 5 лет был прекращен.

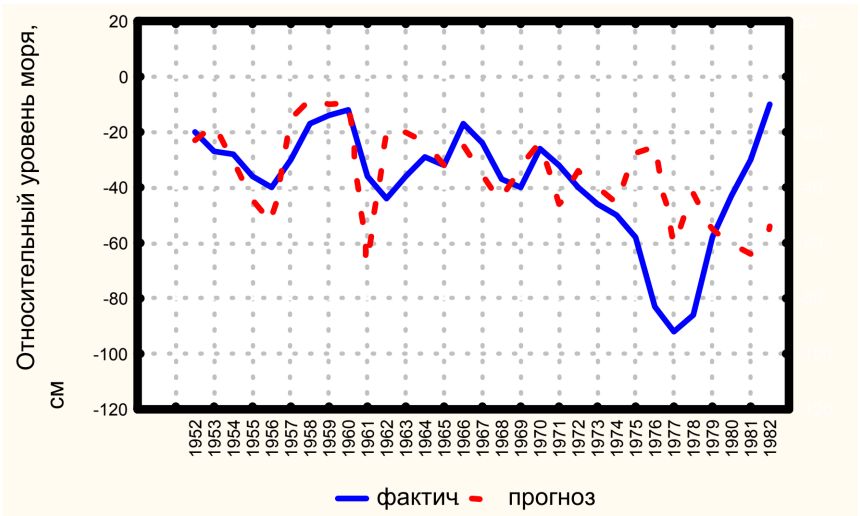


Рис. 8.4. Сопоставление фактического и прогнозируемого уровня Каспийского моря по методу Белинского – Калинина – Смирновой.

8.3.2. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря на 6, 12 и 18 лет на основе усовершенствованного метода Белинского – Калинина – Смирновой

Практический опыт показывает, что основным недостатком эмпирических методов прогноза является их относительно короткая жизнеспособность, обусловленная нелинейностью в многолетнем ходе уровня моря, из-за чего со временем точность прогноза уровня ухудшается. Такие методы достаточно успешно работают в устойчивых климатических условиях. При смене климатических эпох возникает необходимость в уточнении метода. В последние годы в Гидрометцентре России были выполнены исследования по усовершенствованию метода Белинского – Калинина – Смирновой [1–4]. Суть усовершенствования

заключалась в использовании более длинных рядов наблюдений и более информативных предикторов, характеризующих циркуляционные процессы над крупными территориями Северного полушария.

В усовершенствованной методике в качестве предикторов вместо индексов циркуляции Белинского были использованы коэффициенты разложения полей аномалий приземного атмосферного давления в ряды по естественным ортогональным функциям (ЕОФ). Этот выбор обусловлен тем, что индексы циркуляции Белинского характеризуют атмосферные процессы над ограниченными районами (районами Вительса), учитывают интенсивность цикло-антициклонической деятельности и не отражают направление переноса воздушных масс.

Коэффициенты разложения по ЕОФ характеризуют процессы планетарного масштаба и обеспечивают лучшую физическую интерпретацию исходных полей. Они характеризуют не только интенсивность циркуляции, но и преобладающее направление воздушных потоков. Как известно, ряды разложения полей по ЕОФ быстро сходятся, что позволяет ограничиться первыми несколькими членами ряда разложения и меньшим количеством предикторов.

Наиболее надежными для прогностических целей являются средние годовые значения УКМ и количественных показателей атмосферной циркуляции. Для разработки методики использовались данные средних годовых значений уровня моря по пункту Махачкала, обеспечивающему наиболее длинный ряд однородных наблюдений на российском побережье Каспийского моря. В качестве основного критерия изменчивости в ходе уровня и показателей атмосферной циркуляции брались приращения их в смежные годы, так называемые первые разности, или «флюктуационные индексы».

Многолетний ход среднегодовых значений УКМ относится к классу нестационарных нелинейных процессов, так как он не имеет фиксированного среднего значения. Однако если временной ход представить в виде разностей $H_i - H_{i-1}$ межгодовых значений уровня моря, то процесс приближается к стационарному и его можно описать средним значением, дисперсией и автокорреляционной функцией или, что эквивалентно, функцией спектральной плотности.

Следует отметить, что кривая многолетнего хода УКМ для пункта Махачкала близко соответствует кривой многолетнего хода среднего УКМ. Это подтверждается установленной в ГОИНе тесной связью между средними годовыми значениями уровня по посту Махачкала и по данным 4–7 опорных постов на море. Эта связь имеет вид

$$H_{сред.год.} = H_{ср.год.МХК} - 1. \qquad (8.4)$$

Коэффициент корреляции связи равен 0,95. Уравнение (8.4) дает возможность проводить мониторинг среднего уровня Каспия на основании минимально необходимых данных наблюдений уровенного поста Махачкала. Нуль поста Махачкала достаточно точно совпадает с единым нулем постов Каспийского моря, имеющим отметку -28,00 м относительно нуля Главной высотной основы (нуля Балтийской системы, БС).

С физической точки зрения годовые приращения уровня характеризуют отток или приток воды в море, т. е. изменения водного баланса моря. Кривая приращений УКМ с 1901 по 2011 г. представлена на рис. 8.5.

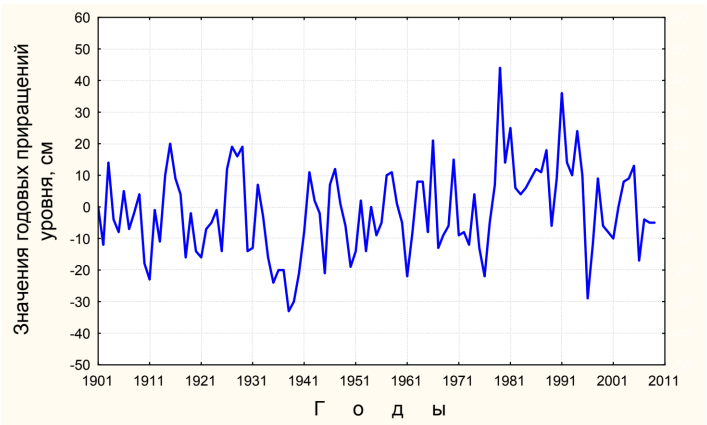


Рис. 8.5. Кривая хода годовых приращений УКМ.

Анализируя рис. 8.5 можно заключить, что годовые приращения в разные периоды неодинаковы. Вблизи периодов максимума значения годовых приращений малы по сравнению с периодами подъема или спада. При этом наибольший интерес вызывают максимальные по абсолютной величине приращения УКМ и показатели атмосферной циркуляции.

Существенное преимущество построения прогностических зависимостей в терминах годовых приращений состоит, во-первых, в том, что интервалы допустимых погрешностей сужаются, а во-вторых, в том, что временной ряд приближается к стационарному, что позволяет применять к нему линейные методы анализа. Последний вывод подтверждается рис. 8.6, на котором представлена гистограмма эмпирического распределения значений годовых приращений УКМ с наложенной на нее кривой теоретического распределения.

Как видно из рис. 8.6, соответствие между теоретическим и эмпирическим распределением достаточно хорошее. Это дает основание применять к анализу исходных рядов методы линейной статистики. В дальнейшем из ряда годовых приращений УКМ был сформирован ряд предиктанта.

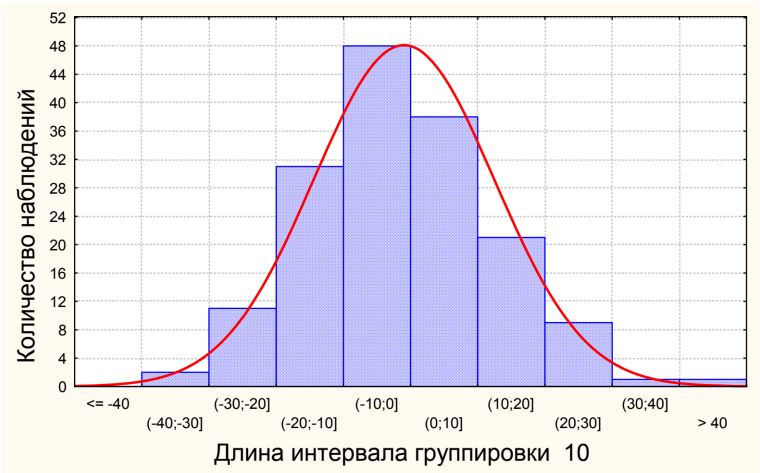


Рис. 8.6. Гистограмма распределения годовых приращений УКМ с наложенной нормальной кривой (теоретическое распределение Гаусса).

Для характеристики атмосферных процессов над Северным полушарием использовались коэффициенты разложения B_i полей аномалий приземного давления в ряды по ЕОФ. Разложение исходных полей по ЕОФ приводит к системе ортонормированных функций, значения которых зависят от статистических свойств рассматриваемых полей. Поиск собственных векторов и собственных чисел осуществляется путем решения матричного уравнения вида

$$R_x U_i - \lambda_i U_i = 0\,, \tag{8.5}$$

где R_x – ковариационная матрица размером $m \times n$; U_i – собственный вектор матрицы ковариаций; λ_i – соответствующие собственному вектору собственные числа.

Для нахождения m собственных векторов, соответствующих m собственных чисел, решается m систем линейных уравнений. Совокупность собственных векторов составляет базис, с помощью которого осуществляется разложение полей исходных данных

$$U^{/} \cdot \varphi_i = Z_i, \tag{8.6}$$

где $U^{/}$ – транспонированная матрица U размером $m \times m$; φ_i – i-й случайный вектор центрированных и нормированных исходных данных; Z_i – вектор главных компонент, являющийся результатом линейного преобразования.

Поскольку собственные вектора ортогонально нормированы, главные компоненты поля являются статистически независимыми. Составляющие вектора Z_i для p-й компоненты разложения определяются по формуле

$$Z_{ip} = \sum_{k=1}^{m} U_{pk} \cdot \varphi_{ik}, \qquad p = 1, .., m, \tag{8.7}$$

где Z_{ip} – составляющие p-той компоненты разложения; U_{pk} – весовые коэффициенты, отражающие вклад p-й компоненты; k-й собственный вектор ковариационной матрицы; φ_{ik} – i-й случайный вектор нормированных исходных данных k-го объекта. Значения U_{pk} изменяются от объекта к объекту, но не зависят от времени. Системы функций U_{pk} часто представляются как функция координат x_k, y_k для k-го объекта и носит название базисной функции. Составляющие вектора-строки матрицы $Z\left[z_{k1}, z_{k2}, .., z_{kp}, ..., z_{kn}\right]$, где n – длина исходных рядов, могут быть представлены как функции времени $z_{kj} = f(t) = z_k(t)$. В связи с вышеизложенным, формулу (8.7) можно представить в виде

$$\varphi(x,y,t) = \sum_{k=1}^{m} U_k(x,y) \cdot z_k(t). \tag{8.7}$$

Если разложению подвергнуть не корреляционную, а ковариационную матрицу, то в этом случае сумма дисперсий главных компонент будет равна сумме дисперсий рядов, т. е.

$$\sum_{p=1}^{m} \sigma_{Z_p}^2 = \sum_{j=1}^{m} \sigma_{X_j}^2 . \tag{8.8}$$

Такое представление позволяет понять суть метода главных компонент, т. к. эти некоррелированные линейные комбинации исходных величин отражают всю дисперсию, заключающуюся в m переменных исходного массива данных. Несколько первых собственных чисел $(\lambda_1 > \lambda_2 > ... > \lambda_m)$ учитывают основную часть суммарной дисперсии исходного поля, поэтому при анализе результатов разложения исходных полей по ЕОФ особое внимание уделяется первым собственным

числам и соответствующим им компонентам. Долю информации, заключенной в первых p компонентах по отношению ко всей суммарной информации о поле, можно оценить с помощью соотношения

$$S = \sum_{k=1}^{p} \lambda_k / \sum_{s=1}^{m} \lambda_S \,, \tag{8.9}$$

где числитель равен сумме дисперсий, приходящих на p первых главных компонент, а знаменатель равен суммарной дисперсии исходного поля. Задавая необходимую точность значением S, (например, S = 0,70–0,80), можно установить число первых компонент, которые следует учитывать, чтобы сохранить основной объем анализируемой информации, сохранив при этом ее основное содержание.

При изучении процессов большого временного масштаба, каким являются многолетние колебания УКМ, необходимо учитывать атмосферные процессы большого масштаба – масштаба полушария. При этом используются интегральные характеристики процессов, осредненные за ряд лет, которые описывают общую картину явления, или, как говорят, основной фон. Более детальное исследование процессов над отдельными регионами, как правило, связывается с характеристиками основного фона. Поэтому для решения задач сверхдолгосрочного прогноза необходимо знать некоторые совокупности параметров, определяющих основу общего циркуляционного механизма, главную часть которого составляет зональная и меридиональная циркуляция.

Среднемесячные значения коэффициентов разложения B_i начиная с 1910 г. регулярно рассчитываются в отделе морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России для пяти секторов Северного полушария (рис. 8.7).

Сектор I охватывает Северную Атлантику, сектор II – Европу, сектор III –Азию, сектор IV – северную часть Тихого океана и сектор V – Северную Америку. В качестве показателя изменчивости атмосферных процессов использовались коэффициенты разложения полей аномалий приземного давления в ряды по ЕОФ, рассчитанные для I, II и III секторов, наиболее информативных секторов Северного полушария, охватывающих атлантико-евразийский регион [28,29]. Кроме того, рассматривался VI сектор, представляющий комбинацию I и II секторов. Для него коэффициенты разложения брались как средние из значений коэффициентов I и II секторов. В каждом из секторов в расчет принимались первые три коэффициента разложения, характеризующие среднее значение аномалии давления B_0 и зональную B_1 и меридиональную B_2 циркуляцию. Знак коэффициентов B_1 и B_2 указывает на направление воздушных потоков, а их модуль – на интенсивность. Из этих коэффициентов в дальнейшем формировались ряды предикторов.

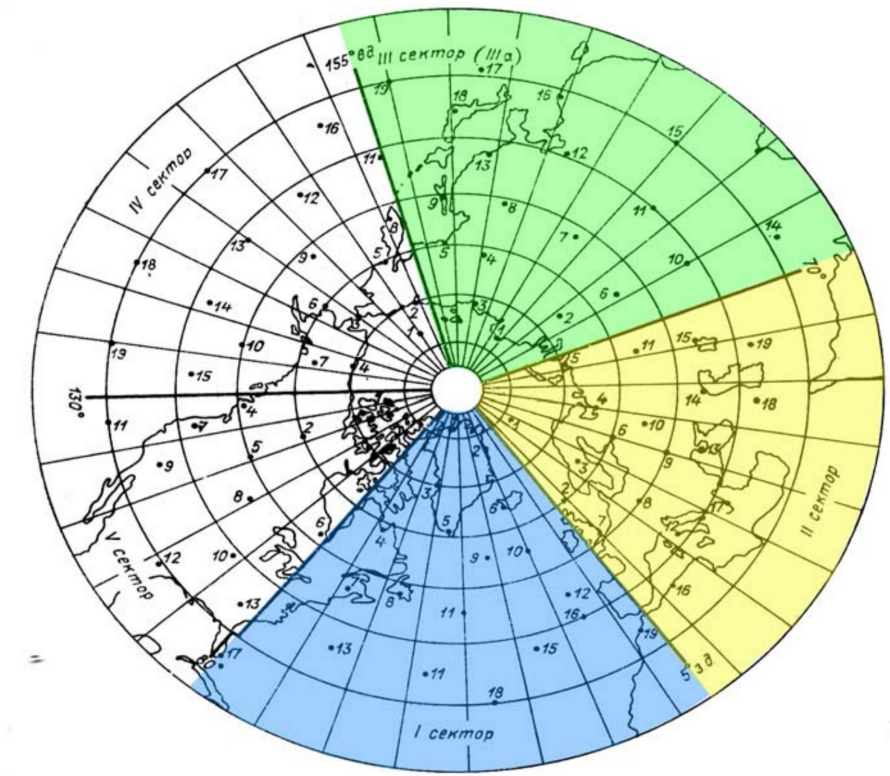


Рис. 8.7. Сектора для расчета коэффициентов разложения по ЕОФ.

Как известно, разложение полей в ряд по ЕОФ позволяет с помощью первых трех собственных векторов корреляционных матриц представить в компактном виде основную информацию об этих полях с точностью до 91–95 %. Первые члены ряда, содержащие информацию о начальной фазе и амплитуде крупномасштабных атмосферных процессов, одновременно являются носителями долговременной метеорологической памяти.

Отклонения от нормы коэффициентов разложения, сохраняющие знак в течение значительного времени, приводят либо к понижению уровня, либо к его повышению. Поэтому естественно предположить, что среднему значению коэффициента разложения должно отвечать такое состояние моря, при котором не происходит ни понижения, ни повышения уровня, т. е. приходная часть водного баланса моря уравновешивается расходной частью. Учитывая, что связь между

коэффициентами разложения и годовыми приращениями УКМ принимается линейной, последовательное суммирование отклонений значений коэффициентов разложения от нормы должно давать величины, соответствующие ходу УКМ.

Известно, что увеличение заблаговременности прогноза прежде всего связано с учетом наиболее крупных и устойчивых особенностей в многолетнем ходе УКМ и атмосферных процессов. Для этого к исходным рядам была применена процедура скользящего осреднения по различным интервалам времени. В результате из исходных рядов была исключена низкочастотная (вековой ход) и высокочастотная (с периодом менее 5 лет) изменчивости, после чего формировались ряды предикторов и предиктанта путем скользящего суммирования по 5 или 6-летиям. При этом кривая хода накопленных сумм годовых приращений уровня повторяет характер кривой хода накопленных сумм коэффициентов разложения, но с определенными сдвигами относительно друг друга. Соответствие циклических колебаний УКМ и атмосферной циркуляции служит доказательством общности причин, обуславливающих эти колебания.

Подготовка рядов предикторов и предиктанта

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

Известно, что любой временной ряд представляет собой сумму достаточно гладкого тренда и случайной компоненты типа «белый шум». Для выделения трендовой составляющей (векового хода) временные ряды сглаживались методом скользящего осреднения по 10-летиям. Затем, после исключения из исходного ряда векового хода, оставшийся временной ряд сглаживался по 5-летиям, чтобы подавить высокочастотную часть спектра.

Преимущество анализа сглаженных рядов заключается в том, что позволяет более детально выявить статистические закономерности колебаний низкочастотной части спектра, которые в исходной реализации могут быть замаскированы высокочастотными составляющими. При сглаживании скользящим осреднением по 10 и 5-летиям характерная изменчивость рядов в низкочастотной области спектра колебаний сохраняется. С увеличением интервалов осреднения увеличивается относительная роль атмосферных процессов в долгопериодных колебаниях УКМ.

К исходным рядам была применена процедура скользящего осреднения по различным интервалам времени. Эта процедура выполнялась следующим образом. Сначала исключался вековой ход путем скользящего десятилетнего осреднения исходных рядов. Затем значения векового хода вычитались из исходных рядов, а разности сглаживались по пятилетиям. Оставшийся ряд условно назывался расчетным рядом. В результате выполненных процедур оказалось, что многолетний ход сглаженных годовых приращений УКМ имеет квазипериодический характер и в основных чертах повторяет характер хода сглаженных рядов коэффициентов разложения по ЕОФ, но с определенными временными сдвигами (рис. 8.8, 8.9).

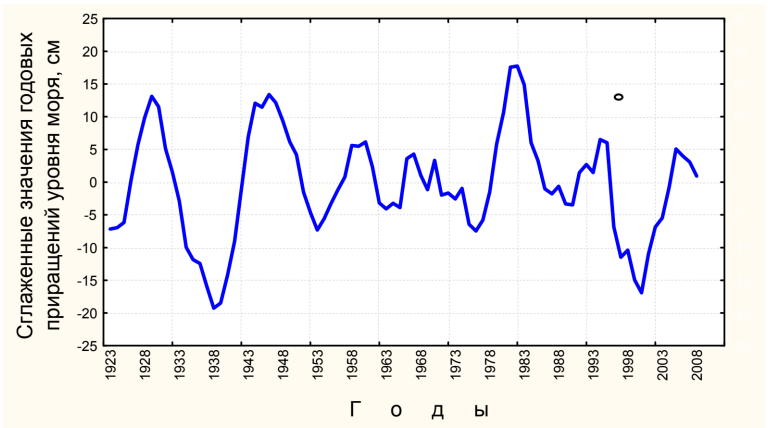


Рис. 8.8. Годовые приращения УКМ, сглаженные по 5-летиям (см).

Традиционно изучение межгодовой изменчивости различных гидрометеорологических процессов проводится по рядам средних годовых значений. По внешнему виду эти ряды похожи на последовательность стохастических колебаний различной продолжительности, часто называемых циклами с незначительными положительными и отрицательными трендами. Отдельные всплески на периодограмме, т. е. циклы, носят случайный характер.

Интервал сдвига определялся с помощью автокорреляционной функции, рассчитанной для сглаженных рядов годовых приращений УКМ. На рис. 8.10 приведен пример корреллограммы, вычисленной по временному ряду средних годовых значений приращений уровня моря, сглаженных путем 5-летнего осреднения. Коррелограмма быстро затухает на начальном участке и затем продолжает флюктуировать с незначительными отклонениями от нуля.

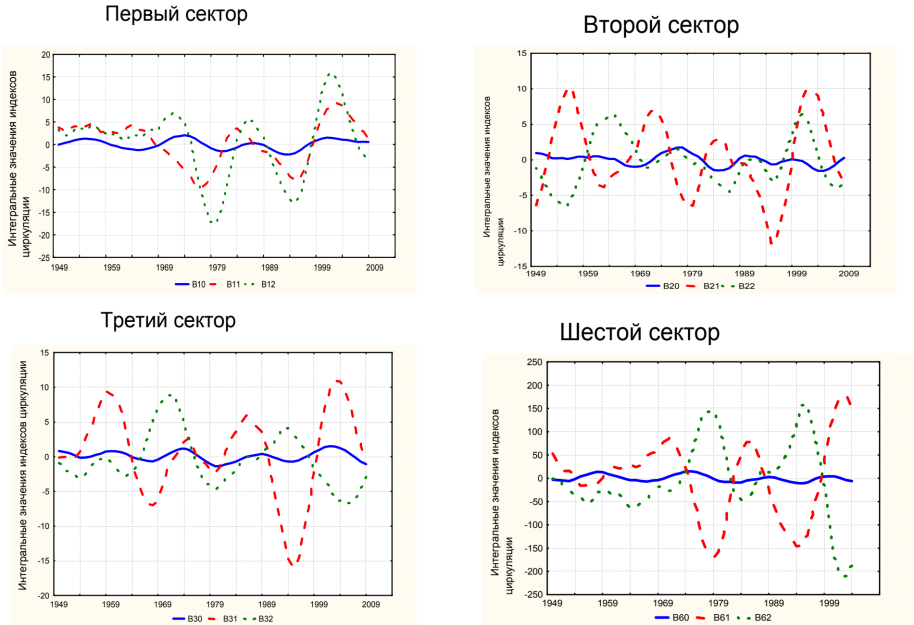


Рис. 8.9. Кривые временного хода первых трех коэффициентов ряда разложения: B_0 (синяя линия), B_1 (красный пунктир) и B_2 (зеленый пунктир).

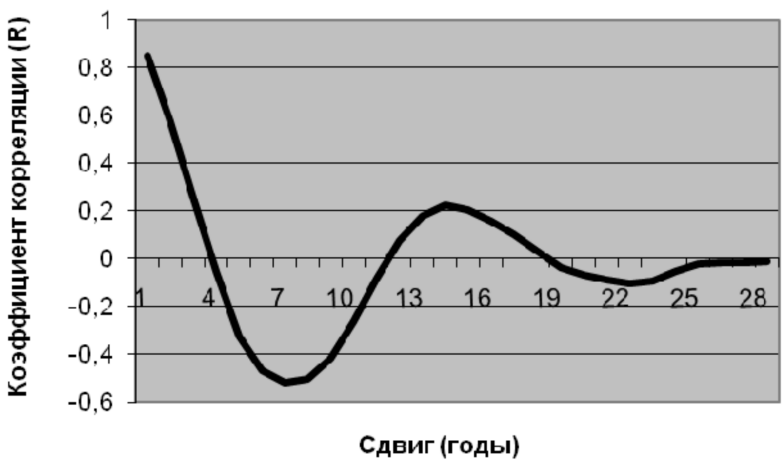


Рис. 8.10. Корреляционная функция сглаженной кривой многолетнего хода годовых приращений УКМ.

Коэффициенты корреляции переходят через нулевые значения на сдвигах 4–5, 11–12, 18–19 лет. Это обстоятельство имеет прогностическое значение и позволяет оценивать будущие изменения УКМ по предистории атмосферных процессов. Происхождение этих циклов имеет разные причины. В частности, 4–5-летние циклы могут быть обусловлены североатлантическим колебанием атмосферы, 12-летние циклы – солнечной активностью, а 18-летние циклы, по-видимому, обусловлены долгопериодными динамическими взаимодействиями в системе океан – атмосфера.

На рис. 8.11 представлена функция спектральной плотности $S_{\Delta H}$ (ω), дающая представление о дисперсии колебаний в многолетнем ходе ΔH.

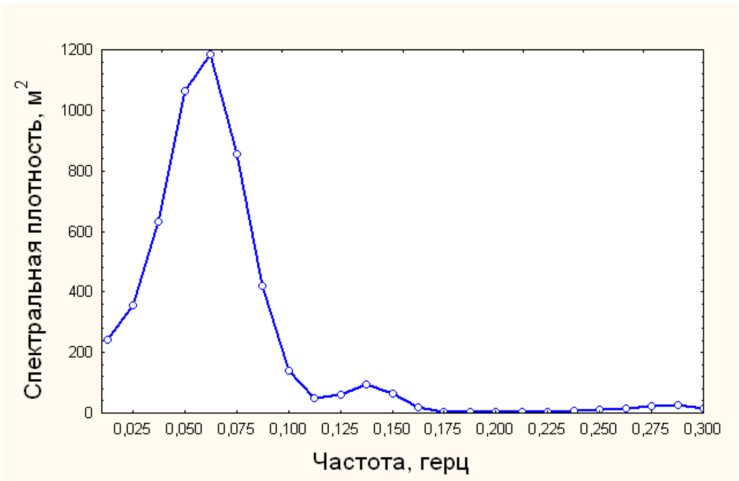


Рис. 8.11. Функция спектральной плотности сглаженной кривой годовых приращений уровня моря.

На спектрах сглаженных рядов не обнаруживается большого количества пиков, как на исходных рядах. На всех спектрах выделяются статистически значимые максимумы, сосредоточенные в интервале периодов 10–40 лет.

Ряды предикторов и предиктанта формировались путем скользящего суммирования рассматриваемых величин по интервалам заблаговременности, т.е. по 5 или 6-летиям или другим интервалам. Установление меры тесноты связей между интегральными характеристиками уровня и показателей атмосферной циркуляции осуществлялось с помощью метода пошаговой множественной линейной регрессии вида

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^{m} b_j x_{ij} + \varepsilon_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + ... + b_m x_{im} + \varepsilon_i , \qquad (8.10)$$

где ε_i – вектор остатков (ошибок), которые не описывается уравнение регрессии; m – число независимых переменных.

Отбор наиболее значимых уравнений регрессии осуществлялся по схеме

$$(\sum \Delta H)_{t+\Delta t} = C_0 + a_i \cdot (\sum B_i)_t + d , \qquad (8.11)$$

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

Прогноз по данному уравнению может осуществляться в режиме скользящего оценивания параметров уравнения регрессии. Прогноз УКМ при этом приобретает адаптивный характер, учитывающий происходящие и уточняющие перспективные изменения факторов, формирующих уровенный режим Каспийского моря. Такой подход особенно эффективен, когда приходится иметь дело с относительно ограниченными выборками. Предикторы, отобранные для построения регрессионной прогностической модели, остаются неизменными до того момента, пока ежегодная их оценка показывает достаточную эффективность прогнозирования. Иными словами, если исходные накопленные суммы коэффициентов разложения брались за 1991–1996, 1992–1997 годы и т. д., то среднегодовые приращения УКМ рассчитывались за 1997–2002, 1998–2003 годы и т. д..

Было исследовано множество вариантов связей, которые в большинстве оказались значимыми. Задача состояла в том, чтобы среди них выбрать наиболее оптимальные. Построению уравнений регрессии предшествовала процедура отбора наиболее информативных предикторов B_i из числа первоначально закрепленных с тем, чтобы отобрать группу предикторов, имеющих наиболее высокую корреляцию с предиктантом. При этом исключались дублирующие и неэффективные предикторы.

Практическая реализация методики прогноза

В экспериментальном порядке было реализовано три модели априорной оценки прогноза УКМ на 5 и 6 лет. В первой модели в качестве предикторов использовались интегральные значения коэффициентов

разложения B_i, рассчитанные для 1 и 2-го секторов, во второй модели – для 3 и 6-го секторов и в третьей модели для 1, 2 и 3-го секторов. Для проверки прогностических возможностей моделей были выполнены расчеты на ряде, охватывающем период с 1931 по 2009 г. Оценка прогнозов осуществлялась в соответствии с Наставлением [75].

Оценки значимости и целесообразности применения прогностических уравнений осуществлялись на основе следующих статистических характеристик: детерминированного коэффициента корреляции R_d, среднеквадратичной ошибки прогноза (стандарт) S, критерия Фишера F, среднеквадратичного отклонения прогноза от нормы σ Практическая применимость (эффективность) метода оценивалась по отношению S/σ (табл. 8.1).

Таблица 8.1. Статистические оценки надежности прогностических уравнений (различные варианты)

	Δt	R	σ_y	S	S/σ_y	ρ	Q, %	N	n
Вариант 1	5	0,908	33,5	14,9	0,445	0,896	91	76	8
	5	0,903	33,1	15,1	0,454	0,903	87	76	8
	6	0,910	33,2	14,9	0,445	0,900	88	74	8
	6	0,914	37,3	16,1	0,431	0,904	90	74	8
	18	0,948	32,7	11,3	0,344	0,939	94	47	8
Вариант 2	5	0,967	23,7	6,8	0,288	0,958	90	66	9
	5	0,927	34,1	13,6	0,400	0,916	91	66	8
	6	0,930	33,9	13,3	0,390	0,920	90	64	8
	6	0,938	38,1	14,2	0,371	0,929	94	64	8
	18	0,943	29,8	10,7	0,357	0,934	94	40	5
	18	0,974	29,8	7,6	0,254	0,967	96	40	8

Примечания: Δt – заблаговременность прогноза в годах; R – коэффициент корреляции; σ_y - допустимая погрешность прогноза; S – среднеквадратичная ошибка прогноза; S/σ_y – эффективность прогноза; ρ – корреляционное отношение; Q – обеспеченность прогноза; N – длина выборки; n – количество предикторов.

Обобщенные результаты прогнозов на 5 и 6 лет по трем моделям представлены в табл. 8.2.

Анализ результатов расчетов показал, что параметры уравнений регрессии в каждой из моделей отличаются друг от друга в зависимости от количества предикторов, длины ряда и заблаговременности прогноза. Следует отметить, что все модели дают удовлетворительные результаты (рис. 8.12). Однако, третья модель, которая учитывает восточные атмосферные процессы, по точности превосходит первые две и сохраняет свою устойчивость значительно дольше первых двух моделей.

Таблица 8.2. Результаты экспериментальных прогнозов УКМ на 5 и 6 лет

Модель	Δt	R	S	F	σ_y	S/σ_y
M1	5	0,954	11,4	73	38,4	0,297
	6	0,979	11,4	154	34,2	0,333
M2	5	0,908	10,7	234	37,4	0,286
	6	0,980	8,6	268	28,2	0,299
M3	5	0,973	4,4	109	26,3	0,262
	6	0,982	4,1	155	26,3	0,213

Примечание: Обозначения в табл. 8.1; F – критерий Фишера.

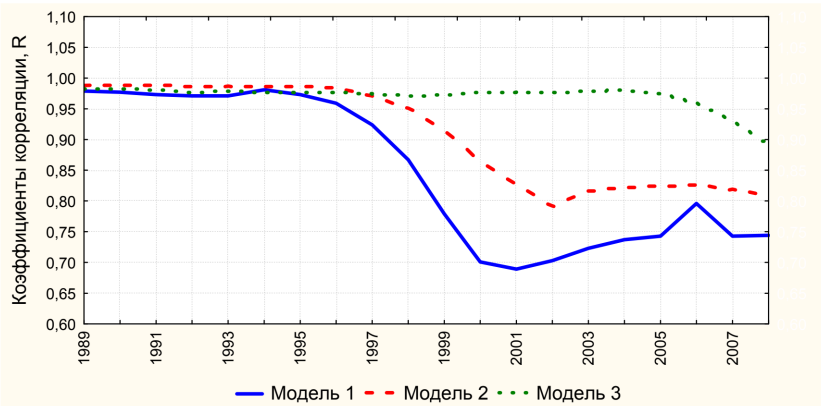


Рис. 8.12. Ход коэффициентов корреляции уравнений регрессии, построенных для трех моделей.

Кроме того, анализ результатов расчетов показал, что наиболее устойчивые связи получаются для заблаговременностей 5 и 6 лет. Это подтверждается графиком хода коэффициентов корреляции уравнений регрессии, построенных по третьей модели для заблаговременности 5 и 6 лет (рис. 8.13).

В результате за основу была принята третья модель, по которой выполнялись проверочные прогнозы изменений уровня моря на срок до 6 лет. Прогноз осуществляется в режиме скользящего оценивания параметров уравнения регрессии, представляющего аналог адаптивно регрессионного метода. Он исключает необходимость обязательной проверки прогностического уравнения на независимом ряде и позволяет сохранить его статистическую устойчивость во времени автоматически. Такой подход особенно эффективен, когда приходится иметь дело с относительно ограниченными выборками.

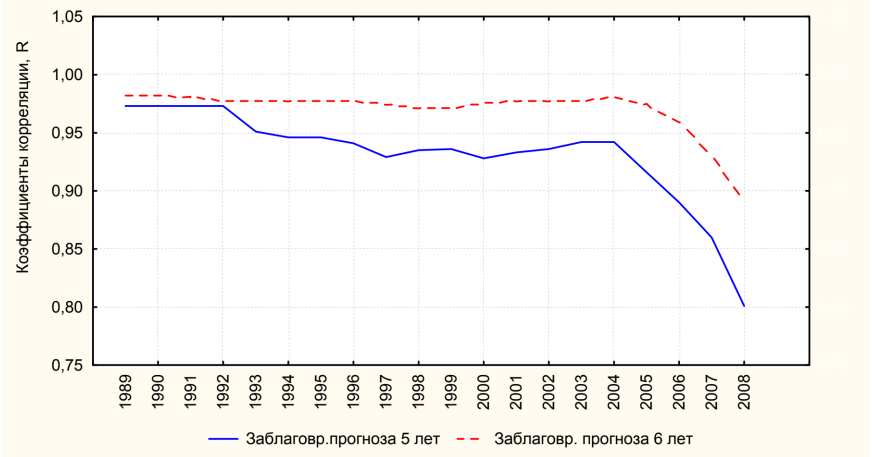


Рис. 8.13. Ход коэффициентов корреляции уравнений регрессии, построенных по третьей модели для заблаговременности 5 и 6 лет.

Оценка успешности сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря

Для проверки качества разработанной методики было составлено 13 прогнозов на период с 1997 по 2009 г., который отличался значительными аномалиями в ходе уровня моря. Результаты сопоставления фактических и прогностических значений уровня показаны в табл. 8.3. Приведенные в ней величины изменения уровня характеризуют собой тенденцию (фон) хода уровня на прогнозируемом отрезке в 6 лет.

Следует отметить, что приведенные прогнозируемые величины характеризуют собой наиболее вероятное положение уровня на момент прогноза, реальные значения уровня могут отклоняться в ту или другую сторону.

Успешность прогнозов изменения уровня Каспийского моря на 6 лет по данной методике при допустимой погрешности σ составила 85 %. Она оказалась выше успешности климатических прогнозов на 15 % и выше успешности прогнозов, составленных по методике Белинского – Калинина – Смирновой, примерно на 9 %.

Усовершенствованная методика фонового прогноза УКМ прошла ЦМКП Росгидромета и рекомендована к практическому использованию. Результат прогноза помещается в гидрометеорологический бюллетень Гидрометцентра России вместе с прогнозом годового хода уровня.

Таблица 8.3. Результаты сопоставления фактических и прогностических значений изменения уровня за 6 лет (допустимая погрешность σ = 26 см)

Год составления прогноза	Год, на который дан прогноз	$H_ф$	$H_{пр}$	$H_ф - H_{пр}$	Оправдываемость
1991	1997	117	85	-32	–
1992	1998	112	96	-16	+
1993	1999	110	101	-9	+
1994	2000	107	123	16	+
1995	2001	98	126	28	–
1996	2002	95	111	16	+
1997	2003	102	100	-2	+
1998	2004	111	113	-2	+
1999	2005	123	113	-10	+
2000	2006	107	111	-4	+
2001	2007	113	103	-10	+
2002	2008	99	104	5	+
2003	2009	93	109	16	+

Сверхдолгосрочные прогнозы тенденций изменения уровня Каспийского моря на сроки 6, 12 и 18 лет, составленные в 2014 г. по вышеизложенной методике

Фоновый прогноз УКМ на 6 лет

Длина исходного ряда составила 68 лет (1946–2014 гг.); расчетный ряд – 48 лет.

Параметры корреляции:

$R = 0{,}960$; $\sigma_y = 25$ см; $S = 11{,}43$; $S/\sigma_y = 0{,}45$.

Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид

$$\sum_{n=1}^{6}\Delta H = -16{,}92B_0^3 + 9{,}13B_1^3 + 2{,}55B_2^3 - 6{,}62B_0^2 + \\ + 6{,}53B_2^2 - 25{,}00B_0^1 - 6{,}17B_1^1 + 4{,}54. \qquad (8.12)$$

В уравнении верхний индекс обозначает номер сектора, а нижний – номер предиктора (коэффициента разложения) в соответствующем секторе.

На рис. 8.14 представлен график фактического и расчетного хода накопленных по 6-летиям сумм годовых приращений УКМ с прогнозом до 2020 г., а на рис. 8.15 – фактический ход уровня и прогноз в абсолютных отметках.



Рис. 8.14. Ход фактических и рассчитанных по уравнению (8.12) накопленных по 6-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2020 г.

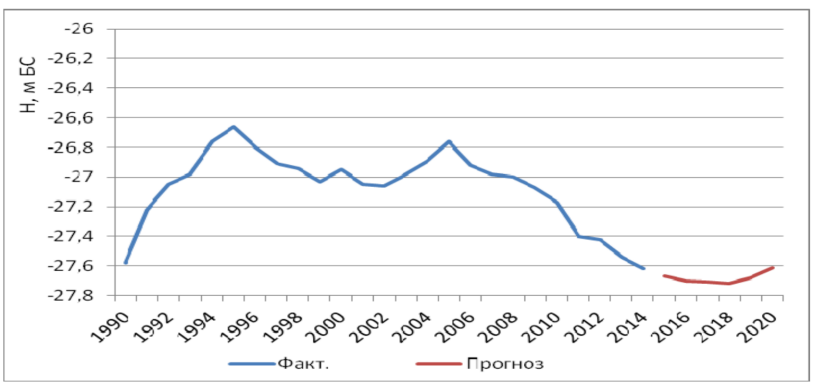


Рис. 8.15. Фоновый прогноз УКМ до 2020 г., составленный в 2014 г.

Согласно прогностической оценке тенденции изменения УКМ на ближайшие 6 лет (до 2020 г.), ожидается в первой половине периода понижение уровня (по отношению к уровню 2014 г.) в среднем на 10 см с допустимыми отклонениями в пределах ±7 см с последующим повышением уровня на 10 см в тех же допустимых пределах. Наиболее вероятное положение среднего уровня моря в 2020 г. составит -27,61 м БС, или 39 см относительно единого нуля Каспийского моря.

Фоновый прогноз УКМ на 12 лет

Длина исходного ряда составила 83 года (1931-2014 гг.); расчетный ряд – 48 лет.

