**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами**

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

**На тему «**Изменчивость компонент водного баланса для периодов длительного повышения и понижения уровня Каспийского моря**»**

**Исполнитель** Кудель Мария Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель** доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Малинин Валерий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»**
**Заведующий кафедрой** _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2026 г.

Санкт-Петербург

2026

**Оглавление**

Введение.....3

Глава 1. Обзор состояния исследований водного баланса Каспийского моря и статистические методы их анализа.....6

1.1 Физико-географическое положение Каспийского моря.....6

1.2 Гидрологический режим Каспийского моря.....10

1.3 Колебания уровня Каспийского моря.....12

1.4 Влияние компонент водного баланса на уровень Каспийского моря.....14

1.5 Исходные данные.....23

1.6 Методика.....27

Глава 2. Испарение с поверхности Каспийского моря и его временнаяизменчивость.....32

Глава 3. Изменчивость осадков для периодов повышения и понижения уровня Каспийского моря.....41

Глава 4. Изменчивость компонент водного баланса Каспийского моря.....52

Заключение.....59

Список литературы.....64

# ВВЕДЕНИЕ

Географическое расположение Каспийского моря в зоне жаркого климата предполагает туризм и строительство курортов. Однако строительная деятельность на побережье Каспия требует детальной подготовки и исследований. Дело в том, что колебания уровня Каспийского моря (УКМ) могут приводить к затоплениям или осушениям больших площадей побережья. Особенно значительно это сказывается в северной части моря, которая по сути является шельфом с очень маленькими глубинами. Таким образом, для строительства, рекреации и хозяйства прибрежного населения учет колебаний уровня Каспийского моря несет важное экономическое значение.

Существенным отличием Каспийского моря от других водоемов нашей планеты является его изолированность от Мирового океана. По сути Каспий – это огромная акватория, в которой наблюдаются значительные многовековые, вековые и многолетние колебания уровня, которые не зависят от колебаний уровня океана.

По причине изолированности Каспия, на колебания его уровня наибольшее влияние оказывают компоненты водного баланса моря: испарение, речной сток и осадки. Считается, что именно соотношение и изменчивость компонент баланса приводит к изменениям уровня моря.

В 20 веке проблема уровня Каспийского моря приобрела особую актуальность вследствие строительства гидроэлектростанций и водохранилищ в Волго-Камском бассейне. Реализация проектов таких гидротехнических сооружений привела к существенному снижению речного стока, так как сток Волги составляет значительную часть стока всех рек Каспийского бассейна. На фоне общего понижения уровня моря уменьшение приходной части водного баланса усилило понижение УКМ.

Снижение уровня Каспийского моря в 20 веке прекратилось только после строительства дамбы в проливе Кара-Богаз-Гол, однако после ее разрушения уровень продолжил понижаться.

**Актуальность** данной работы заключается в анализе компонент водного баланса Каспийского моря для периодов повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996 – 2024 гг.) уровня моря. Такой анализ необходим для правильного понимания климатических причин колебаний уровня Каспия и обоснованного прогнозирования его изменений. Колебания уровня в значительной степени влияют на жизнь и хозяйство прибрежного населения, а качественный мониторинг и прогноз поведения водоема приведет к грамотному взаимодействию человека и природы.

Таким образом **цель** данной работы заключается в анализе изменчивости осадков и испарения для периодов повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996 – 2024 гг.) уровня моря, в значительной степени влияющих на межгодовые колебания УКМ.

В задачи работы входит:

- анализ межгодовой изменчивости осадков и испарения для периодов повышения и понижения уровня моря в трех его районах – Северном, Среднем и Южном Каспии и моря в целом;
- анализ внутригодовой изменчивости осадков и испарения для периодов повышения и понижения уровня моря в трех его районах – Северном, Среднем и Южном Каспии и моря в целом;
- анализ пространственной изменчивости климатических значений осадков и испарения;
- анализ взаимосвязи осадков и испарения с другими компонентами водного баланса.

В работе применяются такие статистические методы исследования, как корреляционный анализ, простые статистические характеристики (среднее арифметическое значение, стандартное отклонение, амплитуда и размах колебаний и т.д.) и регрессионный анализ.

Все вычисления в работе выполнены в среде программирования «MATLAB». Комплексная среда программирования «MATLAB» разработана для решения научных и инженерных задач. Рабочая среда позволяет обрабатывать большие массивы данных, а встроенная графика упрощает визуализацию данных и позволяет получать информацию из созданных графических элементов, например, наведением курсора мыши на график.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки РФ FSZU-2023-0002 и FSZU-2026-0003. По теме исследования автором опубликованы научные статьи [18, 19, 20, 21].

# ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

## 1.1 Физико-географическое положение Каспийского моря

Каспийское море – крупнейший на Земле замкнутый водоем, бессточное солоноватое озеро. Море расположено на южной границе Азии и Европы, омывает берега России, Казахстана, Туркмении, Ирана и Азербайджана. Из-за размеров, своеобразия природных условий и сложности гидрологических процессов Каспийское море принято относить к классу замкнутых внутриматериковых морей. [9]

На рисунке 1.1 представлена физическая карта Каспийского моря и прилегающей к нему территории.

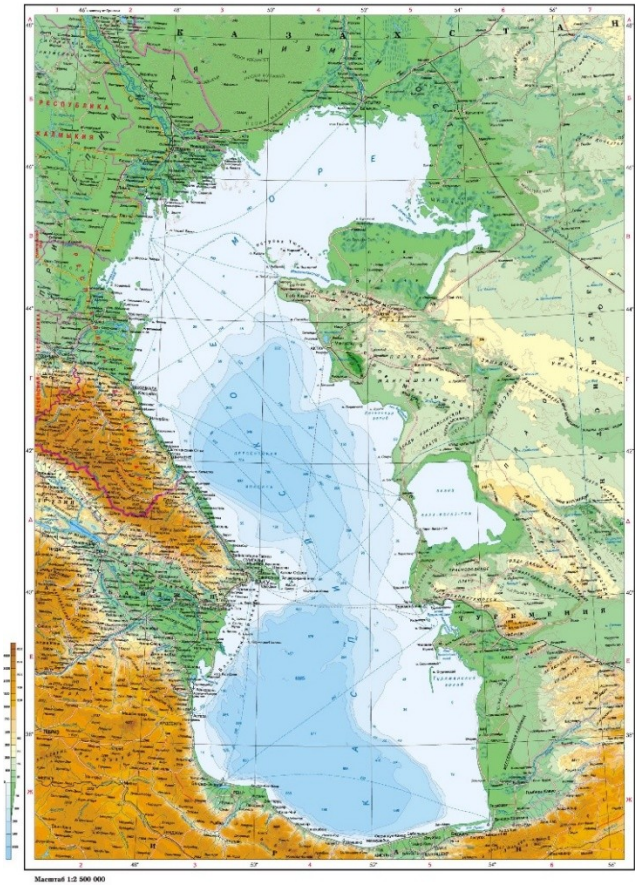


Рисунок 1.1 Физическая карта Каспийского моря

Площадь моря составляет 371 тыс. км$^2$, объём 78 тыс. км$^3$. Протяженность береговой линии составляет 5970 км, из них 2320 км принадлежат Казахстану, 1200 км – Туркменистану, 900 км – Ирану, 850 км – Азербайджану и 700 км России [9]. На рисунке 1.2 представлена карта принадлежности береговой линии прибрежным странам.




Рисунок 1.2 Политико-административная карта региона

Каспийское море по геоморфологическим и гидрометеорологическим условиям разделяют на три части: Северный, Средний и Южный Каспий. Граница между Северным и Средним Каспием проводится по линии,

соединяющей о. Чечень (к северу от Аграханского полуострова) с мысом Тюб-Караган на п-ове Мангышлак. Северный Каспий занимает 24,3% площади водного зеркала и 0,5% объема вод всего моря. Между Средним и Южным Каспием граница проходит над Апшеронским порогом по линии от о. Чилов к мысу Куули. Общая площадь Среднего Каспия составляет 137812 км$^2$, то есть 36,4% от общей площади моря. Объем вод Среднего Каспия составляет 33,9% объема вод всего моря. Общая площадь Южного Каспия составляет 148640 км$^2$ или 39,3% от общей площади моря. Объем вод Южного Каспия составляет 65,6% объема вод всего моря. [2, 3, 9]

На рисунке 1.3 представлена батиметрическая карта Каспийского моря. Северный Каспий представляет собой шельфовую зону, слабо наклоненную к югу с очень отлогими и низменными берегами. Средняя глубина Северного Каспия составляет 4-5 метров, достигая глубин до 20 метров на юге района у границы со Средним Каспием. В результате сгонно-нагонных явлений образуются осушки. Дельты крупных рек, таких как Волга, Терек, Урал образуют дельтовые берега с обильным поступлением терригенного материала. Дельта Волги отличается обширными тростниковыми зарослями. [3]

Средний Каспий глубже Северного. Наибольшая глубина здесь достигается в Дербентской впадине (788 м). Берега Среднего Каспия в основном выровненные абразионно-аккумулятивные, а восточный берег сильно изрезан. [2, 9]

Наиболее глубоководным является Южный Каспий. В его котловине отмечаются наибольшие для всего моря глубины. В этой части моря сосредоточено две трети Каспийских вод, а наибольшая глубина составляет 1025 м. в Южно-Каспийской котловине. Также в котловине расположен хребет, возвышающийся над дном котловины на 500 м. [3, 9]