Параметры корреляции:

$R = 0{,}926$; $S = 18{,}43$.

Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид

$$\sum_{n=1}^{12} \Delta H = -11{,}7 B_0^3 + 1{,}14 B_1^3 + 2{,}01 B_2^3 + 16{,}40 B_0^2 + \\ + 5{,}50 B_1^2 + 1{,}59 B_2^2 - 2{,}60 B_1^1 - 0{,}50. \qquad (8.13)$$

На рис. 8.16 представлен график хода фактических и вычисленных по уравнению (8.13) накопленных по 12-летиям сумм годовых приращений УКМ с прогнозом до 2026 г., а на рис. 8.17 – фактический ход уровня и прогноз в абсолютных отметках.

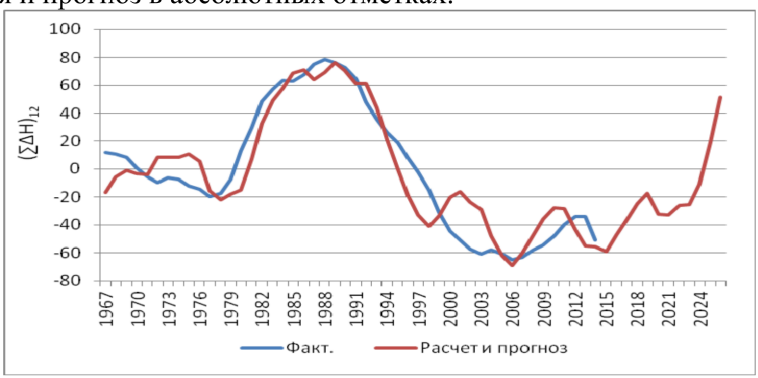


Рис. 8.16. Ход фактических и рассчитанных по уравнению (8.13) накопленных по 12-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2026 г.

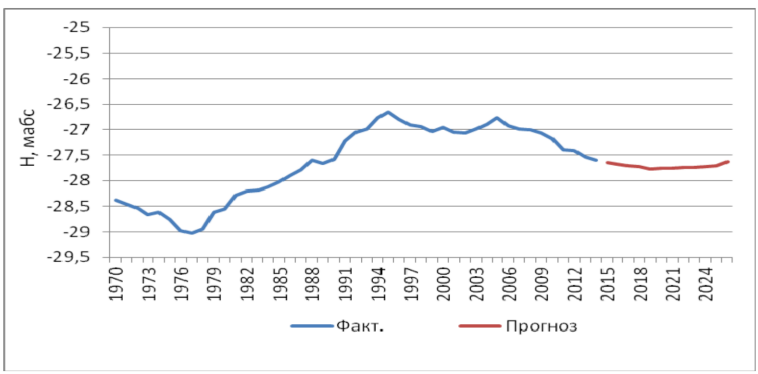


Рис. 8.17. Фоновый прогноз УКМ на 12 лет до 2026 г., составленный в 2014 г.

В соответствии с прогностической оценкой тенденции изменения уровня на 12 лет не ожидается резких колебаний уровня. В ближайшие 12 лет уровень моря будет изменяться незначительно с некоторой тенденцией сначала падения (до 2018 г.), а затем повышения в диапазоне абсолютной отметки -27,50 м БС – -28,00 м БС.

Фоновый прогноз УКМ на 18 лет

Длина исходного ряда составила 83 года (1931–2014 гг.); расчетный ряд – 36 лет.

Параметры корреляции:

R= 0,981; S= 11,84.

Уравнение регрессии, по которому рассчитан прогноз, имеет вид

$$\sum_{n=1}^{18} \Delta H = 59{,}43B_0^3 - 6{,}14B_1^3 + 48{,}66B_0^2 - 4{,}88B_0^1 + 21{,}84\,. \qquad (8.14)$$

Результаты расчета показаны на рис. 8.18 и 8.19.

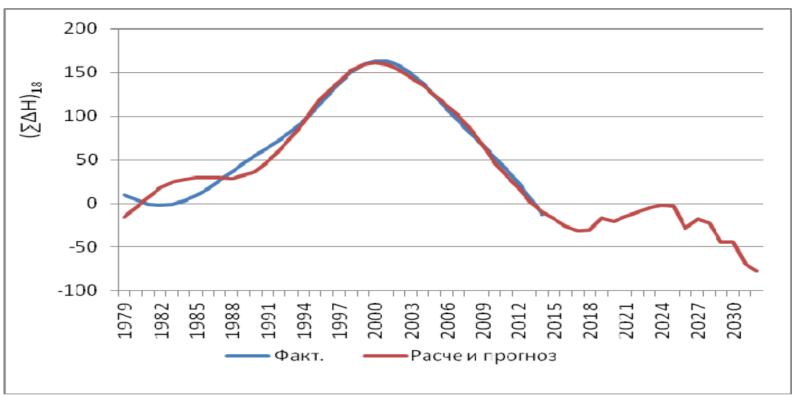


Рис. 8.18. Ход фактических и рассчитанных по уравнению (8.14) накопленных по 18-летиям годовых приращений уровня с прогнозом до 2032 г.

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

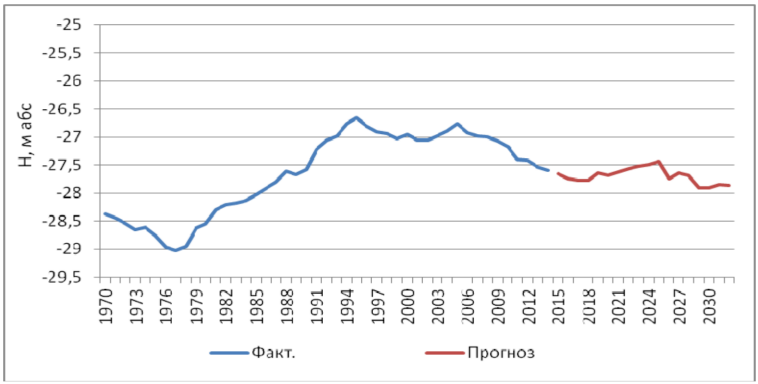


Рис. 8.19. Фоновый прогноз УКМ до 2032 г., составленный в 2014 г.

8.4. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных метеорологических параметров (метод ГГО)

Первый вариант метода ГГО был разработан А.В. Мещерской и М.П. Голод в конце 1980-х гг. и опубликован в 2003 г. [59]. Основу метода составляют 2 этапа: 1) расчет взаимных корреляционных функций $r(\tau)$ между предикторами и уровнем моря в зависимости от временных сдвигов τ (в годах) с выявлением оптимальных интервалов заблаговременности ($\tau_{опт}$), при которых коэффициент корреляции r между конкретными предикторами и УКМ достигает максимума; 2) расчет прогностических значений уровня моря по множественным уравнениям регрессии с ортогонализацией отобранных предикторов с учетом их оптимальной заблаговременности. Чем больше $\tau_{опт}$ (число лет), тем на больший период времени может быть составлен сверхдолгосрочный прогноз УКМ. Чем больше значения $r_{опт}$, тем надежнее прогноз.

Реализация данного метода представляла определенные трудности методического характера. При расчете взаимных корреляционных функций использовались конкретные значения уровня, а не его приращения, поскольку при прогнозах большой заблаговременности невозможно предвычислить колебания уровня моря от года к году, которые определяются межгодовой изменчивостью составляющих водногобаланса. Возможен прогноз только низкочастотного компонента колебаний УКМ, т. е. прогноз его тренда. Очевидно, что в рядах потенциальных предикторов также должна присутствовать трендовая составляющая. Также представлялось целесообразным сгладить исходные ряды, например, скользящими пятилетиями.

Усовершенствование метода Мещерской и Голод состояло в некотором изменении совокупности предикторов, продлении рядов предикторов до 2014 г., а также расчете зависимостей между предикторами и УКМ. Список предикторов и их характеристик для усовершенствованного метода сверхдолгосрочного прогноза УКМ приведен в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Список предикторов и их характеристики для усовершенствованного метода сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря

Предикторы	Исходный год	Длина ряда	Период осреднения предикторов	Оптимальная заблаговременность предикторов		Оптимальные значения r	
				τ_1	τ_2	r_1	r_2
Первая группа предикторов (τ_1 = 6–12)							
Число дней с формой циркуляции W	1891	124	год	6	6	0,82	0,72
Сибирский максимум давления	1900	115	XII-II	8	8	-0,28	-0,16
Число дней с глубоким циклоном в V районе Вительса	1900	115	год	6	5	-0,6	-0,48
Разности температур Кито – Годхавн	1900	115	XII-II	12	11	0,60	0,32
Индекс САК, зима	1951	64	XII-II	10	12	0,80	0,50
Вторая группа предикторов (τ_1 = 17–25)							
Ледовитость Баренцева моря	1900	115	год	17	17	0,62	0,59
Индекс южного колебания	1891	124	год	22	5	-0,26	-0,48
Индекс Воробьевой	1949	55	год	19	19	0,80	0,66
Индекс САК, лето	1951	64	IV-IX	25	12	-0,79	0,45

Из табл. 8.4 видно, что среди отобранных предикторов преобладают длинные ряды, что позволяет максимизировать $\tau_{опт}$. Исключение составляют ряды индекса САК (североатлантическое колебание) (с 1951 г.) и ряды индекса Воробьевой (с 1949 г.). Период осреднения предикторов в годовом цикле разный: от годового до сезонного, причем преобладает зимний сезон, когда циркуляционные процессы протекают более интенсивно.

Кроме табл. 8.4, характеристики предикторов представлены в виде двух серий рисунков (рис. 8.20 и 8.21). В первой серии рисунков (рис. 8.20) представлены проанализированные исходные ряды предикторов

за период с начала ряда и до 2014 г., во второй серии (рис. 8.21) приведены взаимные корреляционные функции между предикторами и УКМ. Сплошные линии соответствуют значения $r(\tau)$ между исходными рядами предикторов и УКМ. Пунктирные линии соответствуют значениям $r(\tau)$ между скользящими пятилетними средними рядов предикторов и УКМ

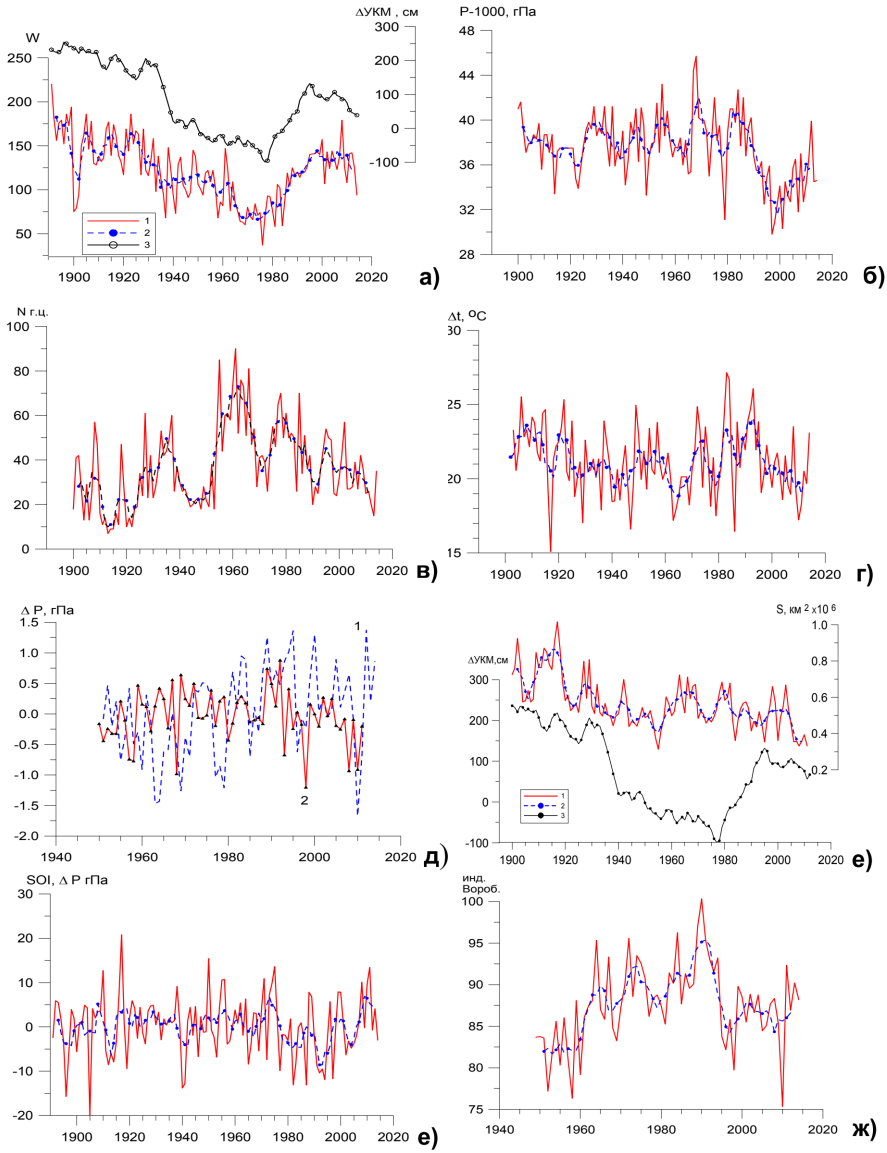


Рис. 8.20. Временные ряды предикторов для сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря:

На рис. 8.20 представлены ряды:

а) среднее годовое число дней с западной формой циркуляции (1), скользящие пятилетние средние этого ряда (2), ряд ΔУКМ (3);

б) давление (в отклонениях от 1000 ГПа) в узле с координатами 50° с.ш., 100° в.д. (вблизи климатического центра сибирского максимума);

в) среднее годовое число дней с глубоким циклоном (N г.ц.) в пятом районе Вительса (азорский максимум);

г) разность значений зимней температуры воздуха Кито–Годхавн;

д) индексы $САК_{XII-II}$ (1) и $САК_{IV-IX}$ (2);

е) ледовитость Баренцева моря (1), скользящие пятилетние средние этого ряда (2) и ΔУКМ (3);

ж) средние годовые индексы южного колебания за 1891–2014 гг.;

з) средние годовые индексы зональной циркуляции в американском секторе Воробьевой.

На рис. 8. 21 приведены взаимные корреляционные функции:

а) $r(\tau)$ среднего годового числа дней с западной формой циркуляции и УКМ (1), для скользящих пятилетних средних этого ряда (2);

б) $r(\tau)$ давления (в отклонениях от 1000 ГПа) в узле с координатами 50° с.ш., 100° в.д. (вблизи климатического центра сибирского максимума) и УКМ (1), для скользящих пятилетних средних этого ряда (2);

в) $r(\tau)$ среднего годового числа дней с глубоким циклоном (N г.ц.) в пятом районе Вительса (азорский максимум и УКМ) (1), для скользящих пятилетних средних этого ряда (2);

г) $r(\tau)$ между разностями значений зимней температуры воздуха Кито – Годхавн и УКМ (1), для скользящих пятилетних средних разностей температуры воздуха (2);

д) $r(\tau)$ между индексами североатлантического колебания $САК_{XII-II}$ (1) и $САК_{IV-IX}$ (3) и УКМ; для скользящих пятилетних средних этих индексов, соответственно, (2) и (4);

е) $r(\tau)$ между ледовитостью Баренцева моря и УКМ (1); для скользящих пятилетних средних этого ряда (2);

ж) $r(\tau)$ между средними годовыми индексами южного колебания за 1891–2014 гг. (1) и УКМ; для пятилетних средних ряда индексов южного колебания (2);

з) $r(\tau)$ между средними годовыми индексами зональной циркуляции в американском секторе Воробьевой и УКМ (1); то же, но для скользящих пятилетних средних индексов (2).

Анализ рис. 8.21 свидетельствует, что по абсолютной величине значения $r(\tau)$ для сглаженных рядов предикторов больше, чем для несглаженных. Эта закономерность вообще характерна для рядов коэффициентов корреляции, что отмечено С.Н. Родионовым [77], а впоследствии В.Н. Малининым [57].

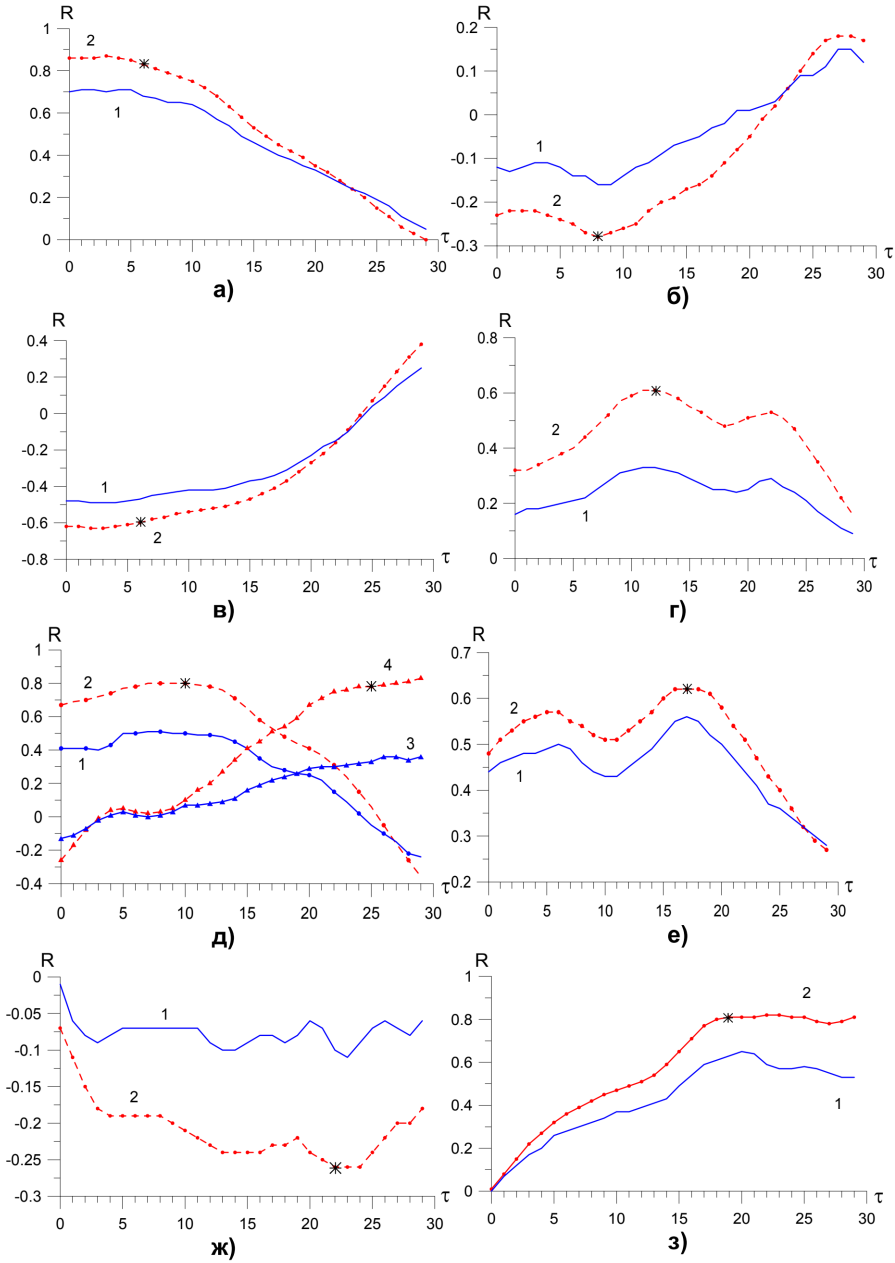


Рис. 8.21. Взаимно-корреляционные функции между предикторами и уровнем Каспийского моря: r_1(т) исходных рядов предикторов и УКМ (1); r_2(т) рядов 5-летних скользящих средних значений предикторов и УКМ (2). Звездочками обозначены оптимальные заблаговременности τ предикторов.

Как уже отмечалось, среди отобранных предикторов (табл. 8.4) преобладают длинные ряды (с 1891–1900 гг. по 2014 г.), что позволяет надеяться на выявление наибольших значений τ, т. е. на возможность прогноза УКМ на максимальный для данного метода период прогнозирования.

Список предикторов составлялся на базе литературных источников и общих соображений о факторах, которые могут определять колебания уровня Каспия. Однако имеется ряд обстоятельств, затрудняющих этот отбор. В подавляющем числе публикаций рассматриваются синхронные связи между влияющими факторами и УКМ. А прогноз УКМ на много лет вперед должен базироваться на долговременных асинхронных зависимостях уровня моря от предшествующих гидрометеорологических условий и, возможно, от внеземных факторов. Ярким примером является интересная статья Г.Н. Панина и др. [72], в которой проанализированы информативные связи периодов подъема и падения УКМ с влияющими факторами (предикторами). Однако эти тесные корреляции получены для синхронных связей и не могут быть основой для долгосрочного прогноза УКМ, поскольку неизвестно, как эти зависимости трансформируются в дальнейшем и насколько надежно можно рассчитать будущие значения предикторов.

Отобранные предикторы (табл. 8.4) разделены на две группы в зависимости от оптимальной заблаговременности предикторов. В первой группе предикторов τ меняется от 6 до 12 лет (предикторы со средними сдвигами по τ). Во второй группе предикторов τ меняется от 17 до 25 лет (предикторы с большими сдвигами по τ). Значения τ_2 в табл. 8.4 и опубликованные ранее [59] в основном близки друг другу, но есть и исключения (разность температуры воздуха Кито – Годхавн, годовое число дней с глубоким циклоном).

Ниже рассмотрены характеристики крупномасштабных параметров (предикторов) и взаимные корреляционные функции между крупномасштабными климатическими параметрами и уровнем Каспийского моря.

Число дней с западной формой циркуляции W (по Вангенгейму)

Западная форма циркуляции W широко используется в работах по климатологии как циркуляционная характеристика, определяющая потоки тепла и влаги из Атлантики на территорию Европы и Западной Сибири (до Енисея). При сильной зависимости УКМ от погодных условий на этой территории (т. е. от значений W), ($r_1 = 0{,}82$; $r_2 = 0{,}72$) эта связь проявляется в течение короткого 6-летнего периода времени ($\tau_{опт} = 6$). Повторяемость числа дней с W может использоваться в сверхдолгосрочных прогнозах УКМ, хотя и на небольшой срок.

Сибирский максимум давления – сезонная (зимняя) характеристика циркуляции

На рис. 8.20 б приведены ряды годовых значений давления за 1900–2014 гг. в узле с координатами 50° с.ш., 100° в.д. вблизи сибирского климатического максимума (в отклонениях от 1000 гПа). Четко прослеживается тенденция к росту давления в центре сибирского центра действия атмосферы (ЦДА) с 1980 по 1985 г. с максимальными значениями в конце 1960-х – начале 1970-х гг. Однако в десятилетие с 1990 по 2000 г. намечается тенденция к ослаблению этого ЦДА, а с 2000 по 2014 г. вновь его усиление.

В методическом плане вопрос об определении положения центра сибирского максимума неоднозначен. В XX веке центр сибирского максимума и его характеристики (давление и координаты) определялись визуально по синоптическим картам. Поэтому положение центра сибирского ЦДА было плавающим по месяцам и годам. В настоящее время положение центра сибирского максимума устанавливается по данным в узлах сетки.

Анализ двух способов нахождения центра Сибирского максимума дает разные результаты, особенно в последние 14 лет. Во втором оценочном докладе Росгидромета по изменению климата [21] было показано, что по данным на станциях давление в центре сибирского максимума после 2000 г. продолжало уменьшаться, а по данным в узле (50° с. ш., 100° в. д.) вблизи климатического максимума давления) период падения давления в центре сменился периодом его заполнения. Это весьма важный момент, причем по величине r_1 (корреляция давления в центре сибирского ЦДА и УКМ) первый способ более информативен (r_1 = -0,61) по сравнению со вторым (r_1 = -0,28). Тем не менее в данной работе использован второй способ как более формализованный (табл. 8.4).

К.В. Кондратович [48] отводит сибирскому антициклону существенное место в повышении УКМ в 1978–1995 гг. По его мнению, при определенной разновидности синоптических процессов в период восточной формы циркуляции (по Г.Я. Вангенгейму) сибирский антициклон смещается к западу с образованием гребня высокого давления к северу от Каспийского и Черного морей. Наличие такого гребня задерживает смещение циклонов к северу, что приводит к выпадению осадков на акваториях Азовского, Черного и Каспийского морей и повышению уровня Каспия.

Анализ взаимных корреляционных функций между давлением в центре сибирского антициклона зимой и УКМ (рис. 8.21 б) показывает, что эта зависимость отрицательна почти во всем диапазоне τ. Это

означает, что сильное развитие сибирского антициклона сопровождается низким УКМ, и наоборот. Действительно, самое низкое давление в центре сибирского максимума (см. рис. 8.20 б) наблюдалось в конце 1990-х – начале 2000-х гг., когда УКМ имел высокие отметки, хотя и ниже, чем в начале XX века. Наиболее высокое давление в центре сибирского максимума пришлось на конец 1960-х – начало 1980-х гг., когда уровень моря был самым низким за последнее 100-летие. Таким образом, по нашим данным, гипотеза Кондратовича не подтверждается.

Индексы антициклоничности Вительса в атлантико-европейском секторе. Число дней с глубоким циклоном в 5 районе Вительса

Индексы антициклоничности Вительса [18] в восьми районах атлантико-европейского сектора (см. рис. 8.3) и их изменчивость на протяжении XX в. подробно рассмотрены А.В. Мещерской и др. в [61]. Напомним, что индексы антициклоничности, или число дней ($N_а$) с антициклонической циркуляцией в месяц, находятся в функциональной связи с числом дней с циклонической циркуляцией ($N_ц$), т. е. $N_а + N_ц = N$, где N – число дней в месяце.

В [61] было показано и количественно оценено уменьшение числа дней с антициклонической циркуляцией в течение XX в. во всех районах Вительса, кроме района 2 (Баренцево море). За 1901–1995 гг. это уменьшение составило 50 дней (24 %) в районе азорского максимума; 47 дней (31 %) на севере Европы; 38 дней (17 %) на юге Западной Сибири. Рассчитаны и проанализированы синхронные связи $N_а$ на севере Европы и на юге ЕТР с осадками и температурой на водосборе Волги. Особенно тесные корреляционные связи между $N_а$ и осадками характерны для юга ЕТР. Здесь в последнем 30-летии XX века r = -0,7 – -0,8 зимой и r = -0,4 осенью и летом.

Однако для целей долгосрочного прогноза УКМ необходимо найти асинхронные зависимости между $N_а$ и метеорологическими величинами на водосборе Волги либо между $N_а$ и УКМ. В данной работе использовано лишь годовое число дней с глубоким циклоном ($N_{г.ц}$) в районе азорского максимума (согласно Вительсу, под глубоким понимается циклон, давление в центре которого не превышает 990 гПа). На рис. 8.20 в, где представлен многолетний ряд этого предиктора, хорошо прослеживается увеличение $N_{г.ц}$ в течение первой половины столетия и уменьшение во второй с максимумом в конце 1950-х и начале 1960-х гг.

Анализ взаимных корреляционных функций (рис. 8.21 в) между $N_{г.ц}$ в 5 районе Вительса и УКМ (1903–1974 гг.) указывает на преимущественно отрицательную корреляцию между рассматриваемыми

рядами, т. е. чем больше повторяемость глубоких циклонов в 5 районе (чем слабее азорский антициклон), тем ниже УКМ.

Объяснение этому факту можно найти в работе Н.А. Белинского и Г.П. Калинина [13], в которой показано, что предложенные авторами интегральные индексы циркуляции (на основе индексов Вительса) имеют зеркальный ход над океаном и над сушей. В частности, в [13] получена тесная обратная зависимость (r = -0,95) между интегральным индексом атмосферной циркуляции в 5 районе Вительса (азорский максимум) и УКМ при опережении ряда индекса относительно ряда УКМ на 5–6 лет (интегральный индекс циркуляции тем больше, чем больше циклоничность). Анализ рис. 8.21 в позволяет найти $\tau_{опт}$ (6 лет) и $r_{опт}$ (-0,6) для продленных исходных рядов индекса Вительса и использовать их в прогнозе в качестве предикторов.

Горизонтальные градиенты температуры воздуха «юг – север» в Северной Атлантике. Разность температуры воздуха между метеостанциями Кито и Годхавн

Известно, что градиенты температуры воздуха полюс – экватор в значительной мере определяют барические градиенты и характер атмосферных процессов, что в полной мере относится к Северной Атлантике.

Для расчета градиентов температуры воздуха в Северной Атлантике К.М. Лугиной были сформированы ряды средней месячной температуры воздуха за 1901–1998 гг. на следующих метеорологических станциях: Рейкьявик, Годхавн, Гибралтар, Дакар, Кито. Две первые из перечисленных станций расположены в северных районах и характеризуют метеорологические условия на западном побережье Гренландии (Годхавн) и на о. Исландия (Рейкьявик). Три остальные станции – южные, причем ст. Кито расположена в экваториальной зоне Южного полушария.

На обеих северных станциях (Рейкьявик, Годхавн) хорошо прослеживается потепление 1930–1940-х гг. с последующим плавным понижением температуры воздуха в конце XX века. На юге, в районе станций Гибралтар и Кито, температура воздуха от начала века к его концу возрастала, так что наибольшая среднегодовая температура воздуха, наблюдавшаяся в 1980–1990-х гг., превысила примерно на 1,5 °С среднегодовую температуру в начале века. Повышение температуры воздуха на южных станциях в конце XX века, возможно, связано с явлением Эль-Ниньо, повторяемость которого существенно возросла в этот период. Ход среднегодовой температуры воздуха на ст. Дакар не согласуется с ходом на двух других южных станциях.

Взаимная корреляционная функция между разностью Δt зимней температуры воздуха в Кито и Годхавне положительная (рис. 8.21 г), т. е. чем больше Δt юг – север, тем выше уровень Каспия. Эта зависимость сохраняется в течение всего рассмотренного периода, достигая максимума коэффициента корреляции ($r = 0{,}6$) при $\tau = 12$ лет (рис. 8.21 г), и была использована в дальнейшем.

Индекс североатлантического колебания

В первом варианте метода были использованы ряды индекса САК, приведенные в [87]. В последующие годы опубликованы многочисленные работы, в которых оценена существенная роль САК в атмосферных процессах на территории Евразии, в том числе над Каспием [11, 22, 53, 57, 64, 71, 87]. В частности, на территории России большое влияние на последующий режим температуры оказывают зимние значения индекса САК. В число предикторов (табл. 8.5) включен индекс САК за декабрь-февраль (рис. 8.20 д). Зимнее САК особенно сильно влияет на УКМ ($r_1 = 0{,}8$) при $\tau = 10$ лет (рис.8.21д). САК в теплый период (апрель–сентябрь) оказалось не менее информативным в отношении будущего изменения УКМ ($r_1 = -0{,}79$) при очень большом сдвиге по τ ($\tau = 25$ лет).

Ледовитость Баренцева моря

Регулярные круглогодичные наблюдения за ледовитостью в западных районах Арктики были начаты в 1934 г. Менее надежные данные, в основном по результатам наблюдений с судов, имеются с начала века, но только за теплый период – с мая по август. В.Ф. Захаров [42] восстановил ряды средней годовой ледовитости Баренцева моря и североевропейского бассейна с начала XX века, использовав корреляционные зависимости между среднегодовой ледовитостью и ледовитостью теплого периода по данным наблюдений за вторую половину XX века.

В период с начала XX в. по начало XXI в. площадь льдов Баренцева моря сократилась в 1,9 раза (рис. 8.20 е). Взаимные корреляционные функции между ледовитостью Баренцева моря и УКМ, рассчитанные за период с 1900 по 2014 г., выявили их положительную корреляцию с $r_{опт} = 0{,}62$ при $\tau_{опт} = 17$ лет (рис. 8.21 е). Вклад ледовитости Баренцева моря, как предиктора изменения УКМ, довольно значителен.

На связь ледовых условий в Арктике с уровнем Каспийского моря, как известно, впервые обратил внимание Л.С. Берг. Из многочисленных последующих публикаций можно отметить монографию С.Н. Родионова [77], в которой обобщены результаты исследований

многих авторов. В этой монографии показано, что повышение УКМ хорошо согласуется с похолоданием климата, ослаблением зональной циркуляции, смещением траектории циклонов к югу, что приносит осадки в бассейн Волги. Понижение УКМ происходит при потеплении климата, усилении зональной циркуляции за счет уменьшения меридиональных градиентов температуры, смещения к северу Исландского минимума и азорского максимума.

Индекс Южного колебания (ЮК)

Имеются два своего рода центра действия ЮК: южно-тихоокеанский и австралийско-индонезийский, в которых межгодовая изменчивость полей приземного давления, ветра и осадков имеет противоположные знаки [85]. Индексы ЮК обычно рассчитываются как нормированные на средние квадратические отклонения разности средних месячных аномалий приземного давления на о. Таити и в Дарвине, которые расположены вблизи центров действия ЮК. По абсолютным значениям индексы ЮК различаются, так как разные авторы используют для расчета ЮК нормы приземного давления за разные периоды. В данной работе использованы ряды индексов ЮК, опубликованные Австралийским метеорологическим бюро (/http://www.bom.gov.au/climate/current). На рис. 8.20 ж приведен ряд индексов ЮК за 1876–2014 гг. Положительные значения индекса ЮК соответствуют обычному развитию процессов, когда давление на о. Таити выше, чем в Дарвине. При этом массы теплой воды под влиянием пассатов переносятся от побережья Южной Америки к Австралии. Аномально сильное развитие такого типа гидрометеорологических процессов получило название Ла-Нинья.

Отрицательные значения ЮК соответствуют такому барическому полю, когда давление на о. Таити ниже, чем в Дарвине, что сопровождается переносом теплых вод от Австралии к побережью Южной Америки и распространением их на всю тропическую зону Тихого океана. Аномально сильное развитие гидрометеорологических процессов этого типа известно как явление Эль-Ниньо. Экстремально сильные явления Эль-Ниньо отмечались в конце XIX – начале XX века. Сильные явления Эль-Ниньо наблюдалась в 1982–1983, 1992–1994 и 1997 гг. [85]. На фоне колебаний индекса ЮК период с середины 1970-х гг. до конца XX века выделяется повышенной повторяемостью явлений Эль-Ниньо, а следовательно, повышением температуры воды в тропической зоне Тихого океана. В начале XXI века преобладает явление Ла-Нинья.

В определенной мере явление Эль-Ниньо связано также с гидрометеорологическими процессами в Северной Атлантике, о чем свидетельствует ряд публикаций. Установлена связь явлений Эль-Ниньо с

траекториями и интенсивностью циклонов в Северной Атлантике [104,105], а также зависимость аномалий меридионального переноса тепла в Северной Атлантике от событий Эль-Ниньо [65]. Что касается влияния Эль-Ниньо на аномалии температуры воздуха и осадков на территории СНГ, то оно незначительно повсюду за исключением района Охотского моря, Кавказа и Средней Азии [38].

В [100] впервые рассмотрены корреляционные связи между среднегодовой температурой воды в тропической зоне Тихого океана за период с 1903 по 1994 г. и приращениями УКМ в следующем году ($\tau = 1$ год). Область наиболее сильной корреляции ($r = 0{,}4$ ... $0{,}5$) расположена в центральной части Тихого океана. Чем сильнее развито Эль-Ниньо, тем больше положительные приращения УКМ.

Эти зависимости подтверждаются нашими расчетами взаимных корреляционных функций между индексом ЮК и УКМ (см. рис. 8.21 ж). Однако значимые коэффициенты корреляции между рассматриваемыми характеристиками удалось получить лишь для периода с 1935 по 2000 г. В значительной мере они определяются совпадением по времени повышенной повторяемости явления Эль-Ниньо с ростом УКМ в последние 20 лет XX века.

Индексы интенсивности зональной и меридиональной циркуляции над американским сектором Северного полушария (индексы Е.В. Воробьевой)

В середине XX века А.Л. Кац [46] разработал индексы зональной и меридиональной циркуляции. Для выбранной зоны индекс зональной циркуляции определялся как разность числа пересечений изобарами меридианов с запада на восток и с востока на запад на единицу расстояния, т. е. удельный градиент давления.

Зональные и меридиональные индексы Каца подготовлены для атлантико-европейского, азиатского и американского секторов Северного полушария для трех широтных зон (70–50, 50–35 и 70–35°с.ш.) и пяти уровней (500, 300, 100, 30 и 10 гПа).

В связи с трудностями продления рядов индексов Каца, Мещерская и Голод ввели в качестве предикторов индексы Воробьевой [20], которые, по сути, являются развитием индексов Каца. Эти индексы основаны на сопряженности циркуляционных процессов в американском и атлантико-европейском секторах Северного полушария. При этом под американским сектором понималась часть Северного полушария, ограниченная 20° и 140° з. д. Анализ проводился путем сопоставления циркуляции в евразийской чести полушария при различных состояниях интенсивности циркуляции в американском секторе, причем в качестве

основного аргумента была взята интенсивность зонального переноса в американском секторе. Для этой цели строились карты AT_{500} и OT^{500}_{1000} для случаев интенсивной и слабой зональной циркуляции в этом секторе. Индексы Воробьевой оказались высоко информативными при оптимальном сдвиге $\tau_{опт} = 19$ лет; $r_{опт} = 0{,}80$ (рис. 8.21 з).

Как уже отмечалось, совокупность предикторов была разделена на две группы: первая группа содержит предикторы со средними величинами $\tau_{опт}$, изменяющимися от 6 до 12 лет. Во второй группе предикторов (группа больших τ) величины $\tau_{опт}$ колеблются от 17 до 22 лет. Заблаговременность составления прогнозов определяется величиной $\tau_{опт}$.

В практическом плане реализовано две схемы расчета:

а) расчет прогностических значений УКМ на каждый год по одномерным уравнениям регрессии с последующим их осреднением по совокупности предикторов первой или второй группы (рис. 8.22);

б) расчет прогностических значений УКМ на каждый год по совокупности предикторов первой или второй группы с использованием ортогонализации предикторов (рис. 8.23).

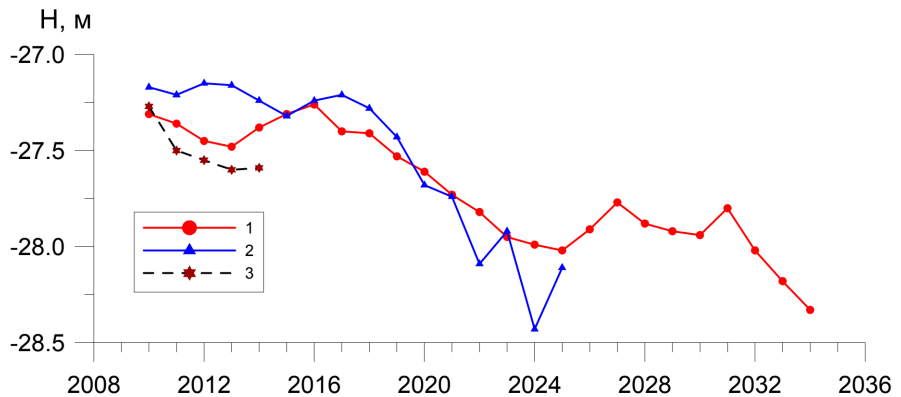


Рис. 8.22. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря, рассчитанные по осредненным рядам одномерных уравнений регрессии: средние значения прогнозов УКМ, рассчитанные по предикторам с большими сдвигами по τ (1); средние значения прогнозов УКМ, рассчитанные по предикторам со средними сдвигами по τ (2); фактические значения УКМ (3).

На рис. 8.22 приведены сверхдолгосрочные прогнозы УКМ, рассчитанные по осредненным рядам одномерных уравнений регрессии. Предикторы с большими сдвигами по τ позволяют рассчитать прогнозы УКМ до 2034 г. со средними сдвигами по τ до 2025 г. Оба варианта расчетов демонстрируют падение УКМ за указанные периоды.

Скорость уменьшения уровня моря для предикторов первой группы составила 5,9 см/год, для предикторов второй группы 3,6 см/год. Оба варианта расчетов достаточно хорошо согласуются по тенденциям изменения.