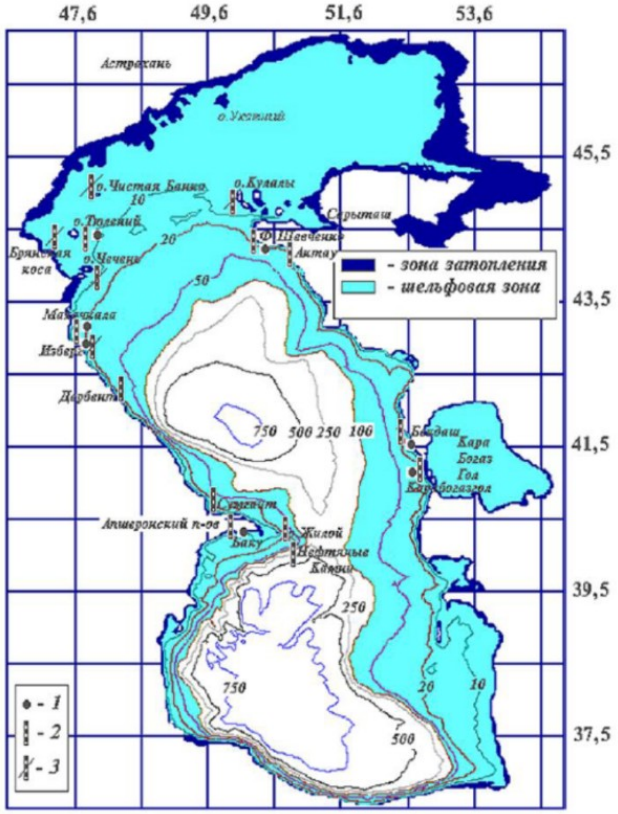



Рисунок 1.3 Батиметрическая карта Каспийского моря [3]

В Каспийском море расположено 3 пролива: Апшеронский, Кара-Богаз-Гол и Челекено-Огурчинский. Длина Апшеронского пролива, разделяющего Апшеронский полуостров и остров Пираллахи, составляет примерно 12 км. Пролив Кара-Богаз-Гол соединяет Каспийское море с одноименным заливом. Длина пролива составляет примерно 8 км, ширина – около 200 м. Пролив расположен между двумя песчаными косами, отделяющими залив КБГ от Каспийского моря. Также в Каспийском море расположен Челекено-Огурчинский пролив, соединяющий открытую часть моря с Туркменским заливом. [3]

В западной части Северного Каспия расположены самые большие острова всего моря: о. Чечень (122 км$^2$) и о. Тюлений (68 км$^2$). В восточной части выделяют архипелаг Тюленьих островов, среди которых 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. [3]

Самый большой залив Каспийского моря – залив Кара-Богаз-Гол, отделяемый от моря одноименным проливом, расположен в Южном Каспии.

В Северном Каспии наиболее крупные заливы: Аграханский, Кизлярский, Мертвый Култук, Кайдак, Казахский, Мангышлагский. В Южном Каспии наиболее крупные заливы и бухты: Красноводский, Туркменбаши, Туркмен, Гызылагач, Гасан-Кули, Гиркан, Гызлар, Энзели. [3]

## 1.2 Гидрологический режим Каспийского моря

Водосборный бассейн Каспийского моря 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 составляет приблизительно 3050 тыс. км$^2$, что почти в 10 раз превышает площадь его акватории. Площадь бассейнов всех российских рек, впадающих в Каспийское море, составляет около 1750 тыс. км$^2$. Территория водосборного бассейна оценивается в 1380 тыс. км$^2$. На рисунке 1.4 представлена карта водосборного бассейна Каспийского моря, где 1 – это граница водосборного бассейна Каспия. [9]

Годовой размах колебаний средней месячной температуры воздуха над центральными глубоководными частями Среднего Каспия составляет 20-22 С, Южного - 18-20 С. Наибольший годовой размах средней месячной температуры воздуха наблюдается над более континентальными северо-западным (25-27 С) и северо-восточным (26-30 С) прибрежными районами. На рисунке 1.5 представлен график годового хода температуры воздуха для Каспийского моря. Красной линией показана среднемесячная температура. [9] Так как море расположено полностью в северном полушарии, в зимние месяцы здесь наблюдаются минимальные температуры, а в летние – максимальные. Минимальное среднее значение отмечается в Январе и составляет +5℃, а максимальное – в июле (+22,5℃)

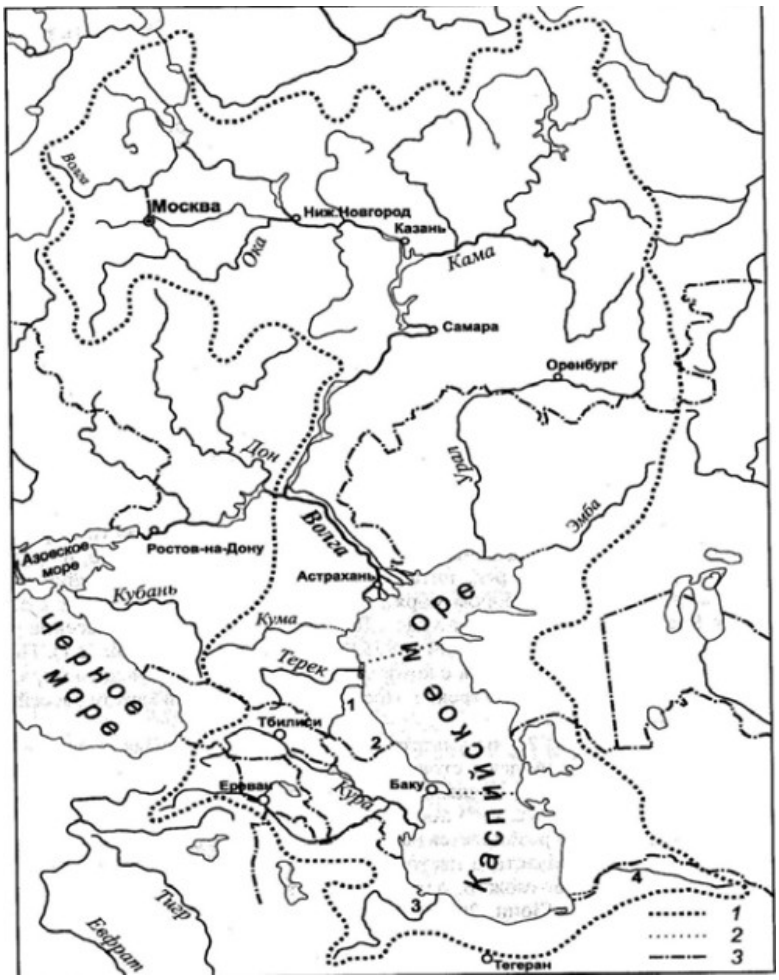



Рисунок 1.4 Водосборный бассейн Каспийского моря [9]

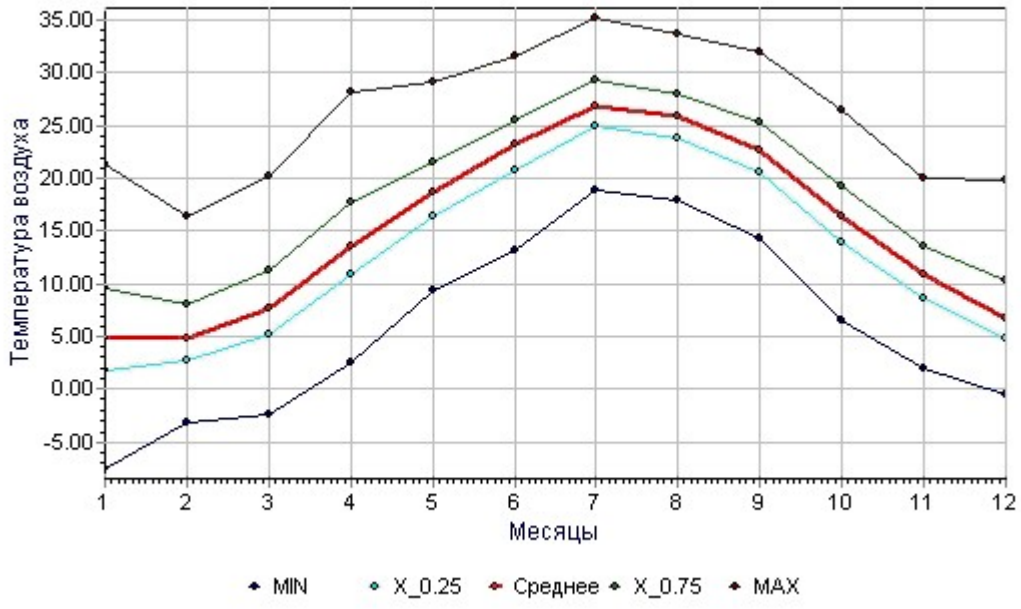



Рисунок 1.5 График годового хода температуры воздуха для Каспийского моря [26]

Ежегодно покрывается льдом только мелководная северная часть Каспийского моря. Период начала ледообразования зависит от синоптических процессов и притока тепла из центральной части моря. В среднем начало образования льда приходится на середину ноября в крайних северо-восточных районах моря и распространяется от берегов. К концу ноября лед покрывает всю прибрежную зону Каспия и ко второй половине января замерзает весь Северный Каспий. [9]

Период разрушения льда начинается с конца февраля. Таяние льда происходит с юга на север. В конце марта – начале апреля происходит полное освобождение акватории моря от льда. [9]

Несмотря на малую продолжительность существования и небольшую площадь покрытия льдов, они существенно влияют на гидрологические условия Каспийского моря. Кромка льдов служит определенной фронтальной зоной, для которой характерна резкая горизонтальная изменчивость гидрологических характеристик. Кроме того, в прикромочной зоне расположенной обычно в районе свала глубин, происходит опускание охлажденных поверхностных вод, которые далее сползают по склонам в глубокие слои, усиливая зимнюю вертикальную циркуляцию. [9]

## 1.3 Колебания уровня Каспийского моря

Как было сказано ранее, 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.

Палеоклиматологами была воссоздана картина изменения УКМ за последние 400 тысяч лет. Ход уровня за этот период представлен на рисунке 1.6. Считается, что процесс формирования уровня Каспийского моря, с одной стороны, определяется глобальными геологическими процессами, а с другой – региональными климатическими особенностями. [15]

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. Многолетнее изучение плейстоценовой истории Каспия позволило ученым сделать вывод о том, 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. [3]




Рисунок 1.6 Изменение УКМ за последние 400 тысяч лет [3]

Наибольшее внимание уделяется изменению УКМ за последние 2000 лет. Минимальная отметка уровня Каспийского моря за этот период, согласно балтийской системе высот, отмечалась в середине V в. (–34,5 м), а максимальная – в начале нашей эры (–22,5 м). [15]

На рисунке 1.7 представлен межгодовой ход уровня Каспийского моря за период с 1900 по 2000 года. За этот период размах колебаний уровня составил 3,2 м. До 1930 года отмечался равновесный режим уровня, то есть его колебания носили случайный характер и четкого тренда на повышение или понижение

уровня не прослеживалось. Затем, до 1978 года наблюдается резкое падение УКМ на 3 м, после чего до 1996 года происходит стремительный рост уровня на 2,4 метра. Таким образом, в XX столетии выявлено три фазы относительно однородных колебаний УКМ: стояние, падение и рост, которые в 1994 году названы естественными климатическими периодами (ЕКП). [14, 15]




Рисунок 1.7 Межгодовой ход уровня Каспийского моря по инструментальным наблюдениям (за ноль принята отметка –28 м БС). [15]

За последние 2000 лет было выявлено 39 ЕКП. Минимальная длительность таких периодов составляла 40 лет, что дает основание полагать, что в будущем продолжительность ЕКП должна составлять не менее 40 лет. Последний единый климатический период начался в 1979 году. Для него была предложена модель межгодовых колебаний уровня. По прогнозу, основывающемся на этой модели было показано, что к 2020 году УКМ асимптотически приблизится к уровню тяготения и составит -26,6м. Однако прогноз не оправдался и в 2020 году уровень моря достиг отметки -28м. [5]

## 1.4 Влияние компонент водного баланса на уровень Каспийского моря

В работе [11] очень подробно раскрываются причины колебаний уровня Каспийского моря. Факторы, влияющие на изменения УКМ принято разделять на

4 группы: космогеофизические силы, геолого-геодинамические процессы, антропогенные факторы и гидрометеорологические процессы (климатические факторы). К космогеофизическим силам относится солнечная активность, приливообразующие силы Луны и Солнца, свободные и вынужденные колебания полюсов Земли и др. Было проведено большое количество работ, посвященных использованию характеристик солнечной активности в прогнозах уровня, а также анализу солнечно – земных связей. Режимы колебаний уровня Каспия при одной и той же интенсивности солнечной активности могут существенно различаться, что говорит о недостаточной обоснованности прямой зависимости между этими процессами и не позволяет пока использовать данные о солнечной активности напрямую.

Геолого-геодинамические процессы представляют из себя тектонические движения (вертикальные и горизонтальные), накопление донных осадков и сейсмодеформацию, то есть такие процессы, которые приводят к изменению объема котловины моря и влияющие на его водный баланс. Н.А. Шило предложил гипотезу, в основу которой легло чередование тектонических фаз сжатия и растяжения в поддонных слоях горных пород, то есть водообмен через дно моря. На фазу сжатия приходится повышение уровня, а на фазу растяжения – понижение. Однако, продолжительность таких процессов занимает тысячи лет, и, следовательно, они не объясняют межгодовую изменчивость уровня. Геолого-динамические процессы вносят незначительный вклад в изменение уровня в качестве заполнения котловины донными отложениями, поступающими с речным стоком или вследствие размыва берегов, а также эоловых процессов. Однако в абсолютных значениях колебаний уровня эти причины крайне малы. [11]

Важный вклад в колебания уровня Каспия вносят антропогенные и техногенные факторы. Наибольшее влияние хозяйственная деятельность человека, а именно создание водохранилищ, оказывает на речной сток. На Волге построено 16 водохранилищ и гидроэлектростанций. В работе [8] сделано предположение о том, что с поверхности водохранилищ, расположенных в

бассейне Волги испаряется примерно 13.3 км$^3$/год. Также стоит учитывать безвозвратное потребление воды впадающих в Каспий рек. Однако самым главным антропогенным фактором, наглядно повлиявшим на уровень Каспийского моря, стало создание и последующее разрушение дамбы в пролив Кара-Богаз-Гол. Более подробное описание влияния дамбы будет приведено ниже. Также, в работе [8] в качестве фактора, влияющего на колебания УКМ рассматривается интенсивная добыча нефти и газа. Однако, указывается, что, при добыче нефти 300 млн тонн в год, вклад в расходную часть водного баланса составит всего 0,3 км$^3$/год, что совершенно незначительно по сравнению с другими составляющими. Еще одной возможной причиной колебаний УКМ было названо орошение в Аральском регионе. Однако в работе [11] такое предположение отвергается по причине неоправдываемости прогноза, предиктором которого указывалось орошение.

Климатические факторы считаются основными причинами нарушения водного баланса Каспия, а следовательно, и межгодовых колебаний уровня. Водный баланс нарушается при изменении всего одной компоненты. В реальности же из стационарного состояния выводятся все компоненты водного баланса, в разной степени и независимо друг от друга.

В работе [11] водный баланс Каспийского моря рассматривается покомпонентно: речной сток, испарение, осадки и сток в залив Кара-Богаз-Гол. Оценки разных авторов испарения с поверхности моря разнятся. Например, средняя оценка испарения по [2] с зеркала Каспийского моря – 910 мм/год, по [3] – 970 мм/год (варьируется от 920 мм/год до 1040 мм/год), а по [10] – 961 мм/год. Таким образом расчет испарения по данным береговых станций представляет из себя сложную задачу, к тому же в таком случае практически невозможно получить данные с открытой акватории моря, что и представляет наибольший интерес.

Работа [4] посвящена влиянию испарения на изменение УКМ, а также влиянию направления ветра на само испарение. С начала XX в. до 1940-х гг. отмечалась устойчивая тенденция повышения испарения с водной поверхности

Каспийского моря. Наиболее интенсивное испарение отмечалось в 1930-е гг. (в среднем 1004 мм) и в первую половину 1970-х гг. (1039 мм). Практически на всех береговых станциях, расположенных в различных частях Каспия, в многолетнем ходе годовых и сезонных величин испарения до второй половины 1990-х гг. прослеживаются статистически значимые тенденции спада [22]. В 1975–1995 гг. интенсивность процессов испарения была значительно ниже, чем в предшествующие годы, и не превышала нормы (в среднем ~919 мм). В 1996–2010 гг. интенсивность процессов испарения возросла, составляя в среднем 966 мм в год [3]. По данным за 1960–1990 гг. между направленными изменениями интенсивности испарения с водной поверхности и среднегодовыми значениями скорости ветра существует тесная причинно-следственная связь. Уменьшение испарения с поверхности Каспия в 1975–1995 гг. связано с изменением скорости ветра. В работе [4] показано, что основное значение в изменениях испарения над Каспийским морем имеют ветры восточного и северного румбов. Произведен анализ данных архивов ре-анализа, по результатам расчетов сделан следующий вывод: смена режима атмосферной циркуляции над Каспийским морем, приводящая к преобладанию ветров то восточного, то северного румбов, обусловливает интенсификацию или уменьшение испарения с поверхности моря и, как следствие, оказывает влияние на колебания его уровня. Ветры восточного румба приносят в акваторию моря сухой и теплый воздух из Средней Азии, который способствует повышению интенсивности испарения. [4]

Одним из ключевых факторов, влияющих на изменение уровня Каспийского моря, является изменение ветрового режима над его акваторией. Наиболее отчетливо это проявляется в три временных интервала: период I (1948–1976 гг.) и период III (1996–2017 гг.) — периоды снижения уровня моря, а также период II (1977–1995 гг.) — фаза его подъема. В эти временные отрезки существенно варьируется частота ветров северного и восточного направлений. Так, в периоды снижения уровня (I и III) повторяемость этих ветров достигает высоких значений (от 70 до 90%), в то время как ветры южного и западного направлений наблюдаются гораздо реже — лишь в 10–40% случаев.