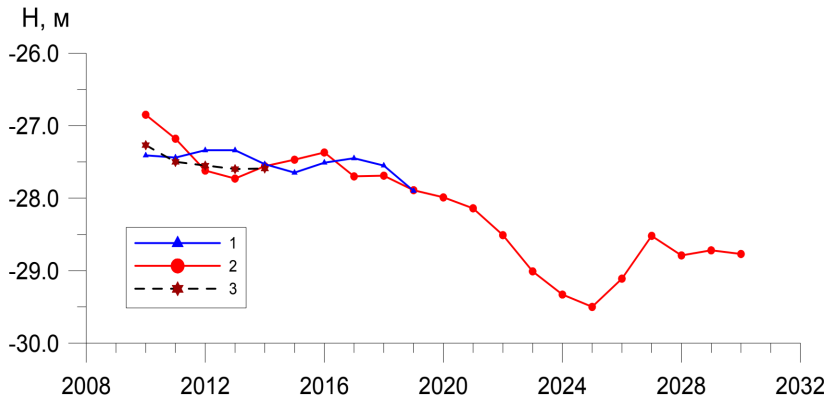


Рис. 8.23. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря, рассчитанные по совокупности предикторов с ортогонализацией: первая группа предикторов (1); вторая группа предикторов (2); фактические значения УКМ (3).

Наибольшие различия прогностических значений УКМ по двум методам не превышают средние квадратические отклонения УКМ. Последние для некоторых лет приведены в [62]. Например, в 2024 г. разность прогностических значений УКМ по двум методам составила 30 см при допустимой разности 57 см.

Процедура ортогонализации предикторов была предложена В.И. Романовским в 1931 г. и применена впоследствии в физико-статистическом методе долгосрочных метеорологических прогнозов, разработанном под руководством М.И. Юдина. Цель ортогонализации предикторов – исключить дублирующую информацию из-за наличия коррелированных предикторов.

Вопрос об исключении дублируемой информации не однозначен. Известно две точки зрения на этот счет. М.И. Будыко считал, что наличие дублирующей информации подтверждает полученный результат и потому целесообразен. М.И. Юдин рассматривал дублирующую информацию излишней, искажающую реальные зависимости. К сожалению, пока что нет обоснованных доказательств преимущества той или иной точки зрения.

Как видно из рис. 8.23, тенденция к падению УКМ сохранилась, а прогнозы по двум группам предикторов близки. В этом варианте

(с ортогонализацией) они лучше согласуются, чем при осреднении прогнозов, рассчитанных по одномерным уравнениям регрессии (рис. 8.22). Возможно, этот вывод может быть аргументом в пользу мнения Юдина. В абсолютном выражении за 2010–2025 гг. по первому варианту уровень моря понизится с -27,5 до -28,5 м, т. е. на 1,0 м (рис. 8.22), а по второму варианту с 27,3 до 29,5 м, т.е. на 2,2 м (рис. 8.23). Вопрос о том, какому варианту следует доверять, решить трудно. По-видимому, целесообразно ориентироваться на среднее значение из двух расчетов, т. е. на падение уровня моря на 1,6 м за период с 2010 по 2025 год.

8.5. Прогностические оценки долгопериодных колебаний УКМ с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана

В последние годы в ГГО для оценки изменений уровня Каспийского моря на далекую перспективу стали широко применяться результаты численного моделирования климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [9, 30–32, 102]. В рамках международной программы «Сравнение атмосферных моделей» (AMIP) российские ученые во главе с академиком Г.С. Голицыным провели исследования по проекту «Каспийский климат» [32]. Цель экспериментов состояла в обосновании гипотезы, согласно которой изменения влагооборота на ЕТР, а следовательно, и на водосборе Каспийского моря, связаны с планетарными колебаниями в системе взаимодействия атмосферы и океана. Большинство климатических моделей высокого пространственного разрешения удовлетворительно воспроизвели как климат на водосборе рек Волги и Урала, так и колебания УКМ [58].

Для проведения широкомасштабных исследований климата Каспийского региона активно используется глобальная модель общей циркуляции атмосферы (ОЦА) ГГО. Модель ГГО была апробирована при осуществлении ряда крупных международных проектов, посвященных анализу современного климата и его вероятностных изменений с учетом влияния антропогенных факторов (программы AMIP, MECCA, FANGIO, MONEG).

Результаты, полученные с помощью модели ГГО наряду с данными наиболее успешных моделей других стран были использованы при составлении отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата за 1992 и 1995 гг. Возможность использования результатов расчета составляющих водного баланса для сверхдолгосрочного прогноза уровня моря с помощью моделей ОЦА в значительной

степени определяется их способностью воспроизводить региональный климат прошлого [58]. Ниже приведены основные полученные результаты.

На начальном этапе по результатам моделирования глобального климата за 1979–1988 гг., полученным с помощью 21 модели ОЦА в рамках проекта AMIP, выполнено сравнение годового хода общей облачности, осадков, массы снега и испарения с данными наблюдений на водосборе рек Волги и Урала. Десятилетний период исследований AMIP совпал с быстрым ростом УКМ. Сравнение показало, что модели ОЦА в целом реалистично воспроизводят гидрологический и термический режим региона. Однако большинство моделей переоценивали количество выпадающих осадков.

Одними из лучших моделей оказались модель ОЦА ECHAM3 Метеорологического института Макса Планка (Гамбург, Германия) и модель ГГО. В ходе подготовки к длительным экспериментам были проведены испытания модели ОЦА ГГО T30L14 относительно различных климатических данных в серии коротких интегрирований на сроки 1–3 года и ряде контрольных интегрирований на сроки 10–17 лет. В результате в модель ГГО был внесен ряд уточнений и изменений. По уточненной модели было проведено два длительных эксперимента на срок 45 лет (1950–1994 гг.) с наблюдаемой температурой поверхности океана (ТПО) и концентрацией парниковых газов.

Результаты экспериментов показали, что модель ГГО достаточно хорошо воспроизводит наблюдаемую долгопериодную изменчивость основных климатических переменных на водосборе Волги, что подтверждает гипотезу о значительном влиянии изменений океанической температуры и концентрации парниковых газов на динамику речного стока в Каспийское море.

Основным результатом выполненных экспериментов является наличие воспроизводимой моделями ОЦА статистически значимой связи между изменениями УКМ и аномалиями температуры в тропической части Тихого океана, тесно связанными с явлением Эль-Ниньо и Южным колебанием. Эта связь подтверждается данными наблюдений. В частности, коэффициент корреляции между среднегодовой ТПО в регионе 160–120º з.д., 15ºю.ш. – 15ºс.ш. и среднегодовыми изменениями УКМ с текущего года на следующий год равен 0,52. Показано, что изменение атмосферной циркуляции в бассейне Каспийского моря, вызванное положительными аномалиями ТПО в тропической части Тихом океане, ведет к увеличению волжского стока и уменьшению видимого испарения с поверхности моря, а суммарный эффект этих двух факторов приводит к более сильной связи аномалий ТПО с изменениями УКМ. Проведение серии экспериментов до конца XXI в. выявило

тенденцию к возрастанию количества осадков, увеличению стока рек и росту уровня моря до 4 м.

Для оценки возможных изменений волжского стока в результате глобального потепления были использованы результаты эксперимента с моделью совместной циркуляции атмосферы и океана ECHAM4/OPYC для периода 1860–2100 гг. В эксперименте концентрация парниковых газов в атмосфере с 1860 по 1990 г. задавалась по данным наблюдений, а далее по сценарию IS92a, описывающему увеличение концентрации парниковых газов с учетом прогнозируемого роста антропогенного фактора. Анализ результатов показал значительный рост среднего количества осадков на водосборе Волги и стока реки в XXI в., однако в первой трети столетия отмечается падение стока до наиболее низких уровней, наблюдавшихся в XX в. При этом существенно увеличивается диапазон изменений характеристик гидрологического цикла [8].

В долгосрочном плане (до конца XXI в.) роль составляющих водного баланса можно оценить лишь в рамках определенных сценариев, учитывающих не только представления о том, каково будет антропогенное влияние на глобальный климат вследствие эмиссий парниковых газов в атмосферу, но и как будет использоваться сток рек в бассейне Каспия на водохозяйственные нужды. Работы в этом направлении сейчас проводятся в ГГО совместно с ИФА РАН и Метеорологическим институтом Макса Планка.

Выполненный анализ воспроизведения регионального климата показал, что большая группа моделей ОЦА высокого пространственного разрешения, включая модель ГГО, удовлетворительно воспроизводит климат водосборов Волги и Урала. Анализ также показал, что определяющую роль в межгодовых колебаниях УКМ играют изменения осадков на водосборах и годовой сток рек. На рис. 8.24 приведены результаты экспериментов с МОЦА ECHAM4/OPYC3 для периода 1861–2100 гг. и данные наблюдений по годовым осадкам на водосборе Волги и ее стоку.

При расчете использовался сценарий роста концентрации парниковых газов в атмосфере IS92a [105], предполагающий рост суммарной концентрации (в CO_2 эквиваленте) от 350 ppm в 1990 г. до 700 ppm в 2100 г. На рис. 8.24 видно хорошее соответствие модельных расчетов данным наблюдений для XX в.

Арпе и Рохнер [101] проанализировали изменения гидрологического цикла по нескольким бассейнам, в том числе по бассейну Каспийского моря. Их результаты показали увеличение осадков и стока Волги и, как следствие, повышение УКМ в XXI веке. Однако позже в 2007 г. Арпе и Лерой [98, 99] с использованием трех моделей МОЦАО

пришли к другому результату, согласно которому в XXI веке прогнозируется постоянство УКМ.

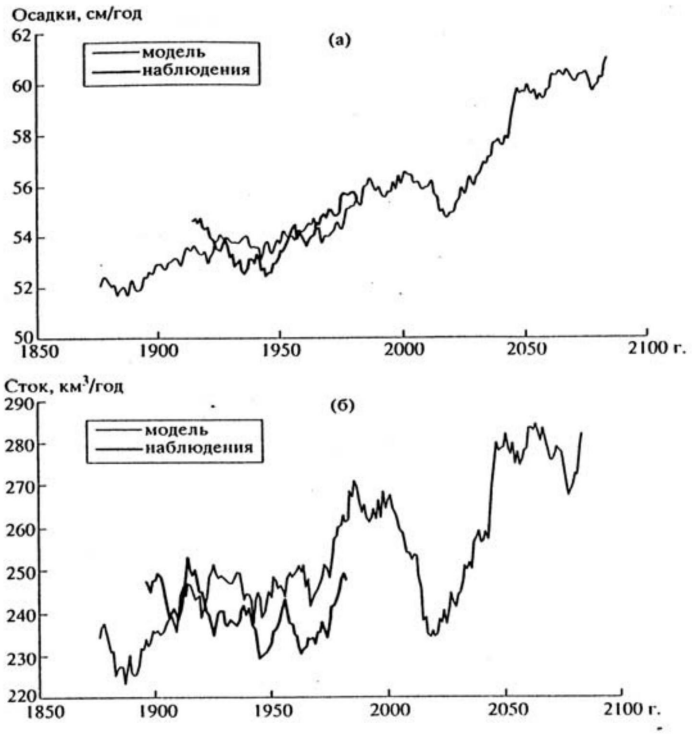


Рис. 8.24. Результаты моделирования с МОЦАО ECHAM4/OPYC3 (тонкая линия) и данные наблюдений (30-летнее скользящее сглаживание) (жирная линия) по годовым осадкам на водосборе Волги (а) и ее стоку (б) [105].

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. 8.25 приведены данные по годовому стоку и приращению уровня моря, причем шкалы подобраны так, чтобы кривые были максимально близки. При таком отображении заметно сходство этих кривых.

В работе Элгиунди и Джорджи [97, 103] на основе восьми климатических моделей получены оценки возможных изменений водного баланса и УКМ в XXI в. Для определения колебаний УКМ использовалось уравнение водного баланса на основе моделирования осадков и испарения в бассейне.

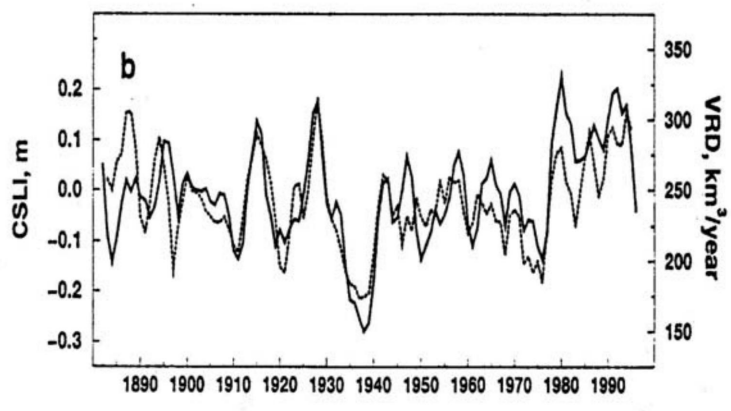


Рис. 8.25. Приращение уровня Каспийского моря за год (левая ось ординат, м) и годовой сток Волги (правая ось ординат, км^3/год) [100].

Ежегодные приращения УКМ вычислялись по уравнению

$$\Delta H_{\Delta t} = \left\{ \frac{A_L}{A_s} \left[P_L (1 - fl) - E_l \right] + P_s - D - E_s \right\}, \qquad (8.16)$$

где A_L / A_S – отношение размера суши в бассейне к размеру моря (равно 6,365); P_L и P_s – количество выпавших осадков над сушей и над морем; E_l и E_s – испарение с поверхности суши и с поверхности моря соответственно; D – сток в залив Кара-Богаз-Гол приблизительно равный 3 см в год толщины слоя моря (в расчетах им пренебрегалось). Параметр fl определяет долю от общего количества осадков P_L, выпавших над сушей в бассейне, которая теряется в результате процессов испарения (порядка 10 %).

Рассматривались различные сценарии выбросов парниковых газов. Для 14 из 16 рассмотренных случаев уровень Каспия в XXI веке понижается. В конце века в среднем по ансамблю это снижение может составить 9 м. Прогнозируемое понижение УКМ противоречит ранее сделанным расчетам Арпе и Рохнера [101]. В [97, 103] это объясняется тем, что в модели Арпе и Рохнера увеличение испарения с поверхности моря не учитывалось, хотя эта компонента имеет существенное значение. Таким образом, имеющиеся долгосрочные оценки возможного изменения УКМ противоречивы.

В работе Г.Н. Панина и Н.А. Дианского [71] показано, что уровень Каспийского моря зависит от осадков и испарения в бассейне Волги и над Каспийским морем, которые, в свою очередь, зависят от

интенсивности и направления переноса воздушных масс из Северной Атлантики на Евразию. Предложен сводный индекс переноса влаги, в который входят влажность над Северной Атлантикой и скорость ее переноса, оцениваемая с помощью индекса САК. Показано, что периоды понижения УКМ (1940–1977 и 1996–2012 гг.) приходятся на периоды уменьшения влияния САК на Европу и на водосбор Каспия (корреляция между зимней температурой воздуха и зимним САК минимальная), а период роста УКМ (1978–1995 гг.) приходится на период повышения влияния САК (корреляция максимальна). Период понижения УКМ связан также с отрицательной корреляцией полей осадков с САК (и отрицательным трендом осадков -16,2 мм/10 лет), а рост УКМ – с положительной корреляцией и положительным трендом осадков 1,5 мм/10 лет. Корреляция между индексом САК и величиной интегрального нормированного стока Волги, сдвинутого на 10 лет, составляет 0,73.

Также предлагается для сверхдолгосрочного прогноза УКМ вводить в рассмотрение показатели интенсивности термохалинной циркуляции и меридионального переноса тепла в Северной Атлантике, которые влияют на климат Евразии.

8.6. Вероятностные прогнозы основных составляющих водного баланса и УКМ на основе климатических сценариев (методы ГГИ)

8.6.1. Вероятностный прогноз уровня на период до 2030 г.

В ГГИ [24, 25, 69, 92], были проведены исследования по разработке вероятностного прогноза уровня Каспийского моря на перспективу до 2030 г. на основе стохастической модели колебаний УКМ, основоположниками которой были С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель [52]. Исходным при прогнозе был принят фактический уровень моря на 1 января 2001 года.

Для оценки возможных изменений уровня был применен сценарный подход, предусматривающий оценки основных элементов водного баланса в соответствии с принятыми климатическими сценариями. В результате выполненных расчетов было получено, что в первой половине XXI века следует ожидать увеличения стока Волги на 5–10 % по сравнению со среднемноголетней величиной.

Для каждого сценария были рассмотрены три варианта безвозвратного водопотребления в бассейнах основных рек, впадающих в море: оптимистический, умеренный и пессимистический, в соответствии с которыми снижение притока речных вод в море составит до 2030 г.

48, 40 и 28 км^3/год соответственно. В последнем из этих вариантов предполагалось, что величина безвозвратного водопотребления в бассейне Каспия стабилизируется на современном уровне.

Для оценки возможных изменений стока Волги, испарения с поверхности Каспия и выпадающих осадков на зеркало моря были использованы четыре климатические модели: HadCM2 (Великобритания), CGCM1 (Канада), ECHAM4 (Германия) и GFDR-R15 (США). Сценарии разработаны при условии увеличения концентрации CO_2 в атмосфере на 1 % в год. При всех климатических сценариях и величине водопотребления ожидается, что до 2020 г. УКМ будет ниже современного, колеблясь в диапазоне от -27,7 до -28,1 м БС. Этот сверхдолгосрочный прогноз хорошо совпадает с фактическими значениями УКМ, по крайней мере до 2014 года.

Для этих сценариев были проведены расчеты, где в качестве исходных данных принимались статистические характеристики естественного притока речных вод в море, испарения с его поверхности, а также осадков, определенных по данным наблюдений за многолетний период времени. Моделирование основных компонентов водного баланса вначале выполнялось для годовых значений, которые затем трансформировались в месячные значения по типовому внутригодовому распределению.

В качестве моделируемых входов системы использовались следующие компоненты:

1) сток Волги, Куры, Терека, Урала, Самура, Сулака и рек иранского побережья;
2) осадки на поверхность моря;
3) испарение с поверхности моря;
4) подземный приток (принят неизменным, равным 4 км^3/год).

Водный баланс был составлен в двух вариантах – при независимом определении всех его составляющих, включая испарение с водной поверхности, рассчитанное по методике ГОИНа [89], а также при значениях испарения, определенного как остаточный член баланса. В первом варианте водный баланс составлен за период с 1941 по 1996 г., а во втором – за более длительный период с 1880 по 1996 год.

Годовые суммы осадков, выпадающих на поверхность моря, были рассчитаны за 1940–1996 гг. с использованием методики [89]. При этом были использованы данные наблюдений за осадками по 17 прибрежным и островным станциям. Предварительно была выполнена работа по приведению рядов осадков к многолетнему периоду времени, заполнению пропусков в наблюдениях и введению всех видов поправок. В соответствии с выполненными расчетами в перспективе

к 2030 г. следует ожидать увеличение испарения с водной поверхности Каспия примерно на 12 %. Годовые осадки на поверхность моря возрастут на 11 %.

Для дальнейшего использования в вероятностной воднобалансовой модели Каспийского моря основные элементы водного баланса были объединены в два ряда:

- объем притока (поверхностного + подземного);
- слой видимого испарения (испарение за вычетом осадков).

Основные статистические характеристики этих рядов приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5. Статистические параметры элементов водного баланса Каспийского моря

Элемент баланса	Длина ряда	Норма	C_v	Cs/Cv	Автокорреляция	Значения с обеспеченностью, %								
						0,1	1	5	10	50	90	95	99	99,9
Приток, км^3	117	301	0,17	1,5	0,44	471	425	387	367	301	240	224	195	164
Видимое испарение, см	56	72,0	0,13	2,0	0,28	103	94,9	87,8	84,1	71,9	60,9	57,9	52,6	46,9

Также было выполнено моделирование уровня при различных вариантах исходного среднеквадратического отклонения ряда притока к морю. Необходимость таких расчетов обусловлена тем, что многочисленные исследования, выполненные в последние годы по моделям общей циркуляции атмосферы, указывают на то, что в перспективе при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере возрастет вариация стока рек.

В настоящее время этот вывод является качественным, какие-либо количественные оценки отсутствуют. В связи с этим авторами был проведен сравнительный анализ результатов моделирования уровня при среднеквадратическом отклонении ряда притока к морю, равном 50, 60 и 70 км^3 (варианты 2, 4 и 5 в табл. 8.6).

Статистические параметры входов системы (средние значения, дисперсии, авто- и кросскорреляционные функции) оценивались по многолетним рядам, при этом ряды стока рек предварительно восстанавливались, т. е. приводились к естественным условиям (табл. 8.7).

Таблица 8.6. Эксперименты с различными статистическими параметрами элементов водного баланса

Элементы баланса	Параметры	Наблюденные	Номер эксперимента							
			0 (баз.)	1	2	3	4	5	6	7
Приток	Стандарт. отклонение, км^3	50	50	50	50	50	60	70	50	50
	Автокорреляция	0,44	0,3	0	0	0	0	0	0,44	0,3
Видимое испарение	Стандарт. отклонение, см	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	Автокорреляция	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0
Межрядная корреляция		-0,3	-0,3	0	-0,3	-0,6	-0,3	-0,3	0	-0,3

Согласно полученным результатам, к 2015 г. следовало ожидать снижения уровня до отметок -27,59 – -27,91 м БС, а к 2030 г. до отметок -28,02 – 28,91 м БС. Приведенные значения характеризуют математическое ожидание уровня моря. Анализ возможных в перспективе отклонений уровня от своего среднего положения показал, что для принятых климатических сценариев даже при стабилизации безвозвратного водопотребления в бассейне на современном уровне вероятность его превышения до отметки -26,00 м БС составляет менее 1 %, а до отметки -25,5 м БС менее 0,1 %.

Таблица 8.7. Статистические параметры входов (восстановленные значения)

Входы	Среднее	*Cv*	Автокорреляция
Волга, км^3	256	0,18	0,209
Кура, км^3	18,6	0,21	0,000
Урал, км^3	10,1	0,46	0,376
Терек, км^3	11,0	0,16	0,473
Самур + Сулак + малые реки Западного побережья, км^3	8,52	0,12	0,134
Иранские реки, км^3	16,1	0,20	0,032
Осадки, см	23,8	0,13	0,138
Испарение, см	95,9	0,08	0,286

8.6.2. Вероятностный прогноз уровня на первую половину XXI века

Моделирование уровня Каспия проводилось на период 2001–2050 гг. для 12 вариантов, отличающихся сценариями климатических условий и динамикой водопотребления в бассейне (пессимистический, умеренный и оптимистический).

Выполненные расчеты показали, что по сравнению с естественным стоком Волги, составляющим (без учета потерь в Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги) для современных климатических условий 254 км^3/год, его увеличение для климатических сценариев, соответствующих периоду 2040–2069 гг., составляет 28 км^3/год (11 %) для модели HadCM3, 82 км^3/год (32 %) для модели ECHAM4 и 105 км^3/год (41 %) для модели CGCM1.

Полученные результаты указывают на существенное увеличение неопределенности в оценке возможных изменений климатического стока Волги. Вместе с тем следует подчеркнуть, что увеличение неопределенности прогноза изменений стока (как и любого другого природного процесса) при увеличении заблаговременности расчетного периода является вполне объективным явлением.

В соответствии с принятыми исходными статистическими характеристиками естественного стока рек, впадающих в море, норма суммарного притока в Каспий была принята равной 297 км^3/год. Эта величина была получена по данным о стоке рек, восстановленном с учетом влияния всего комплекса факторов хозяйственной деятельности, действующих на водосборах и руслах рек. Подземный приток в море был принят равным 4 км^3/год. Нормы испарения с поверхности Каспия и осадков на его акватории составили, соответственно, 96 и 24 см.

Для расчетов стока из Каспия в залив Кара-Богаз-Гол была получена регрессионная зависимость стока от положения уровня моря [69]. За исходный уровень моря при расчетах был принят фактический уровень на 1 января 2001 г., равный -27,18 м БС. Суммарное уменьшение притока рек в Каспий за счет хозяйственной деятельности в бассейне на уровень 2000 г. было принято равным 28 км^3/год.

Значения изменений притока Волги в Каспий для климатических сценариев на 2040–2069 гг. был приняты на основе результатов моделирования по модели ГГИ [92]. Аналогичным образом получены изменения испарения с поверхности моря и осадков. В целях более корректной интерполяции по времени были использованы также результаты по оценке изменений климатического стока Волги, испарения и осадков на акватории моря, полученные для 30-летия 2010–2039 гг. [69], условно отнесенные к 2030 г. Промежуточные значения величин изменений

притока, испарения и осадков в 2001–2050 гг. рассчитывались путем линейной интерполяции между 2000, 2030 и 2060 гг.

Анализ результатов

Результаты моделирования показывают, что несмотря на очень большой диапазон возможных к середине столетия климатических условий и соответствующих им оценок стока рек, значения математических ожиданий уровней даже к 2050 г. отличаются не очень значительно и не превышают 1,0 м. Влияние различных сценариев хозяйственной деятельности на амплитуду математического ожидания уровня моря еще меньше – к 2050 г. она не превышает 0,6 м.

Следует отметить, что при всех рассмотренных сценариях климатических условий и развития водопотребления, смоделированные уровни 50%-ной обеспеченности до середины столетия имеют отметки ниже современных (табл. 8.8). Этот на первый взгляд неожиданный результат, имея в виду большое увеличение притока по ряду сценариев, объясняется тем, что увеличение приходной составляющей водного баланса моря за счет повышения водности рек на рассматриваемом промежутке времени будет происходить постепенно, а также в значительной мере будет компенсироваться ростом испарения с поверхности Каспия.

Таблица 8.8. Математическое ожидание уровня Каспийского моря в 2050 г. (м) при четырех климатических сценариях и трех сценариях хозяйственной деятельности

Климатические сценарии	Сценарии хозяйственной деятельности		
	Пессимистический	Умеренный	Оптимистический
Современный	-28,23	-28,65	-28,93
HadCM3	-28,01	-28,41	-28,67
ECHAM4	-28,14	-28,54	-28,80
CGCM1	-27,25	-27,62	-27,87

В результате вероятностного моделирования УКМ были получены также его значения различной вероятности превышения. В качестве примера на рис. 8.26 приведены условные математические ожидания уровня и границы 90%-го доверительного интервала, характеризующие возможные отклонения уровня от своего среднего положения для всех принятых климатических сценариев при варианте стабилизации безвозвратного водопотребления в бассейне.

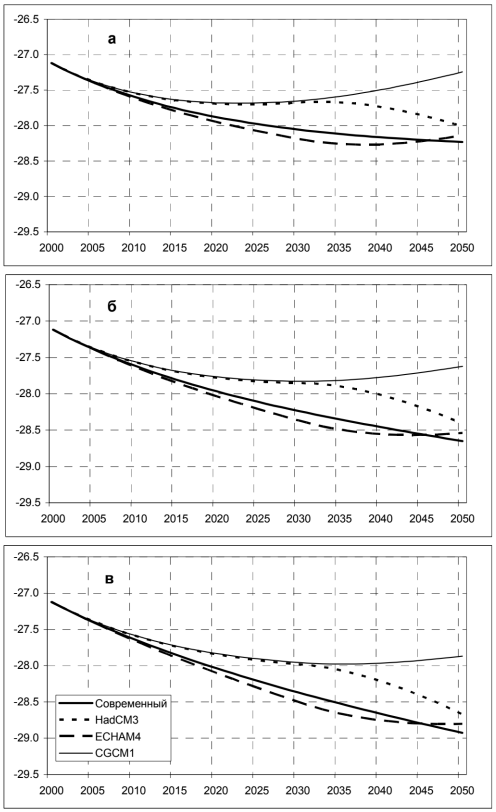


Рис. 8.26. Условное математическое ожидание уровня Каспийского моря при четырех климатических сценариях и трех сценариях водопотребления: пессимистическом (а), умеренном (б) и оптимистическом (в).

Границы доверительного интервала ограничивают зону, внутри которой с вероятностью 90 % могут происходить колебания уровня. Из этих графиков следует, что только при сценарии CGCM1 в конце расчетного периода верхняя граница доверительного интервала превысит отметку -26,0 м БС. В остальных сценариях вероятность превышения этой отметки меньше 5 %. Очевидно, что при возрастании водопотребления в бассейне уровень моря будет находиться на более низких отметках. Поэтому на современном этапе изученности проблемы, учитывая очень большую неопределенность в оценках климатических сценариев и, соответственно, основных составляющих водного баланса Каспия, нет оснований при планировании мероприятий по защите побережья от затопления ориентироваться на отметки уровня выше -25,5 – -26,0 м БС.

8.7. Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря на основе ансамблевого подхода (КаспМНИЦ)

Для моделирования временных рядов и составления прогноза использовались данные об изменениях среднегодового уровня моря на четырех постах: Махачкала, Баку, Красноводск и Актау. Как показали исследования, существенное значение для прогноза уровня Каспийского моря имеют колебания с периодом 12–13 и 17–19 лет. Для каждого временного ряда строилось 6 моделей (табл. 8.9).

Таблица 8.9. Продолжительность периодов колебаний (годы) в моделях временных рядов УКМ

Период колебаний	Модели					
	X1217	X1218	X1219	X1317	X1318	X1319
Первый	12	12	12	13	13	13
Второй	17	18	19	17	18	19

Примечание: При обозначении конкретных моделей литер «X» заменялся на литеры «M» (Махачкала), «B» (Баку), «K» (Красноводск), «A» (Актау).

Расчеты уровня Каспийского моря проводились для периодов 1996–2015 и 2011–2035 гг. Далее полученные расчетным путем ряды уровня моря с 1996–2015 гг. сравнивались с фактическими данными (рис. 8.27).

На рис. 8.27 видно, что отдельные расчетные кривые неплохо воспроизводят фактические колебания уровня моря, происходившие на фоне ярко выраженного в это время отрицательного тренда.

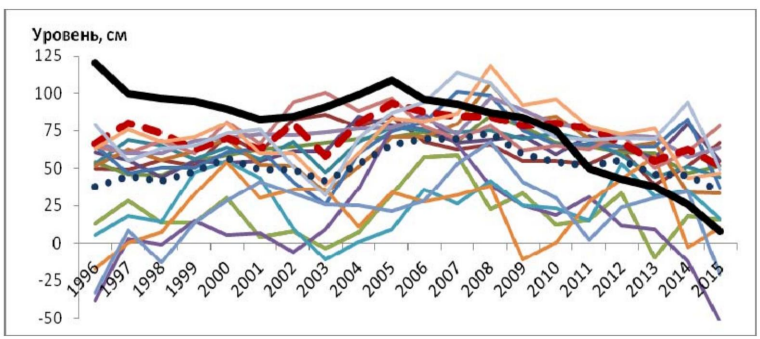


Рис. 8.27. Фактический (черная жирная линия) и расчетные уровни моря на 1996–2015 гг. Модель M1317 – штриховая линия: среднее значение по ансамблю – пунктирная линия.

Также рассчитывались коэффициенты линейной корреляции между расчетными и фактическими значениями (табл. 8.10). За фактический уровень принимался средний по всей акватории уровень моря (по данным Гидрометцентра России). Данная работа была выполнена в июле 2015 г., в связи с этим за фактический уровень в 2015 г. взята отметка, принятая в прогнозе Гидрометцентра России на этот год. Расчеты уровня моря проводились для каждого из 4-х постов в отдельности с использованием 6 моделей «кратной сезонности».

Таблица 8.10. Коэффициенты линейной корреляции фактического и расчетного уровня Каспийского моря в 1996–2015 гг.

Уровенный пост	Модель, использовавшаяся для расчетов					
	X1217	X1218	X1219	X1317	X1318	X1319
Махачкала	0,28	0,24	0,24	0,57	0,28	0,14
Баку	0,27	0,26	0,02	0,53	0,29	0,08
Красноводск	0,21	0,21	0,39	-0,24	-0,11	0,04
Актау	0,12	–	–	0,22	–	–

Примечание: для расчета уровня моря на посту Актау, в связи с недостаточной продолжительностью, оказались неприменимы модели, которым в таблице соответствуют пустые ячейки.

Данные, приведенные в табл. 8.10, показывают, что модель М1317 лучше, чем другие модели, воспроизводила фактические колебания уровня моря в 1996–2015 гг. (коэффициент линейной корреляции, равный 0,57, значим при $\alpha = 0{,}01$), на втором месте стояла модель В1317 (коэффициент линейной корреляции, равный 0,53, значим при $\alpha = 0{,}05$). Коэффициент корреляции средних по всем моделям значений с фактическими данными был равен 0,30. Интересно, что модельные кривые (для модели М1317 и средних значений) лучше совпадали с фактическими данными в интервале с 2003 по 2015 г., чем на предыдущем отрезке времени (с 1996 по 2003 г.).

Расчеты уровня моря на 2011–2035 гг. выполнялись в двух вариантах: сольном (рис.8.28) и ансамблевом (рис.8.29). Для сольного прогноза использовалась модель М1317, для ансамблевого – все модели.

На рис. 8.28 видно, что кривая уровня моря, рассчитанная на период 2011–2035 гг. с использованием модели М1317, после ее приведения к базовой отметке достаточно хорошо воспроизводит фактические изменения уровня в 2011–2015 гг. В соответствии с сольным прогнозом в 2016 г. уровень моря продолжит свое падение, но в 2017–2020 гг. он будет быстро повышаться.

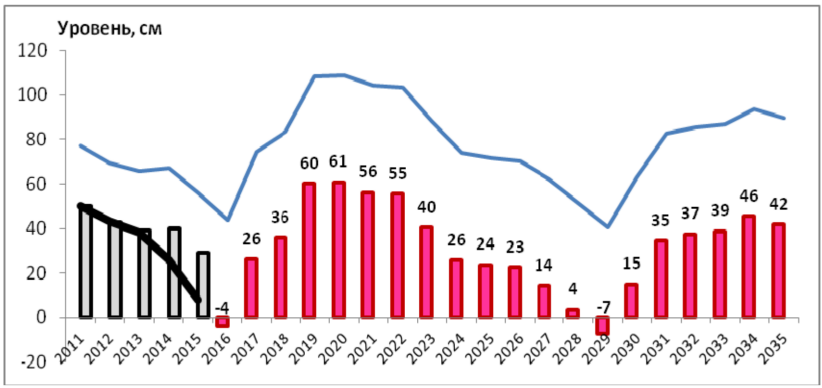


Рис. 8.28. Фактический (черная жирная линия) и рассчитанный с использованием модели M1317 (тонкая линия) уровень моря в 2011–2035 гг. Столбчатая диаграмма – рассчитанный уровень, приведенный к базовой отметке. За базовую отметку для 2011–2015 гг. взят фактический уровень в 2011 г., для 2016–2035 гг. – фактический уровень в 2015 г.

В силу того, что модель «кратной сезонности» не воспроизводит линейные тренды, расстояние на графике между фактической и расчетной кривой, даже в случаях, когда они следуют параллельно друг другу, может быть значительным. Для того, чтобы использовать расчетные кривые в прогностических целях, они приводились к базовому уровню, за который был принят средний уровень моря в году, предшествующему прогностическому периоду (например, для прогноза уровня моря на 2016–2035 гг. за базовый был принят уровень моря в 2015 г.).

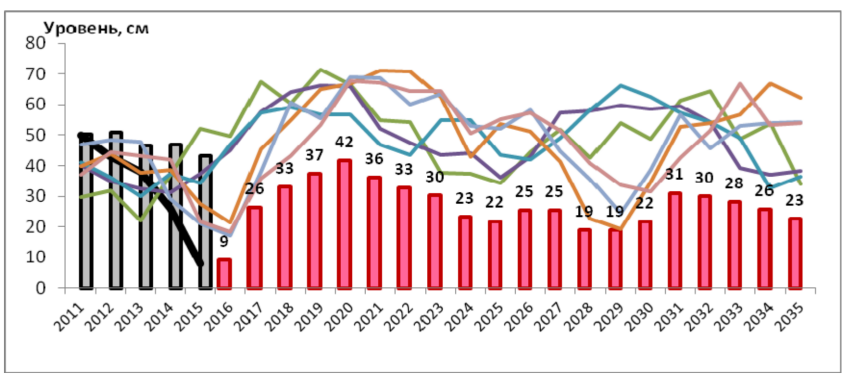


Рис. 8.29. Фактический (черная жирная линия) и рассчитанный с использованием ансамбля моделей (тонкие линии) уровень моря в 2011–2035 гг. Столбчатая диаграмма – средний по ансамблю уровень, приведенный к базовой отметке. За базовую отметку для 2011–2015 гг. взят фактический уровень в 2011 г., для 2016–2035 гг. – фактический уровень в 2015 г.

Расчеты с использованием ансамблевого метода проводились поэтапно: на первом этапе вычислялся уровень по каждому посту и для каждой модели; на втором этапе вычислялся средний уровень по четырем постам для каждой модели (рис. 8.29); на третьем этапе вычислялся средний уровень по всем моделям

На рис. 8.29 видно, что кривая уровня моря, рассчитанная на период 2011–2035 гг. с использованием ансамблевого метода, после ее приведения к базовой отметке воспроизводит слабое падение уровня в 2011–2015 гг. В соответствии с ансамблевым прогнозом, средний уровень моря в 2016 г. не будет отличаться от такового в 2015 г., а 2017–2020 гг. он также будет повышаться. Согласие в ходе УКМ, рассчитанного с использованием различных моделей, наблюдается до 2025 г., после чего кривые хода сильно расходятся. Учитывая период колебаний, использованных для моделирования (12–13 и 17–19 лет) и начальную точку расчетов (2011 г.), можно сказать, что согласие между моделями ограничивается одним циклом. Поэтому прогностический период в этом случае следует ограничить десятью годами (2016–2025 гг.). Прогноз уровня моря на этот период приведен в табл. 8.11.

Таблица 8.11. Прогноз изменения УКМ на 2016–2025 гг. (см) в сравнении с уровнем, ожидаемым в 2015 г. Нуль соответствует -28,0 м БС

Метод прогноза	Годы										
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Сольный	8	-4	26	36	60	61	56	55	40	26	24
Ансамблевый	8	9	26	33	37	42	36	33	30	23	22

Примечание: за фактический уровень в 2015 г. взята отметка, принятая в прогнозе Гидрометцентра России на этот год.

Как видно из табл. 8.11, ожидаемые в соответствии с сольным и ансамблевым прогнозом изменения уровня моря в 2016–2025 гг. в отдельные годы (2017–2018, 2024–2025 гг.) совпадают друг с другом, а в 2019–2023 гг. следуют друг за другом, отличаясь только размахом.

Резкое отличие заметно в 2016 г.; в соответствии с сольным прогнозом ожидается снижение уровня на 12 см относительно 2015 г., а в соответствии с ансамблевым – повышение на 1 см. Из таблицы видно, что по прогнозу в ближайшие годы уровень вновь начнет расти, причем быстрыми темпами. В частности, прогноз, приведенный в табл. 8.11, должен быть скорректирован с учетом фактического уровня Каспийского моря в 2015 г. При корректировке базовой отметки остаются неизменными ожидаемые годовые приращения уровня моря, которые легко вычислить, исходя из табл. 8.11 (приведены в. табл. 8.12).

Таблица 8.12. Прогноз приращений уровня Каспийского моря на 2016–2025 гг. (см)

Метод прогноза	Годы									
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Сольный	-12	30	10	24	1	-5	-1	-15	-14	-2
Ансамблевый	1	17	7	4	5	-6	-3	-3	-7	-1

Примечание: за фактический уровень в 2015 г. взята отметка, принятая в прогнозе Гидрометцентра России на этот год.

Исходя из тесной связи годовых приращений уровня моря со стоком р. Волги, их ожидаемые значения можно использовать в качестве ориентира для долгосрочного прогноза стока р. Волги. Так, исходя из цифр, приведенных в табл. 8.12, в 2017 г. (±1 год) следует ожидать катастрофического половодья на р. Волге.

У данного прогноза есть недостатки, обусловленные тем, что модели, используемые для его подготовки, не воспроизводят некоторые реальные черты временной изменчивости уровня Каспийского моря, в том числе: а) высокочастотные пульсации; б) долговременные линейные тренды; в) ультранизкочастотные колебания. Поэтому реальные отметки уровня моря будут отличаться от прогноза. Однако, нельзя не отметить, что дисперсия неучтенной изменчивости на 15-летнем отрезке времени, для которого составляется прогноз, существенно меньше дисперсии колебаний с периодом 12–13 и 17–19 лет, заложенных в модель.