Причиной этого служит то, что восточные ветры приносят в регион сухие и тёплые воздушные массы из Центральной Азии, что усиливает испарительные процессы над морем. Именно в периоды I и III данные ветры становятся наиболее активными, способствуя понижению уровня КМ за счёт увеличения испарения. В противоположность этому, во время II периода роста уровня моря наблюдается ослабление восточных ветров, при этом доминируют потоки с севера, способствующие снижению испарения и, соответственно, повышению уровня моря.

Также выявлена сезонная закономерность: наибольшая частота северных ветров отмечается в теплое время года, особенно в летние месяцы, тогда как восточные ветры чаще проявляются в осенне-зимний и весенний периоды. Годовая динамика скорости ветра над Каспием также подтверждает этот тренд: в тёплые месяцы ветер ослабевает, а в холодные – наоборот, усиливается.

Проведённый анализ подтверждает, что наибольшее влияние на испарительные процессы в акватории Каспийского моря оказывают ветры восточного и северного направлений. Их частота и скорость демонстрируют чёткую связь с временными периодами снижения и подъёма уровня моря (I, II и III фазы), что подчёркивает их важную роль в формировании водного баланса Каспийского моря. [4]

Проблема оценки величины атмосферных осадков, выпадающих над акваторией Каспийского моря, традиционными методами также заключается в отсутствии постоянных измерений над открытой акваторией моря. Средняя величина выпавших над Каспием составляет 180 мм/год. [11]

Как уже было сказано ранее, расхождения в результатах оценки испарения и осадков с Каспийского моря связаны с тем, что натурные данные берутся с малого количества береговых и островных станций, которые не могут учесть все особенности распределения данных величин по всей акватории моря. Решение этой проблемы связано с появлением данных спутникового дистанционного зондирования Земли.  Так, в работе [14], по данным GPCP Version 2.2 Combined Precipitation Data было получено значение осадков 360 мм/год, что в два раза

превышает предыдущие оценки осадков, основанные на данных береговых станций.

В Каспий впадает более 130 рек, приносящих в море примерно 300 км$^3$/год воды. На Волгу из этого объема приходится около 250 км$^3$/год, что позволяет брать за основу речного стока именно сток Волги. Дело в том, что огромное количество рек, впадающих в Каспий, а также отсутствие современных приборов, измеряющих расход воды (для расчета стока реки применяют эмпирические формулы, используют гидрометрические вертушки, с помощью которых измеряют скорость течения в точке, а площадь поперечного сечения русла получают путем промера глубин) делает невозможным использование точных значений объемов всех впадающих в море рек.

В работе [14] представлена концепция, согласно которой долгосрочные колебания УКМ отражают интегральные процессы влагообмена в системе океан (Северная Атлантика) – атмосфера – континентальная поверхность (водосборный бассейн Волги). Усиление циклонической активности в Северной Атлантике, особенно в районе Исландской депрессии, ведёт к увеличению испарения и повышению содержания влаги в атмосфере. Это сопровождается ростом зональной составляющей скорости горизонтального переноса водяного пара в рамках средней атмосферной циркуляции и синоптических вихрей. При усилении циклонической активности углубляется Исландский минимум давления, смещаясь в пространстве. Это, в свою очередь, усиливает Североатлантическое колебание (САК), которое существенно влияет на адвективный зональный перенос воздушных масс в умеренных широтах. Следствием этого становится значительное увеличение поступления водяного пара на европейский континент, включая европейскую часть России, что способствует росту осадков в бассейне Волги. При ослаблении циклонической и усилении антициклонической активности ситуация изменяется на противоположную. На рисунке 1.8 представлена концептуальная модель формирования межгодовых колебаний УКМ, предложенная в работе [14]. В

модели приведены причинно-следственные связи между атмосферными явлениями и изменением уровня Каспия.




Рисунок 1.8 Генетическая модель формирования межгодовых колебаний уровня Каспийского моря. [13, 14]

На рисунке 1.9 представлена диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря (км3 /год) в зависимости от годового стока Волги в г. Самара (км3 /год) за период с 1890 по 1990 г. Установлено, что в XX веке примерно две трети ($R^2$=0,64) межгодовых колебаний уровня Каспийского моря связаны с притоком речных вод, сформированных в лесной части бассейна Волги, удалённой от побережья более чем на тысячу километров. При этом вклад эффективного испарения находится в диапазоне белого шума, и потому может быть исключён из расчётов.[15]

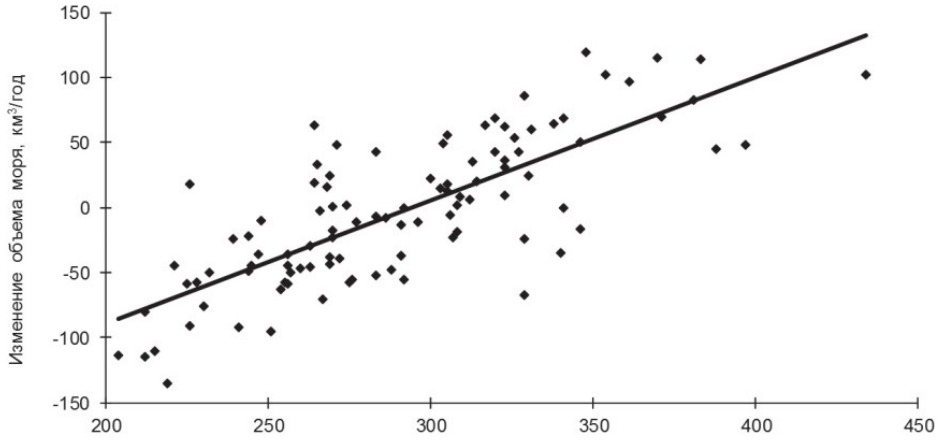



Рисунок 1.9 Диаграмма рассеяния внутригодовых изменений объема Каспийского моря (км3 /год) в зависимости от годового стока Волги в г. Самара (км3 /год) за период с 1890 по 1990 г. [15]

Таким образом причиной долгопериодных колебаний уровня Каспийского моря является множество факторов, не оказывающих на уровень непосредственного влияния.

Как было сказано ранее, непосредственное влияние на уровень Каспийского моря оказывают компоненты водного баланса: речной сток, испарение и осадки. Именно эти факторы формировали ЕКП на протяжении сотен лет. С конца XX века, под влиянием глобального потепления, в Каспийском море начали происходить стремительные изменения. Отмечается рост температуры воздуха и поверхности воды, сокращение площади ледяного покрова, увеличение испарения, снижение речного стока и уменьшение количества осадков, выпадающих над морской акваторией. При этом все эти процессы развиваются не синхронно и с разной интенсивностью. Согласно результатам исследований, среднегодовая температура воздуха у поверхности в Каспийском регионе (включая море и прилегающие территории) в течение 41 года — с 1980 по 2020 гг. — практически непрерывно росла со скоростью 0,030 °C в год, что составило превышение на 1,2 °C. Темпы повышения температуры поверхности самого моря оказались ещё выше — потепление составило 1,4 °C. [15]

В работе [22] показано, что рост температуры воздуха вследствие глобального потепления влияет на скорость испарения с поверхности моря, а значит глобальное потепление тоже можно в каком-то смысле назвать внешним фактором изменения УКМ.

Одной из важнейших причин роста УКМ в 1978 – 1990 г. стал приток Волги, который был существенно выше нормы. Из-за засушливых условий в летний период в увлажнении бассейна Волги наступила маловодная фаза, и с 1992 года отмечается значительный отрицательный тренд волжского стока со скоростью за 24-летний период (1992—2016 гг.) примерно –2,5 км$^3$ /год, что соответствует уменьшению слоя воды — 0,64 см/год. [22]

По сравнению с речным стоком и испарением, осадки, выпадающие на поверхность моря практически незначительны. За период 2003— 2017 гг. среднегодовое количество осадков уменьшилось примерно на 38 мм, что эквивалентно уменьшению УКМ примерно на 4 см, что составляет уменьшение осадков со скоростью 2,6 мм/год.

Однако поводом к формированию последнего на сегодняшний момент периода понижения уровня моря послужило антропогенное воздействие. В работе [15] основной причиной снижения УКМ с 1996 года указывается сток вод Каспийского моря в залив Кара-Богаз-Гол, который, в результате разрушения дамбы значительно увеличился. В работе [15] указывается, что вклад стока в залив КБГ в снижение уровня моря достигает 72%. Глухая песчаная дамба была создана в 1980 году в целях исключения испарения каспийских вод с поверхности залива Кара-Богаз-Гол – мощнейшего испарителя. В результате таких действий к 1984 году залив практически полностью пересох, а уровень моря начал стремительно расти. В целях сохранения залива как уникального соляного месторождения проводились работы по восстановлению стока в залив, однако это не привело к ожидаемым результатам и в 1992 дамба была взорвана и поперечное сечение пролива КБГ увеличилось примерно в 2 раза. [5, 6] В работе [15] с помощью нелинейной зависимости от среднегодового уровня моря получен вклад стока в залив Кара-Богаз-Гол в падение УКМ. Он составил 72%,

из чего сделан вывод, что полное разрушение дамбы в 1992 году стало главной причиной сильного понижения УКМ после 1996 года. Тогда на остальные компоненты остается лишь 28%. Уровень дна пролива Кара-Богаз-Гол составляет -30,6 м. В работах [14, 15] указывается, что при соблюдении стационарных условий компонент водного баланса, к 2038 году уровень Каспия достигнет этой отметки -30,6 м и сток в залив КБГ прекратится. Понижение УКМ также остановится.

### 1.5 Исходные данные

В работе использовались 4 спутниковых глобальных архивов ре-анализа:

— архив NCEP/NCAR (*англ*. National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США) Reanalysis-1 (R-1);

— архив NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (*англ*. National Centers for Environmental Prediction, Department of Energy — Национальный центр экологических прогнозов США, Департамент энергетики; англ. Atmospheric Model Intercomparison Project) Reanalysis-2 (R-2), являющийся продолжением архива R-1.

Изначально R-2 предназначался для исправления выявленных в R-1 недостатков. Однако поскольку проект R-2 стал показывать многообещающие результаты, то он дополнительно стал использоваться для анализа, интерпретации, моделирования и синтеза большого массива разнородных натурных данных. В описании глобальных проектов R-1 и R-2 четко указано, что «оба повторных анализа являются глобальными, привязаны к сетке и инициализируются исходными данными с наземных приборов, аэростатов, самолетов и спутников». Отсюда видно, что в этих архивах применяется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, однако основой является дистанционное зондирование со спутников. С большой вероятностью расчет затрат тепла на испарение в обоих архивах осуществлялся

с помощью традиционного аэродинамического метода. Оба архива пользуются постоянной поддержкой. [18, 29, 30, 31, 32]

Эти архивы имеют пространственное разрешение 1,9˚ * 1,9˚ и для них были взяты 13 узлов, попадающих на акваторию Каспийского моря. Осредненные значения испарения и осадков для этих архивов были получены простым осреднением значений во всех узлах.

Значения осадков в этих архивах предоставляются в размерности кг /м$^2$ /с и для удобства расчетов и анализа результатов были переведены в мм/мес. Для получения значений испарения из этих архивов брались значения скрытого потока тепла (latent heat flux) и для удобства расчетов и анализа переводилось в мм/мес.

На рисунке 1.10 показано расположение узлов для архивов R-1 и R-2: 5 в Северном Каспии, 4 в Среднем и 4 в Южном.

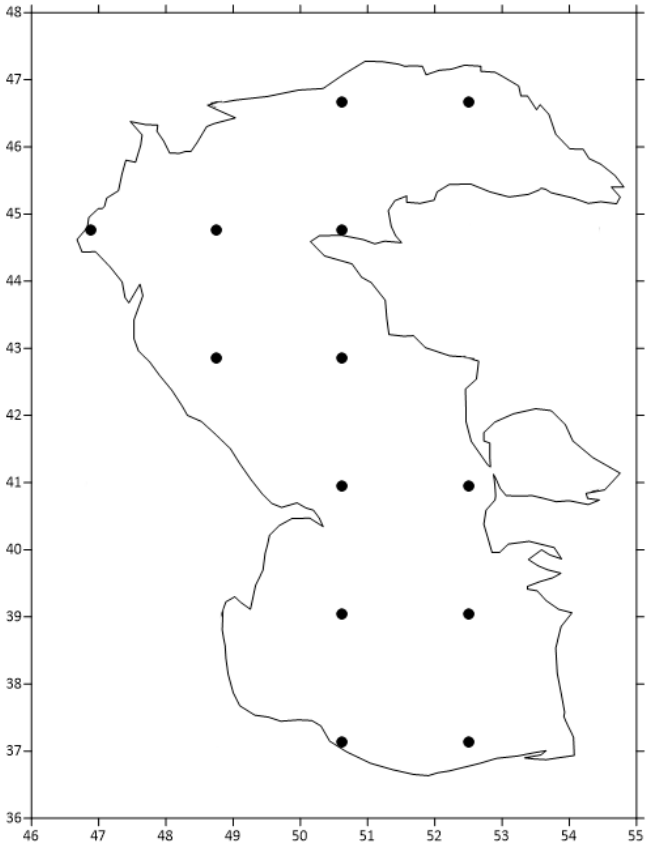



Рисунок 1.10 Пространственная сетка архивов R1 и R2 на акватории Каспийского моря

— архив MERRA-2, представляющий новейший ретроспективный атмосферный анализ современной спутниковой эпохи, созданный Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (GMAO). Архив ERA-5 — это атмосферный ре-анализ глобального климата ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) пятого поколения, охватывающий период с января 1940 года по настоящее время. Пространственное разрешение у архива MERRA-2 составляет 0,5˚ * 0,625˚. Для акватории Каспийского моря был получен 21 широтный разрез, содержащий от 4 до 11 точек. Выбранные в узлах сетки среднемесячные значения осадков вначале усреднялись для каждой широты, а затем для всего моря. При этом учитывалось число точек на каждой широте. Общее число точек для всей акватории моря составило 140. На рисунке 1.11 представлена карта пространственного распределения узлов сетки архива MERRA-2 на акватории Каспийского моря. [18, 27]

— архив ERA-5 представляющий атмосферный ре-анализ глобального климата ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) пятого поколения, охватывающий период с января 1940 года по настоящее время. Пространственное разрешение архива ERA-5 составляет 0,25˚ * 0,25˚. Для всей акватории моря было выделено 42 широтных разреза и число точек на них варьировалось от 8 до 26. Осреднение для этого архива проводилось также, как и для архива MERRA-2. Общее число точек, покрывающих акваторию моря составило 700. На рисунке 1.12 представлена карта пространственного распределения узлов сетки архива ERA-5 на акватории Каспийского моря. [18, 28]

Для всех архивов брались среднемесячные значения испарения за период с 1978 по 2024 гг.

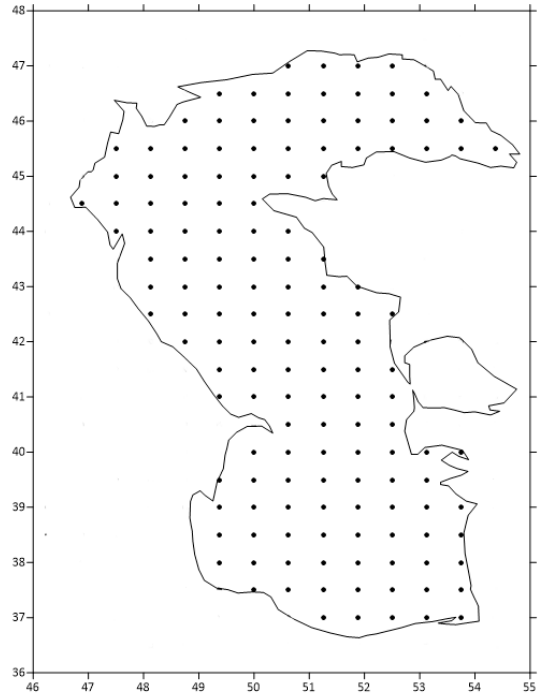



Рисунок 1.11 Пространственная сетка архива MERRA-2 на акватории Каспийского моря

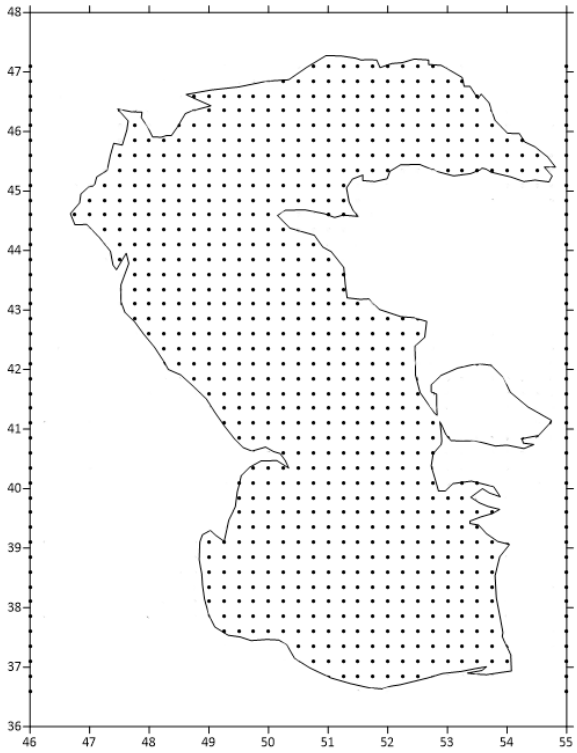



Рисунок 1.12 Пространственная сетка архива ERA-5 на акватории Каспийского моря

Значения уровня Каспийского моря до 1993 года были получены по данным 4 береговых станций (Баку, Махачкала, Форт Шевченко и Красноводск), а после 1993 года — по данным спутниковой альтиметрии. Среднегодовые значения уровня также брались за период с 1978 по 2024 гг.

Основой суммарного стока речных вод послужили данные по стоку Волги из работы [10]. Умножением на коэффициент 1,2 [5, 6], который характеризует вклад стока других рек в Каспий и подземный приток, сток Волги переводился в суммарный приток речных вод $Q_{сум}$ к Каспию. Сток в з. Кара-Богаз-Гол (КБГ) заимствован из [2, 11]. Данные по стоку также брались за период с 1978 по 2024 гг.