8.8. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря на 50 лет (метод М.В. Болгова)

Метод вероятностного прогноза [14] основан на решении уравнения водного баланса моря, записанного в виде

$$\frac{dh}{dt} = V(t)/F(t) - E(t), \tag{8.17}$$

где $V(t)$ – приток воды в единицу времени; $E(t)$ – слой видимого испарения; $F(t)$ – площадь зеркала моря.

Для аналитического решения уравнения (8.17) используется его линеаризированный аналог

$$\frac{dh}{dt} + (bV(t)/a^2)h = V(t)/a - E(t), \tag{8.18}$$

где a и b – коэффициенты линейной зависимости площади моря от уровня моря $F = ah + b$.

Располагая величинами притока вод в море, видимого испарения, вычисляется приращение уровня для заданного i-го временного интервала

$$\Delta Z_i = \frac{V_i - V_{КБГ}}{F_i} - E_i . \qquad (8.19)$$

Прибавляя его к уровню на начало расчетного периода, получается значение уровня в конце этого интервала. Повторяя эту процедуру требуемое число раз, получается искусственная последовательность уровней моря необходимой заблаговременности.

В табл. 8.13 и на рис. 8.30 представлены квантили условных распределений вероятности уровня на ближайшие десятилетия, рассчитанные с использованием имитационной модели для следующих значений параметров побуждающих процессов: норма притока – 315 км^3/год, норма видимого испарения – 0,75 м/год, безвозвратное водопотребление – 25 км^3/год. Как следует из таблицы, диапазон возможных значений уровня достаточно широк. Отметка -26,0 м, имеющая обеспеченность 1 %, должна быть принята во внимание при проектировании мероприятий по инженерной защите. Также вероятны и низкие стояния уровня моря на отметках -28,0 -29,0 м БС.

Таблица 8.13. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря (безвозвратные изъятия 25 км^3/год; начальный уровень -27,0 м БС)

Обеспеченность, %	Заблаговременность прогноза, годы							
	1	3	5	10	20	30	40	50
0,1	-26,53	-26,11	-25,87	-25,59	-25,48	-25,48	-25,54	-25,63
1	-26,66	-26,37	-26,20	-26,04	-26,02	-26,06	-26,13	-26,21
5	-26,77	-26,59	-26,50	-26,44	-26,51	-26,58	-26,66	-26,73
50	-27,05	-27,14	-27,22	-27,40	-27,67	-27,83	-27,92	-27,98
95	-27,32	-27,69	-27,93	-28,37	-28,84	-29,07	-29,19	-29,23
99	-27,43	-27,91	-28,23	-28,76	-29,33	-29,59	-29,71	-29,75

С заблаговременностью до 5, 10, 20, 30 лет и т.д. средний прогнозный уровень (50 % обеспеченности) составляет от -27,05 до -27,98 м к 2050 г. Наиболее неблагоприятный прогноз 0,1 % обеспеченности на те же периоды составляет -25,48 м, а наиболее неблагоприятный прогноз 1 % обеспеченности составляет -26,02 м.

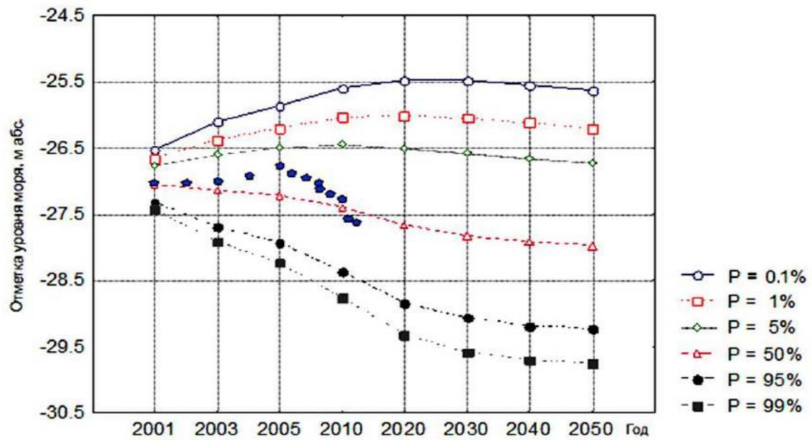


Рис. 8.30. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря (безвозвратные изъятия 25 км^3/год; начальный уровень -27,0 м). Отдельные точки на графике – отметки уровня моря по посту Махачкала.

Для рассмотренного выше примера оценки расчетных характеристик распределения вероятностей максимального за 50 лет уровня моря приводится в табл. 8.14.

Таблица 8.14. Плотность распределения и функция распределения максимального за 50 лет уровня Каспийского моря

№	Отметка, м	Плотность, %	Функция распред., %	№	Отметка, м	Плотность, %	Функция распред., %
1	-27,0	36,10	100,00	16	-25,5	0,380	1,450
2	-26,9	11,70	63,90	17	-25,4	0,380	1,070
3	-26,8	10,90	52,20	18	-26,3	0,220	0,700
4	-26,7	8,00	41,20	19	-25,2	0,120	0,470
5	-26,6	6,10	33,30	20	-25,1	0,050	0,350
6	-26,5	5,90	27,20	21	-25,0	0,100	0,300
7	-26,4	4,40	21,20	22	-24,9	0,080	0,200
8	-26,3	4,80	16,80	23	-24,8	0,050	0,120
9	-26,2	3,00	12,00	24	-24,7	0,025	0,075
10	-26,1	3,40	9,00	25	-24,6	0,025	0,050
11	-26,0	1,50	6,55	26	-24,5	0,000	0,025
12	-25,9	1,40	5,02	27	-24,4	0,000	0,025
13	-25,8	0,97	3,62	28	-24,3	0,250	0,000
14	-25,7	0,62	2,65	29	-24,2	0,000	0,000
15	-25,6	0,57	2,02	30	-24,1	0,000	0,000

8.9. Прогноз уровня Каспийского моря на основе решения дифференциального уравнения водного баланса (метод А.Б. Казанского)

В работе А.Б. Казанского [45] приводится прогноз уровня моря на 1993–2020 гг. В качестве модели колебания уровня использовалось дифференциальное уравнение водного баланса в виде

$$v - ae - beh = (a + bh) \cdot dh/dt \,, \tag{8.20}$$

где v – поступление воды в море в результате речного стока и осадков на поверхность моря; a и b – параметры линейной зависимости площади от уровня моря для расчетного интервала времени; h – уровень; t – время (годы).

Для построения прогноза использовалось решение уравнения (8.20) относительно t

$$t = -\frac{v}{be}\ln\left[1 - \frac{b}{v/ae - 1}\frac{h}{a}\right] - \frac{h}{e} \,. \tag{8.21}$$

Результат прогностического хода уровня приведен на рис. 8.31.

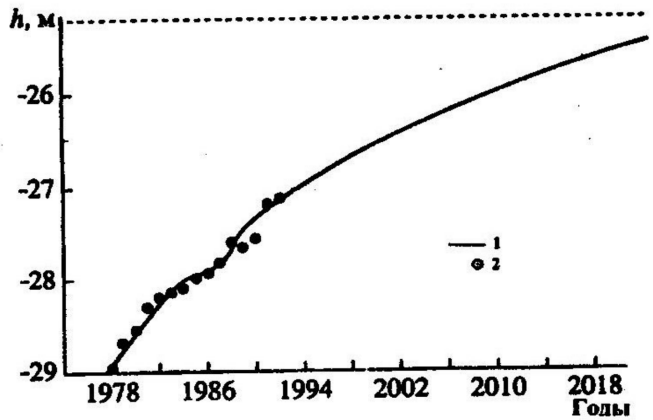


Рис. 8.31. График прогностического хода уровня с 1993 по 2020 г.: прогностическая кривая (1), фактические данные (2) [45].

8.10. Прогностические оценки колебаний УКМ на основе палеогеографических реконструкций

Палеогеографические реконструкции, основанные на данных детальных геолого-геоморфологических исследований каспийского побережья, проведенные в последние десятилетия С.И. Варущенко и др.,

Е.Г. Маевым и др., Г.И. Рычаговым, А.А. Свиточем и др. показали, что в течение плейстоцена (последние 700–500 тыс. лет) уровень Каспийского моря претерпел крупномасштабные колебания в диапазоне около 200 м: от -140 до + 50 м БС, и что за этот отрезок времени Каспий «испытал» четыре крупных трансгрессии: бакинскую, хазарскую, хвалынскую и новокаспийскую, которые разделялись глубокими регрессиями.

Рычагов [78] на основе изучения палеогеографической истории каспийского моря по палеогеоморфологическим данным и анализа высотного положения уровня моря на различных этапах развития, установил четкую связь между высотным положением уровня моря и составляющими водного баланса (стока рек и испарения на акватории моря). Анализ палеогеографической ситуации Каспийского региона позволил Рычагову сделать заключение, что за последние 2–2,5 тыс. лет, т. е. с начала субантарктической эпохи голоцена, когда началось формирование современных ландшафтов в бассейне Каспия, а следовательно, и близких к современным условиям составляющих водного баланса, уровень моря никогда не поднимался выше -25,0 м БС. Это дало ему основание полагать, что начавшийся в 1978 г. подъем уровня не превысит эту отметку, а с учетом хозяйственной деятельности и восстановления стока в залив Кара-Богаз-Гол остановится на отметке -26,0 м БС.

Результаты данного анализа позволили ему экстраполировать палеогеографические данные на современную эпоху. Он пришел к выводу, что при современных величинах составляющих водного баланса (объема стока более 300 км^3/год), видимого испарения (более 69 см/год) и среднегодовой скорости (до 13 см) повышения уровня моря, и учитывая геоморфологические особенности Каспийского моря, можно ожидать повышение уровня до отметки -26,0 м БС на рубеже XX–XXI вв., а -25,0 м БС к 2010 г. Исходя из геоморфологического строения Каспийской впадины, в самые ближайшие годы повышение уровня моря замедлится, а с приближением к отметке -26,0 м БС может даже прекратиться (без учета сезонных колебаний уровня моря), так как начнется затопление таких понижений (соров) как Мертвый Култук, Кайдак, Балханского, Келькор и других более мелких понижений северного и северо-восточных побережий моря. Затопление крупных соров и новой территории приведет к увеличению площадей более чем на 12000 кв. км хорошо прогреваемых мелководий, что увеличит испарение примерно на 10 км^3/год.

Уменьшению расходной части водного баланса будет способствовать увеличение стока в залив Кара-Богаз-Гол, восстановленного в 1992 г. С палеогеографической точки зрения в поведении уровня Каспия в XX столетии (падение на 3,0 м с 1930 по 1977 г. и подъем почти на 2,5 м с 1978 по 1995 г.) нет ничего экстраординарного и, если бы все

мероприятия в прибрежной зоне проводились с учетом зоны риска (полосы побережья от -25,0 до -29,0 м абсолютных отметок, т. е. в пределах вековых колебаний уровня), то можно было бы избежать тех негативных последствий и убытков, которые были связаны с подъемом уровня после 1978 года.

Разработанная Рычаговым методика позволила ему составить два прогноза. Первый прогноз относится к периоду понижения уровня, в котором он предсказал приостановку падения уровня и даже более вероятное его повышение. Этот прогноз в целом оправдался. Второй прогноз относился к начавшемуся в 1978 г. подъему уровня моря. Согласно этому прогнозу подъем уровня в ближайшие годы замедлится, а с приближением к отметке -26,0 м прекратится. Этот прогноз также оправдался, достигнув в 1995 г. отметки -26,06 м, уровень моря за последующие 17 лет, испытывая небольшие колебания, понизился на 90 см и к началу 2013 г. находился на отметке -27,57 м (по посту Махачкала).

По Рычагову уровень моря в ближайшем будущем вряд ли понизится ниже отметки -28,0 м БС при условии, что средние параметры водного баланса Каспия за последнее столетие составят: сток рек приблизительно 288 км^3/год; видимое испарение приблизительно 77 см/год. Как отмечает Рычагов, такой уровень ни населению, ни прибрежной инфраструктуре угрозы не представляет.

М.И. Будыко. и др. [16] выполнили расчет климатических условий на 2000, 2020 и 2050 гг. по материалам для климатических оптимумов голоцена, микулинского межледниковья и плиоцена, т.е. на основе палеаналогий. Изменения уровня моря по отношению к 1986 г., согласно прогнозу, оказались следующими: 2000 г. – -0,3 м; 2020 г. – +0,7 м; 2050 г. – +5,4 м. Позднее В.В. Лобанов [56] уточнил этот прогноз: в 2000 г. – -0,4 м; в 2025 г. – +0,4 м; в 2050 г. – +3,9 м.

8.11. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря, основанные на учете солнечной активности

В истории исследования Каспийского моря в XX веке (в периоды падения и подъема уровня моря) появилось много прогнозов, основанных на учете солнечной активности. Сверхдолгосрочные прогнозы УКМ, основанные на учете солнечной активности, были разработаны М.С. Эйгенсоном [96], А.Н. Афанасьевым [10], И.Ф. Гетманом [26, 27], А.И. Дуваниным [40, 41], Н.Н. Соловьевой [90], В.А. Рутковской [80] и другими.

Эйгенсон на основании сравнительного анализа векового хода солнечной активности и уровня Каспийского моря составил достаточно точный прогноз изменения УКМ. Он сформулировал правило, согласно

которому низкие стояния Каспия приходятся на эпохи вековых максимумов солнечной активности и, наоборот, эпохам высоких стояний Каспия соответствуют эпохи минимумов вековых уровней солнечной активности. На основе этого правила Эйгенсон в 1963 г. предсказал подъем уровня в 1970–2000 гг. Согласно прогноза Эйгенсона, к 2000 г. средний уровень моря должен был достичь отметки -26,9 м БС. Фактически в 2000 г. отметка уровня по посту Махачкала составила -26,95 м БС. Важно, что этот прогноз хорошо уловил переход уровня с падения на подъем в 1978 г.

По прогнозу Дуванина [40, 41] в ближайшие 30–40 лет после 1990 г. уровень моря будет повышаться со скоростью 5–6 см и до 8 см в конце периода. По прогнозу Гетмана [26, 27], к концу первой половины XXI века уровень моря достигнет абсолютной отметки -21,7 м. Это означает, что ежегодно в течение 50 лет уровень должен повышаться в среднем на 11 см, что маловероятно. Даже по самому смелому прогнозу В.В. Лобанова [56] максимальная отметка уровня к 2050 г. не должна превысить -24,0 м БС.

В работах Д.Г. Осика и др. [66, 67] указывается, что определяющим фактором уровенного режима Каспия является климатический, который, в свою очередь, определяется динамикой солнечной активности. Им установлена обратная зависимость УКМ от солнечной активности (коэффициент корреляции -0.86). В работе показано, что самое низкое стояние уровня (-29,01 м БС), наблюдавшееся в 1977 г. является результатом суперпозиции максимумов одиннадцатилетнего, векового и многолетнего циклов. По прогнозу Осика, составленному в 1995 г., не исключена возможность подъема уровня к 2020 г. до отметки -24,0 м БС, после чего должна наступить квазистабилизация уровня в течение 40 лет и затем вновь падение до отметок -27,0 – -28,0 м БС.

Н.Н. Соловьева [90] разработала методологию сравнения многолетних рядов солнечной активности и геофизических процессов различных масштабов и показала зависимость колебаний детерминированных составляющих геофизических процессов, в том числе стока Волги и уровня Каспийского моря от солнечной активности предшествующих периодов. На основе этой зависимости она разработала прогнозы стока Волги и уровня Каспийского моря до середины XXI века.

Глава 9.

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И МЕТОДЫ ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

9.1. Условия возникновения и развития сгонно-нагонных явлений на Северном Каспии

На Каспийском море к непериодическим колебаниям уровня относятся, прежде всего, сгонно-нагонные явления. Приливные колебания и колебания сейсмического происхождения на Каспии незначительны, и они здесь не рассматриваются. Особенности возникновения и развития сгонно-нагонных колебаний уровня моря (штормовых нагонов и сгонов) на Каспии исследовались многими авторами [11, 21, 30, 33, 34]. Некоторые результаты этих исследований изложены в [1, 25, 28].

Основными характеристиками штормовых нагонов являются даты начала и окончания явления, высота подъема уровня воды и его обеспеченность, интенсивность повышения уровня, продолжительность стояния высокого уровня, дальность распространения по суше и скорость проникновения морских вод, общая площадь затопления. Штормовой нагон или сгон часто определяются как разность между наблюденным уровнем и уровнем, который мог бы быть в отсутствии шторма. При штормовом нагоне эта разность положительна, при сгоне – отрицательна.

При сильных нагонах в условиях очень пологого побережья происходит затопление полосы побережья шириной до 15–25 км, что наносит огромный материальный ущерб и вызывает негативные экологические последствия [4, 16]. За последние годы в результате штормовых нагонов в пределах административной границы российского побережья Каспийского моря было затоплено и выведено из землепользования 320 тыс. га освоенных земель, при этом суммарный экономический ущерб составил около 4,3 млрд руб. (в ценах 1991 года.). Только

штормовой нагон 12–16 марта 1995 г. нанес ущерб на сумму около 3 млрд руб. (в ценах 1995 г.). Этот нагон был предсказан с трехдневной заблаговременностью Гидрометцентром России, иначе материальный ущерб был бы неизмеримо больше. Прогноз непериодических колебаний уровня в прибрежных и мелководных районах Каспийского моря имеет большое практическое значение для судоходства, рыболовства, добычи полезных ископаемых на шельфе и т. д.

Сгон, совпадающий с низким стоянием уровня, может создавать риск для судоходства (особенно для больших судов в прибрежных водах) и проблемы с охлаждением воды на энергетических станциях. При сгонах нарушается работа водозаборов, происходит обмеление портовых акваторий и судоходных морских каналов, сокращаются площади нерестилищ и нагула ценных промысловых рыб, в первую очередь осетровых, изменяется ландшафтная структура прибрежных территорий, оголяются значительные площади прибрежных территорий.

Как нагон, так и сгон могут обуславливаться одним и тем же штормом при разных стадиях его развития. Штормовой нагон генерируется частично в результате изменения атмосферного давления, но в основном в результате непосредственного воздействия ветра. При этом эффекты давления и ветра одинаково важны.

Относительно причин возникновения сгонно-нагонных колебаний уровня моря существуют различные точки зрения. Большинство ученых придерживаются концепции, согласно которой на величину нагонов и сгонов оказывают влияние такие факторы, как скорость и направление ветра, продолжительность его действия, длина разгона ветра, а также глубина моря, уклоны и рельеф дна, конфигурация береговой черты.

Однако существует и другая точка зрения, например в [3], согласно которой в формировании экстремальных колебаний уровня доминирующую роль играют генерируемые проходящими циклонами длинные волны. Когда скорость движения циклона приближается к скорости перемещения свободной длинной волны, может наступить явление резонанса, значительно усиливающее ее. Очевидно, что в зависимости от конкретных физико-географических особенностей акватории морей основной вклад в формировании нагонов могут вносить первый или второй механизм, либо их комбинация.

Физический механизм формирования сгонно-нагонных колебаний уровня определяется воздействием нормальных и тангенциальных сил ветра и атмосферного давления на водную поверхность моря, в результате чего осуществляется перераспределение водных масс внутри водоема. Колебания атмосферного давления над морем обычно вызывают статические изменения уровня – повышение в области пониженного давления и понижение в областях повышенного давления, они

возбуждают длинные волны [3]. Изменение положения уровенной поверхности за счет статического эффекта атмосферного давления приближенно описывается законом «обратного барометра», согласно которому при повышении атмосферного давления на 1 гПа уровень понижается на 1 см, и наоборот.

В результате воздействия ветра на водную поверхность возникают дрейфовые течения, которые в Северном полушарии отклоняются вправо. Полный поток установившего течения направлен перпендикулярно к действию ветра. В мелководных морях величина отклонения течения от направления ветра зависит от отношения глубины моря к глубине, на которой вектор течения направлен противоположно вектору течения на поверхности (глубина трения). Если это отношение меньше 0,1, то угол отклонения приближается к нулю. Таким образом, в глубоком море нагон будет наибольшим при ветре, направленном параллельно береговой линии, расположенной справа, а в мелководном – при ветре, перпендикулярном к ней. Динамические процессы на море осложняются тем, что на колебания уровня, обусловленные ветром, накладываются длиннопериодные волны, обусловленные воздействием крупномасштабных атмосферных процессов, влияние которых может существенно превосходить статический эффект атмосферного давления и действия ветра.

Под влиянием дрейфового и градиентного течений вдоль побережья моря формируется определенная циркуляция вод. С уменьшением глубины моря влияние силы Кориолиса уменьшается и при некоторой достаточно малой глубине ею можно пренебречь. Но одновременно с этим возрастает трение о дно, и для создания компенсирующего потока от берега, равного потоку дрейфового течения в сторону берега, необходимы большие уклоны уровня. Соответственно, амплитуда сгонно-нагонных колебаний увеличивается с уменьшением глубины.

Когда ветер начинает дуть в сторону берега, в море преобладает дрейфовый поток. Если глубины меньше 3 м, при продолжительном сильном ветре вся масса воды перемещается по ветру, противотечения у дна не возникает, и вода накапливается у берега. Повышение уровня создает градиент давления, вызывающий, в свою очередь, отток воды, т. е. на глубинах 4–5 м может возникать слой воды толщиной 1–1,5 м с компенсационным течением у дна (противотечением). Наступает явление «установившегося нагона», которое будет существовать до тех пор, пока сила, вызвавшая нагон, не изменится или не прекратит свое действие. При изменении силы ветра через некоторое время вновь наступает установившийся нагон, но уже при другом положении уровенной поверхности. Профиль водной поверхности по нормали к берегу в процессе развития нагона меняется – пик нагона перемещается к берегу от изобаты 4–5 м.

9.2. Статистика сгонно-нагонных явлений на Северном Каспии

Большое разнообразие физико-географических условий на различных участках побережья Каспия обуславливает значительные различия в величинах сгонно-нагонных колебаний уровня, которые наблюдаются по всему побережью Каспия, но особенно им подвержены мелководные районы Северного Каспия, где размах колебаний достигает 5–7 м. Так, величина катастрофического нагона, наблюдавшегося в ноябре 1952 г., превысила 4 м, а величина сгона у Волго-Каспийского маяка в ноябре 1958 г. достигла 2,5 м.

Развитию штормовых нагонов в этом районе способствуют малые глубины и уклоны дна в прибрежной зоне. В западной части Северного Каспия наибольшие нагоны отмечались у пос. Каспийский (4,5 м), в восточной – у пос. Жилая Коса (2,5 м). Максимальные сгоны наблюдались у плавмаяка Волго-Каспийский (2,3 м) и у о. Зюйдвестовская Шалыга (1,5 м) [25]. Распространение нагонов в дельте Волги существенно зависит от положения среднего уровня моря.

В периоды низкого стояния среднего уровня моря граница зоны вероятного затопления смещается в сторону открытого моря на 40–50 км, при этом распространение нагонной волны в дельту Волги отмечалось только в экстремальных случаях, как, например, при катастрофическом нагоне в ноябре 1952 г. Разрушительное действие ветровых нагонов при этом уменьшается, так как уменьшается вероятность затопления той части побережья, которая обычно затапливается при более высоком положении среднего уровня моря. И наоборот, при высоком стоянии среднего уровня моря разрушительная роль штормовых нагонов существенно усиливается, при этом нагонная волна свободно распространяется в дельту Волги, достигая Астрахани и даже с. Верхнее Лебяжье.

На западном побережье моря, на участке Кизлярский залив – с. Вышка при сильных нагонах затопление может проникать на сушу на расстояние 30–50 км, на участке Дементьевская Коса – устье Урала на расстояние 5–10 км, на восточном побережье от устья Урала до полуострова Дуриев – на 30–40 км. С повышением уровня Каспия происходит и повышение максимальных уровней во время нагонов на Северном Каспии.

Сгонно-нагонные колебания уровня моря в северо-восточном Каспии также довольно частое явление. В среднем за месяц происходит 3–5 нагонов и 5–6 сгонов воды различной интенсивности. На рис. 9.1 представлен хронологический график хода сгонно-нагонных колебаний уровня на Северном Каспии за период с 1950 по 2004 год [15].

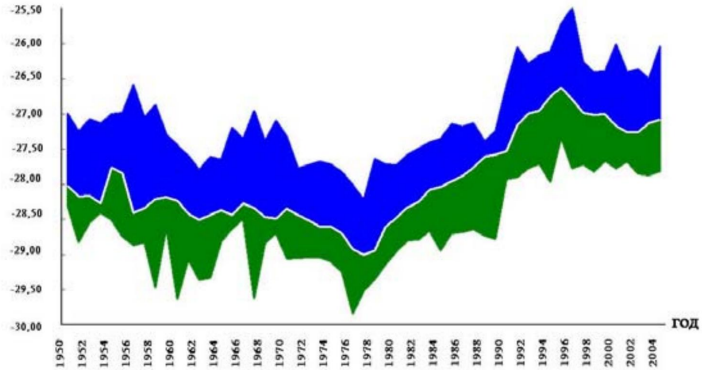


Рис. 9.1. Колебания уровня Каспийского моря во время сгонно-нагонных явлений (белая линия – ход среднего уровня моря, м БС).

Характеристики нагонов и сгонов и, соответственно, опасность затоплений и осушений побережья постоянно меняются вслед за изменениями среднего уровня и площади моря, конфигурации береговой линии и других факторов, в частности деятельности человека. При одной и той же величине нагона, но при более высоком положении среднего уровня моря вероятность и размеры затоплений, дальность проникновения нагонного повышения в сторону суши увеличиваются, а при более низком – уменьшаются.

В средней и южной частях моря сгонно-нагонные колебания уровня меньше, но тоже значительные. Наибольшая величина нагона составляет 50–70 см, а сгона 30–100 см. Наибольший размах колебаний изменяется в пределах 100–150 см.

Внутригодовое распределение сгонов и нагонов в районе Махачкалы определяется в основном сезонной повторяемостью господствующих ветров. Сгоны в районе Махачкалы достигают больших значений, чем нагоны, и имеют место преимущественно зимой. Максимальный сгон составил 100 см (20–21 ноября 1957 г.) во время жестокого шторма (скорость северо-западного ветра достигала 34 м/с). Максимальный нагон наблюдался 12 февраля 1969 г. и составил 72 см при юго-восточном ветре до 20 м/с. Минимальные штормовые нагоны наблюдаются в пограничном районе между средней и южной частями моря. В прибрежных районах Южного Каспия от Астары на западе до Туркменбаши на востоке величина нагонов при ветрах северной четверти равна 50–80 см. Величина сгонов при юго-восточных ветрах в районе Туркменбаши, Аладжи превышает 1 м.

Экстремальные нагоны наблюдаются во все сезоны года, но чаще всего в холодный период: в Северном Каспии – с сентября по ноябрь

и с марта по апрель. В большинстве случаев штормовые нагоны наблюдаются в весенние и осенние месяцы. Нагоны у западных и северо-западных побережий вызываются часто повторяющимися ветрами восточных и юго-восточных направлений. Сгоны морской воды обусловлены действием ветров западного и северо-западного направлений. Суммарная повторяемость ветров нагонных направлений составляет 60 %, а сгонных – 40 %. На Северном Каспии подъем уровня до 1 м возникает при скорости ветра 10–15 м/с и продолжительности действия от 10–12 ч до 1–2 сут. При сильных ветрах со скоростью 15–25 м/с их высота достигает 1,5–2,5 м и более. Наиболее часто крупные сгонно-нагонные явления наблюдаются на западном и восточном побережьях Северного и Среднего Каспия (табл. 9.1).

Таблица 9.1. Число случаев максимальных нагонов по данным наблюдений в Северном (ГМС о. Тюлений и о. Пешной) и Среднем Каспии (ГМС Махачкала и Форт-Шевченко) [32]

Пункт	Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
о.Тюлений	1938–1993	7	4	5	0	3	1	0	0	2	7	15	14
о.Пешной	1931–1993	1	2	2	8	9	4	3	1	5	20	4	3
Махачкала	1900–1993	19	9	5	0	1	1	1	1	1	0	1	18
Форт-Шевченко	1921–1993	12	11	7	3	1	3	0	3	5	3	12	11

Как видно из табл. 9.1, в большинстве случаев штормовые нагоны наблюдаются весной и осенью и обусловлены сильными и устойчивыми ветрами эффективных направлений, каковыми на Северном Каспии являются юго-восточные, восточные (для западной части моря), северо-западные и западные (для восточной части моря). Штормовые нагоны наблюдаются и в зимние месяцы. Отличительной чертой зимних нагонов на Северном Каспии является то, что они происходят при наличии ледяного покрова. Ледяной покров существенным образом уменьшает величину нагонов. Это особенно относится к неподвижному льду (припаю). Величина нагона при установлении прочного припая уменьшается более чем в 3 раза и не превышает 1 м. Плавучий лед, который обычно бывает в мягкие зимы, практически не препятствует развитию и распространению нагонной волны. Несколько иное распределение максимальных за год величин нагонов характерно для западного и восточного побережья Среднего Каспия (Махачкала и Форт-Шевченко), где много сильных нагонов наблюдается в зимний период.

Продолжительность нагонов меняется в широких пределах: от нескольких часов до нескольких суток. Наиболее часто нагоны длятся

1,5–2,5 сут, а максимальная продолжительность достигает 6–8 сут. Максимальная величина нагонов (относительно среднемесячного уровня моря) колеблется в пределах 2,4–4,2 м. Величины нагонов 0,5, 1,0 и 2,0 % обеспеченности равны 3,6, 2,7 и 2,0 м (ГМС о. Тюлений) и 2,5, 1,9 и 1,4 м (ГМП о. Искусственный). На Северном Каспии отмечается по 3–4 нагона и сгона в месяц. Ширина зоны затопления при малых нагонах равна нескольким километрам, а при экстремальных нагонах достигает 35 и даже 50 км (например, нагон ноября 1952 г.). Во время таких нагонов в зону затопления попадают многие населенные пункты и объекты инфраструктуры.

За последние 150 лет на северо-западном побережье Каспия наблюдалось до 14 нагонов величиной 1,5–2,0 м, нанесшим значительный ущерб хозяйственным объектам. Наиболее катастрофическим считается нагон 10–14 ноября 1952 г., обусловленный продолжительными и сильными ветрами (более 20 м/с, а на ГМС Махачкала более 30 м/с). Он происходил на фоне среднего уровня моря -28,0 м БС. Уровень моря при этом нагоне достиг в пределах калмыцкого побережья Каспия отметки -23,6 м БС. Вероятность таких нагонов по Н.Д. Герштанскому [10] составляет один случай в 150–200 лет.

На Северном Каспии выделяются две зоны значительных нагонных колебаний уровня: западное побережье и устьевое взморье Волги (от Брянской Косы до о. Новинский) и северо-восточное и восточное побережье от Мартышечьей Косы до м. Бурунчук. На западном побережье моря, на участке Кизлярский залив – п. Вышка, при сильных нагонах зона затопления может достигать ширины 30–50 км, на восточном, от устья р. Урал до полуострова Дурнев, 30–40 км.

С повышением уровня моря происходит и повышение максимальных уровней во время нагонов. Так, если в период с 1980 по 1984 г. максимальный уровень у Каспийска во время нагонов превысил отметку 100 см 3 раза (135 см – январь 1984 г., 159 см – февраль 1981 г., 184 см – декабрь 1981 г.), то в следующем пятилетии 1985–1989 гг. эта отметка была превышена 11 раз (110 см – декабрь 1988 г., 130 см – июль 1988 г., 132 см – февраль 1989 г., 136 см – август 1989 г., 140 см – май 1989 г., ноябрь 1989 г., 152 см – июнь 1987 г., 156 см – март 1989 г., 170 см – сентябрь 1988 г., 172 см – октябрь 1987 г., 180 см – апрель 1989 г.). Соответственно, у о. Тюлений во время нагонов в 1980–1984 гг. уровень превысил отметку 80 см 4 раза, в 1985–1989 гг. – 11 раз.

Среди наиболее значительных нагонов на северо-западе Каспия за последние три десятилетия можно выделить особо опасные нагоны 27–30 декабря 1981 г., 12–14 октября 1987 г., 28–29 октября 1987 г., 17–10 апреля 1989 г. и 12–16 марта 1995 г.

За последние 120 лет в Северном Каспии наблюдались сильные нагоны (высотой до 1,5 м и более) в 1877, 1910, 1925, 1940, 1952,1960, 1981, 1984, 1985, 1987, 1989, 1991,1992,1993,1994, 1995 гг. (табл. 9.2).

Таблица 9.2. Характеристики наиболее значительных штормовых нагонов в северо-западной части Каспийского моря [4]

Дата	Максимальная отметка уровня, м	Величина подъема уровня относительно среднего уровня моря, м	Интенсивность подъема воды, см/ч	Ширина зоны затопления побережья, км
25–27.11.1910	–	3,6	–	
10–13.11.1952	-23,62	3,7	20	до 50
19–20.11.1960	-26,95	1,2	4–10	10–17
27–30.12.1981	-26,16	1,9	до 14	до 40
25–28.01.1984	-26,65	1,1	4–12	20–30
17–18.04.1989	-26,20	1,1	4–9	20–30
23.06.1991	-25,95	0,9	2–5	20–25
08.04.1992	-25,78	1,1	2–7	15–20
02–03.04.1993	-25,76	1,0	3–4	12–17
07–09.04.1994	-25,20	1,4	до 12	25–30
12–13.03.1995	-24,81	1,7	до 15	до 30

Величина сгона в прибрежной зоне моря и устьевом взморье Волги ограничена глубиной места и может достигать максимальных значений 2–3 м. Самые сильные сгоны (более 130 см) у северо-западного побережья Каспия отмечены в холодный период года: февраль 1936 г., октябрь 1941 г., октябрь 1957 г., ноябрь 1958 г., ноябрь 1959 г., январь 1960 г., октябрь 1979 г., февраль 1981 года.

Существенное влияние на характер затопления побережья Северного Каспия при нагонах оказывает положение среднего уровня моря. В вопросе о том, что брать за начало отсчета при определении величины нагона и сгона, нет определенной точки зрения. В одних случаях для выделения нагонов и сгонов берут средний уровень за весь период наблюдений, в других – среднемесячный уровень период действия нагона. Н.А. Скриптунов [31] рекомендует за фоновый уровень, от которого отсчитывается относительная величина нагона или сгона, принимать среднемесячную отметку уровня по конкретному посту для месяца, в котором наблюдалось данное явление. За продолжительность нагона принято время, в течение которого уровень моря при нагоне

превышает среднемесячную отметку. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов, прогнозы уровня нужно составлять относительно абсолютного единого нуля поста для Каспийского моря, равного -28,00 м БС, так как критические отметки для пунктов Каспийского моря даны именно относительно абсолютного нуля поста. Отклонения экстремальных значений уровня моря от их среднемесячных величин представлены в табл. 9.3. В ней приведены среднемесячные и наибольшие за месяц величины нагонов и сгонов по данным многолетних наблюдений на уровенных постах Северного Каспия.

Таблица 9.3. Среднемесячные (числитель) и наибольшие за месяц (знаменатель) величины нагонов и сгонов относительно среднего месячного уровня моря по данным многолетних наблюдений на постах Северного Каспия (см) [5]

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Экстремум
Бирючья Коса (1892–1919, 1921–1945)													
Нагон	33	23	48	71	55	30	39	45	56	66	79	57	232
	37	51	160	232	140	87	94	103	114	135	227	486	04.1944
Сгон	24	21	32	41	36	25	34	34	40	46	45	39	116
	54	58	76	82	53	46	73	63	75	102	91	116	12.1892
Каспийский (1935–1949,1976–1993)													
Нагон	50	48	70	87	72	56	43	53	64	70	63	73	180
	115	168	178	140	158	96	75	96	115	144	151	180	12.1947
Сгон	48	46	60	79	68	55	47	44	61	66	74	68	155
	113	134	130	122	137	107	79	83	108	120	130	155	12.1990
о. Искусственный (1941–1992)													
Нагон	16	15	25	39	33	28	20	21	28	33	37	34	309
	61	86	77	108	81	135	62	71	92	107	309	102	13.11.1952
Сгон	13	11	17	16	22	16	13	11	13	15	13	16	55
	45	36	37	48	48	45	34	29	42	47	55	53	11.1992
о. Тюлений (1938–1995)													
Нагон	59	52	57	52	46	38	36	40	51	58	67	67	238
	118	139	133	83	90	87	70	80	108	97	238	119	12.11.1952
Сгон	60	56	54	50	49	46	41	43	54	66	68	65	153
	153	135	118	103	107	97	71	86	126	145	142	122	23.01.1960
о. Кулалы (1936–1992, 2001–2004)													
Нагон	31	28	28	25	22	23	20	21	25	28	32	35	76
	60	65	57	62	51	74	48	45	62	60	61	76	22.12.1967
Сгон	26	25	26	22	23	24	20	23	22	23	26	26	77
	77	64	53	43	51	38	43	48	42	39	57	45	11.01.1941
о. Пешной (1929–1953, 1965–1968, 1972–1993, 2000–2004)													
Нагон	28	19	28	45	93	41	42	38	43	54	48	40	153
	72	64	92	153	124	74	94	78	77	105	79	110	04.04.1946
Сгон	25	20	27	43	32	39	39	43	45	45	43	36	123
	57	57	67	87	80	81	65	87	123	88	83	72	07.09.1967

9.3. Эмпирические и физико-статистические методы краткосрочного прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня на Каспии

Проблема прогноза штормовых нагонов в той или иной степени актуальна практически для всех мелководных побережий Каспийского моря. Штормовые нагоны относятся к числу опасных явлений, поэтому в случае угрозы возникновения штормового нагона прогностическими органами Росгидромета выпускается штормовое предупреждение в соответствии с требованиями нормативного документа [27].

Каспийское море является наиболее сложным объектом для изучения и прогнозирования сгонно-нагонных явлений, которые происходят на фоне значительных вековых, многолетних и сезонных колебаний уровня. Так, в течение последних 100 лет уровень Каспийского моря понижался на 3 м (с отметки -26,00 м БС в 1929 г. до -29,01 м БС в 1977 г.) и повышался на 2,35 м (с отметки -29,01 м БС в 1977 г. до отметки -26,66 м БС в 1995 г.).

До недавнего времени в оперативной практике использовались в основном эмпирические и физико-статистические методы прогноза уровня моря, основные ограничения которых – возможность составления прогноза для отдельных пунктов при наличии в этих пунктах длительных рядов наблюдений над ветром и уровнем моря.

Физико-статистические методы прогноза непериодических колебаний уровня наиболее удобны в оперативном использовании и представляют многочисленную и разнообразную по принципам реализации группу [1, 2, 19, 20, 28, 35]. Их суть состоит в том, что на основе исходных рядов наблюдений за ветром и уровнем устанавливается корреляционная связь между ними с определенным сдвигом во времени, который определяет заблаговременность прогноза.

Преимущество методов этой группы заключается в сравнительной простоте построения прогностических уравнений. Другим преимуществом методов этого направления является то обстоятельство, что в прогностических уравнениях косвенно учитываются недостаточно глубоко изученные физические процессы, оказывающие влияние на механизм формирования непериодических колебаний уровня. В силу эмпирической природы прогностических уравнений по истечении определенного времени оправдываемость прогнозов, составленных по этим уравнениям, снижается. Это приводит к необходимости их периодического уточнения.

На начальном этапе прогнозы составлялись на основе корреляционных зависимостей между уровнем моря и ветром в отдельных

пунктах моря. Однако со временем стало ясно, что в большинстве случаев временной ход уровня моря не имеет тесной связи с локальным ветром, а обусловлен ветровыми полями над большей частью акватории моря, и только в мелководных бухтах и заливах вклад местного ветра может быть значительным [28].

Так, А.И. Каракаш [20] по данным ГМП Махачкала установил зависимость между изменением уровня моря и изменением атмосферного давления и скорости ветра, которая имеет вид

$$\Delta H = a\Delta P + b\Delta V \,, \tag{9.1}$$

где ΔH – величина изменения уровня за 12 ч, см; ΔP – изменение давления за 12 ч, гПа; ΔV – изменение скорости ветра за 12 ч, м/с.