### 1.6 Методика

В работе применяются простые статистические методы анализа временных рядов. В естественных науках понятие «статистика» определяется как научное направление, связанное с обработкой, анализом и интерпретацией эмпирических данных. [14]

Среднее арифметическое значение характеризует центр тяжести (распределения) числового ряда. Среднее арифметическое это вид степенной средней величины, рассчитываемой по формуле:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sqrt[m]{x_i^m},$$

Где m – показатель степени, m = 1, x – текущее значение осредняемой величины. [14]

Также для анализа результатов работы применяются характеристики рассеяния случайной величины. Случайная величина – это такая переменная величина, которая в результате испытания (измерения) в одинаковых условиях может принимать то или иное, заранее неизвестное, значение.

Простейшей мерой рассеяния случайной величины является размах колебаний, определяемый как

$$R = x_{max} - x_{min}.$$

Размах колебаний дает общие представления об изменчивости временного ряда, показывая, насколько различаются между собой максимальное и минимальное значение. [14]

Наиболее распространенным критерием изменчивости ряда считается дисперсия или стандартное отклонение. В данной работе рассматривается именно стандартное отклонение. Стандартное или среднеквадратическое отклонение представляет из себя квадратный корень из дисперсии и описывает степень отклонения отдельных значений внутри ряда. Стандартное отклонение рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n}}$$

Где n – длина ряда. Размерность стандартного отклонения совпадет с размерностью ряда.[14]

Для оценки рядов с различной размерностью применяется безразмерный коэффициент вариации, равный:

$$C = \frac{\sigma}{\overline{x}}.$$

В работе также применяется корреляционный анализ. Коэффициент корреляции представляет собой безразмерную параметрическую характеристику линейной взаимосвязи двух случайных величин X и Y. Коэффициент корреляции рассчитывается по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{n \sigma_x \sigma_y},$$

Где $n$ – длина ряда, $\sigma_x$ $u$ $\sigma_y$ – стандартные отклонения рядов. [14]

Коэффициент корреляции изменяется в пределах от -1 до +1. Если коэффициент корреляции равен 0, связь между величинами отсутствует. Если коэффициент корреляции равен 1 по модулю, наблюдается линейная связь. Положительный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии прямой связи между рядами, то есть при возрастании одной величины вторая тоже

возрастает, а отрицательный – об обратной, то есть при возрастании первой – вторая величина убывает. [14]

Для проверки коэффициента корреляции применяется критерий Стьюдента. Выборочное значение критерия Стьюдента рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{R}{\sigma_R}, \quad \sigma_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{N - 1}} .$$

где $\sigma_R$ - стандартное отклонение для распределения коэффициентов корреляции.

Далее $t^*$ сравнивается с критическим коэффициентом Стьюдента $t_{кр}$, определяемым по уровню значимости α (обычно принимается как 0,05) и числу степеней свободы ν = n-1. Если $|t^*| > t_{кр}$, то между двумя рядами существует статистически значимая связь. $|t^*| < t_{кр}$, коэффициент корреляции незначим и связь между рядами отсутствует. [7]

Также в данной работе применяется регрессионный анализ. Уравнение парной регрессии связывает две физические характеристики. Уравнение парной линейной регрессии выглядит следующим образом:

$$y = a_1 x + a_0 .$$

Тогда y – называется зависимой переменной (предиктант), x – независимой переменной (предиктор), $a_1$ – коэффициент регрессии, $a_0$ – свободный член. Коэффициент регрессии $a_1$ представляет собой тангенс угла наклона линии регрессии к оси абсцисс и определяется по формуле:

$$a = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x},$$

где R – коэффициент корреляции переменных, входящих в регрессию; $\sigma_y$ и $\sigma_x$ – стандартные отклонения зависимой и независимой переменной, соответственно. Свободный член $a_0$ представляет собой расстояние от начала координат до пересечения оси ординат уравнением регрессии. [7]

Качество модели линейной регрессии определяется по ее характеристикам. Значимость коэффициентов регрессии определяется по критерию Стьюдента. Коэффициент детерминации представляет собой квадрат коэффициента

корреляции $R^2$. Чтобы модель считалась качественной, значение коэффициента детерминации должно превышать 0,70. Также модель должна быть адекватна генеральным данным. Здесь рассматриваются дисперсия модели, остатки модели ($\varepsilon_i = y_i - y(x)_i$, где $y_i$ – ряд исходных значений, $y(x)_i$ – ряд модельных значений), дисперсия остатков и адекватность модели по критерию Фишера. Относительная ошибка модели, то есть отношение стандартной ошибки модели (стандартного отклонения ряда остатков) к стандартному отклонению исходного ряда не должна превышать 0,67. [7]

Уравнение множественной линейной регрессии описывает одну характеристику через несколько других и выглядит следующим образом:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \ldots + a_n x_n + a_0,$$

Где y – зависимая переменная, или предиктант; $x_i$ – независимые переменные или предикторы; $a_i$ – коэффициенты регрессии при i-ой переменной, где i = 1, n, $a_0$ – свободный член. [7]

Качество модели множественной линейной регрессии определяется по ее параметрам также, как и для парной линейной регрессии.

В работе также применяются методы анализа временных рядов. Под трендовой составляющей понимают некоторое медленное изменение процесса, с периодом, превышающим длину исходной реализации. Величина и поведение тренда напрямую зависит от выборки. Помимо основного тренда, определяемого по всему ряду значений, можно выделить локальные тренды для конкретных периодов. Линейный тренд задается уравнением линейной регрессии, предиктором в которой является время:

$$X = a_1 t + a_0.$$

Величина линейного тренда определяется коэффициентом регрессии $a_1$. Положительный линейный тренд свидетельствует об увеличении характеристики со временем, а отрицательный – о ее уменьшении. Значимость линейного тренда определяется по значимости коэффициента регрессии и коэффициента детерминации. Значимость коэффициента регрессии

определяется по критерию Стьюдента. Значение коэффициента детерминации должно превышать 0,70. [14]

# ГЛАВА 2. ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ЕГО ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ.

В работе [18] приведено сравнение оценок испарения, полученных разными авторами по натурным данным. В течение многих десятилетий испарение с акватории Каспия рассчитывалось двумя способами. Первый заключался в применении стандартной гидрометеорологической информации береговых и островных станций. В таком случае используются, как правило, различные полуэмпирические формулы и возникают искажения, обусловленные влиянием локальных (местных) факторов на процесс испарения, учесть которые оказывается чрезвычайно сложно, и экстраполяция этих результатов на открытые районы моря может приводить к значительным погрешностям. Второй метод оценки испарения основывается на замыкании уравнения водного баланса. Недостаток такого метода заключается в том, что определение испарения как остаточного члена уравнения баланса включает в себя суммарную ошибку расчета остальных компонент, которую также очень трудно оценить.

В таблице 2.1. приведены статистические характеристики и коэффициенты корреляции между оценками испарения, рассчитанные разными авторами за период 1940—1969 гг. В этот временной промежуток отмечалось стояние уровня, то есть его случайные колебания и морфометрический фактор не оказывал влияния на испарение с акватории моря. Расхождение между средними оценками испарения составляет 121 мм или 12 % от общей средней (993 мм). Что касается межгодовой изменчивости испарения, то по СКО она различается в 2,5 раза, а по размаху колебаний – в 3 раза. Анализируя коэффициенты корреляции, можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев они являются незначимыми, а между данными Панина и Лобанова (аэродинамический метод) корреляция вообще оказалась отрицательной. Лучше всех коррелируют с другими рядами оценки испарения, полученные методом водного баланса, а хуже — данные Панина. Таким образом, даже совершенный метод расчета еще не гарантирует

высокой точности, если гидрометеорологические данные не соответствуют требованиям метода к исходной информации. Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют о явно неудовлетворительном состоянии проблемы изученности испарения на основе стандартных гидрометеорологических данных в приземном слое над морем. Из этого следует необходимость поиска альтернативного источника данных. На сегодняшний день под такими источниками мы понимаем данные спутникового ре-анализа. Однако точность значений испарения по спутниковым данным проверить практически невозможно по причине отсутствия «эталонных» значений с акватории Каспийского моря. Натурные данные испарения для Каспия получаются с береговых и островных станций, что не дает оценок испарения с открытой акватории, а судовые наблюдения, носят случайный характер.

Таблица 2.1 Статистические характеристики испарения с акватории моря по данным разных авторов за 1940—1969 гг.

| | Смирнова [24] | Панин [23] | Архипова [1] | Лобанов [12] | | Георгиевский [5] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эмпирическая формула | Модель приводного слоя | Эмпирическая формула | Аэродинамический метод | Метод теплового баланса | Метод водного баланса |
| Среднее | 1011 | 980 | 957 | 946 | 1067 | 998 |
| СКО | 33,2 | 29,1 | 74,5 | 58,3 | 73,3 | 58,3 |
| Размах колебаний | 121 | 129 | 363 | 260 | 280 | 240 |
| Коэффициент корреляции | 1 | 0,22 | 0,34 | 0,37 | 0,47 | 0,59 |
| | | 1 | 0,22 | -0,09 | 0,04 | 0,12 |
| | | | 1 | 0,09 | 0, 25 | 0,64 |
| | | | | 1 | 0,16 | 0,45 |
| | | | | | 1 | 0,62 |

Анализ величины испарения с акватории Каспийского моря основывается на результатах расчетов, произведенных по данным архивов спутникового ре-анализа ERA-5, MERRA-2 и R1 (подробная информация об используемых архивах приведена в разделе «Исходные данные»).

В среднем, испарение составляет 48% в структуре абсолютных значений компонент водного баланса. То есть вносит наибольший вклад в баланс. Среднее значение испарения за весь рассматриваемый период составляет 971,04 мм.

На рисунке 2.1 представлен совместный график среднегодовых значений испарения и уровня Каспийского моря за период с 1978 по 2024 год. Из графика видим, что, как в период повышения (1978—1995 гг.), так и в период понижения (с 1996 г.), уровня моря, испарение имеет положительный тренд. Величина тренда в период повышения уровня моря составляет 3,15 мм/год, что в несколько раз превышает величину тренда в период понижения уровня моря которая равна 0,68 мм/год. Таким образом, при повышении УКМ величина испарения увеличивается почти в 5 раз быстрее, чем при его понижении.

При более детальном анализе межгодовой изменчивости испарения можно также отметить 2005 год, после которого явно выделяется отрицательный тренд, величина которого составляет -4,56. 2005 год можно считать переломным для межгодового хода испарения, когда значимый рост сменяется не менее значимым снижением, однако, в рамках климатических периодов изменения уровня Каспия такое разделение временного ряда не имеет первостепенной важности.

Все тренды значимы по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $\nu = N-1$.

В период повышения уровня моря максимальное значение испарения достигается в 1982 году и составляет 992,92 мм. Минимальное значение испарения составляет 816,41 мм и наблюдается в 1979 году. Для периода понижения уровня моря стоит отметить два минимума, разница между которыми не превышает одну десятую миллиметра. Эти значения отмечались в 2003 и 2023 году и составляли 939,64 мм и 939,71 мм соответственно. Максимум для периода понижения УКМ составил 1109,73 мм и был отмечен в 2005 году. Абсолютный максимум для всего рассматриваемого периода совпадает с максимумом в период понижения уровня, а минимум – с минимумом в период повышения УКМ.

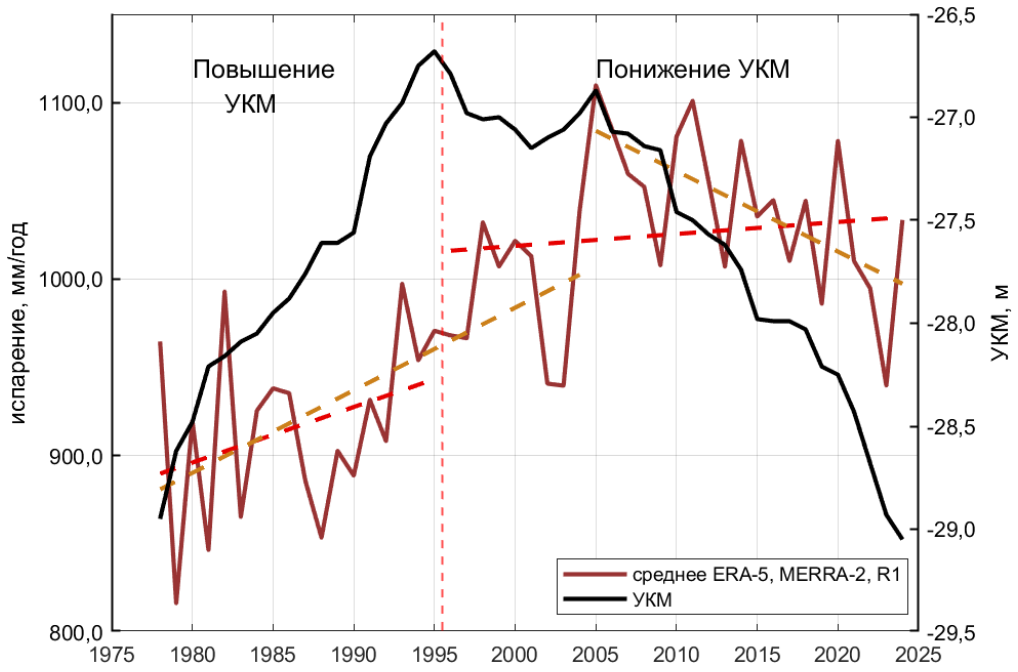



Рисунок 2.1 Межгодовой ход испарения с акватории Каспийского моря и УКМ за периоды повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

На рисунке 2.2 представлен межгодовой ход испарения для трех районов Каспийского моря: Северного, Среднего и Южного. Для периода повышения уровня наблюдаются близкие значения испарения для всех районов моря. Минимум за этот период отмечается для Северного Каспия в 1979 году, когда величина испарения составляла 742,36 мм. Максимального значения 1012,64 мм испарение достигло в 1993 году в Среднем Каспии. Для периода понижения уровня моря наименьшие значения испарения отмечается для Северного Каспия. В этом районе моря отмечается минимальное значение испарения 815,62 мм, отмеченное в 2023 году. Максимальное значение испарения для периода понижения УКМ достигается в 2005 году в среднем районе моря. Испарение с акваторий Среднего и Южного Каспия примерно одинаково. Абсолютный минимум на протяжении всего расчетного периода наблюдается для Северного Каспия в 1979 году, абсолютный максимум – для Среднего Каспия в 2005 году. Преобладание испарения в Среднем и Южном Каспии над Северным

объясняется более высокими температурами и отсутствием льда в этих районах моря.

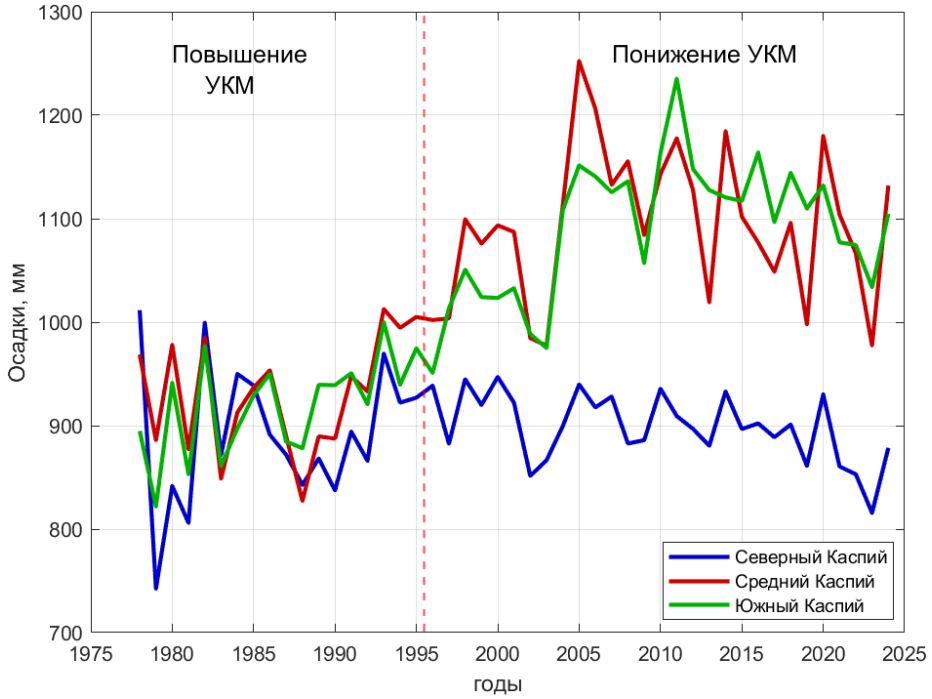



Рисунок 2.2 Межгодовой ход испарения с акватории Каспийского моря для трех районов моря за периоды повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

Также важное значение для анализа испарения с акватории Каспийского моря имеет изменчивость климатических значений. Сезонный ход испарения представляет собой колебание с выраженными весенним минимумом и осенним максимумом. На рисунке 2.3 представлен график сезонной изменчивости испарения для трех районов моря: Северного, Среднего и Южного Каспия. Для всех районов моря максимум наблюдается в сентябре. Наибольшее максимальное значение испарения отмечается для Южного Каспия (155,79 мм), а наименьшее – для Северного (117,69 мм). Наименьшее значение испарения наблюдается в Среднем Каспии в мае и составляет 26,53 мм. Минимум испарения для Северного и Южного Каспия отмечается в апреле. Наибольшее минимальное значение отмечается для Северного Каспия (41,98 мм). Как было сказано ранее, такое распределение испарения связано с пространственным распределением

температуры и льда. Наибольший размах колебаний отмечается для Южного Каспия и составляет 129,90 мм. Наименьший размах колебаний наблюдается для северного района моря и составляет 75,71 мм.