С.И. Кан [19] построила прогностическое уравнение регрессии для ГМП Каспийск, которое имеет вид

$$H = \overline{H} + 0{,}50\Delta H + 0{,}35\Delta P \,, \tag{9.2}$$

где H – прогнозируемый среднесуточный уровень, см; $\overline{H}$ – среднесуточный уровень за предыдущую декаду, см; $\Delta H = H_{сроч} - \overline{H}$, где $H_{сроч}$ – уровень в исходный срок наблюдений; ΔP – градиент давления, гПа, по линии Гурьев – Махачкала. Коэффициент корреляции r = 0,83.

Методы прогноза непериодических колебаний уровня, основанные на учете эффективных градиентов давления, носят локальный характер, так как для каждого пункта необходимо отыскивать свои эффективные градиенты. Простота вычисления градиентов давления обеспечивала им широкое применение при создании методов прогноза уровня. В то же время использование для расчетов уровня параметров местного ветра, регионального ветра и градиентов давления не позволяет объективно учесть все многообразие полей ветра над морем. В связи с этим в начале 1960-х гг. появились работы, в которых прогнозы уровня рассчитывались по корреляционным зависимостям, учитывающим поля атмосферного давления, представленные аналитически в виде рядов разложения по полиномам Чебышева или по естественным ортогональным функциям.

О.И. Шереметевская [35] показала, что вместо эффективных градиентов предпочтительнее использовать непосредственно поля атмосферного давления над значительным районом, представленные аналитически в виде рядов разложения по функциям координат *x, y*. Тогда коэффициенты ряда разложения можно использовать в качестве предикторов при построении прогностических зависимостей. По значению и знаку коэффициента разложения можно судить об интенсивности и

направлении воздушных потоков, что позволяет косвенно учесть изменение скорости течений, а также статический эффект в колебаниях уровня моря. В качестве предикторов использовались шесть первых коэффициентов разложения поля атмосферного давления по полиномам Чебышева.

Прогностические зависимости устанавливались отдельно для сильных нагонов, сильных сгонов и умеренных колебаний уровня моря. В результате были установлены зависимости для прогноза уровня моря с заблаговременностью 6, 12, 18, и 24 ч для семи пунктов: Махачкала, Изберг, Сумгаит, Форт-Шевченко, Бегдаш, Кара-Богаз-Гол и Красноводск вида

$$H_t - \overline{H}_{t-1} = f(\Delta H_{t-1}; \sum A_{ij}; (H - \overline{H}_{t-1}), \qquad (9.3)$$

где H_t – уровень в момент выпуска прогноза; $\overline{H}_{t-1}$ – среднедекадный скользящий уровень в тот же срок; ΔH_{t-1} – разность между положением уровня в опорных пунктах; A_{ij} – коэффициенты разложения поля давления в ряд по полиномам Чебышева.

На низких побережьях Каспийского моря большое значение имеет информация о глубине заливания прибрежной территории Северного Каспия во время штормового нагона. В условиях Северного Каспия береговая черта постоянно мигрирует в зависимости от колебаний уровня моря, причем миграция эта обусловлена факторами различного масштаба [30]. Наибольшие перемещения береговой линии (до десятков км) происходят в результате вековых и многолетних колебаний уровня моря. Под воздействием сгонно-нагонных явлений береговая черта мигрирует в пределах 3–5 км [25, 30].

Н.Д. Герштанский [9, 10] на основе анализа данных систематических облетов по определению границ затопления побережья моря показал, что ширина зоны затопления определяется величиной нагона непосредственно у берега, уклонами прибрежного участка суши, временем стояния максимального уровня и шероховатостью подстилающей поверхности заливаемого участка, и построил нелинейную зависимость ширины этой зоны от уровня моря. С помощью этой зависимости по прогнозируемому максимальному уровню у о. Тюлений возможно предсказать ширину зоны заливания берега. При построении зависимости границы затопления были приведены к одному положению уреза воды -28,40 м БС. По данным за 1968–1975 гг. была составлена табл. 9.4, с помощью которой по прогнозируемому максимальному уровню у о. Тюлений возможен расчет (прогноз) ширины зоны заливания берегов по 14 профилям (рис. 9.2).

Таблица 9.4. Расчетные данные ширины зон затопления (км) на различных профилях западного побережья Северного Каспия по прогнозируемым уровням у о. Тюлений [10]

δ, см	Q, %	Номер профиля													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
40	4,07	1,2	1,4	0,8	2,4	2,5	2,3	1,8	2,2	0,8	7,5	5,3	0,5	0,3	0,3
60	0,96	2,4	2,4	1,9	3,9	4,2	3,8	2,3	3,4	1,6	8,5	7,9	0,9	0,9	0,4
80	0,27	3,8	3,7	3,3	5,6	7,0	5,8	3,2	4,5	3,2	9,4	11,8	1,6	2,0	0,8
100	0,07	5,7	5,3	5,9	7,3	11,9	12,0	4,7	6,2	5,1	11,4	17,0	2,6	4,8	1,2
120	0,03	10,0	12,0	13,1	15,0		18,0	13,0	13,4	8,3	20,7	26,0	4,5	8,4	2,4
140	0,02		16,0	15,7	16,7		21,5	16,6	16,7	12,4			9,8	12,6	8,0
160	0,011				18,4		24,9	20,0	20,0	16,2			14,8	16,7	15,1
180	0,011				20,4		28,3	23,4	23,3	20,2			20,7	20,8	18,4
200	0,005				22,0		31,3	26,9	26,6	24,3			25,6	25,0	23,8

Примечание: δ - отклонение уровня от среднегодового у о. Тюлений; на профилях II и III зона затопления не может быть шире 16,0 и 15,7 км соответственно из-за наличия в этом районе железнодорожной насыпи.

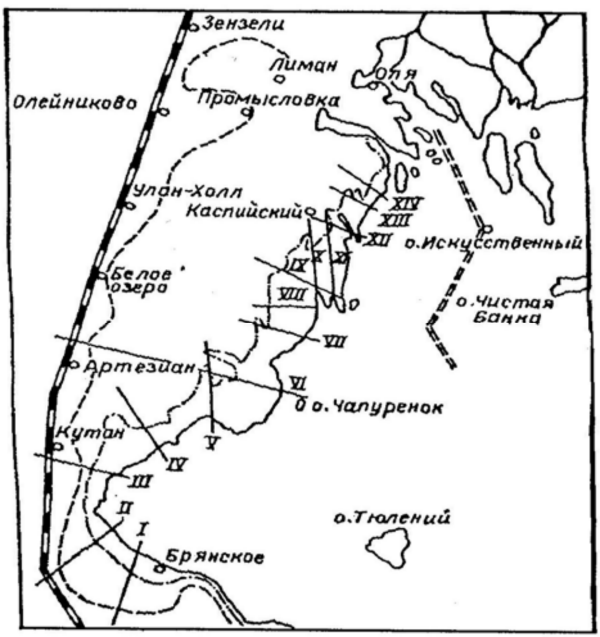


Рис. 9.2. Профили для определения ширины затопления берега и границы затопления берега во время нагонов в северо-западной части Каспийского моря [10]. Пунктирной линией показана зона затопления побережья во время катастрофического нагона в ноябре 1952 г.

Методы краткосрочного прогноза непериодических колебаний уровня моря за последние годы существенно улучшились. Они стали физически более обоснованными, увеличилась заблаговременность прогноза. В настоящее время с помощью физико-статистических и гидродинамических методов стало возможным рассчитывать штормовые нагоны по заданным метеорологическим условиям с достаточной для практики точностью. Хотя методы прогноза непериодических колебаний уровня имеют общие методические основы, эффективность их применимости в оперативной практике зависит от того, насколько хорошо изучен режим колебаний уровня и учтены локальные морфометрические и физико-географические особенности того или иного района моря. Метод прогноза, разработанный для одного пункта, может быть неприемлемым для других участков моря без дополнительных исследований режима и учета топографии конкретного прибрежного района.

9.4. Гидродинамические методы расчета и прогноза уровня моря

9.4.1. Аналитические решения, одномерные и двумерные модели

Несмотря на широкое применение физико-статистических методов, они недостаточно полно объясняют природу явления, имеют ограниченное применение для исследования режима колебаний уровня в неосвещенных наблюдениями участках побережья и открытых районах моря. В тех ситуациях, когда нет длительных регулярных морских наблюдений, единственным эффективным средством получения информации является численное моделирование процесса непериодических колебаний уровня и течений. В последние десятилетия в связи с быстрым развитием численных методов и вычислительной техники стали активно развиваться гидродинамические модели прогноза непериодических колебаний уровня моря.

Как известно, точное решение уравнений гидродинамики вследствие их нелинейности невозможно без определенных допущений и приближений, значительно упрощающих задачу. Такие упрощения позволяют найти аналитические решения. Широко известные работы Экмана явились первым шагом в этом направлении. Экман рассмотрел задачу об установившемся нагоне и циркуляции воды в глубоком море с учетом силы трения и силы Кориолиса. Было показано, что в глубоком море полный поток дрейфовых течений направлен перпендикулярно к направлению действующего ветра. Также показано, что максимальный нагон в глубоководных морях наблюдаются при ветрах, действующих параллельно береговой линии, а в мелководных морях –

перпендикулярно берегу. Примером исследования с использованием аналитических решений может служить работа Хипса [43]. К исследованиям аналитического плана относятся работы В.Б. Штокмана [37], который получил аналитическое выражение для оценки величины нагона в мелком море прямоугольной формы:

$$H = \frac{T_w \cdot L}{\rho_w \cdot g \cdot h}, \tag{9.4}$$

где T_w – коэффициент касательного напряжения ветра на поверхности моря; L – длина бассейна; ρ_w – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; h – глубина моря.

Численные модели разделяются на одномерные, двумерные и трехмерные. В России одномерная модель штормовых нагонов применительно к Северному Каспию была разработана И.Ф. Гетманом [12], а к Азовскому морю – С.Н. Овсиенко [23].

Наряду с одномерными моделями получили развитие и двумерные модели. В 1940-х годах Ханзен [42] разработал двумерную численную модель расчета течений и уровня на основе теории мелкой воды. Двумерные модели особенно интенсивно развивались во второй половине прошлого столетия [8, 23, 39, 46, 48]. Эти модели имеют единую физическую основу и отличаются способами задания граничных и начальных условий, вынуждающих сил, выражениями для придонного трения и методами численного решения. В настоящее время в мире существует целый ряд оперативно работающих методик, в основе которых лежат двумерные модели.

Как известно, двумерные модели позволяют определить интегральный перенос воды, но не дают информации об изменениях течений с глубиной. Однако, часто при решении практических задач необходимо знание профиля скорости течения, например для определения влияния нагонного течения на какие-либо конструкции или перемещения донного материала. Поэтому в последние годы активно разрабатываются трехмерные гидродинамические модели, которые позволяют рассчитывать скорости течений на различных горизонтах [5, 13, 14, 24, 38, 45, 47].

9.4.2. Трехмерная гидродинамическая бароклинная модель течений и уровня Каспийского моря (модель Гидрометцентра России)

В Гидрометцентре России группой специалистов была разработана трехмерная гидродинамическая бароклинная модель со свободной поверхностью, на основе которой применительно к Каспийскому морю

была создана технология краткосрочного прогноза штормовых сгонно-нагонных колебаний уровня и течений [5–7, 13, 14, 24]. В основу технологии были положены результаты исследований [29, 38, 40, 41, 47].

Важным преимуществом этой модели является возможность воспроизведения трехмерной структуры течений в бассейне, что позволяет решать целый ряд экологических задач, связанных с моделированием распространения различного рода загрязнений. Модель со свободной поверхностью основана на уравнениях движения в декартовой системе координат в приближении гидростатики и *f*-плоскости [47]. Коэффициент вертикальной вязкости задается переменным по глубине в предположении, что характерная длина турбулентного перемешивания пропорциональна толщине перемешанного слоя. Толщина верхнего и придонного перемешанных слоев задаются априори, например на основе данных наблюдений над температурой и соленостью воды.

Уравнения движения

Система уравнений гидродинамической модели со свободной поверхностью в декартовой системе координат в приближении гидростатики и *f*-плоскости записывается в виде [38]

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}} = 0\,, \tag{9.5}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}u^2 + \frac{\partial}{\partial y}vu + \frac{\partial}{\partial z}wu - fv = \\ &= -g\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial (p_a + p_s)}{\partial x} + N_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + N_z\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \end{aligned} \tag{9.6}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}vu + \frac{\partial}{\partial y}v^2 + \frac{\partial}{\partial z}wv + fu = \\ &= -g\frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial (p_a + p_s)}{\partial y} + N_h\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + N_z\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \end{aligned} \tag{9.7}$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}ur + \frac{\partial}{\partial y}vr + \frac{\partial}{\partial z}wr = K_z\frac{\partial^2 r}{\partial z^2}\ . \tag{9.8}$$

Начало координат расположено на невозмущенной поверхности моря, ось z направлена вертикально вверх, ось y – на север, ось x – на восток. Использованы следующие обозначения: f – параметр Кориолиса; p – давление; ρ – плотность; ρ_0 – отсчетное значение плотности;

u, v, w – составляющие вектора скорости течения по осям x, y, z соответственно; g – ускорение свободного падения. Используется приближение гидростатики:

$$p = \int_{z}^{\zeta} \rho g dz = p_a + p_S + \rho_0 g \zeta , \qquad (9.9)$$

где ζ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного положения, а $p_S = \int_{z}^{0} \rho g dz$; p_a – атмосферное давление; N_h, N_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости; K_z – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии.

Коэффициент вертикальной турбулентной вязкости N_z задается переменным по глубине и рассчитывается по формуле

$$N_z = (c_{ML} \cdot h_{ML})^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{S_M} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}} , \qquad (9.10)$$

где c_{ML} – коэффициент пропорциональности; h_{ML} – толщина перемешанного слоя, м; S_M – число Шмидта, которое определяется через число Ричардсона

$$Ri = -\frac{\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} , \qquad (9.11)$$

$$S_M = \frac{Ri}{0{,}725(Ri + 0{,}186 - \sqrt{Ri^2 - 0{,}316 Ri + 0{,}0346})} . \qquad (9.12)$$

Коэффициент c_{ML} для случая устойчивой стратификации принимается равным 0,05 [45].

Граничные условия

На поверхности моря задаются касательные напряжения ветра, кинематическое условие и отсутствие потока плавучести:

$$N_z \frac{\partial u}{\partial z} = t_{sx} , \quad N_z \frac{\partial v}{\partial z} = t_{sy} , \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, \quad K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0. \qquad (9.13)$$

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

$$N_z\frac{\partial u}{\partial z}=\tau_{bx},\quad N_z\frac{\partial v}{\partial z}=\tau_{by},\quad u\frac{\partial H}{\partial x}+v\frac{\partial H}{\partial y}=w,\quad K_z\frac{\partial p}{\partial z}=0. \qquad (9.14)$$

где $(\tau_{sx},\tau_{sy})=(C_dU_{ax}\left|\vec{U}_a\right|,C_dU_{ay}\left|\vec{U}_a\right|)$; $\vec{U}_a$ – вектор скорости ветра; $C_d=3{,}2\cdot10^{-6}$; $(\tau_{bx},\tau_{by})=(\alpha u_b\left|\vec{U}_b\right|,\alpha v_b\left|\vec{U}_b\right|)$; $\vec{U}_b$ – вектор придонного течения; $\alpha=2{,}5\cdot10^{-3}$.

Алгоритм осушения и затопления прибрежных территорий

При моделировании штормовых нагонов возможно затопление и осушение прибрежных областей. Для учета этих эффектов расчетная область содержит дополнительные расчетные точки, которые считаются «сухими» в начале расчета и могут затопляться в процессе штормового 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 осушки и затопления осуществляется с помощью специальной технологии, разработанной на основе процедуры, изложенной в работе [40]. Для лучшего понимания алгоритма на рис. 9.3 показано пространственное расположение узлов расчетной сетки типа ”C” по классификации, предложенной Мезингером и Аракавой в 1979 году.

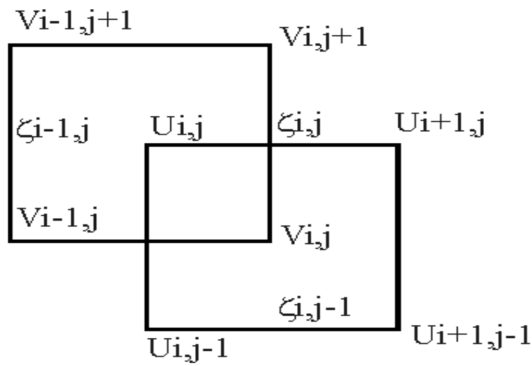


Рис. 9.3. Расположение узлов сетки при расчете зон затопления и осушки.

Точка $U_{i,j}$, в которой рассчитывается u-компонента вектора скорости течения (u-узел), сдвинута влево на половину пространственного шага относительно ζ-узла, где заданы значения уровня моря $\zeta_{i,j}$ и глубины $H_{i,j}$, а точка $V_{i,j}$ сдвинута на половину пространственного шага

вниз относительно ζ-узла. Тогда алгоритм можно представить в следующем виде. Решение разностных уравнений баланса импульса и неразрывности осуществляется после проверки в каждой точке расчетной области следующих условий. Точка уровня $\zeta_{i,j}$ считается "сухой" (расчеты не выполняются), когда толщина слоя (при этом имеется только один расчетный слой) становится меньше некой «постулированной» величины ε, принятой в нашем случае для Северного Каспия равной 1 см, то есть, если $(\zeta+H)_{i,j} < \varepsilon$, тогда $\zeta_{i,j} = -H_{i,j}$.

Точка $U_{i,j}$ считается "сухой" и полный поток в слое полагается равным нулю при выполнении следующих условий:

– толщина слоя в этой точке меньше ε, т. е.

$(\zeta+H)_{i-1/2,j} < \varepsilon$, где $H_{i-1/2,j} = (H_{i,j} + H_{i-1,j})/2$, $\zeta_{i-1/2,j} = (\zeta_{i,j} + \zeta_{i-1,j})/2$;

– или если справа от точки $U_{i,j}$ находится "сухая" точка уровня и его превышение слева от $U_{i,j}$ меньше ε/2, что означает

$(\zeta+H)_{i,j} = 0$ и $\zeta_{i-1,j} - \zeta_{i,j} < \varepsilon$,

– или если слева от $U_{i,j}$ находится "сухая" точка уровня и его превышение справа от $U_{i,j}$ меньше ε/2

$(\zeta+H)_{i-1,j} = 0$ и $\zeta_{i,j} - \zeta_{i-1,j} < \varepsilon$.

Для *V*-компоненты вектора скорости течения алгоритм осушки и затопления строится аналогично. Важно отметить, что в алгоритме учитываются не только полная глубина, но также и разности уровней моря в данной и окружающих точках.

При выполнении численных экспериментов с моделью в качестве метеоинформации использовались поля приземного атмосферного давления по данным глобального реанализа NCEP/NCAR [44]. Также учитывалось положение ледовой кромки. Касательное напряжение ветра задавалось только при сплоченности льда меньше 5 баллов.

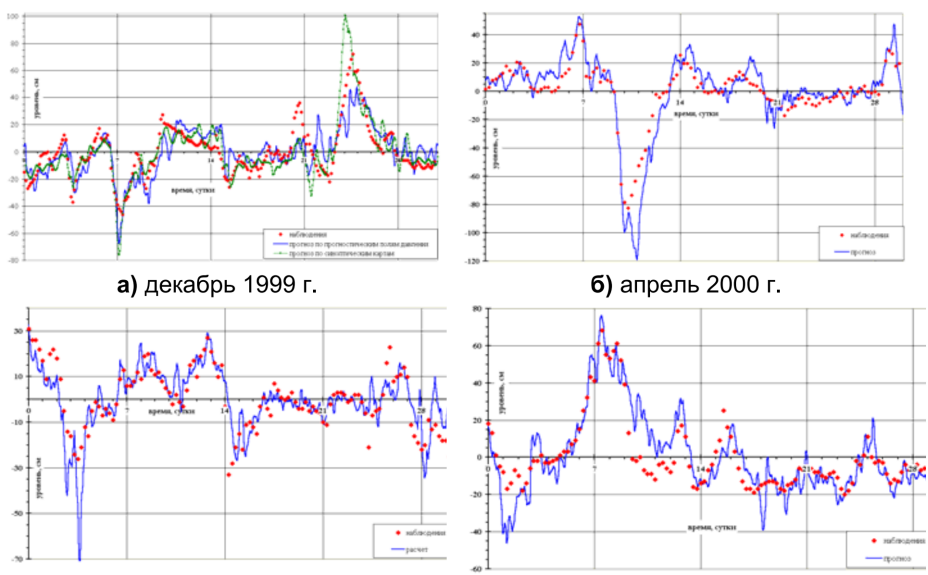
Начальные условия

Для Северного Каспия необходимо учитывать плотностные и стоковые течения, на фоне которых под действием ветра формируются относительно короткопериодные, но достаточно интенсивные сгонно-нагонные течения. Полученное диагностическим методом сильно зашумленное поле плотностных и стоковых течений и заданное из наблюдений осредненное по пространству и времени поле плотности плохо согласованы между собой. Для их согласования в настоящее время широко используется метод гидродинамического диагноза и адаптации, являющийся синтезом диагностического и прогностического подходов [29]. В этом случае рассчитанное с помощью

диагностического метода поле плотностных и стоковых течений и наблюденное поле плотности используются в качестве начальных условий в прогностической модели. Процесс расчета полей плотности и течений по прогностической модели прекращается после короткого этапа быстрого согласования полей, в течение которого подавляются высокочастотные шумы, присутствующие в осредненном поле плотности и рассчитанном диагностическим методом поле течений. Полученные таким способом по исходному наблюденному полю плотности с учетом стока реки Волги поля плотности, уровня моря и течений используются в качестве начальных условий при моделировании сгонно-нагонных явлений.

9.4.2.1. Результаты численных экспериментов

На рис. 9.4 приведены результаты сравнения расчетов (прогностических значений уровня) с имеющимися данными наблюдений над уровнем моря в п. Тюлений за декабрь 1999 г., апрель, август и октябрь 2000 года.

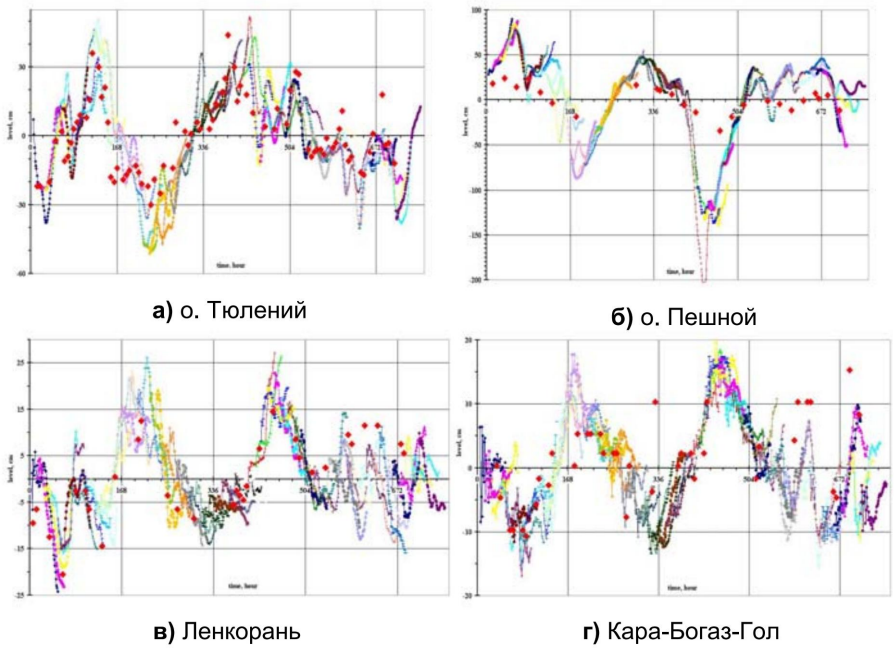


а) декабрь 1999 г. **б)** апрель 2000 г.

в) август 2000 г. **г)** октябрь 2000 г.

Рис. 9.4. Верификация модели по данным наблюдений на о. Тюлений. Точки – данные наблюдений, синяя линия – результаты расчетов по прогностическим полям приземного атмосферного давления, зеленая линия – результаты расчетов по синоптическим картам.

На рис. 9.5 показаны прогностические (60 прогнозов) и фактические значения уровня в некоторых пунктах Каспийского моря в июне 2001 года.



а) о. Тюлений

б) о. Пешной

в) Ленкорань

г) Кара-Богаз-Гол

Рис. 9.5. Временной ход расчетного (сплошные линии) и фактического уровня (точки) в различных пунктах Каспийского моря

Серия расчетов выполнена для условий шторма 12–16 марта 1995 г., который вызвал серьезные последствия (наряду с нагоном 1952 г.). Этот шторм происходил в период, когда среднегодовой уровень Каспия практически достиг своего максимума за последние 100 лет. Нагон в марте 1995 г. нанес огромный ущерб побережью Калмыкии и Дагестана, особенно Каспийскому району и п. Лагань. Прибрежная полоса западного побережья была затоплена на протяжении 600 км. Ширина полосы затопления составила 25–30 км, общая площадь затопления достигла 1450 км^2. Без крова остались 3700 человек, имелись человеческие жертвы. Были размыты дороги, разрушены дамбы, линии связи и электросети.

Во время нагона отмечалось резкое увеличение горизонтальных градиентов давления над Северным Каспием за счет смещения мощного антициклона с севера и углубления циклона над Черным морем. В связи с этим в северо-западной части Каспия 12–14 марта 1995 г.

отмечался сильный восточно-северо-восточный ветер со скоростью до 15–16 м/с (хотя данное направление ветра не самое эффективное для нагона у западного побережья Северного Каспия).

Наивысший уровень моря (-25,71 м БС) при нагоне у о. Тюлений был отмечен в 12–13 ч 13 марта, величина нагона составила 107 см. Наибольшая величина нагона в Лагани наблюдалась в 16–17 ч 13 марта и составила 167 см, что на 60 см выше, чем у о. Тюлений. 15 марта 1995 г. над всей акваторией Северного Каспия было отмечено новое усиление восточного ветра до 12–20 м/с и новый нагон: у о. Тюлений до величины 106 см, у п. Лагань до 141 см.

Отметки уровня моря (относительно нуля поста) в максимум нагона 13 марта 1995 г. в Лагани практически достигали той же величины, что и при нагоне 12–14 ноября 1952 г., хотя в 1995 г. скорость ветра и величина нагона были почти в два раза меньше. В этом сказалась разница в положении среднемесячного уровня моря в период этих нагонов – в марте 1995 г. уровень был на 1,6 м выше, чем в ноябре 1952 года.

На рис. 9.6 приведено пространственное распределение изолиний расчетного уровня моря в Северном Каспии на 18.00 ч ВСВ 13 марта 1995 г. (момент наибольшего развития шторма).

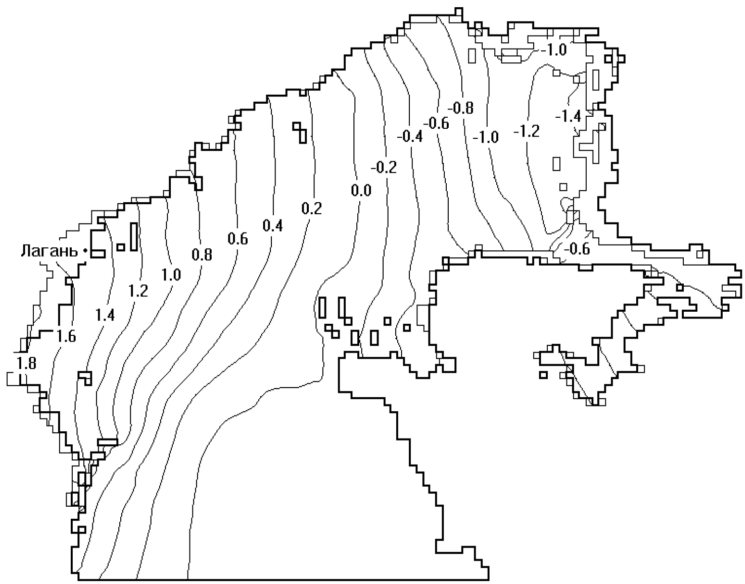


Рис. 9.6. Пространственное распределение изолиний расчетного уровня моря в Северном Каспии на 18.00 ч ВСВ 13 марта 1995 г. Тонкой линией показана граница затапливаемой области вблизи п. Лагань, максимальная ширина которой составляет порядка 40 км.

Северо-северо-восточный ветер вызвал сильный нагон в северо-западной части Северного Каспия. Максимальное повышение уровня моря отмечалось в Кизлярском заливе (до 1,8 м), в п. Лагань максимальный подъем уровня превышал 1,5 м. Для сравнения на рис. 9.7 представлен временной ход уровня моря в п. Лагань с учетом и без учета алгоритма затопления и осушки мелководных областей за весь срок штормовой ситуации 12–16 марта 1995 г., который сравнивается с данными срочных наблюдений в этом пункте.

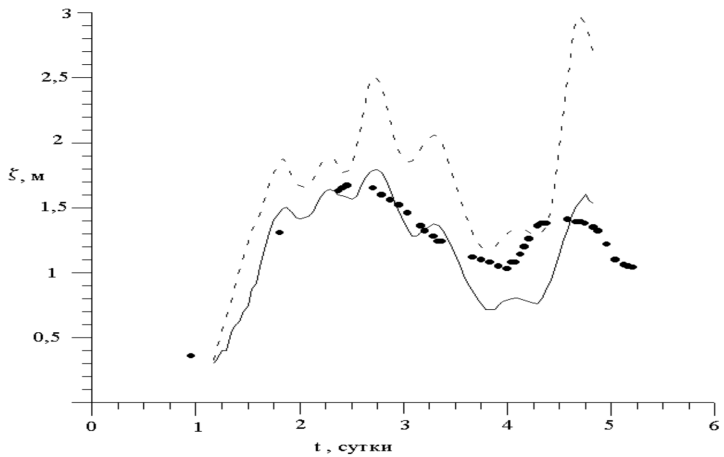


Рис. 9.7. Временной ход уровня в пункте Лагань во время шторма 12–16 марта 1995 г. Сплошная кривая – уровень, рассчитанный по модели с учетом алгоритма затопления и осушки; пунктирная – уровень, рассчитанный по модели без учета алгоритма затопления и осушки; кружками отмечены данные срочных наблюдений над уровнем в п. Лагань, приведенные к отметке среднего уровня – 27 м БС. Начало первых суток соответствует 0 ч 12 марта 1995 г.

Совпадение результатов расчета с данными наблюдений на фазе подъема уровня моря достаточно хорошее для варианта расчета, учитывающего алгоритм затопления и осушки, что лишний раз подтверждает важную роль этого фактора для решения практических задач при затоплении мелководных прибрежных областей.

Расхождение на фазе спада уровня моря можно объяснить влиянием местных ветров, которое невозможно учесть исходя только из крупномасштабных синоптических карт погоды. Важную роль этого фактора должны отразить данные региональной модели, которые в настоящее время используются для расчетов. На рис. 9.8 показана зона затопления побережья во время нагона 29 сентября – 4 октября 1985 года.

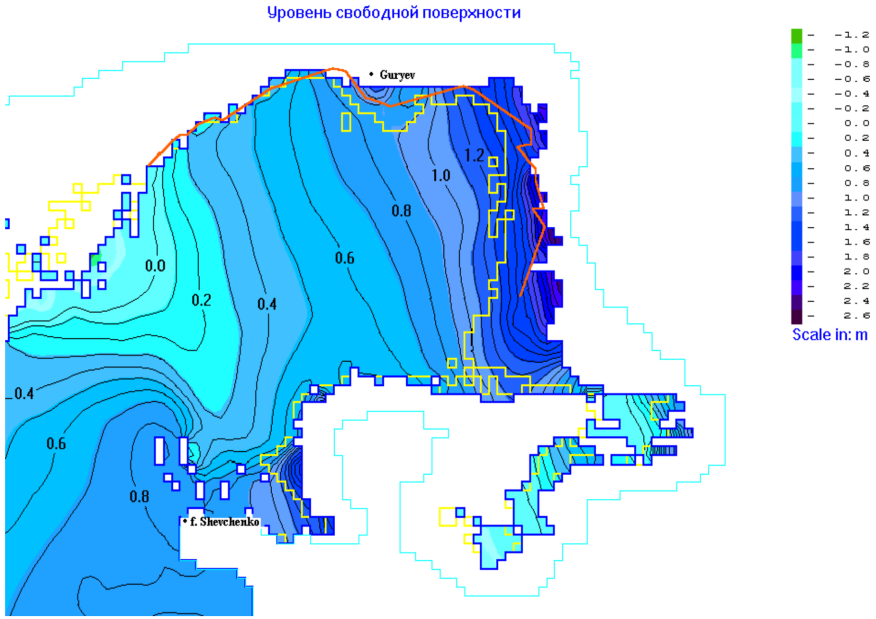


Рис. 9.8. Зона затопления побережья во время нагона 29 сентября – 4 октября 1985 г. Красная линия показывает границу затопления по данным авиаразведки, желтая – береговую линия до шторма.

Также были выполнены расчеты характеристик сильного нагона 16–19 апреля 1989 г. Сравнение расчетных уровней с наблюденными производилось по пяти пунктам (рис. 9.9).

9.4.2.2. Технология оперативного автоматизированного краткосрочного прогноза штормовых нагонов и течений на Каспийском море на основе модели Гидрометцентра России

Описанная выше трехмерная гидродинамическая бароклинная модель была положена в основу оперативной технологии прогноза уровня и течений в Каспийском море [13, 14]. Задается батиметрия, соответствующая современному положению среднего уровня моря. Расчет осуществляется для всей акватории моря, что позволяет получать прогноз в виде полей уровня моря и скоростей течений на стандартных горизонтах для всей акватории моря, а также в виде временных рядов уровня моря в любом пункте (в том числе для районов, где наблюдения отсутствуют).

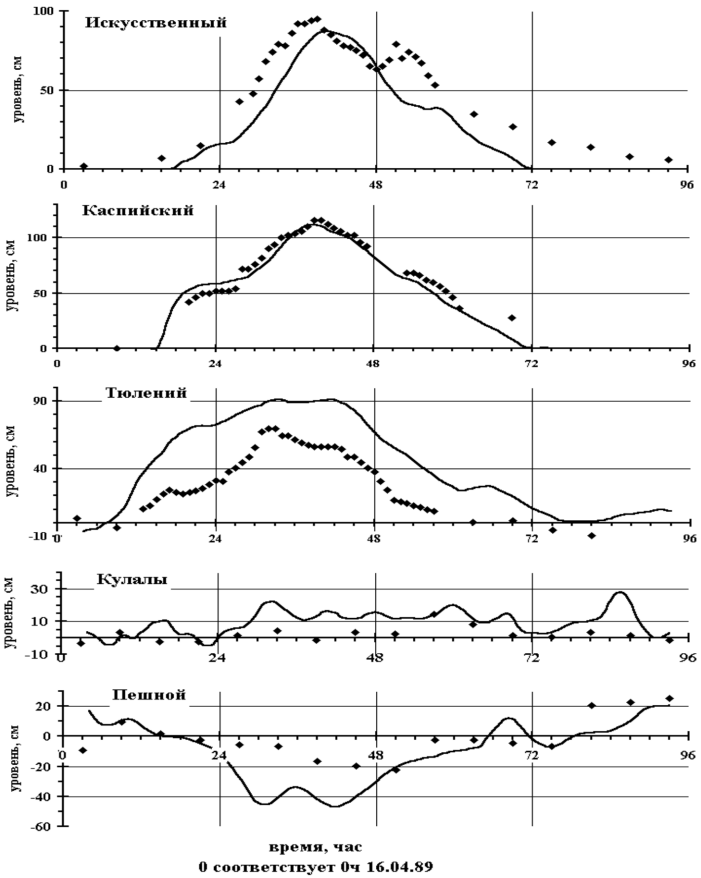


Рис. 9.9. Временной ход уровня в пяти пунктах Северного Каспия во время шторма 16–19 апреля 1989 г. Сплошная кривая – уровень, рассчитанный по модели; точками отмечены данные срочных наблюдений над уровнем моря, приведенные к среднему уровню моря.

Технология прогноза включает следующие компоненты и процедуры:

− в качестве входной метеорологической информации используются цифровые поля приземного атмосферного давления, полученные по региональной прогностической модели атмосферы, разработанной в Гидрометцентре России [22];

− расчет осуществляется 2 раза в сутки сразу после завершения расчетов по метеорологической модели; заблаговременность морского прогноза определяется заблаговременностью метеорологического прогноза и составляет 48 ч;

– пересчет полей барики в поля ветра осуществляется по известной формуле для геострофического ветра с учетом коэффициентов приведения ветра к стандартному горизонту (10 м);

– учитывается среднесуточный расход Волги (так как Волга определяет фоновое пространственное распределение уровня в Северном Каспии, т.е. его наклон с севера на юг);

– используются средние сезонные климатические поля плотности;

– положение ледовой кромки задается по данным оперативного еженедельного прогноза ледовой обстановки Гидрометцентра России;

– включен алгоритм осушения и затопления прибрежных областей, который позволяет оценивать возможные затапливаемые территории, а также получать достоверные величины нагонов и скоростей течений в прибрежной зоне;

– предусмотрена возможность проведения расчетов при различных положениях среднего уровня Каспийского моря; задаются глубины, соответствующие современному положению среднего уровня Каспийского моря;

–расчетная область охватывает все Каспийское море и прилегающие прибрежные территории с пространственным шагом 3 морские мили.

Для реализации технологии были организованы две оперативные базы данных (БД) морских параметров. Первая содержит данные наблюдений над уровнем моря, поступающие в оперативном режиме в Гидрометцентр России в коде КН-02. Вторая – прогностические поля уровня моря и течений на всех 19 расчетных горизонтах, прогноз ледовых условий и расход Волги (сброс с Волгоградского водохранилища в куб. м/с), а также информацию, необходимую для расчетов: поля плотности и массив глубин. Все данные за исключением расхода Волги представлены как поля на сетке 126×216 узлов с шагом 3 морские мили (5556 м). Поля плотности и скоростей течений даны на 19 горизонтах. Поля уровня моря записываются в БД каждые 3 ч, компоненты скоростей на 19 расчетных горизонтах – 2 раза в сутки с дискретностью 12 ч. Период хранения данных в оперативной БД наблюдений – один календарный месяц, затем данные архивируются.

Расчет по модели производится сразу после того, как в базе данных появляется прогноз по региональной метеорологической модели атмосферы. В качестве начальных условий по уровню моря и скоростям течений на всех расчетных горизонтах используются прогностические значения предыдущего расчета.

Верификация метода проводилась на основе сравнения результатов прогностических расчетов с данными наблюдений на станциях Каспийского моря, передающих информацию в коде КН-02. Оценка

надежности и точности проводилась в соответствии с Наставлением [26]. Результаты оперативных испытаний метода краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Каспийском море изложены в [5, 6].

Для оценки качества прогноза уровня использовались поля атмосферного давления в период с 1 ноября 2000 г. по 8 февраля 2001 г. Статистические характеристики качества прогнозов приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5. Показатели качества прогнозов уровня на ГМС о. Тюлений в период с декабря 1999 г. по декабрь 2000 г.

Месяц, год	δ, см		ε	σ, см		$\bar{\delta}$, см		S, см		R_τ	P, %		δ_S		ε_S
	М	И	М	М	И	М	И	М	И		М	И	ампл, см	фаза, ч	
12.1999	12,1	30,4	0,40	14,5	35,8	4,9	-0,1	17,5	35,9	0,96	78	35	-23,1	0,0	1,11
01.2000	11,8	33,3	0,36	15,0	40,0	5,5	10,8	19,2	53,7	0,97	73	30	3,5	3,0	0,64
02.2000	14,1	22,6	0,56	20,2	27,9	-7,1	4,3	26,0	37,6	0,90	71	36	5,9	-2,0	1,28
03.2000	11,6	32,7	0,35	14,9	36,0	-1,0	-5,3	19,1	42,2	0,92	87	24	-5,0	0,0	0,88
04.2000	11,9	26,8	0,51	14,6	31,8	-0,1	8,0	24,2	40,0	0,92	83	41	-4,7	6,0	1,39
05.2000	19,1	20,2	0,94	23,4	24,3	16,9	-2,4	37,5	24,7	0,92	56	50	-37,6	-36,0	1,91
06.2000	12,2	23,7	0,62	16,1	28,6	7,5	13,1	22,7	39,9	0,90	69	40	-5,7	-6,0	0,58
08.2000	10,5	24,4	0,44	14,3	28,7	4,3	-14,0	19,6	37,9	0,94	69	30	-19,6	6,0	1,78
09.2000	8,5	22,1	0,39	10,7	24,7	-5,0	2,5	13,9	39,3	0,92	84	32	13,8	6,0	1,10
10.2000	10,4	22,2	0,38	13,0	25,0	-8,7	-5,3	20,1	29,7	0,95	67	25	-8,5	-12,0	0,53
11.2000	9,9	14,4	0,94	12,4	16,2	-2,3	1,0	19,7	18,5	0,90	61	37	5,8	3,0	1,43
12.2000	12,2	13,3	0,92	16,3	18,6	8,1	11,5	21,5	27,3	0,72	88	75	-23,4	-6,0	0,49
Весь период	12,0	23,8	0,57	15,4	28,1	1,9	2,0	21,7	35,6	0,91	74	38	-8,2	-3,2	1,09

Примечание: М - методические прогнозы, И - инерционные прогнозы. δ - средняя абсолютная ошибка прогноза; ε - средняя относительная ошибка прогноза; σ - средняя квадратичная ошибка прогноза; $\bar{\delta}$, - средняя арифметическая (систематическая) ошибка; S - стандартная ошибка; R_τ - корреляция тенденций; P – оправдываемость прогнозов; δ_S - абсолютная ошибка экстремума; ε_S - относительная ошибка экстремума.

9.4.3. Технология оперативного прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня на северо-восточном побережье Каспийского моря с помощью модели MIKE-21 (КазНИИМОСК)

В Казахском НИИ мониторинга окружающей среды и климата (КазНИИМОСК) Казгидромета в 2002 г. внедрен в производство и в дальнейшем усовершенствован автоматизированный метод прогнозирования уровня Каспийского моря и полей течений. Метод основан на

комплексе программ, ядром которого является гидродинамическая модель расчета течений и уровня MIKE-21, адаптированная казахскими специалистами к условиям Каспийского моря [16–18, 36]. Прогнозы уровня составляются для восьми пунктов казахской и двух пунктов российской частей моря. Прогнозы оформляются в форме бюллетеня и рассылаются в заинтересованные организации, в том числе в Гидрометцентр России.

Модель MIKE является структурным элементом технологической линии оперативной системы прогнозирования штормовых нагонов с заблаговременностью до пяти суток. Метеорологическая информация поступает по каналам связи из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, гидрологическая – с казахских станций на Каспийском море. Система позволяет обрабатывать информацию и в кратчайшие сроки составлять необходимые прогнозы. Для составления прогнозов ежечасных уровней моря во время сгонно-нагонных явлений используется батиметрическая карта высокого разрешения с шагом сетки 10 км для всего моря и с шагом 2 км для мелководной северной части моря.

Прогнозы сгонно-нагонных колебаний уровня, выполненные с помощью пакета программ MIKE 21, могут быть представлены в виде гидрографа уровня, электронных карт уровенных поверхностей, расчетов для продольного разреза моря и его локальных зон. Уровень и течения рассчитываются в прямоугольной координатной сетке, охватывающей область расчета, с учетом батиметрических данных, шероховатости дна, начальных и граничных условий и т. д. Входными данными модели являются начальный уровень моря, батиметрические данные, поля давления, пересчитываемые в поля векторов ветра.

Блок-схема автоматизированного расчета уровня представлена на рис. 9.10.

Система внедрена в оперативную практику Казгидромета, и по ней ежедневно проводятся расчеты уровня на основе информации о ветре и атмосферном давлении. Прогнозы уровня составляются для районов Северного и Среднего Каспия, определенных таким образом, чтобы учитывались морфометрические условия, специфика синоптических процессов, наличие ежедневной гидрометеорологической информации. Начальный уровень определяется по данным наблюдений на сети, поступающим по каналам связи. Если рассчитанный уровень моря достигает отметок, близких к опасным, то выпускается штормовое предупреждение. Форма представления прогноза: текст, график хода уровня на каждый час с заблаговременностью пять суток, предупреждение о возможных последствиях (затопление, разрушение дамб, ухудшение условий плавания).

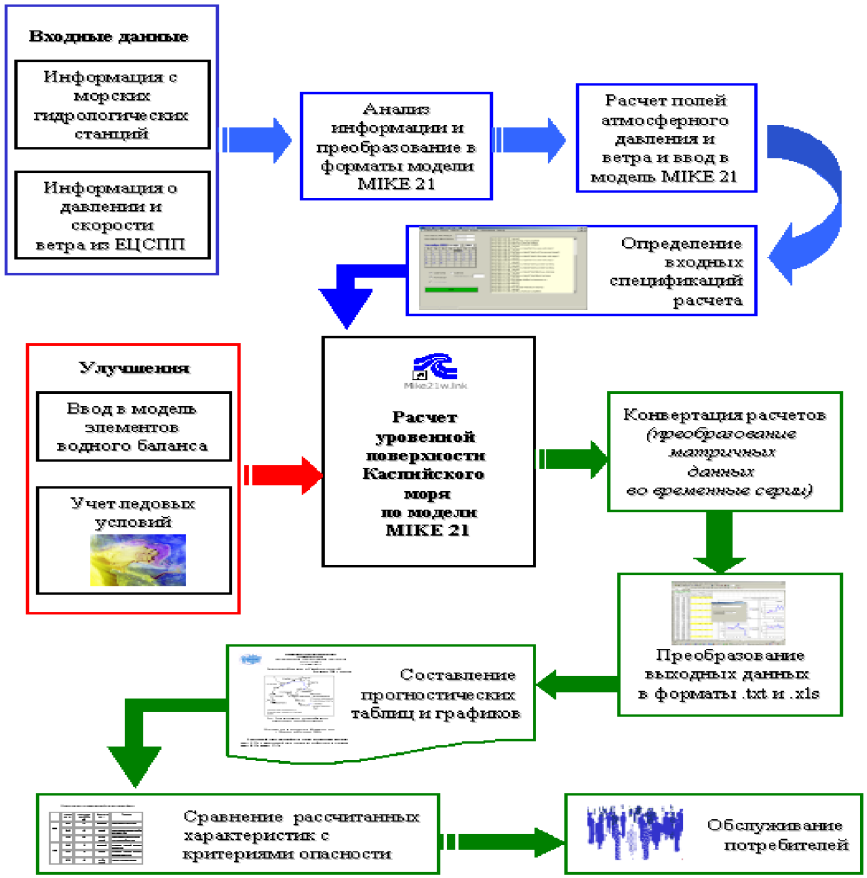


Рис. 9.10. Блок-схема автоматизированного расчета уровня Каспийского моря по модели MIKE 21.

Оценка прогнозов осуществлялась в соответствии с Наставлением [26]. Средняя оправдываемость прогнозов уровня на 3 суток составила 87 %, а на 5 суток – 80 %.

Для верификации модели MIKE 21 в Каспийском море были установлены две гидрологические станции для измерения уровня (морская и прибрежная). Выполнены прогностические расчеты для наиболее характерных нагонных ситуаций на казахском побережье Каспийского моря. Сравнение результатов расчетов с данными измерений уровня показало, что модель адекватно описывает сгонно-нагонные явления в береговой зоне северо-восточной части Каспийского моря (рис. 9.11).

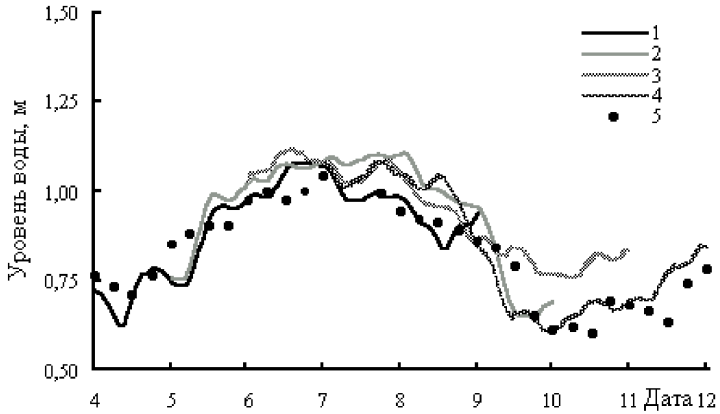


Рис. 9.11. Примеры прогнозов уровня на ст. м. Пешной (август 2001 г.): 4–9.08 (1); 5–10.08 (2); 6-11.08 (3); 7-12.08 (4); фактический уровень (5).

На рис. 9.12 представлен пример прогноза уровня Каспийского моря в пунктах Северного и Среднего Каспия на период с 23 по 28 июля 2009 года.

Прогнозы уровня выпускаются в форме гидрометеорологического бюллетеня. Ниже показан пример бюллетеня с обзором и прогнозом состояния уровня на Северном Каспии на период с 16 по 22 июля 2009 года (Приложение 2).

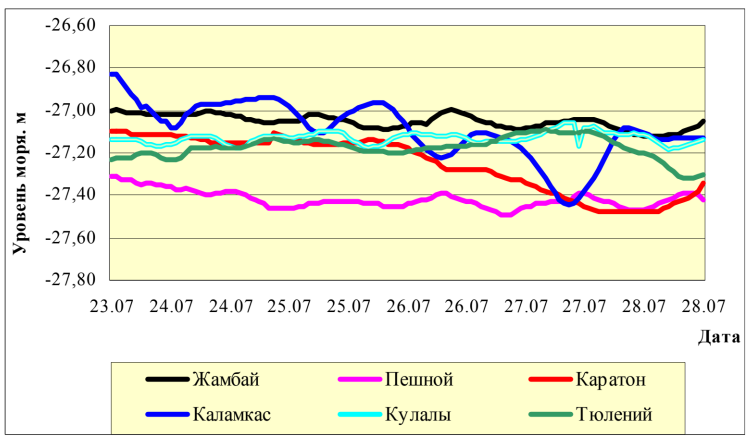


Рис. 9.12. Прогнозы уровня Каспийского моря в пунктах Северного и Среднего Каспия (23–28 июля 2009 г.).

Заключение

Как показано в настоящем пособии, проблема сверхдолгосрочного прогноза УКМ очень сложна, и хотя в последние годы в этом направлении достигнуты определенные успехи, она еще далека от решения. В XX и начале XXI века в институтах РАН (ИВП, ИО РАН и др.), Росгидромета (Гидрометцентр России, ГГИ, ГГО, ГОИН, КаспМНИЦ), МГУ, РГГМУ и др. был выполнен обширный комплекс научно-прикладных исследований по различным аспектам проблемы Каспия, но несмотря на это причины долгопериодных колебаний УКМ остаются за пределом однозначного научного объяснения и, по-видимому, еще долгое время будут оставаться предметом научных дискуссий.

Аномальные многолетние колебания УКМ представляют собой главный и возрастающий вызов странам Каспийского региона. Присущие Каспийскому региону в силу его географического положения колебания климата и водного баланса отличаются большим размахом. При этом переход водного баланса и УКМ из одного состояния в другое может происходить довольно быстро, вызывая серьезные экологические и социально-экономические последствия. Исследования последних лет указывают на то, что в настоящее время климат и водный баланс Каспийского региона находится в неустойчивом положении, из которого они могут перейти в новое состояние.

Практическая потребность в сверхдолгосрочных прогнозах уровня моря оказывает стимулирующее влияние на развитие научных исследований причин многолетних колебаний УКМ и разработку методов их прогнозирования. К важным научным достижениям последних десятилетий следует отнести результаты, полученные в рамках международного проекта AMIP на основе сравнения моделей общей циркуляции атмосферы ведущих метеорологических центров.

Пути развития сверхдолгосрочных прогнозов уровня Каспийского моря должны лежать в решении следующих задач:

– выяснение роли отдельных компонентов климатической системы в формировании аномальных колебаний УКМ;

– исследование взаимосвязей гидрометеорологических процессов в бассейне Каспия и далеко за его пределами, прежде всего в Северной Атлантике и Арктике;

– определение роли тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой в формировании засушливой и влажной погоды на водосборном бассейне Каспия.

Для этого предварительно должны быть определены оптимальные масштабы временного и пространственного осреднения для различных параметров климатической системы и оптимальные регионы и масштабы времени, которые были бы наиболее репрезентативны для описания компонентов климатической системы, а также получены однородные временные ряды исходных данных, выбраны и сформированы показатели, характеризующие состояние климатической системы

Исследование причин разномасштабных колебаний уровня Каспийского моря и их прогнозирование, изложенное в настоящей книге, свидетельствуют о том, что колебания УКМ являются продуктом комплексного воздействия космического, метеорологического, геологического, антропогенного факторов, обуславливающих их существенную изменчивость. Спектр колебаний очень широк, начиная от короткопериодных колебаний, вызванных непосредственно воздействием ветра и атмосферного давления; сезонных, обусловленных годовым ходом гидрометеорологических элементов – речного стока, температуры и влажности воздуха; вековых и многолетних колебаний, обусловленных гелиогеофизическими факторами.

Анализ барико-циркуляционного режима Атлантико-Европейского сектора в XX столетии позволил получить оценки зависимости уровня моря и составляющих водного баланса от развития циркуляционных процессов и дать объективное объяснение их многолетней и сезонной изменчивости. В результате исследований было установлено, что длительные однонаправленные изменения уровня происходят в условиях аномального развития циклонической (1978 г. – настоящее время) или антициклонической циркуляции (1930–1941, 1970–1977 гг.), развивающихся не только в пределах каспийского бассейна, а охватывающих весь Атлантико-Европейский сектор. Так, маловодность и падение уровня моря в 1930-е (на 1,8 м) и в 1970-е (на 0,7 м) годы были обусловлены развитием процессов восточной формы циркуляции и установлением антициклонического режима погоды. С начала 1970-х годов в осенне-зимний сезон происходила активизация западной формы циркуляции, что способствовало развитию в 1978–1995 гг. процессов циклонической циркуляция. Многоводность рек увеличилась, и произошел резкий продолжительный подъем уровня моря (с 1978 по 1995 год на 2,4 м).

В результате интенсивного использования природных ресурсов Каспия в последние годы значительно возросла актуальность обеспечения хозяйственной и природоохранной деятельности в регионе надежными прогнозами колебаний УКМ, а также информацией об опасных

гидрометеорологических процессах и явлениях, таких как штормовые нагоны, экстремальное волнение и др. Все это требует расширения научных исследований с целью уточнения методов прогноза УКМ и других гидрологических параметров моря. Уточненные методы позволят предпринять своевременные меры по реализации защитных мер, связанных с колебаниями уровня моря, и в результате уменьшить экономический ущерб от их воздействий.

Одним из важных вопросов в проблеме Каспия является улучшение и расширение наблюдательной сети за гидрометеорологическими элементами и уровнем моря с помощью новых приборов и оборудования. Без надежных данных наблюдений трудно рассчитывать на получение объективных оценок состояния Каспийского моря. В этом плане большое будущее принадлежит наблюдениям, полученным с помощью аппаратуры, установленной на метеорологических спутниках. Точность и синхронность этих наблюдений, одновременное освещение всей акватории моря может внести существенное улучшение в вопросы исследования уровенного режима моря, что в конечном счете должно привести к улучшению прогнозов УКМ.

В заключение следует подчеркнуть, что несмотря на постоянный интерес к проблеме Каспийского моря и, в частности, к проблеме изменений его уровня со стороны научных организаций прикаспийских стран, исследования до сих пор носят разрозненный, нескоординированный характер, что не позволяет представить целостную картину о происходящих в Каспийском море и его бассейне процессах. В этой связи не подлежит сомнению, что только координация и объединение усилий всех прикаспийских стран позволит получить полную объективную информацию о происходящих в Волго-Каспийском бассейне гидрометеорологических процессах и, прежде всего, процессах, связанных с долгопериодными колебаниями уровня Каспийского моря.

Литература

К главе 1

1. *Алиев А.С.* Подъем уровня Каспийского моря и затопление прибрежной зоны Азербайджанской Республики. – Баку: Элм, 2001. – 144 с.

2. *Алиев А.С., Мансимов М.Р., Мамедов Р.М.* Колебания уровня и социально-экономические проблемы прибрежной зоны Каспийского моря // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. – 1999. – № 2. – С. 49–59.

3. *Антонов В.С.* Проблема уровня Каспийского моря и сток северных рек // Труды ААНИИ. – 1963. – Т. 253. – С. 232–248.

4. *Аполлов Б.А.* Каспийская проблема и пути ее решения // Труды океанограф. Комиссии АН СССР. – 1959. – Т. 5. – С. 5–22.

5. *Бухарицын П.И., Политов С.А., Лукьянов Ю.С.* Влияние колебаний уровня Каспийского моря на экономическое развитие приморской части Астраханской области // Труды ГОИН. – 2008. – Вып. 211. – С. 460–466.

6. *Войтоловский Г.К., Арбатов А.А. и др.* Море проблем: опыт системного изучения Каспийского региона. – М.: СОПС, 2001. – 183 с.

7. *Воропаев Г.В., Иванова Т.Н., Красножон Г.Ф.* Волжские водохранилища и их роль в экологических проблемах низовьев Волги и Северного Каспия // Водные ресурсы. – 1991. – № 5. – С. 155–167.

8. *Воропаев Г.В., Косарев А.Н., Николаева Р.В., Яблонская Е.А.* Проблемы Северного Каспия и устьевых областей Волги и Урала // Водные ресурсы. – 1981. – № 1. – С. 200–204.

9. *Воропаев Г.В., Косарев А.Н.* О современных проблемах Каспийского моря// Природа. – 1981. – № 1. – С. 61–73.

10. Генеральный каталог уровня Каспийского моря [Электрон. ресурс]. – http://www.caspcom.com/index.php?razd=sess&lang=1&sess=17&podsess=61

11. Геоэкологические изменения при колебаниях уровня Каспийского моря. Вып. 1. Геоэкология прикаспия / под ред. П.А. Каплина, Е.И. Игнатова. – М.: Географ. ф-т МГУ, 1997. – 208 с.

12. *Гранберг А.Г., Григорьев Е.Г. и др.* Рабочая концепция Федеральной целевой программы «Комплексное развитие территории Российской Федерации, прилегающей к Каспийскому морю» // Вестник Каспия. – 1999. – № 2. – С. 4–11.

13. *Жило П.В.* К вопросу о влиянии понижения уровня Каспийского моря на народное хозяйство // Колебания уровня Каспийского моря. Т. 2. – ДАН СССР, 1954. – С. 118–126.

14. *Залогин Б.С., Косарев А.Н.* Некоторые природно-хозяйственные проблемы Каспийского моря // География в школе. – 1973. – № 5. – С. 18–20.

15. *Замахаев В.С., Селиванов Г.И.* К решению проблемы Каспийского моря // Труды Гидропроекта. – 1973. – Вып. 29. – С. 166–170.

16. *Зонн И.С.* Каспийская энциклопедия. – М.: Международные отношения, 2004. – 461 с.

17. *Игнатов Е.И., Каплин П.А. и др.* Влияние современной трансгрессии Каспийского моря на динамику его берегов // Геоморфология. – 1992. – № 1. – С. 12–21.

18. Изменение уровня Каспийского моря // Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. Раздел 2. Влияние ожидаемых изменений на отрасли экономики – М.: Росгидромет, 2005. – С. 31–32.

19. Каспийский регион: изменения климата и эволюция природной среды // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2011. – № 2. – С. 1–112.

20. *Куприянов Е.И., Трапезникова О.Н.* Подтопление земель и изменение природно-хозяйственной структуры Калмыцкого побережья Каспия // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 1997. – № 6. – С. 90–96.

21. *Клиге Р.К.* Каспийское море: проблемы и прогнозы // Земля и Вселенная. – 1992. – № 2. – С. 26–32.

22. Комплексная программа по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в регионе Каспийского моря (КАСПАС) // ВМО-№ 873. – 1997. – 21 с.

23. Загрязнение морской среды нефтепродуктами и их деградация в экосистеме Каспийского моря: анализ результатов численного моделирования // Труды ГОИН. – 2011. – Вып. 213. – С. 407–418.

24. *Леонтьев О.К.* Проблемы уровня Каспия и устойчивости каспийских берегов // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1988. – № 1. – С. 14–23.

25. *Максимов А.А., Ходкин С.С.* Международное сотрудничество в области гидрометеорологии и мониторинга природной среды в регионе Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 364–386.

26. *Мамедов Т.А. и др.* К проблеме падения уровня Каспийского моря // Доклады АН АзССР. – 1976. – Т. 32, № 4. – С. 66–70.

27. *Михайлов Н.Н., Вязилов Е.Д. и др.* Государственная система информации об обстановке в Мировом океане и ее применение для информационной поддержки морской деятельности Российской Федерации // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2014. – Вып. 177. – С. 95–118.

28. *Михайлов В.Н., Рычагов Г.И., Повалишникова Е.С.* Являются ли недавний подъем уровня Каспийского моря и его последствия природной катастрофой? // Вестник РФФИ. – 1998. – № 4 (14). – С. 51–60.

29. *Николаева Р.В.* Краткий обзор схем и предложений по стабилизации и регулированию уровня Каспийского моря // Труды океанограф. комиссии АН СССР. Том 5. Проблемы Каспийского моря. – М.: Из-во АН СССР, 1959. – С. 50–62.

30. Обзор состояния и загрязнения морской среды северо-западной части Каспийского моря в 2012 г. / под. ред. С.К. Монахова. – Астрахань: Росгидромет, 2014. – 82 с.

31. *Овсиенко С.Н., Зацепа С.Н., Ивченко А.А.* Математическое моделирование как элемент информационной поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения // Труды ГОИН. – 2011. – № 213. – С. 396–406.

32. Отчет о выполнении специализированных гидрометеорологических работ по теме: «Исследование влияния природных и хозяйственных условий на безопасную эксплуатацию Волго-Каспийского морского судоходного канала». – Астраханский ЦГМС, 2012. – 265 с.

33. *Подольский Е.М.* Проблема оптимального управления уровнем Каспийского моря и методические основы ее решения // Водные ресурсы. – 1975. – № 4. – С. 81–108.

34. *Раткович Д.Я.* Проблема Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1980. – № 5. – С. 5–20.

35. *Раткович Д.Я., Жданова И.С., Привальский В.Е.* К проблеме уровенного режима Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1973. – № 3. – С. 45–69.

36. *Рычагов Г.И.* Современные проблемы уровня Каспийского моря и хозяйственная деятельность в береговой зоне // Труды ГОРД. – 2013. – Вып. 41. – С. 1–13.

37. *Рычагов Г.И., Михайлов В.Н., Повалишникова Е.С.* Неизбежен ли экологический и хозяйственный ущерб в условиях нестабильности уровня Каспия // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1999. – № 5. – С. 47–54.

38. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. – Обнинск. – 2009. – 143 с.

39. *Свиточ А.А.* Экстремальный подъем уровня Каспийского моря и геоэкологическая катастрофа в приморских городах Дагестана. – М.: Из-во МГУ, 1997. – 203 с.

40. СНиП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. – М.: 2002. – 19 с.

41. *Фролов А.В.* Оценка экономических и экологических ущербов от изменений уровня Каспийского моря // Вестник Каспия. – 2002. – № 2. – С. 96–102.

42. *Фролов А.В.* Залив Кара-Богаз-Гол как регулятор колебаний уровня Каспийского моря // Вестник Каспия. – 1995. – № 3. – С. 45–56.

43. *Фролов А.В.* Инженерные аспекты проблемы уровенного режима Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – № 4. – С. 425–430.

44. *Хубларян М.Г.* Колебание уровня Каспийского моря и его эколого-экономические последствия // Экологические проблемы Каспия. РАН и Нац. акад. США: Сб. докл. Международ. науч. семинара по экологическим проблемам Прикаспийского региона, 1–3 декабря 1999 г., Москва. – 2000. – С. 5–13.

45. *Хубларян М.Г.* Феномен Каспия // Вестник РАН. – 1995. – Т. 65, № 7. – С. 616–621.

46. *Хубларян М.Г., Найденов В.И.* Нелинейная теория колебаний уровня природных водоемов // Воды суши: Проблемы и решения. – М.: ИВП РАН, 1994. – С. 193–216.

47. *Чернявский Е.Б.* О равнодушии к Каспийскому региону // ТЭК. – 2002. – № 3. – С. 37–38.

48. *Шикломанов И.А.* Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 78 с.

49. *Шлыгин И.А.* Каспийское море: история и проблемы // Морской флот. – 1980. – № 8. – С. 38–41.

50. *Эльдаров Э.М., Бутаев А.М., Гасанов Ш.Ш. и др.* Социально-экономические и экологические последствия повышения уровня Каспийского моря // Современные экологические проблемы Дагестана. – Махачкала, 1994. – С. 128–164.

51. ЮНЕП. Последствия изменения климата в регионе Каспийского моря. Региональный обзорный документ. – Женева: ЮНЕП, 1997.

52. *Яблонская Е.А., Зайцев А.И.* Современное состояние проблемы повышения биологической продуктивности Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1979. – № 1. – С. 41–50.

К главе 2

1. *Аполлов Б.А.* Каспийское море и его бассейн. – М.: Из-во АН СССР, 1956. – 119 с.

2. *Валлер Ф.И., Егоров И.Г.* О преобладающем переносе вод Северного Каспия в навигационный и ледовый период // Сб. работ Астраханской ЗГМО. – 1980. – Вып. 2. – С. 73–92.

3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 6. Каспийское море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под. ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – 360 с.

4. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. – М; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. – 608 с.

5. Каспийское море. – М.: Из-во МГУ, 1969. – 264 с.

6. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия. – М.: Наука, 1986. – 262 с.

7. Каспийский регион: изменения климата и эволюция природной среды // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2011. – № 2. – С. 1–112.

8. *Клевцова Н.Д.* Поверхностные течения в Средней и Южной частях Каспийского моря при различных полях ветра // Океанология. – 1966. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 82–88.

9. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования на Каспийском море в 1914–1915 гг. // Труды Каспийской экспедиции 1914–1915 гг. – 1921. – Том 1. – 943 с.

10. *Косарев А.Н., Кураев А.В., Никонова Р.Е.* Особенности современных гидрологических условий Северного Каспия // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 1996. – № 5. – С. 47–53.

11. *Косарев А.Н., Маева С.А., Гоптарев Н.П.* О гидрометеорологических процессах, определяющих многолетние колебания уровней Каспийского и Аральского морей // Комплексные исследования Каспийского моря. – 1976. – Вып. 5. – С. 20–223.

12. *Кошинский С.Д.* Типы распределения ветров над Каспийским морем, их повторяемость, устойчивость и преемственность // Труды НИИАК. – 1964. – Вып. 26. – С. 85–127.

13. *Курбанов П.К.* Изменение климата и Каспийское море // Бюллетень ВМО. – 1995. – Т.43. – № 1. – 84 с.

14. *Лавров Д.А.* Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа морской воды // Экологические проблемы Каспия: Сб. докладов Международ. научного семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона. –М., 2000. – С. 17–21.

15. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.

16. Основные гидрометеорологические сведения о морях СССР. Т.2. Каспийское море. Вып. 1 (водный кадастр). – Л.: Гидрометеоиздат, 1940. – 320 с.

17. *Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В.* Современное состояние Каспийского моря. – СПб: Наука, 2005. – 356 с.

18. *Пармузина Т.А.* Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Каспийского моря // Труды НИИАК. – 1971. – Вып. 76. – С. 74–89.

19. *Попов С.К.* Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 5. – С. 76–84.

20. *Скриптунов Н.А., Лупачев Ю.В.* Залив Кайдак – исчезающий и возрождающийся «обратный» эстуарий Каспийского моря // Труды ГОИН. – 2000. – Вып. 207. – С. 235–244.

21. *Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е.* Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 239–253.

22. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н. и др.* Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 1. – С. 91–99.

23. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ГЕОС, 2013. – 703 с.

К главе 3

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 287 с.

2. *Аполлов Б.А., Федорова Е.И.* Исследования колебания уровня Каспийского моря // Труды ИОАН. – 1956. – Т. 15. – С. 72–228.

3. *Брегман Г.Р.* Геодезические высоты в связи с проблемой колебания уровня Каспи я// Метеорология и гидрология. – 1947. – № 1. – С. 59–68.

4. *Васильев А.С., Лапшин В.Б., Лупачев Ю.В., Победоносцев С.В.* К проблеме мониторинга среднего уровня Каспия по данным спутниковых альтиметров // Изменения климата и их последствия. – М.: Наука, 2002. – С. 131–140.

5. *Воронцов А.А., Михайлов Н.Н.* Оценка изменений климата Каспийского моря на основе новых информационных технологий // Материалы международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса

Каспийского региона», Астрахань, Российская Федерация, 19–20 октября 2010 г. – 2011. – С. 31–37.

6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 6. Каспийское море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под. ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – 360 с.

7. *Зенин В.А.* Водное нивелирование футштоков Каспийского моря // Записки по гидрографии. – 1940. – № 3. – С. 67–75.

8. *Зенин В.А.* Метод водного нивелирования // Труды ГОИН. – 1961. – Вып. 61. – С. 66-115.

9. *Иванов Г.С., Кондратьева В.И.* О точности определения среднего уровня моря // Труды ГОИН. – 1970. – Вып. 99. – С. 59–67.

10. *Казакевич А.В.* Исправление уровенных наблюдений на Каспийском море // Труды ГОИН. – 1985. – Вып. 163. – С. 21–27.

11. *Красножон Г.Ф.* Комплексный мониторинг природной среды Каспийского моря и его побережий // Международный симпозиум «Природные и социально-экономические последствия разработки и управления водными ресурсами», тезисы докладов. – М., 1995. – С. 159–160.

12. *Лебедев С.А., Костяной В.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: Изд.центр «Море» Международного института океана. – 2005. – 366 с.

13. *Ленц Э.* Об изменениях уровня Каспийского моря // Журнал Мин. внутр. дел. – 1836. – Т. 20, № 26. – С. 93–100.

14. *Леонов А.В., Чичерина О.В., Семеняк Л.В.* Загрязнение морской среды нефтепродуктами и их деградация в экосистеме Каспийского моря: анализ результатов численного моделирования // Труды ГОИН. – 2011. – Вып. 213. – С. 407–418.

15. *Лукин И.Н.* Каталог уровенных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море. – М.: Гидрометеоиздат, 1964. – 131 с.

16. Методические указания. О пересчете отметок нулей постов пунктов уровенных наблюдений к единому нулю поста моря // Труды ГОИН. – 1962. – Вып. 20. – 31 с.

17. *Михайлевский А.И.* Наблюдения над колебанием уровня моря в г. Баку с 1830 г. // Записки по гидрографии. – 1932. – Т. 2. – С. 57–58.

18. Мониторинг современного гидрометеорологического режима Каспийского моря. Раздел III. // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 102–216.

19. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Вып. 9. Часть 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 106 с.

20. *Никонова Р.Е.* О колебаниях уровня Каспийского моря и современное состояние сети наблюдений // Вестник Каспия. – 2011. – № 2. – С. 72–81.

21. *Овсиенко С.Н., Зацепа С.Н., Ивченко А.А.* Математическое моделирование как элемент информационной поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения // Труды ГОИН. – 2011. – № 213. – С. 396–406.

22. *Остроумов В.З.* Научно-технический отчет о выполненных работах по привязке реперов морских уровенных постов Каспийского моря к государственной высотной основе с помощью глобальных навигационных спутниковых систем позиционирования GPS/ГЛОНАСС как объекта «Северо-западный морской» // Шифр А.01.03.07. №2-GEOIS, А.01.0136 и № 1-GEOIS (31-05» Д». – М; Астрахань, 2005. – С. 127.

23. *Победоносцев С.В., Абузяров З.К., Копейкина Т.Н.* О качестве наблюдений за уровнем Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 22–31.

24. *Победоносцев С.В.* Методика восстановления среднего годового уровня моря с учетом влияния вертикальных движений берегов // Гидродинамические методы моделирования процессов на морях СССР. – М.: Гидрометеоиздат, 1987. – С. 24–28.

25. *Победоносцев С.В.* Использование водного нивелирования для проверок и восстановления значений уровня моря // Труды ГОИН. – 1978. – Вып. 137. – С. 37–107.

25. РД 52.10.768.2012. Нивелирование морских уровенных постов. – Обнинск: Артифекс, 2012. – 56 с.

27. РД 52.10.324-92. Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. М.: Росгидромет, 1993. – 187 с.

28. *Смирнова К.И.* Исследование закономерности в изменении уровня вдоль побережья Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1969. – Вып. 51. – С. 64–74.

29. *Татевян С.К.* Космические технологии для контроля измерения уровня Каспийского моря // Вестник Каспия. – 1997. – № 4 (6). – С. 21–23.

30. *Терзиев Ф.С.* Комплексный мониторинг – основа для изучения морей и обеспечения потребностей экономики и принятия управленческих решений // Международная конференция «Экологический мониторинг морей западной Арктики», тезизы докл. – Мурманск: КИЦ РАН, 1997. – С. 137–144.

31. *Фролов А.В.* Об оперативном гидрометеорологическом мониторинге бассейна Каспийского моря в Гидрометцентре России // Международный симпозиум «Природные и социально-экономические последствия разработки и управления водными ресурсами», тезисы доклада, Российская Федерация, Москва, май 15-20, 1995. – С. 178–179.

32. *Ханыков Н.В.* О перемежающихся изменениях уровня Каспийского моря // Записки Кавказск. отдел. Русского географ. об-ва. Кн. 2. – 1853. – С. 66–152.

33. *Шадрин А.Г.* К вопросу колебания уровня Каспийского моря // Геодезия и картография. – 2000. – № 4. – С. 26–30.

34. *Cazenave C., Bonnefond P., Dominh., Schaeffer P.* Caspian sea level from Topex-Poceidon altimetry: level now falling // Geophys. Research Letter. – April 15, 1997. – Vol. 24, № 8. – P. 881–884.

35. Vignudelli S., Testut L., Mamedov R., Sultanov M., Aliev A. et al. Installation of Pilot Sea Level Monitoring Station for Satellite Altimetry Calibration / Validation in the Caspian Sea at Absheron Port, Baku, Azerbaijan (8–13 June 2008) // Вестник Каспия. – 2008. – № 4. – С. 41–56.

К главе 4

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. *Алиев А.С., Велиев С.С.* Динамика изменения уровня Каспийского моря в историческое время и ближайшем будущем // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 3. – С. 79–84.

3. *Алишаев М.Г.* Природные циклы и переходные режимы уровня Каспия // Труды Географического общества Дагестана. – 2013. – Т. 41. – С. 21–25.

4. *Аполлов Б.А.* Колебания уровня Каспийского моря // Труды ИОАН. – 1956. – Т. XV. – С. 281–288.

5. *Берг Л.С.* Уровень Каспийского моря за историческое время // Проблемы физической географии. – 1934. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 11–64.

6. *Брегман Г.Р.* Колебания уровня Каспийского моря // Исследование морей СССР. – 1936. – Вып. 24. – С. 13–85.

7. *Варущенко А.Н.* Изменение уровня Каспийского моря с V в до 1830 г. // Технико-экономический доклад «Анализ изменений уровня Каспийского моря» (ТЭД). – М., 1992. – С. 49–71.

8. *Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К.* Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. – М.: Наука, 1987. – 240 с.

9. *Варущенко С.И. и др.* Уровень Каспийского моря и колебания увлажненности русской равнины в средние века // Изв. АН СССР. Серия 5. География. – 1984. – № 4. – С. 61–70.

10. *Герштанский Н.Д.* Некоторые особенности рельефа водной поверхности при нагонах и сгонах в отмелых районах моря (на примере Северного Каспия) // Труды ГОИН. – 1971. – Вып. 194. – С. 82–95.

11. *Гумилев Л.Н.* История колебаний уровня Каспийского моря за 2000 лет (с IV в до н.э. до XVI в н.э.) // Колебания увлажненности Арало-Каспийского региона в голоцене. – М., 1980. – С. 32–47.

12. *Гюль К.К.* Вековые колебания уровня Каспийского моря // Изв. АН АзССР. Серия наук о Земле. – 1972. – № 3. – С. 81–83.

13. *Зубаков В.А.* Колебания уровня Каспийского моря в геологическом прошлом и его прогноз // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 8. – С. 82–88.

14. *Кадукин А.И., Клиге Р.К.* Многолетние колебания и современный уровенный режим Каспийского и Аральского морей //Труды ГГИ. – 1990. – Вып. 338. – С. 132–140.

15. *Карпычев Ю.А.* Колебания уровня Каспийского моря в исторический период // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 1. – С. 5–17.

16. Колебания уровня Каспийского моря // Труды ИОАН. – 1956. – Т. 15. – 288 с.

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

18. *Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я.* Колебания уровня Каспийского моря (анализ режима и вероятностный прогноз). – М.: Наука, 1975. – 160 с.

19. *Лупачев Ю.В., Макарова Т.А.* Сезонные циклы в изменении уровня Каспийского моря // Труды ГОИН. – 2000. – Вып. 207. – С. 113–121.

20. *Михайлов В.Н.* Загадки Каспийского моря // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. № 4. – С. 63–70.

21. *Никонова Р.Е., Бортник В.Н.* Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. – 1994. – Вып. 4 – С. 410–414.

22. *Никонова Р.Е.* Уровень моря. Водный баланс // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – С. 188–199, 211–221.

23. *Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость составляющих водного баланса Каспийского моря и ее роль в колебаниях уровня // Материалы Всесоюзного совещания по проблеме Каспийского моря, Гурьев, 3–5 июня 1991.

24. *Родионов С.Н.* Многолетняя изменчивость сезонного хода уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1986. – № 4. – С. 87–91.

25. *Рычагов Г.И.* Плейстоценовая история Каспийского моря. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 267 с.

26. *Рычагов Г.И.* Уровенный режим Каспийского моря в последние 10000 лет // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. География. – 1993. – № 2. – С. 38–49.

27. *Рычагов Г.И.* Уровень Каспийского моря за историческое время // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. Географ. – 1993. – № 4. – С. 42–49.

28. *Рычагов Г.И.* Уровень Каспийского моря на рубеже XVIII–XIX веков // Геоморфология. – 1994. – № 2. – С. 102–108.

29. *Скриптунов Н.А.* Сезонная изменчивость уровня Каспийского моря // Труды ГОИН. – 1970. – Вып. 98. – С. 95–106.

30. *Смирнова К.И.* Исследование закономерностей в изменении уровня вдоль побережья Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1969. – Вып. 51. – С. 64–74.

31. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никоновва Р.Е.* Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестник МГУ. Сер. 5. Географ. – 2011. – № 2. – С. 62–71.

32. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления // под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ГЕОС, 2013. – 700 с.

33. *Федоров П.В.* Трансгрессия и регрессия Каспийского моря в четвертичном периоде и проблема долгосрочных предсказаний его уровня // Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М.: Изд-во АН СССР. 1957. – С. 64–67.

34. *Федоров П.В.* Причины колебаний уровня Каспийского моря в четвертичном периоде // Труды ИОАН. – 1956. – Т. 15, гл. 2. – С. 30-43.

К главе 5

1. *Аполлов Б.А.* Доказательство прошлых низких стояний уровня Каспийского моря // Вопросы географии. Вып. 24. – М.: 1951. – № 24. – С. – 134–143.

2. *Арпе К., Спорышев П.В., Семенов и др.* Изменения климата и их последствия // СПб: ИНЕНКО РАН, 2000. – С. 65–179.

3. *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.* Исследование причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы // Изменения климата и их последствия – СПб: Наука, 2002. – С. 165–179.

4. *Арпе К., Спорышев П.В., Семенов В.А., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Мохов И.И.* Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Доклады РАН. – 1999. – Т. 366, № 2. – С. 248–252.

5. *Архипова Е.Г., Крюков В.В. и др.* Возможные изменения уровня Каспийского моря в связи с изменениями климатических условий // Труды ГОИН. – 1975. – Вып. 125. – С. 75–85.

6. *Афанасьев А.Н.* Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. – М.: Наука, 1967. – 231 с.

7. *Бабкин В.И.* Механизм увлажнения и водные ресурсы бассейна Волги в периоды различной водности // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 54–64.

8. *Бабкин В.И., Постников А.Н. и др.* Влияние циклонической активности на сток Волги // Труды ГГИ. – 1992. – Вып. 360. – С. 48–57.

9. *Белевич Е.Ф., Русаков Г.В.* Роль антропогенного фактора в формировании дельты Волги // Сб. работ Астраханской ЗГМО. Вып. 2. Гидрология Южных морей. – 1980. – С. 60–69.

10. *Белинков С.Ю.* К вопросу о причинах современного понижения уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1948. – № 5.

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

12. *Берг Л.С.* Избранные труды. Т. III. – М.: АН СССР, 1960. – 455 с.

13. *Березнер А.С.* Перспективы развития водопотребления в бассейне Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1979. – № 1. – С. 7–14.

14. *Брегман Г.Р.* Колебания уровня Каспийского моря // Исследования морей СССР. – 1936. – Вып. 24. – С. 13–85.

15. *Бруевич С.В.* К вопросу о причинах колебания уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1938. – № 3. – С. 110–114.

16. *Бутаев А.М.* Каспий: загадки уровня. – Махачкала, 1998. – 70 с.

17. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2014. – С. 664–683.

18. *Визе В.Ю.* Колебания солнечной активности и ледовитости арктических морей. – М.: Изд-во ГУСМП, 1945. – 6 с.

19. *Вительс Л.А.* Исследования многолетних колебаний атмосферной циркуляции и осадков в связи с проблемой сверхдолгосрочного прогноза

уровня Каспийского моря. Избранные труды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 255 с.

20. *Вительс Л.А.* Характеристики барико-циркуляционного режима Европейского естественного синоптического района 1900–1964 гг. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 120 с.

21. *Воейков А.И.* Климаты земного шара и в особенности России // Избр. соч. Т. 1. – М.; Л.: 1948. – 750 с.

22. *Вязилова Н.А.* Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 7. – С. 5–14.

23. *Гасюков П.С., Смирнов Н.П.* Колебания барического поля Северного полушария в 11-летнем цикле солнечной активности // Доклады АН СССР. – 1967. – Т. 173, № 3.- С. 567–569.

24. *Гетман И.Ф.* Повторяемость южных циклонов над водосбором Волги и акваторией Каспийского моря и их связь с индексами атмосферной циркуляции и составляющими водного баланса: Раздел отчета ГГО по теме 1.7.2.3 за 2009–2010 гг. «Разработать технологию прогноза тенденций изменения уровня Каспийского моря на перспективу от 5 до 20 лет».

25. *Гирс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат,1971. – 280 с.

26. *Гирс А.А.* Эпохальные преобразования форм атмосферной циркуляции и связанные с ними колебания уровня Каспийского моря // Изв. АН СССР. Сер. географ. – 1957. – № 1. – С. 102–108.

27. *Голицын Г.С.* Исторический обзор колебаний уровня Каспийского моря и его причины // Экологические и политические проблемы стран Каспийского региона. – М.; Найроби: Kluwer Acad. Publish, 1998. – С. 23–35.

28. *Голицын Г.С., Дзюба А.В. и др.* Региональные изменения климата и их проявление в современном подъеме уровня Каспийского моря // Докл. АН СССР. – 1990. – Том 313, № 5. – С. 1224–1227.

29. *Голубов Б.Н.* Аномальный подъем уровня Каспийского моря и техногенная стабилизация недр // Изв. РАН. Сер. географ. – 1994. – № 1. – С. 27–36.

30. *Демин А.П.* Эффективность использования водных ресурсов в бассейне Волги // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 6. – С. 653–663.

31. *Дзердзеевский Б.Л.* Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии. – М.: Межвед. Геофиз ком., 1968. – 176 с.

32. *Дроздов О.А.* Колебания естественной увлажненности в связи с анализом антропогенных изменений климата и увлажнения // Водные ресурсы. – 1992. – № 2. – С. 5–15.

33. *Дроздов О.А.* О возможности климатических прогнозов на основании учета цикличности, обусловленной космическими и земными факторами // Труды ГГО. – 1971. – Вып. 274. – С. 3–26.

34. *Дуванин А.И.* О модели взаимодействия между макропроцессами в океане и атмосфере // Океанология. – 1968. – Т. 8.– Вып. 4. – С. 571–580.

35. *Зайков Б.Д.* Водный баланс Каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня // Труды НИУ ГУГМС. – 1946. – Сер. IV. – Вып. 38. – С. 5–50.

36. *Зайцева И.С.* Многолетние колебания стока Волги и глобальные изменения климата // Изв. АН РАН. Сер. географ. – 1996. – № 5. – С. 45–54.

37. *Зайцева И.С.* Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. – М.: Ин-т географии АН СССР, 1990. – 184 с.

38. *Исаев А.А., Клименко Л.В. Жильцова О.В.* Повторяемость «дождливых» и «сухих» синоптических процессов в бассейне Волги и водобалансовые характеристики Каспия в периоды относительной стабилизации, устойчивого падения и роста уровня // Вестник МГУ. Серия 5. География. –1995. – № 1. – С. 70–77.

39. *Калинин Г.П., Клиге Р.К., Леонтьев О.К., Шлейников В.А.* Анализ изменения уровня Каспийского моря как одного из показателей глобального водообмена // Проблемы палеогидрологии. – М.: Наука, 1976. – С. 191–213.

40. *Каминский А.А.* К вопросу о влиянии на колебания уровня Каспийского моря осадков в его бассейне // Изв. Центрального гидрометеорологического бюро. – 1926. – Вып. VI. – С. 221–244.

41. *Ким И.С., Никулина С.П.* Изменение уровня Каспийского моря и циркуляция атмосферы // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 7. – С. 76–80.

42. *Клиге Р.К., Ковалевский В.С., Федорченко Е.А.* Влияние глобальных климатических изменений на водные ресурсы Волжского бассейна // Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). – М.: Научный мир, 2000. – С. 220–236.

43. *Клименко Л.В.* Об увлажнении центральной части ЕТР и о происхождении засух // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 7. – С. 21–25.

44. *Ковалев В.В., Парада С.Г.* Геологические аспекты изменений уровня Каспийского моря // Вестник Южного научного центра. – 2003. –Т. 9, № 2. – С. 38–46.

45. *Кондратович К.В.* Антропогенные, геофизические и космические факторы изменения циркуляционных эпох и уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21. – № 6. – С. 623–630.

46. *Кондратович К.В.* Количественная оценка интенсивности циклонической-антициклонической деятельности в Северной Атлантике // Труды ААНИИ. – 1974. – Т. 325. – С. 43–62.

47. *Косарев А.Н., Никонова Р.Е.* О причинах и последствиях колебаний уровня Каспийского моря в XX–XXI столетиях // Труды ГОИН. – 2008. – Вып. 211. – С. 127–151.

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

49. *Косарев А.Н., Маева С.А.* О гидрометеорологических процессах, определяющих многолетние колебания уровней Каспийского и Аральского морей // Комплексные исследования Каспийского моря. – М., 1976. – Вып. 5. – С. 220–223.

50. *Кренке А.Н., Попова В.В.* Колебания уровня Каспийского моря и глобальная циркуляция атмосферы // Материалы метеорологических исследований. – 1992. – № 15. – С. 116–122.

51. *Лепешко В.Н.* К прогнозу южных циклонов // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 7. – С. 15–21.

52. *Лилиенберг Д.А.* Феномен Каспия и новая тектоно-гидроклиматическая концепция колебаний уровня внутренних водоемов // Науки о Земле. – Баку: Изд-во Nafta-Press, 2001. – № 3. – С. 3–11.

53. *Лилиенберг Д.А.* Тенденции современной эндодинамики Каспия и изменения уровня // Докл. РАН. – 1993. – Т. 331, № 6. – С. 745–750.

54. *Маев Е.Г.* Колебания уровня Каспийского моря – роль тектонических факторов // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1993. – Т. 4. – С. 98–102.

55. *Малинин В.Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб: РГМУ, 1994. – 160 с.

56. *Мелешко В.П., Катцов В.М. и др.* Изучение возможных изменений климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана // Изменения климата и их последствия. – СПб: Наука, 2002. – С. 13–35.

57. *Мещерская А.Н., Голод М.П., Белянкина И.Г.* Колебания уровня Каспийского моря в связи с особенностями общей циркуляции атмосферы в XX веке // Изменения климата и их последствия. – СПб: Наука, 2002. – С. 180–194.

58. *Михайлов В.Н., Повалишникова Е.С.* Еще раз о причинах изменений уровня Каспийского моря в XX веке // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1998. – № 4. – С. 35–38.

59. *Монахов С.К., Романов Н.Т.* Динамика полей уровня Каспийского моря и сейсмическая активность восточного Кавказа и Предкавказья // Вестник ДНЦ РАН. – 1999. – № 5. – С. 40–45.

60. *Найденов В.И.* Почему меняется уровень Каспия? // Природа. – 1992. – № 1. – С. 68–74.

61. *Нестеров Е.С.* Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада лтд, 2013. – 143 с.

62. *Нестеров Е.С.* О фазах североатлантического колебания // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 1. – С. 64–74.

63. *Нестеров Е.С.* О связи индексов колебаний циркуляции атмосферы и уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 323–325.

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

65. *Никонова Р.Е.* Основные концепции непостоянства уровня Каспийского моря // Материалы международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса Каспийского региона», Астрахань, Российская Федерация, 19–20 октября 2011 г. – С. 193–200.

66. *Нуждина М.А.* Колебания уровня Каспийского моря в квазидвухлетнем и 11-летнем циклах солнечной активности // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22, №4. – С. 496–500.

67. Обзор некоторых результатов исследований причин колебаний уровня Каспийского моря и его прогноз (вклад Росгидромета в реализацию Комплексной программы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в регионе Каспийского моря – КАСПАС) // Вестник Каспия. – 2000.-№ 1. – С. 37–50.

68. *Панин Г.Н., Дианский Н.А.* О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Известия РАН. ФАО. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 304–316.

69. *Попова В.В.* Структура многолетних колебаний осадков на русской равнине // Изв. РАН. Серия геогр. – 1999. – № 3. – С. 40–50.

70. Последствия изменения климата в регионе Каспийского моря // Региональный документ, ЮНЕП, Женева, 1997. – 125 с.

71. *Раткович Д.Я.* Современные колебания уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1993. – Т. 20, № 2. – С. 160–179.

72. *Раткович Д.Я., Жданова И.С., Привальский В.Е.* К проблеме уровенного режима Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1973. – № 3. – С. 45–69.

73. *Родионов С.Н.* Современные изменения климата Каспийского моря. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – 124 с.

74. *Родионов С.Н.* Климатологический анализ необычного подъема уровня Каспийского моря в последние годы // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1989. – № 2. – С. 73–81.

75. *Рычагов Г.И.* Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 2011. – № 2. – С. 4–12.

76. *Рычагов Г.И.* Плейстоценовая история Каспийского моря. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 267 с.

77. *Рычагов Г.И., Варущенко А.Н., Никифоров Л.Г.* Палеогеографические аспекты прогноза колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 5. – С. 500–504.

78. *Рычагов Г.И.* Уровень Каспийского моря на рубеже XVIII–XIX веков // Вестник МГУ. – 1994. – № 2. – С. 102–108.

79. *Рычагов Г.И.* Уровень Каспийского моря за историческое время // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1993. – № 4. – С. 42–49.

80. *Рубашев Б.М.* Проблемы солнечной активности. М.: Наука, 1964. – 360 с.

81. *Сайкин И.М.* Уровень Каспия и солнечная активность // Труды ГГО. – 1959. – Вып. 89. – С. 72–82.

82. *Свиточ А.А., Янина Т.А.* Будущее Каспия – в его прошлом // Природа. – 1996. – № 2. – С. 45–57.

83. *Сидоренков Н.С., Швейкина В.И.* Изменение климатического режима бассейна Волги и Каспийского моря за последнее столетие // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 4. – С. 401–406.

84. *Смирнов Н.П.* Центры действия атмосферы и солнечная активность // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1973. – № 42. – С. 25–30.

85. *Соловьева Н.Н.* Исследование зависимости колебаний уровня Каспийского моря от солнечной активности. – СПб: Изд-во РГГМУ, 2004. – 70 с.

86. *Спорышев П.В., Мелешко В.П. и др.* Влагооборот бассейна Каспийского моря, наблюдаемый и рассчитанный по моделям общей циркуляции атмосферы // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 6–23.

87. *Спорышев П.В., Мещерская А.В. и др.* Динамика климата водосбора Каспийского моря в XX веке и его возможные изменения в XXI веке по данным наблюдений и результатам моделирования с ансамблем климатических моделей // Всемирная конференция по изменению климата. Тезисы докладов, Москва, 29.IX–3.X. 2003. – С. 521.

88. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. Раздел 2. Влияние ожидаемых изменений на отрасли экономики – М.: Росгидромет, 2005. – 34 с.

89. Технико-экономический доклад (ТЭД): Анализ изменений уровня Каспийского моря. – М.: 1992. – 592 с.

90. *Туголесов Д.А.* О причинах трансгрессий и регрессий Каспийского моря // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1948. – № 6. – С. 131–140.

91. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 2011. – № 2. – С. 62–71.

92. Устья рек каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ГЕОС, 2013. – 700 с.

93. *Федоров П.В.* Трансгрессии и регрессии Каспийского моря в четвертичном периоде и проблема долгосрочных предсказаний его уровня // Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 64–67.

94. *Федоров П.В.* Причины колебаний уровня Каспийского моря в четвертичном периоде // Труды ИОАН. – 1956. – Т. 15. – С. 30–43.

95. *Федоров Е.Е.* Влияние солнечных пятен на температуру и давление воздуха // Известия Главной физической обсерватории. – 1920. – № 3.

96. *Хубларян М.Г.* Феномен Каспия // Вестник РАН. – 1995. – Вып. 65. – С. 616–621.

97. *Хубларян М.Г., Найденов В.И.* Нелинейная теория колебаний уровня природных водоемов // Воды суши: проблемы и решения. – М.: ИВП РАН, 1994. – С. 193–216.

98. *Чернова Н.П.* Влияние атмосферной циркуляции на пространственно-временную изменчивость сезонных сумм осадков в бассейне Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1997. – Т. 24. – № 2. – С. 133–139.

99. *Шевнин А.Д.* Долговременные вариации солнечной и магнитной активности и уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 4. – С. 405– 409.

100. *Шикломанов И.А, Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л.* Причины повышения уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 152–164.

101. *Шикломанов И.А, Георгиевский В.Ю.* Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия. – СПб: Наука, 2002. – С. 165–179.

102. *Шикломанов И.А, Георгиевский В.Ю.* Влияние хозяйственной деятельности на водный баланс и изменения уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 267–277.

103. *Шикломанов И.А., Кожевников В.П.* Потери стока в Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 221. – С. 3–46.

104. *Шило Н.А.* Природа колебаний уровня Каспия // Труды ДАН СССР. – 1989. – Т. 305, № 2. – С. 412–416.

105. *Шило Н.А., Кривошей М.И.* Взаимосвязь колебаний уровня Каспийского моря с напряжениями в земной коре // Вестник АН СССР. – 1989. – № 6. – С. 83–90.

106. *Шнитников А.В.* Закономерности колебания уровня Каспийского моря в связи с изменчивостью общей увлажненности материков Северного полушария // Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М., 1957. – С. 23–47.

107. *Шулейкин В.В.* Взаимодействие звеньев в системе океан-атмосфера-материк // Материалы V съезда ВГО. – 1970. – Вып. 17.

108. *Шулейкин В.В.* Связь между климатом Европы и переносом тепла в Атлантике // Изв. АН СССР. ФАО. – 1968. – Т. 4, № 3. – С. 243–261.

109. *Шулейкин В.В.* Термобарические сейши в атмосфере, как фактор смены погоды // Изв. АН СССР. Серия геогр. и геофиз. – 1942. – № 1–2.

110. *Эйгенсон М.С.* Будущее Каспийского моря // Проблемы Каспийского моря. – Баку: Изд-во АН Азерб. ССР, 1963. – С. 24–27.

111. *Эйгенсон М.С.* Колебания уровня Каспийского моря и солнечная активность // Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 9–22.

112. ЮНЕП. Значение изменения климата и повышения уровня Каспийского моря: Региональный обзор. – Женева: ЮНЕП, 1997.

113. *Arpe K., Bengston L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V.* Connection between Caspian Sea Level variability and ENSO // Geophys. Res. Lettes. – 2000. – Vol. 27, No. 17. – P. 2693–2696.

114. *Arpe K., Leroy S.A.G.* The Caspian Sea Level forced by the atmospheric circulation as observed and modeled // Quat. Int. – 2007. – Vol. 173. – P. 144–152

115. *Arpe K., Leroy S.A.G., Lahijani H, Khan V.* Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea Level // Hydrol. Earth Syst. Sci. – Vol. 16. – P. 19–27. – www.hydrol-ears-syst-sci.net/16/19/2012/ doi: 10.5194/hess-16-19-2012.

116. *Arpe K., Roechner E.* Simulations of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases // Advances in Water Resources. – 1999. – Vol. 23. – P. 105–119.

117. *Elgiundi N, Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations //Geophysical Res. Letters. – April 2006. – Vol. 33. – P. L007006.

118. Golitsyn G.S., Meleshko V.P. et al. GSM simulation of water balance over Caspian Sea and its watershed // Proceeding of the Fierst International AMIP Scientific Conference, 1996, WMO/TD-No. 732. – P. 113–118.

119. *Rodionov S.N.* Global and Regional Climate Interaction: The Caspian Sea Experience // Water Science and Ttchnology Library. – 1994. – Vol. 11. – 256 c.

К главе 6

1. *Абузяров З.К.* Роль составляющих водного баланса Каспийского моря в месячных и годовых приращениях его уровня // Труды Гидрометцентра России. – 2006. – Вып. 341. – С. 3–27.

2. *Абузяров З.К., Фролов А.В.* Диагноз элементов водного баланса и прогноз уровня Каспийского моря на различные сроки в Гидрометцентре России // Международная конференция «Каспийский регион: экономика, экология, минеральные ресурсы»: сборник рефератов, Москва, июнь 20–23, 1995. – С. 11.

3. *Аполлов Б.А.* Водный баланс Каспийского моря и возможные его изменения // Труды ЦИЭГМ. – 1935. – Вып. 11 (44). – С. 11–18.

4. *Архипова Е.Г., Макарова Р.Е., Крюков В.В.* Многолетние изменения испарения на Каспийском море // Труды ГОИН. – 1975. – Вып. 125. – С. 86–94.

5. *Архипова Е.Г.* Современный и перспективный водный и солевой баланс и возможные изменения гидрологического режима Каспийского моря // Труды ВНИРО. – 1975. – Т. 108. – С. 18–26.

6. *Архипова Е.Г., Потайчук М.С., Скриптунов Н.А.* Современный водный баланс Каспийского моря // Труды ГОИН. – 1970. – Вып. 101. – С. 34–73.

7. *Архипова Е.Г.* Об испарении на Каспийском море // Труды ГОИН. – 1955. – Вып. 021. – С. 3–20.

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

9. *Белинский Н.А.* Морские гидрометеорологические информации и прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 254 с.

10. *Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // Труды ГГО. – 2003. – Вып. 551. – С. 23–50.

11. *Богданова Э.Г., Мещерская А.В.* Оценка влияния потерь на смачивание на однородность рядов годовых сумм осадков // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 11. – С. 88–99.

12. *Бортник В.Н.* Водный баланс залива Кара-Богаз-Гол в естественных и регулируемых условиях // Труды ГОИН. – 1991. – Вып. 183. – С. 3–18.

13. Водный баланс Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС СССР. – 1941. – Сер. 8, вып. 1.

14. *Галеркин Л.И.* О расчете водного баланса по уровню // Океанология. – 1962. – Т. 2. – Вып. 5. – № 5. – С. 783–788.

15. *Георгиевский В.Ю. и др.* Модель оттока в залив Кара-Богаз-Гол: раздел отчета ГГИ по НИР Росгидромета по теме 1.5.1.2. – 2004. – 2 с.

16. *Георгиевский В.Ю., Цыценко К.В., Шалыгин А.Л.* Оценка притока поверхностных вод в Каспийское море // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 217–229.

17. *Георгиевский В.Ю., Голубев В.С.* Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 230–238.

18. *Георгиевский В.Ю.* Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений// Гидрологические расчеты и прогнозы. – Л.: Изд. ЛПИ, 1982. – Вып. 79. – С. 7–14.

19. *Голицын Г.С., Мелешко В.П., Мещерская А.Н. и др.* Моделирование водного и теплового баланса на Каспийском море и примыкающем водосборе

с помощью моделей общей циркуляции атмосферы // Международная конференция «Каспийский регион: экономика, экология, минеральные ресурсы»: сб. рефератов, Москва, 20-23 июня 1995 г. – С. 11.

20. *Голицын Г.С., Панин Г.Н.* О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 1. – С. 57–64.

21. *Голубев В.С., Цыценко К.В.* Структура и динамика потерь речного стока в низовьях Волги // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 8. – С. 85–93.

22. *Голубцов В.В.* Водный баланс Каспийского моря: уровень как проблема исследования // Каспийская экологическая программа (КЭП). – Алматы, 1999.

23. *Гоптарев Н.П.* Схема расчета характеристик турбулентности приземного слоя атмосферы // Труды ГОИН. – 1965. – Вып. 84. – С. 171–181.

24. *Давыдов В.К.* Испарение с поверхности Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС. – 1941. – Сер. 8, вып. 1. – С. 124–154.

25. *Евсеева Л.С.* Влагооборот Каспийского моря // Каспийское море. – М.: Из-во МГУ, 1969. – С. 88–106.

26. *Зайков Б.Д.* Водный баланс Каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня // Труды НИУ ГУГМС. – 1946. – Сер. 4, вып. 38. – С. 5–50.

27. *Зайков Б.Д.* Водный баланс Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС. – 1941. – Сер. 8, вып. 1. – С. 167–175.

28. *Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Месхетели А.В.* Подземный водообмен в море. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 205 с.

29. *Исмайылов Г.Х., Федоров В.М.* Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // Водные ресурсы. – 2001. –Т. 28, № 5. – С. 517–525.

30. *Исаев А.А., Клименко Л.В. Жильцова О.В.* Повторяемость «дождливых» и «сухих» синоптических процессов в бассейне Волги и водобалансовые характеристики Каспия в периоды относительной стабилизации, устойчивого падения и роста уровня // Вестник МГУ. – 1995. – Сер. 5. География. – № 1. – С. 70–77.

31. *Калинин Г.П., Смирнова К.И., Шереметевская О.И.* Водобалансовые расчеты будущих уровней Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1968. – № 9. – С. 45–52.

32. *Клиге Р.К.* Водный баланс и уровень моря // ТЭД. – 1992. – С. 317–343.

33. *Кудрицкий Д.М.* Площадь поверхности Каспийского мор // Труды НИУ ГУГМС. –1941. – Сер. 8, вып. 1. – С. 67–70.

34. *Лавров Д.А.* Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа морской воды // Международный научный семинар по экологическим проблемам Прикаспийского региона «Экологические проблемы Каспия»: сб. докл., Москва. 1–3 декабря 1999 г. – С. 17–21.

35. *Лахиджани Х.К., Красножон Г.Ф.* Сток рек иранского побережья в Каспийское море // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 11. – С. 100–102.

36. *Лобанов В.В.* Влияние изменения испарения с поверхности Каспийского моря на его будущий уровень // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 2. – С. 59–64.

37. *Лобанов В.В.* Испарение с поверхности Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 10. – С. 47–53.

38. *Макарова Р.Е.* Плотностные изменения уровня Каспийского моря // Труды ГОИН. – 1972. – Вып. 115. – С. 20–25.

39 *Мелешко В.П., Голицын Г.С., Володин Е.М. и др.* Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы // Известия РАН. ФАО. – 1998. – Т. 34, № 4. – С. 591–599.

40. Методы изучения и расчета водного баланса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 400 с.

41. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. –639 с.

42. *Михайлевский А.И.* Испарение с поверхности Каспийского моря и общий баланс моря // Труды АН АзССР. Сер. географ. – 1939. – Т. 1 (58). – С. 3–20.

43. Многолетний водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. (Расчет параметров многолетнего уровенного режима Каспийского моря на перспективу до 2010 г.): научный отчет МГНВП «Ресурс». – М., 1995.

44. Многолетний водный баланс и колебания уровня Каспийского моря (науч. рук. Фролов А.В.). Кн. 2. - – М.: Совинтервод, 1994. – 59 с.

45. *Никонова Р.Е.* Исследование современной динамики гидрометеорологических условий каспийского бассейна, в том числе уровня моря и составляющих водного баланса и оценка их возможных изменений на ближайшую перспективу: раздел ГОИНа по НИР Росгидромета по теме 1.5.1.2. – 2004. –14 с.

46. *Николаева Р.В. Бортник В.Н.* Характеристики межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 4/5. – С. 410–414.

47. *Николаева Р.В.* Новые морфометрические характеристики Каспийского моря // Бюллетень МОИП. Отд. геолог. – 1971. – № 1. – С. 143.

48. *Никонова Р.Е.* Изменение водного баланса и уровня Каспийского моря в условиях глобальной климатической изменчивости и антропогенного воздействия на его гидрологический режим // Материалы международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса Каспийского региона», Астрахань, Российская Федерация, 19–20 октября 2011 г. – С. 200–212.

49. *Никонова Р.Е., Терзиев Ф.С., Бортник В.Н.* Многолетние изменения уровня и составляющих водного баланса Каспийского моря // Международ. конф. «Каспий-95. Каспийский регион: экономика, экология, минеральные ресурсы», сборник рефератов, Москва, 1995. – С. 24.

50. *Никонова Р.Е., Бортник В.Н.* Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. – 1994. –Том 21, № 4. – С. 410–414.

51. *Никонова Р.Е.* Уровень моря. Водный баланс // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 6. Каспийское море. Вып. 1. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – С. 188–199, 211–221.

52. *Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость составляющих водного баланса Каспийского моря и ее роль в колебаниях уровня // Материалы Всесоюзного совещания по проблеме Каспийского моря, Гурьев, июнь 3–5, 1991.

53. *Новиков Ю.В., Алешин С.В. и др.* Исследование динамики изменения залива Кара-Богаз-Гол по данным космических и аэровизуальных наблюдений. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – С. 1–8.

54. *Остроумова Л.П., Полонский В.Ф.* Водно-балансовая модель Северного Каспия, отдельных его частей и оценка притока речных вод в Средний Каспий // Труды ГОИН. – 2011. – Вып. 213. – С. 343–355.

55. Отчет о НИР по теме 1.5.1.2 «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: раздел: «Исследование водного баланса и методы долгосрочных прогнозов колебаний уровня Каспийского моря». – 2004. – С. 69–105.

56. *Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В.* Современное состояние Каспийского моря. – М.: Наука, 2005. – 356 с.

57. *Панин Г.Н.* Развитие исследований испарения с поверхности Каспийского моря // Водные ресурсы. –1999. – Том 26, № 5. – С. 643–651.

58. *Панин Г.Н.* Испарение и теплообмен Каспийского моря. –М.: Наука, 1987. – 89 с.

59. *Панин Г.Н., Дзюба А.В., Осипов А.Г.* О возможных причинах изменения испарения за последние десятилетия в районе Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1991. – Т. 21, № 3. – С. 5–17.

60. *Полонский В.Ф., Горелиц О.В.* Сток воды и его распределение в дельте Волги // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 4. – С. 84–95.

61. *Потайчук М.С.* О подземном стоке воды в Каспийское море // Труды ГОИН. – Вып. 98. – 1970. – С. 165–173.

62. *Ремизова С.С.* Водный баланс // Каспийское море. Гл. 7. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – С. 107–138.

63. *Решетников В.И.* Сток Волги с 1892 г. // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 4. – С. 453–456.

64. *Самойленко В.С.* Современная теория океанического испарения и ее практическое применение // Труды ГОИН. – 1952. – Вып. 21 (33). – С. 3–31.

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

66. *Смирнова К.И.* Изменчивость элементов водного баланса Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1968. – Вып. 34. – С. 26–33.

67. *Смирнова К.И., Шереметевская О.И.* Расчеты водного баланса Каспийского моря для прогноза годового хода уровня моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1967. – Вып. 3. – С. 49–74.

68. *Смирнова К.И., Лунякова Л.Г.* Многолетние характеристики составляющих водного баланса Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1984. – Вып. 263. – С. 113–122.

69. *Уланов Х.К.* О роли подземного стока в водном балансе Каспийского моря // Океанология. – 1966. – Т. 6, вып. 5. – С. 103–106.

70. Устья рек каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / Под ред. проф. В.Н. Михайлова. – М.: ГЕОС, 2013. – 700 с.

71. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. – М.: ГЕОС, 2003. – 171 с.

72 *Шереметевская О.И.* Учет стратификации воздуха в расчетах испарения и теплообмена // Метеорология и гидрология. – 1960. – № 9. – С. 16–22.

73. *Яготинцев В.Н., Поставик П.В.* Уровень Каспийского моря в прошлом и настоящем // Труды Географического общества Дагестана. – 2013. – Т. 41. – С. 26–30.

К главе 7

1. *Абузяров З.К.* Усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 48–66.

2. *Абузяров З.К., Красюк В.С., Лежнева Н.Г.* Автоматизированный прогноз годового хода уровня Каспийского моря // Труды ГОИН. – 2009. – Вып. 212. – С. 146–158.

3. *Абузяров З.К., Красюк В.С.* Прогноз годового хода уровня Каспийского моря, основанный на приближенном расчете уравнения водного баланса // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб:, Гидрометеоиздат, 2003. – С. 310–322.

4. *Арпе К., Спорышев П.В. и др*. Исследования причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы//В кн.: Изменения климата и их последствия. СПб.: «Наука».-2002.- С.165-179.

5. Атлас сельского хозяйства. – М.: ГУГК, 1960. – 308 с.

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

7. *Белинский Н.А.* Морские гидрометеорологические информации и прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 254 с.

8. *Белинский Н.А., Калинин Г.П.* О прогнозе колебаний уровня Каспийского моря // Труды НИУ ГУГМС. – 1946. – Серия 4, вып. 37. – 36 с.

9. *Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах РФ // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 10. – С. 68–93.

10. *Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // Труды ГГО. – 2003. – Вып. 551. – С. 23–50.

11. *Богданова Э.Г., Мещерская А.В.* Оценка влияния потерь на смачивание на однородность рядов годовых сумм осадков // Метеорология и гидрология. – 1998.– № 11.– С. 88–99.

12. *Бортник В.Н.* Водный баланс залива Кара-Богаз-Гол в естественных и регулируемых условиях // Труды ГОИН. – 1991.– Вып. 183.– С. 3–18.

13. *Голицын Г.С., Панин Г.Н.* О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология. – 1989.– № 1.– С. 57–64.

14. *Ефремова Н.И.* Месячные количества атмосферных осадков, средние для районов Европейской территории СССР и Северного Казахстана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 111 с.

15. *Калинин Г.П.* Прогноз уровня Каспийского моря // Труды НИЦ ГУГМС. – 1941. – Серия 8, вып. 1.

16. *Калинин Г.П.* Проблемы глобальной гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1958. – 377 с.

17. *Калинин Г.П., Смирнова К.И., Шереметевская О.И.* Водобалансовые расчеты будущих уровней Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1968. – № 9. – С. 45–52.

18. *Каминский А.А.* К вопросу о влиянии на колебания уровня Каспийского моря осадков в его бассейне // Изв. ЦГМБ. – 1926. – Вып. 4. – С. 221–244.

19. *Леднева К.В., Мещерская А.В.* Многолетние ряды месячных сумм осадков, осредненных по площади для основных сельскохозяйственных районов СССР (ежегодные данные). – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 157 с.

20. *Малинин В.Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб: РГМУ, 1994. – 160 с.

21. *Малинин В.Н.* Долгосрочное прогнозирование уровня Каспийского моря // Изв. РАН. Серия географ. – 2009. – № 6. – С. 7–16.

22. *Малинин В.Н.* Об аналитическом подходе к оценке фоновых изменений уровня Каспийского моря // Труды РГГМУ. – 1999. – Вып. 123. – С. 189–201.

23. *Мещерская А.В., Сперанская И.А., Голод М.П.* Учет эффекта урбанизации при оценке изменений температуры воздуха северного полушария во второй половине XX века // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2011. – № 24.– С. 317–332.

24. *Мещерская А.В., Голод М.П., Белянкина И.Г.* Метод долгосрочного прогноза изменений уровня Каспийского моря с годовой заблаговременностью по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 9.– С. 69–82.

25. *Мещерская А.В., Голод М.П., Мирвис В.М., Белянкина И.Г.* Усовершенствованный метод долгосрочного прогноза уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Труды ГГО. – 1999. – Вып. 547. – С. 66–78.

26. *Мещерская А.В., Александрова Н.А., Голод М.П.* Мониторинг температурно-влажностного режима в бассейне Волги и Урала и оценка влияния метеорологических условий на изменения уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – Том 21, № 4. – С. 463–471.

27. *Мещерская А.В., Александрова Н.А.* Прогноз уровня Каспийского моря по метеорологическим данным // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 3. – С. 72–82.

28. Многолетние ряды месячных сумм средних областных осадков за холодный период для основной сельскохозяйственной зоны СССР / под ред. А.В. Мещерской, Н.А. Болдыревой. – Л: Гидрометеоиздат, 1988. – 285 с.

29. *Никонова Р.Е., Бортник В.Н.* Характеристика межгодовой и сезонной изменчивости составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря за период его современного повышения // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 4. – С. 410–414.

30. РД 52.27.723-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов: изд-е 4-е. – М.: Триала лтд, 2011. – 196 с.

31. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165–177.

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

33. *Смирнова К.И, Шереметевская О.И.* Расчет водного баланса Каспийского моря для прогноза годового хода уровня моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1967. – Вып. 3. – С. 49–74.

34. *Смирнова К.И., Шереметевская О.И.* Влияние зарегулирования режима стока рек Волги, Куры и Урала на годовой ход уровня Каспийского моря // Океанология. – 1966. – Т. 6, вып. 5 – С. 788–793.

35. *Смирнова К.И.* Уточнение метода прогноза уровня Каспийского моря // Труды ЦИП. – 1966. – Вып. 156. – С. 103–106.

36. *Шереметевская О.И.* Усовершенствование метода прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1985. – № 4. – С. 67–71.

37. *Шереметевская О.И., Лунякова Л.Г.* Опыт обеспечения народного хозяйства долгосрочными прогнозами уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1985. – Вып. 270. – С. 36–42.

38. *Шикломанов И.А.* Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. – Л.: Гидрометеоиздат,1988. – 152 с.

39. *Arpe K., Leroy S.A.G., Wetterhall F., Khan V. et al.* Prediction of the Caspian Sea level using ECMWF seasonal forecasts and reanalysis // Theor. Appl. Climatol. – 2014. – Vol. 117. – P. 41–60.

К главе 8

1. *Абузяров З.К.* Физико-статистический метод фонового прогноза уровня Каспийского моря на срок 6 лет // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. – 2013. – С. 23–40.

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

3. *Абузяров З.К., Нестеров Е.С., Красюк В.С., Лежнева Н.Г.* Развитие методов и технологий прогноза уровня Каспийского моря в Гидрометцентре России // Материалы международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса Каспийского региона», Астрахань, Российская Федерация, 19–20 октября 2010 г. – С. 185–192.

4. *Абузяров З.К.* Технология прогноза тенденций изменения УКМ на перспективу 6 и 18 лет // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 351–363.

5. *Алексеев Г.В., Захаров В.Ф., Иванов Н.Е.* Изменения современного климата Арктики // Труды ААНИИ. – 2007. – Вып. 447. – С. 7–16.

6. *Антонов В.С.* Проблема уровня Каспийского моря и сток северных рек // Труды ААНИИ. – 1963. – Т. 253. – С. 232–248.

7. *Аполлов Б.А. Алексеева К.И.* Прогноз уровня Каспийского моря // Труды океанографической комиссии АН СССР. Проблемы Каспийского моря. – 1959. – Т. 5. – 61 с.

8. *Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С. и др.* Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Доклады РАН. – 1999. – Т. 366, № 2. – С. 248–252.

9. *Арпе К., Спорышев П.В. и др.* Исследования причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей циркуляции атмосферы // Изменения климата и их последствия. – СПб: Наука, 2002. – С. 165–179.

10. *Афанасьев А.Н.* Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. – М.: Наука, 1967. – 230 с.

11. *Бардин М.Ю., Полонский А.Б.* Североатлантическое колебание в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. ФАО. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 147–157.

12. *Белинский Н.А.* Морские гидрометеорологические информации и прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 254 с.

13. *Белинский Н.А., Калинин Г.П.* О прогнозе колебаний уровня Каспийского моря // Труды ГУГМС. – 1946. – Сер. 4. – Вып. 37. – С. 18.

14. *Болгов М.В.* Вероятностный прогноз многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Труды Географического общества Дагестана. – 2013. – Т. 41. – С. 16–20.

15. *Болгов М.В., Филимонова М.К.* Об источниках неопределенности при прогнозировании уровня Каспийского моря и оценке риска затопления прибрежных территорий // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 6. – С. 664–669.

16. *Будыко М.И., Ефимова И.А., Лобанов В.В.* Будущий уровень Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 5. – С. 86–94.

17. *Варущенко А.Н.* Изменение уровня Каспийского моря с V в. до 1830 г.: технико-экономический доклад «Анализ изменений уровня Каспийского моря» (ТЭД). – М., 1992. – С. 49–71.

18. *Вительс Л.А.* Характеристики барико-циркуляционного режима Европейского естественно-синоптического района 1900–1964 гг. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 120 с.

19. *Воробьев В.Н., Малинин В.Н.* Перспективы долгосрочного прогнозирования уровня Каспийского моря // Международный симпозиум «Природные и социально-экономические последствия разработки и управления водными ресурсами, тезисы докладов. – М., 1995. – С. 145.

20. *Воробьева Е.В.* Сопряженность атмосферных процессов в Северном полушарии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 116 с.

21. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. –107 с.

22. *Вязилова Н.А.* Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 7. – С. 5–14.

23. *Георгиевский В.Ю., Ежов А.В. и др.* Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 89–99.

24. *Георгиевский В.Ю.* Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений // Труды ЛГМИ. – 1982. – Вып. 79. – С. 76–85.

25. *Георгиевский В.Ю.* Расчеты и прогнозы изменения уровня Каспийского моря под влиянием естественных климатических факторов и хозяйственной деятельности // Труды ГГИ. – 1978. – Вып. 255. – С. 94–112.

26. *Гетман И.Ф.* Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря с использованием гелиогеофизических факторов // Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). – М.: Научный мир, 2000. – С. 237–254.

27. *Гетман И.Ф.* Об ожидаемом уровне Каспийского моря в первой половине XXI века на основе анализа вековых циклов солнечной активности // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 12. – С. 25–31.

28. *Глаголева М.Г.* Методическая записка по разложению в ряды по естественным составляющим полей аномалий атмосферного давления над Северным полушарием. – М.: Гидрометцентр СССР, 1978. – 22 с.

29. *Глаголева М.Г.* Таблицы коэффициентов разложения в ряды по естественным составляющим полей аномалий среднего месячного давления над Северным полушарием. – М.: 1977. – 164 с.

30. *Голицын Г.С., Раткович Д.Я. и др.* О современно подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25, № 2. – С. 133–139.

31. *Голицын Г.С.* Подъем уровня Каспийского моря как задача диагноза и прогноза изменений регионального климата // Известия РАН. ФАО. – 1995. – Т. 31, № 3. – С. 385–391.

32. *Голицын Г.С., Мелешко В.П., Мещерская А.Н. и др.* Моделирование водного и теплового баланса на Каспийском море и примыкающем водосборе с помощью моделей общей циркуляции атмосферы // Международная конференция «Каспийский регион: экономика, экология, минеральные ресурсы»: сб. рефератов, Москва, июнь 20–23, 1995. – С. 11.

33. *Голицын Г.С., Панин Г.Н.* О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 1. – С. 57–64.

34. *Голицын Г.С., Панин Г.Н.* Еще раз об изменении уровня Каспийского моря // Вестник АН СССР. – 1989. – №9. – С. 59–63.

35. *Голицын Г.С., Дзюба А.В., Осипов А.Г., Панин Г.Н.* Региональные изменения климата их проявления в современном подъеме уровня Каспийского моря // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 313, № 5. – С. 1224–1227.

36. *Голубцов В.И., Ли В.И.* О расчете уровней Каспийского моря на перспективу с учетом возможного изменения климата // Гидрометеорология и экология (Алмата). – 1995. – Т. 1. – С. 28–38.

37. *Голубцов В.И., Ли В.И., Шиварева С.П.* Определение фонового уровня Каспийского моря на перспективу и его превышений во время ветровых нагонов // Международный симпозиум «Природные и социально-экономические последствия разработки и управления водными ресурсами»: тезисы докладов, Москва, Май 15-20, 1995. – С. 148–149.

38. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я. и др.* О связи климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо-Южное колебание // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 5. – С. 32–51.

39. *Дроздов О.А.* Колебания естественного увлажнения в связи с анализом антропогенных изменений климата и увлажнения // Водные ресурсы. – 1990. – № 2. – С. 5–15.

40. *Дуванин А.И.* О циклических автоколебаниях в природе // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1998. – № 1. – С. 14–18.

41. *Дуванин А.И.* К пониманию природы и возможностей прогноза колебаний уровня Каспийского моря // Вестник МГУ. – 1997. – № 2. – С. 13–15.

42. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. – СПб: Гидрометеоиздат, 1996. – 214 с.

43. *Зубаков В.А.* Колебания уровня Каспийского моря в геологическом прошлом и его прогноз // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 8. – С. 82–88.

44. Изменение уровня Каспийского моря: раздел доклада Росгидромета Правительству Российской Федерации «Стратегический прогноз на период до 2010–2015 гг. о влиянии ожидаемых изменений климата на отрасли экономики России и их проявление в отдельных регионах страны». – М.: 2005. – С. 31–32.

45. *Казанский А.Б.* Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря // Доклады РАН. – 1994. – Т .338, № 4. – С. 531–537.

46. *Кац А.Л.* Об изучении и оценке общей циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. – 1954. – № 6. – С. 13–18.

47. *Клиге Р.К.* Прогнозные оценки изменения уровня Каспия // Мелиорация и водное хозяйство. – 1994. – № 1. – С. 10–11.

48. *Кондратович К.В.* Антропогенные, геофизические и космические факторы изменения циркуляционных эпох и уровня Каспия // Водные ресурсы. – 1994. –Т. 21, № 6. – С. 623–630.

49. *Косарев А.Н., Макарова Р.Е.* Об изменениях уровня Каспийского моря и возможности их прогнозирования // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1988. – № 1. – С. 21–26.

50. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А.* Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979–2011 гг. // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 570. – С. 50–87.

51. *Кренке А.Н., Попова В.В.* Колебания уровня Каспийского моря и глобальная циркуляция атмосферы // Материалы метеорологических исследований. – 1982. – № 2. – С. 116–122.

52. *Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* Некоторые положения статистической теории колебаний уровня естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря // Труды I совещания по регулированию стока. – М.; Л.: Изд. АН СССР, 1946. – С. 76–97.

53. *Крыжов В.Н.* Связь среднемесячной, сезонной и годовой температуры воздуха с арктическим колебанием // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 2. – С. 5–14.

54. *Куриленко О.Д., Широкий Д.К.* Долгосрочный прогноз уровенного режима Каспийского моря // Автоматика. – 1981. – № 1. – С. 91–92.

55. *Леонтьев О.К.* К вопросу о долгосрочном прогнозе уровня Каспия // Палеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое. Ч. 1. – М., 1983. – С. 76–77.

56. *Лобанов В.В.* Влияние изменений испарения с поверхности Каспийского моря на его будущий уровень // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 3. – С. 72–79.

57. *Малинин В.Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб: РГГМИ, 1994. – 158 с.

58. *Мелешко В.П., Голицын Г.С. и др.* Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы // Известия РАН. ФАО. – 1998. – Т. 34, № 4. – С. 591–599.

59. *Мещерская А.В., Голод М.П.* О статистических сверхдолгосрочных прогнозах уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных климатических параметров // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 278–294.

60. *Мещерская А.В., Голод М.П., Белянкина И.Г.* Колебания уровня Каспийского моря в связи с особенностями общей циркуляции атмосферы в XX веке // Изменения климата и их последствия. – СПб: Наука, 2002. – С. 180–194.

61. *Мещерская А.В., Моргасова В.Г. и др.* Индексы антициклоничности Л.А. Вительса и их связи с температурно-влажностным режимом на водосборе Волги // Известия РАН. Серия географ. – 2001. – № 6. – С. 15–21.

62. *Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я.* Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука, 1982. – 184 с.

63. *Найденов В.И., Кожевникова И.А.* Предсказуем ли уровень моря? // Природа. – 1994. – № 5. – С. 4–12.

64. *Нестеров Е.С.* О связи индексов колебания циркуляции атмосферы и уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 323–326.

65. *Нечволодов Л.В., Лобов А.Л. и др.* О связи аномалий меридионального переноса тепла в Северной Атлантике с явлением Эль-Ниньо-Южное колебание // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 6. – С. 53–65.

66. *Осика Д.Г., Магомедова Э.Ф. и др.* Уровенный режим Каспия и его прогноз // Труды ИГ ДНЦ РАН. Геология, минерально-сырьевые и топливно-энергетические ресурсы. – Дагестан; Махачкала, 1997. – С. 135–138.

67. *Осика Д.Г.* О сути уровенного режима Каспийского моря и его прогноз на обозримое будущее // Международный симпозиум «Природные и социально-экономические последствия разработки и управления водными ресурсами»: тезисы докладов, Москва, май 15–20, 1995. – С. 17–18.

68. Отчет о НИР по теме 1.5.1.2 «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. Раздел: «Исследование водного баланса и методы долгосрочных прогнозов колебаний уровня Каспийского моря». – 2004. – С. 69–105.

69. Отчет о НИР по теме 1.7.2.3 «Испытать и подготовить к внедрению методы и технологии анализа и прогноза морских гидрометеорологических

характеристик, разработанных в 1998–2000 гг.». Раздел ГГИ «Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря до 2020 г.». – СПб, 2001.

70. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том. 1. Изменения климата. – Росгидромет, 2008. – 227 с.

71. *Панин Г.Н., Дианский Н.А.* О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Известия РАН. ФАО. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 304–316.

72. *Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В.* Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 183–210.

73. *Раткович Д.Я.* О развитии вероятностной методики прогнозирования уровня бессточных водоемов и прогнозах уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1988. – № 2. – С. 30–40.

74. *Раткович Д.Я.* О предсказуемости режима уровня бессточных водоемов применительно к проблеме Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1986. – № 5. – С. 3–10.

75. РД 52.27.723-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов: изд-е 4-е. – М.: Триада лтд, 2011. – 196 с.

76. *Ремизова С.С., Мягков М.С.* О проблеме долгосрочного прогнозирования уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1995. – Т. 22, № 3. – С. 336–342.

77. *Родионов С.Н.* Современные изменения климата Каспийского моря. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – 124 с.

78. *Рычагов Г.И.* Прогноз уровня Каспийского моря на основе палеогеографических реконструкций // Вестник МГУ. Сер.5. География. – 1994. – № 3. – С. 71–76.

79. *Рычагов Г.И., Варущенко А.Н. и др.* Палеогеографические аспекты прогноза колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1994. – Т. 21, № 5. – С. 500–505.

80. *Рутковская В.А.* К вопросу о сверхдолгосрочном прогнозировании уровня Каспийского моря с учетом солнечного фактора // Труды ИО АН СССР. – 1960. – Т. 37. – С. 65–72.

81. *Серебренников М.Г., Первозванский А.А.* Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука, 1965. – 244 с.

82. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М.: АН СССР, 1957. – 68 с.

83. *Свиточ А.А.* Уровенный режим Каспийского моря по палеогеографическим данным // Водные ресурсы. – 1997. –Т. 24, № 1.– С. 13–22.

84. *Свиточ А.А.* Колебания уровня Каспийского моря в плейстоцене (классификация и систематическое описание) // Каспийское море. Палеогеография и геоморфология. – М.: Наука, 1991. – С. 5–100.

85. *Сидоренков Н.С.* Характеристики явления Южное колебание – Эль-Ниньо // Труды Гидрометцентра России. – 1997. – Вып. 316. – С. 31–41.

86. *Сидоренков Н.С., Швейкина В.И.* Изменение климатического режима бассейна Волги и Каспийского моря за последнее столетие // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 4. – С. 401–412.

87. *Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб: Из-во РГГМУ, 1998. – 122 с.

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

89. Современный и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР // Труды ГОИН. – 1972. – Вып. 108. – 236 с.

90. *Соловьева Н.Н.* Исследование зависимости колебаний уровня Каспийского моря от солнечной активности. – СПб: Из-во РГГМУ, 2004. – 70 с.

91. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. – М.: ГЕОС, 2003. –174 с.

92. *Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Ежов А.В.* Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – 2003. – С. 327–341.

93. *Шихлинский Э.М.* О возможности прогноза изменений климата и уровня Каспийского моря различной заблаговременности // Известия АН Аз. ССР. Сер. Науки о Земле – 1976. – № 3. – С. 13–25.

94. *Шлямин Б.А.* Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Известия ВГО. – 1962. – Т. 94, вып. 1. – С. 26–33.

95. *Шнитников А.В.* Закономерности колебания уровня Каспия в связи с изменчивостью общей увлажненности материков Северного полушария // Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря. – М., 1957. – С. 23–47.

96. *Эйгенсон М.С.* Будущее Каспийского моря // Проблемы Каспийского моря: Всесоюзное совещание по проблеме Каспийского моря. – Баку, 1963. – С. 24–28.

97. *Элгинди Н., Джорджи Ф.* Предполагаемые изменения уровня Каспийского моря в XXI веке на основе современных моделей ОЦАО // Вестник Каспия. – 2006. – № 3. – С. 66–72.

98. *Arpe K., Leroy S.A.G.* The Caspian Sea level forced by the atmospheric circulation as observed and modeled // Quat. Int. – 2007. – Vol. 173–174. – P. 144–152.

99. *Arpe K., Leroy S.A.G. et al.* Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea Level // Hydrol. Earth Syst. Sci. – Vol. 16. P. 19–27. – www.hydrol-ears-syst-sci.net/16/19/2012/. – doi: 10.5194/hess-16-19-2012.

100. *Apre K., Bengtsson L., Golitsyn G.S. et al.* Connections between Caspian Sea level variability and ENSO // Geoph. Res. Let. – 2000. – Vol. 27, No. 17. – P. 2693–2696.

101. *Arpe K., Roechner E.* Simulations of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases // Adv. Water Res. – 1999. – Vol. 23. – P. 105–119.

102. *Apre K., Bengtsson L., Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Semenov V.A., Sporyshev P.V.* Analysis and Modeling of the Hydrological Regime Variations in

the Caspian Sea Basin // Doklady Earth Sciences. – 1999. – Vol. 366, № 4. – P. 552–556.

103. *Elgiundi N., Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geophy. Res. Letters. – April 2006. – Vol. 33. – P. L007006.

104. Fraedrich K. An ENSO impact on Europe? // Tellus. – 1994. – Vol. 46A. – P. 541–552.

105. *Hoerling M.P., Ting M.T.* Organization of extratropical transients during El- Niño // J. Climate. – 1994. – Vol. 7. – P. 745–766.

К главе 9

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 287 с.

2. *Белинский Н.А.* Морские гидрометеорологические информации и прогнозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 254 с.

3. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. – 324 с.

4. *Бухарицын П.И.* Влияние штормовых нагонов на работу прибрежных нефтепромыслов Северного Каспия // Материалы к Всесоюзной научно-практической конференции «Экология и воздействие природного газа на организм», Астрахань 19–23.09.1989 г. – С. 3.

5. *Вербицкая О.А.* Гидродинамический метод прогноза синоптических колебаний уровня и течений Каспийского моря: диссертация ... кандидата физ.-мат. наук: 25.00.28. – М., 2004. – 175 с.

6. *Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л.* О результатах оперативных испытаний технологии краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Каспийском море // Информационный сборник № 31. – 2004. – С. 70–84.

7. *Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л.* Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний // Информационный сборник № 29. – 2002. – С. 76–89.

8. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 207 с.

9. *Герштанский Н.Д.* Некоторые особенности рельефа водной поверхности при нагонах и сгонах в отмелых районах моря (на примере Северного Каспия // Труды ГОИН. – 1971. – Вып. 104. – С. 82–95.

10. *Герштанский Н.Д.* О затоплении западного берега Северного Каспия // Сб. работ Астраханской ЗГМО. Вып. 2. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – С. 30–40.

11. *Герштанский Н.Д.* Особенности сгонно-нагонных колебаний уровня воды в устьевом взморье Волги // Труды ГОИН. – 1973. – Вып. 116. – С. 131–145.

12. *Гетман И.Ф.* Опыт использования гидродинамической модели для расчетов сгонов и нагонов в Северном Каспии // Труды Гидрометцентра СССР. – 1981. – Вып. 241. – С. 40–48.

13. *Зильберштейн О.И., Вербицкая О.А, Попов С.К., Лобов А.А.* Метод прогноза штормовых нагонов для Северного Каспия на основе данных региональной модели атмосферы // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб: Гидрометеоиздат, 2003. – С. 342–350.

14. *Зильберштейн О.И., Чумаков М.М., Попов С.К., Сафронов Г.Ф.* Метод расчета экстремальных характеристик уровня моря в Северном Каспии // Водные ресурсы. – 2001. – Том. 28, № 6. – С. 692–700.

15. *Ивкина Н.И.* Прогнозирование опасных сгонно-нагонных явлений для районов нефтедобычи на Каспийском море. – Казгидромет, 2007. – 5 с.

16. *Ивкина Н.И.* Влияние сгонно-нагонных явлений на процессы загрязнения окружающей среды Прикаспийского региона // Гидрометеорология и экология. – 2000. – № 2. – С. 156–162.

17. *Ивкина Н.И.* Опыт применения гидродинамической модели MIKE 21 для прогнозирования сгонно-нагонных явлений на Каспийском море // Гидрометеорология и экология. – 1998. – № 12. – С. 105–112.

18. *Йенсен Х.Р., Ивкина Н.И., Строева Т.П.* Некоторые результаты тестирования системы предупреждения штормовых нагонов на Каспийском море // Гидрометеорология и экология. – 2002. – № 1. – С. 71–78.

19. *Кан С.И.* Метод краткосрочного прогноза уровня северной части Каспийского моря // Труды ЦИП. – 1948.– Вып. 3(30).– С. 3–50.

20. *Каракаш А.И.* Метод предсказаний краткосрочных изменений уровня во внутренних морях // Метеорология и гидрология. – 1939. – № 3. – С. 78–82.

21. *Кошинский С.Д., Рыжкова Л.М.* Условия наводнения в северо-западном Каспии 10–13 ноября 1952 г. // Тр. ЗапСибНИИ. – 1980. – Вып. 9. – С. 63–75.

22. *Лосев В.М.* Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CRAY // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 334. – С. 69–90.

23. *Овсиенко С.Н.* Расчет штормовых нагонов в Азовском море // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 4 – С. 76–81.

24. *Попов С.К.* Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 5. – С. 76–84.

25. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия // Под ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – 359 с.

26. РД 52.27.723-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов: изд-е 4-е. –М.: Триада лтд, 2011. – 196 с.

27. РД 52.88.699-2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – Москва.- 2008. – 33 с.

28. Руководство по морским гидрологическим прогнозам // Под ред. З.К. Абузярова. – СПб: Гидрометеоиздат, 1994. – 525 с.

29. *Саркисян А.С., Демин Ю.Л. и др.* Методы и результаты расчета циркуляции вод Мирового океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 151 с.

30. *Скриптунов Н.А., Горелиц О.В.* Ветровые нагоны и сгоны у западного побережья Северного Каспия // Труды ГОИН. – 2000. – Вып. 207. – С. 204–223.

31. *Скриптунов Н.А*. К расчету максимальных сгонно-нагонных колебаний уровня Каспийского моря // Труды ГОИН. – 1967. – Вып. 80. – С. 46–61.

32. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря // Под ред. В.Ф. Полонского, В.Н. Михайлова, С.В. Кирьянова. – М.: ГЕОС, 1998. – 165 с.

33. *Фомина Н.Д.* Характеристика сгонно-нагонных уровней у западного побережья Каспийского моря // Сб. работ Бакинской ГМО. – 1967. – Вып. 3. – С. 30–34.

34. *Фомина Н.Д.* О связи ветра и уровня в районе Среднего и Южного Каспия // Сб. работ Бакинской ГМО. – 1968. – Вып. 4. – С. 61–67.

35. *Шереметевская О.И.* Прогнозы непериодических изменений уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1964. – № 9. – С. 33–37.

36. *Шиварева С.П., Ивкина Н.И., Строева Т.П., Васенина Е.И.* Расчет ветровых нагонов на казахстанском побережье Каспийского моря на основе модели MIKE-21 // Сборник докладов международного научного семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона, Россия, Москва, 1–3 декабря 1999. – С. 14–16.

37. *Штокман В.Б.* Ветровые нагоны и горизонтальная циркуляция в замкнутом море небольшой глубины // Избранные труды по физике моря. – Л.: Гидрометеоиздат,1970. – С. 173–198.

38. *Backhaus J.O, Hainbucher D.* A finite difference general circulation model for shelf seas and its application to low frequency variability on the north Europian shelf / Three-dimensional models of Marine and Estuarine dynamics // Ed. J.C.J. Nihoul, B.M. Jamart, Els. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987. – P. 241–244.

39. *Dobroliubov S., Arkhipkin V. et al.* High-resolution retrospective analysis of storm surges in the North Caspian Sea based on numerical simulation // Geoph. Res. Abs. –2013. – Vol. 15.– EGU2013-7572.

40. *Fang G, Ichiye T.* On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea // Geoph. J. Roy. Astr. Soc. – 1983. – P. 65–82.

41. *Flather R.A., Heaps N.S.* Tidal computation for Morecambe Bay // Geoph. J. Roy. Astr. Soc. – 1975. – Vol. 42. – P. 489–517.

42. *Hansen W.* The reproduction of the motion in the sea by means of hydrodynamical-numerical methods // Mitt. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg. – 1966. – No. 5. – 57 p.

43. *Heaps N.S.* On the numerical solutions for tides and storm surges // Mem. Soc. Roy. Sci. – Liege. – 1972. – Vol. 2, No. 2. – P. 143–180.

44. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W. et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – March 1996. – P. 437–471.

45. *Kochergin V.P.* Three-dimentional prognostic models / Three-dimentional coastal ocean models // Ed. N.S. Heaps: Coastal and Estuarine Science. – 1987. – Vol. 4. – P. 201–208.

46. *Murty T.S.* Storm surges – meteorological ocean tides // Can. Bull. Psh. Sci. – 1984. – 897 p.

47. *Oey L.Y., Mellor G.L., Hires R.I.* A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part 1. Description of the model and model simulations // J. Phys. Oceanogr. – 1985. – Vol. 15, No. 11. – P. 1676–1692.

48. *Ryabinin V.E., Zilberstein O.I.* Numerical prediction of storm surges – a review // Storm Surges. Report. – 1996. –No. 799. – P. 1–62.

Приложение 1. **Гидрометеорологический бюллетень Гидрометцентра России. Уровень Каспийского моря и прогнозы его изменений**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ISSN 0013 – 3612

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ № 36

УРОВЕНЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ПРОГНОЗЫ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

Составлен 28 апреля 2014 г.

1. Характеристика годового хода уровня в 2013 г.

В 2013 г. средний годовой уровень Каспийского моря по сравнению со средним годовым уровнем 2012 г. понизился на 5 см и достиг отметки -27,62 м абс (38 см).

Максимальная отметка уровня -27,44 м абс (56 см) наблюдалась в июле, минимальная -27,74 м абс (26 см) – в декабре.

По сравнению с минимальным средним годовым уровнем, наблюдавшимся в 1977 г. (-29,03 м абс), в 2013 г. его превышение составило 141 см.

В табл. 1 приведены средние месячные уровни (см) по 7 пунктам и по месяцам за 2013 г., а также средние годовые уровни по этим пунктам и по всему морю за 2013, 2012 и 1977 гг.

2. Прогноз хода среднего месячного уровня моря по месяцам на II–IV кварталы 2014 г. и на январь-апрель 2015 г.

Ожидаемый ход средних месячных значений уровня моря с мая по декабрь 2014 г. и с января по апрель 2015 г. представлен в табл. 2. Согласно планируемому объему сбросов воды в нижний бьеф Волгоградской ГЭС во II квартале 2014 г. расчет изменений уровня выполнен по его наиболее вероятному значению (87,9 км^3) с учетом водности других рек, впадающих в Каспийское море.

По сравнению со средним годовым уровнем 2013 г. в 2014 г. ожидается его понижение на 5–10 см.

Графики хода фактических и ожидаемых уровней моря в 2013–2015 г.г. показаны на стр. 3.

3. Фоновый прогноз изменений уровня на 6 лет

Согласно прогностической оценке до 2016 г. ожидается понижение среднего уровня моря по отношению к среднему уровню 2010 г. на 11 см. Наиболее вероятное значение среднего уровня в 2016 г. составит -27,28 м абс или 72 см относительно единого нуля Каспийского моря, равного -28,00 м абс.

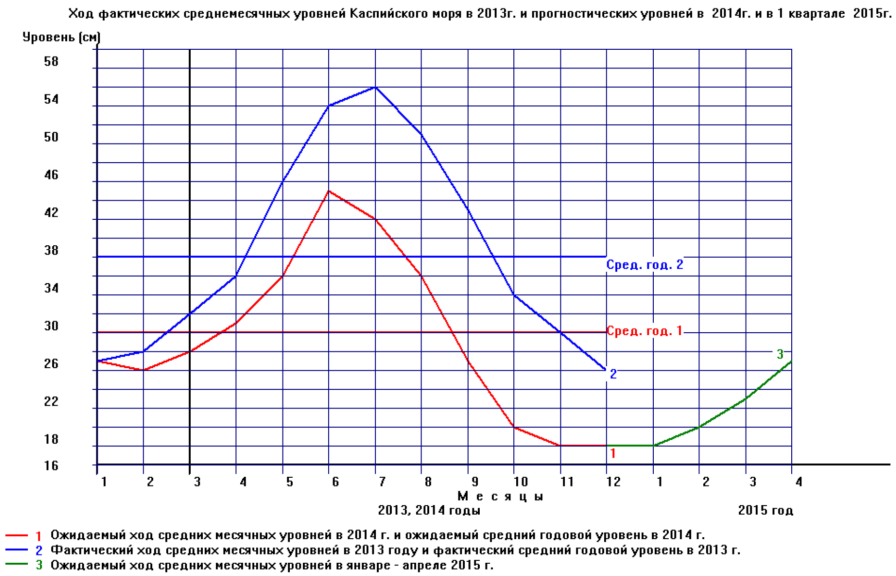
Таблица 1

Пункт	2013 г.												Средний годовой уровень		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	2013	2012	1977
Баку	41	43	49	51	61	70	70	67	63	54	54	49	56	60	-92
Нефтяные Камни	46	49	49	55	62	76	79	77	63	56	45	47	59	62	-106
Махачкала	18	22	27	27	45	44	46	42	34	25	25	12	30	42	-102
Форт-Шевченко	32	35	39	45	51	61	59	55	48	40	39	36	45	50	-97
Куули-Маяк	14	13	16	22	28	37	43	35	29	20	14	12	24	22	-114
Туркменбаши	18	18	22	29	39	46	51	46	36	22	17	17	30	26	-94
Кара-Богаз-Гол	18	14	21	26	34	42	43	35	29	20	14	12	26	28	-113
Средний уровень	27	28	32	36	46	54	56	51	43	34	30	26	38	43	-103

Таблица 2

Пункт	2014 г.													2015			
	Фактический уровень			Ожидаемый уровень									Сред. год.	Ожидаемый уровень			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		I	II	III	IV
Баку	49	47	47	51	56	65	60	52	42	35	32	32	47	32	35	38	43
НефтяныеКамни	44	44	43	47	52	62	58	52	42	34	32	32	45	32	34	36	39
Махачкала	26	31	28	30	35	45	42	37	32	27	26	26	32	26	29	34	38
Форт-Шевченко	33	34	37	36	41	49	45	38	32	27	25	25	35	25	27	30	34
Гувлы-Маяк	8	7	8	14	18	27	24	20	11	3	1	0	12	0	2	5	10
Туркменбаши	16	10	17	22	26	34	30	23	12	4	2	2	17	2	4	7	11
Кара-Богаз-Гол	13	9	13	18	22	31	30	24	15	8	6	6	16	6	8	12	17
Средний уровень	27	26	28	31	36	45	42	36	27	20	18	18	30	18	20	23	27

Примечания: В таблицах 1 и 2 значения уровня даны в см над *единым нулем* Каспийского моря, равным -28,00 м абс.



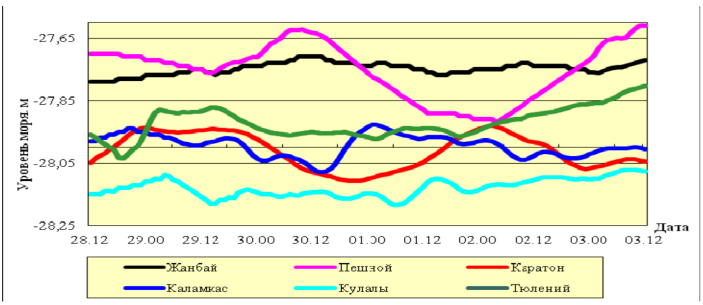
Директор ФГБУ «Гидрометцентр России» Р.М.Вильфанд

Москва, Б. Предтеченский пер., 9–13. ФГБУ «Гидрометцентр России»
Ред. Н.Г. Лежнева. Т. 30. Зак. 28.VI.2014.

Приложение 2. **Гидрометеорологический бюллетень РГП «КАЗГИДРОМЕТ». Еженедельный бюллетень по Каспийскому морю**

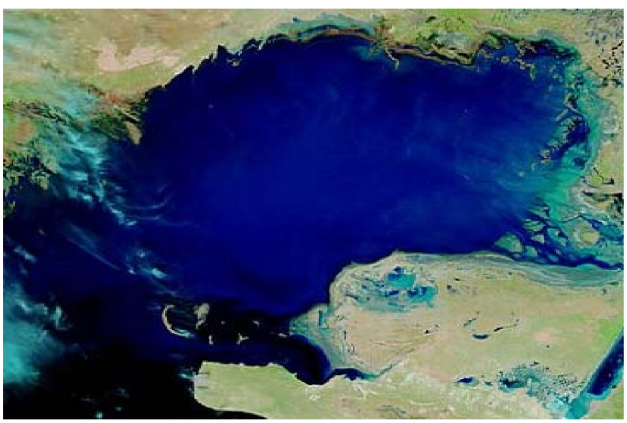
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
РГП «КАЗГИДРОМЕТ»

ДЕПАРТАМЕНТ ГИДРОЛОГИИ



Бюллетень по Каспийскому морю № 17

29 апреля 2016 г., пятница



Космический снимок Каспийского моря, 25 апреля 2016 г.
«MODIS Rapid Response Project at NAGA/GSFC»

ОБЗОР

состояния уровня моря за 21–27 апреля 2016 г.

Среднее значение уровня Каспийского моря в его северной части по данным морских станций и постов Казгидромета: М Пешной, МГП Жанбай, МГ Кулалы остров и МГ Тюлений остров (Росгидромет) соответствовало отметке минус 27,84 м, при сгонно-нагонных явлениях наблюдался подъем уровня до отметки минус 27,52 м и спад до отметки минус 28,17 м.

В Среднем Каспии по данным МГ Форт-Шевченко, МГ Актау, МГП Фетисово и Росгидромета (МГ Махачкала) среднее значение уровня моря соответствовало отметке минус 27,90 м, при сгонно-нагонных явлениях наблюдался подъем уровня до отметки минус 27,70 м, и спад до отметки минус 28,09 м.

Бюллетень составлен в управлении гидрометеорологических исследований Каспийского моря
Адрес: 050022, Алматы, пр. Абая 32, Тел. 2 55 84 06;
e-mail: caspian_almaty@mail.ru, kaspy@meteo.kz

ПРОГНОЗ*

уровня моря на 28 апреля- 3 мая 2016 г.

В Северном Каспии (рис.2) ожидается колебание уровня моря около отметки минус 27,93 м. При сгонно-нагонных явлениях возможен подъём уровня моря до отметки минус 27,61 м и его понижение до отметки минус 28,18м.

В Среднем Каспии (рис.3) ожидается колебание уровня моря около отметки минус 27,81 м с максимальным подъемом до отметки минус 27,77 м и минимальным спадом до отметки минус 28,04 м.

Критерии опасности сгонно-нагонных явлений на северо-восточном побережье

	Уровень моря,		Характеристика***	Последствия
	м**	см, над уровнем моря минус 28,00 м		
нагон	-27,45	55	критический	затопление побережья до 5 км
	-27,35	65	опасный	затопление и подтопление дамб и построек до 10 км
	-26,85	115	особо опасный	затопление побережья более 10 км, разрушение дамб и построек
сгон	-28,55	-55	критический	ухудшение условий плавания малых судов
	-28,65	-65	опасный	ухудшение условий плавания малых и средних судов
	-29,00	-100	особо опасный	суда могут оказаться на мели

**Расчетные характеристики получены при использовании гидродинамического модуля MIKE 21 Датского гидравлического института, адаптированного в РГП «Казгидромет» к условиям Каспийского моря. При расчете использовались данные наблюдений за уровнем моря (рис. 1) и численный прогноз барического поля на 24-120 ч.*

***При определении характерных отметок учитывались естные условия.*

****Критический – 50 % обеспеченности, опасный – 25 % обеспеченности, особо опасный – 4 % обеспеченности высоты нагона и сгона. Расчет был проведен за период 1940-2015 гг. по данным М Пешной.*

Прогностические значения сгонно-нагонных колебаний уровня моря в различных пунктах казахстанского побережья на 28 апреля – 3 мая 2016 г.

Название пункта	Максимум		Минимум		Средний
	уровень, см (м.абс)	дата, время, СГВ*	уровень, см (м.абс)	дата, время, СГВ*	уровень, см (м.абс)
Северный Каспий					
Жанбай	29 (-27,71)	2016/04/30 09:00:00	21 (-27,79)	2016/04/28 12:00:00	**25 (-27,75)**
Пешной	39 (-27,61)	2016/05/03 11:00:00	8 (-27,92)	2016/05/02 04:00:00	**25 (-27,75)**
Каратон	7 (-27,93)	2016/05/02 02:00:00	-11 (-28,11)	2016/04/30 20:00:00	**-1 (-28,01)**
Каламкас	7 (-27,93)	2016/05/01 00:00:00	-8 (-28,08)	2016/04/30 13:00:00	**1 (-27,99)**
Кулалы	-7 (-28,07)	2016/05/03 08:00:00	-18 (-28,18)	2016/04/29 14:00:00	**-13 (-28,13)**
Тюлений	20 (-27,80)	2016/05/03 12:00:00	-3 (-28,03)	2016/04/28 18:00:00	**8 (-27,92)**
Средний Каспий					
Форт-Шевченко	15 (-27,85)	2016/05/02 08:00:00	4 (-27,96)	2016/04/29 12:00:00	**11 (-27,89)**
Актау	1 (-27,99)	2016/05/01 10:00:00	-4 (-28,04)	2016/04/28 12:00:00	**-1 (-28,01)**
Фетисово	23 (-27,77)	2016/05/01 12:00:00	15 (-27,85)	2016/04/29 00:00:00	**19 (-27,81)**
Махачкала	14 (-27,86)	2016/05/03 12:00:00	5 (-27,95)	2016/04/30 17:00:00	**9 (-27,91)**

СГВ* - среднее гринвичское время

Оглавление

Предисловие 3

Введение 4

Глава 1. Проблемы Каспия в связи с колебаниями его уровня 7
1.1. Социально-экономические последствия колебаний уровня Каспийского моря 7
1.2. Проблемы экологии и охраны природной среды Каспия 13
1.3. Пути решения проблем Каспия на современном этапе. Правовые аспекты Каспия 15
1.4. Комплексная программа по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в регионе Каспийского моря и ее задачи..... 18

Глава 2. Краткая история исследований Каспийского моря и его основные физико-географические и гидрометеорологические черты ... 23
2.1. История исследования Каспийского моря 23
2.2. Физико-географические и морфологические особенности 25
2.3. Климатические и гидрометеорологические особенности 32

Глава 3. Комплексный мониторинг гидрометеорологического состояния и уровня Каспийского моря 45
3.1. Цели и задачи мониторинга 45
3.2. К истории организации инструментальных наблюдений за уровнем Каспийского моря 47
3.3. Наблюдения над колебаниями уровня моря 51
3.3.1. Приведение уровнемерных постов к единой высотной основе 53
3.3.2. О введении поправок на вертикальные тектонические движения 55
3.4. Современное состояние уровнемерной сети на Каспии 58
3.5. Мониторинг среднего уровня моря по данным спутниковой альтиметрии 59
3.6. Мониторинг загрязненности морской среды Каспия 67
3.7. Концепция развития интегрированной системы гидрометеорологического мониторинга в бассейне Каспийского моря ... 70

Глава 4. Пространственно-временная изменчивость уровня Каспийского моря 74
4.1. Общие положения 74
4.2. Многовековая и вековая изменчивость 75

4.3. Многолетняя и межгодовая изменчивость …….. 83
4.4. Внутригодовая изменчивость …… 90
4.5. Структура многолетней изменчивости уровня Каспийского моря и стока Волги …….. 100
4.6. Особенности рельефа уровенной поверхности Каспийского моря … 113

Глава 5. Краткий обзор исследований причин колебаний уровня Каспийского моря ……..…… 115
5.1. Общие положения ……... 115
5.2. Климатическая водно-балансовая концепция колебаний уровня моря ……. 117
5.2.1. Исследование связей между колебаниями уровня моря и изменчивостью общей циркуляции атмосферы ……. 117
5.2.2. Влияние Северной Атлантики на климат и погоду водосборного бассейна Каспия ……... 121
5.2.3. Основные причины повышения уровня Каспийского моря в период с 1978 по 1995 год …… 127
5.2.4. Влияние колебаний циркуляции атмосферы на изменения уровня Каспийского моря …… 129
5.2.5. Исследование связей гидрометеорологических процессов и уровня моря с солнечной активностью …….. 131
5.3. Геолого-тектоническая концепция вековых колебаний уровня Каспия ……. 135
5.4. Роль антропогенных и техногенных факторов в формировании речного стока и уровня Каспийского моря …….. 138

Глава 6. Водный баланс Каспийского моря и расчет его составляющих …….. 144
6.1. Общие положения ……... 144
6.2. Уравнение водного баланса и диагноз его составляющих …….. 144
6.2.1. Поверхностный приток речных вод в море ……. 146
6.2.2. Атмосферные осадки …….. 157
6.2.3. Испарение с поверхности моря ……. 164
6.2.4. Сток в залив Кара-Богаз-Гол ……. 173
6.2.5. Подземный приток вод в море …….. 180
6.2.6. Плотностные изменения уровня моря …….. 181
6.2.7. Определение площади моря …….. 183
6.3. Расчет составляющих водного баланса и их оценка …… 184
6.4. Источники неопределенностей при расчете составляющих водного баланса и уровня моря ……... 189

Глава 7. Методы прогноза уровня Каспийского моря с годовой заблаговременностью …… 191
7.1. Метод прогноза годового хода УКМ на основе приближенного решения уравнения водного баланса (метод Гидрометцентра России) ... 191
7.1.1. Алгоритм усовершенствованного метода Калинина – Смирновой – Шереметевской ……. 197

7.1.2. Результаты прогнозов уровня моря по усовершенствованной методике Калинина – Смирновой – Шереметевской 203
7.1.3. Технология автоматизированного прогноза годового хода уровня Каспийского моря 205
7.2. Метод прогноза приращений УКМ с годовой заблаговременностью по метеорологическим данным на водосборе Волги и Урала (метод ГГО) 207
7.2.1. Характеристика исходной информации 208
7.2.2. Методика определения оптимального периода учета осадков, температуры воздуха и гидротермических коэффициентов для прогноза приращений уровня с годовой заблаговременностью 216
7.2.3. Расчет трендовой составляющей изменений уровня Каспийского моря 220
7.3. Прогноз составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря с годовой заблаговременностью (метод В.Н. Малинина) 225
7.4. Метод прогноза уровня моря с полугодовой заблаговременностью 227

Глава 8. Развитие методов сверхдолгосрочного прогноза уровня Каспийского моря 229
8.1. Общие положения 229
8.2. Методические подходы при сверхдолгосрочном прогнозировании уровня моря 232
8.3. Фоновые прогнозы уровня, основанные на учете общей циркуляции атмосферы (Гидрометцентр России) 236
8.3.1. Метод прогноза уровня на 5 лет (метод Белинского – Калинина – Смирновой) 236
8.3.2. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря на 6, 12 и 18 лет на основе усовершенствованного метода Белинского – Калинина – Смирновой 240
8.4. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных метеорологических параметров (метод ГГО) 259
8.5. Прогностические оценки долгопериодных колебаний УКМ с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана 273
8.6. Вероятностные прогнозы основных составляющих водного баланса и УКМ на основе климатических сценариев (методы ГГИ) 278
8.6.1. Вероятностный прогноз уровня на период до 2030 года 278
8.6.2. Вероятностный прогноз уровня на первую половину XXI века 282
8.7. Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря на основе ансамблевого подхода (КаспМНИЦ) 285
8.8. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря на 50 лет (метод М.В. Болгова) 289
8.9. Прогноз уровня Каспийского моря на основе решения дифференциального уравнения водного баланса (метод А.Б. Казанского) 292

8.10. Прогностические оценки колебаний УКМ на основе палеогеографических реконструкций 292
8.11. Сверхдолгосрочные прогнозы уровня Каспийского моря, основанные на учете солнечной активности 294

Глава 9. Кратковременные непериодические колебания уровня Каспийского моря и методы их прогнозирования 296
9.1. Условия возникновения и развития сгонно-нагонных явлений на Северном Каспии 296
9.2. Статистика сгонно-нагонных явлений на Северном Каспии 299
9.3. Эмпирические и физико-статистические методы краткосрочного прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня на Каспии 305
9.4. Гидродинамические методы расчета и прогноза уровня моря 309
9.4.1. Аналитические решения, одномерные и двумерные модели 309
9.4.2. Трехмерная гидродинамическая бароклинная модель течений и уровня Каспийского моря (модель Гидрометцентра России) 310
9.4.2.1. Результаты численных экспериментов 315
9.4.2.2. Технология оперативного автоматизированного краткосрочного прогноза штормовых нагонов и течений в Каспийском море на основе модели Гидрометцентра России 319
9.4.3. Технология оперативного прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня на северо-восточном побережье Каспийского моря с помощью модели MIKE-21 (КазНИИМОСК) 322

Заключение 326

Литература 329

Приложение 1. Гидрометеорологический бюллетень Гидрометцентра России. Уровень Каспийского моря и прогнозы его изменений 365

Приложение 2. Гидрометеорологический бюллетень РГП «КАЗГИДРОМЕТ». Еженедельный бюллетень по Каспийскому морю 368

Научно-методическое пособие

ВОДНЫЙ БАЛАНС И КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ

Подписано в печать 24.06.2016. Формат 70×100 1/16
Печать офсетная. Печ. л. 23,5. Тираж 300 экз. Заказ № 160701
Отпечатано в типографии «ТРИАДА ЛТД»
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33
тел./факс: (495) 617-11-98
www/triadaltd/ru