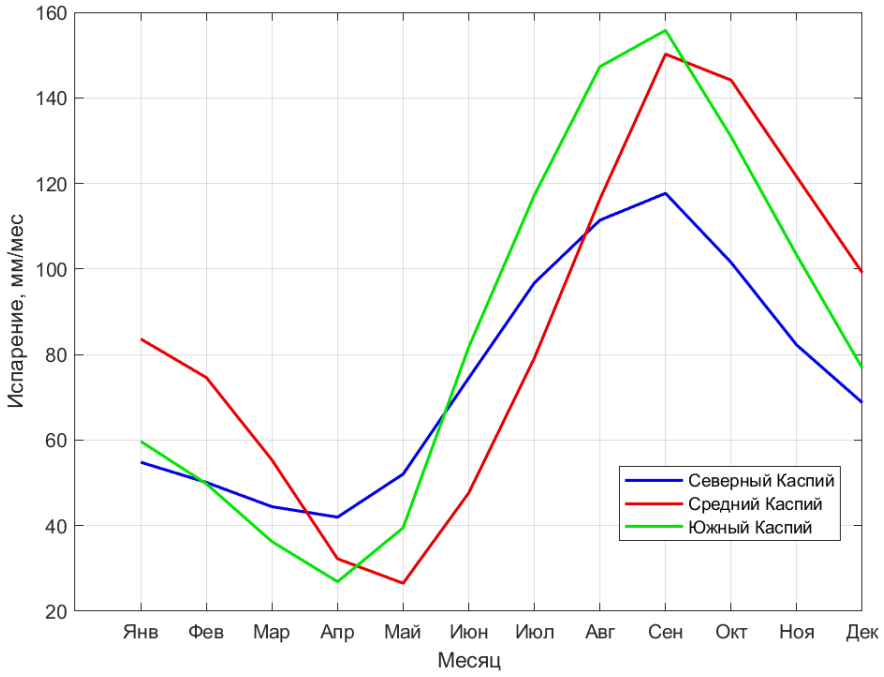



Рисунок 2.3 Сезонная изменчивость испарения с акватории Каспийского моря для трех районов моря за период с 1978 по 2024 годы

Также в данной работе был проанализирован сезонный ход климатических значений испарения для периодов повышения и понижения уровня моря (рисунок 2.4). Максимальное значение испарения как для периода повышения, так и для периода понижения уровня, и, соответственно, для всего периода в целом, отмечается в сентябре. Наибольшего значения испарение достигает в период понижения уровня (104,85 мм). Минимум для периода повышения УКМ наблюдается в мае и составляет 22,68 мм. Для периода понижения уровня минимум наблюдается в апреле и составляет 23,89 мм. Минимум испарения для всего рассматриваемого периода также отмечается в апреле (24,00 мм).

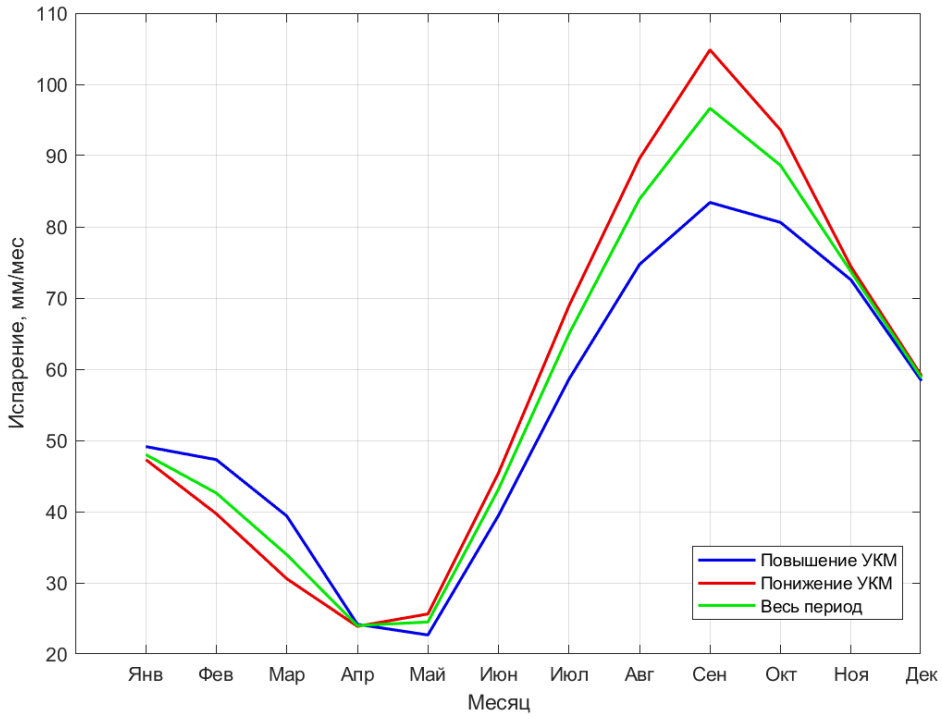



Рисунок 2.4 Сезонная изменчивость испарения с акватории Каспийского моря для периодов повышения (1978-1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) УКМ, а также для всего рассматриваемого периода (1978-2024 гг.)

Также необходимо уделить внимание пространственной изменчивости испарения с акватории Каспийского моря. На рисунке 2.5 представлена карта пространственного распределения климатических значений испарения за период с 1978 по 2024 год, полученная путем обработки данных архива ERA-5 по причине его наибольшего пространственного разрешения. Использование сразу трех архивов для карты пространственного распределения было признано нецелесообразным. Интерполяция архивов с меньшим пространственным разрешением привела бы к излишнему сглаживанию, а осреднение на более крупную сетку – к потере информации.

Вблизи береговой черты Северного Каспия отмечаются наименьшие значения испарения: 300-400 мм/год. Наибольшие значения наблюдаются в центральных районах Среднего и Южного Каспия. Здесь величина испарения достигает значений 1100 – 1200 мм. Наибольшие пространственные градиенты наблюдаются у берегов Северного Каспия. Такое пространственное

распределение испарения отражает особенности гидрологического режима моря. Меридиональные градиенты температур воды и воздуха объясняют распределение минимумов и максимумов испарения. Так, температуры воды и воздуха увеличиваются с севера на юг, и, значения испарения также возрастают в южном направлении. Также стоит отметить влияние ледового покрова в зимние месяцы. Ледообразование происходит только в Северном Каспии, что препятствует испарению с северной части акватории зимой.

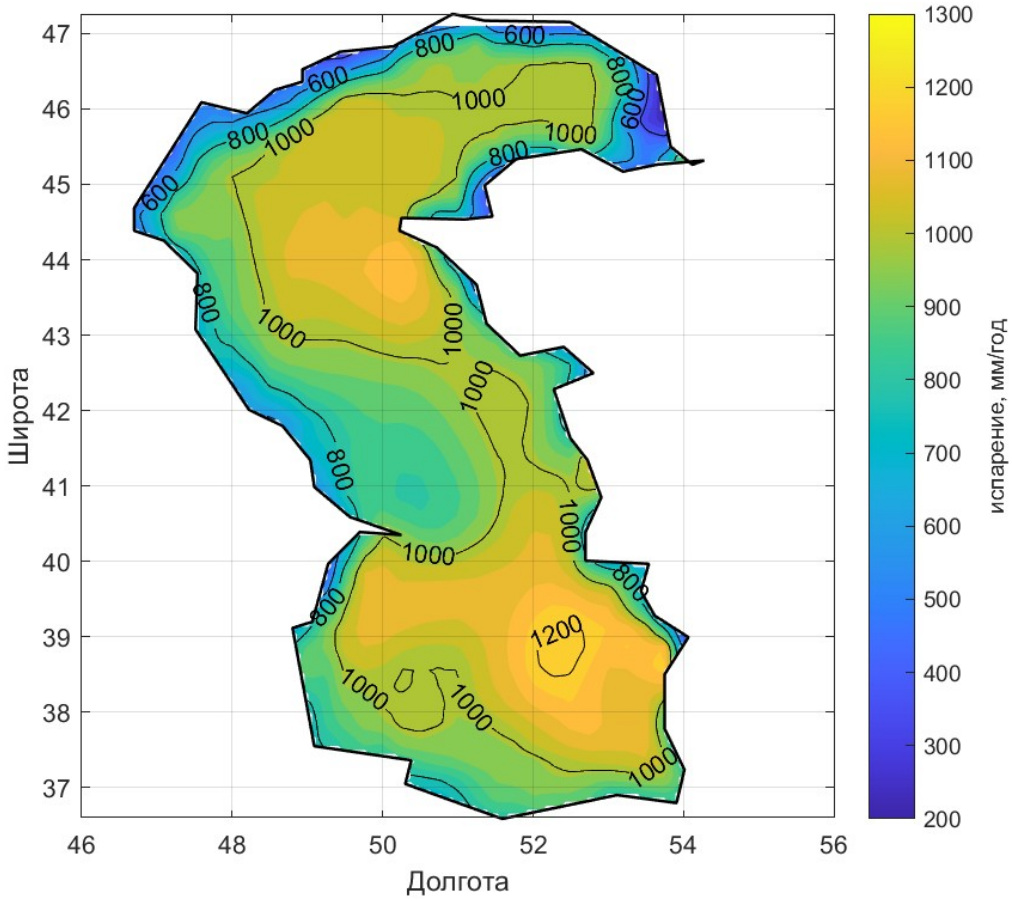



Рисунок 2.5 Пространственное распределение климатических значений испарения с акватории Каспийского моря за период 1978-2024 гг.

В таблице 2.2 представлены основные статистические характеристики испарения для периодов повышения и понижения уровня Каспийского моря. Среднее значение в период понижения уровня моря превышает среднее значение испарения в период повышения УКМ на 109,04 мм/год. Стандартные отклонения испарения для обоих периодов примерно равны и составляют 50,68 мм и 46,91

мм для периодов повышения и понижения уровня соответственно. Коэффициенты вариации равны 0,06 и 0,05 для периодов повышения и понижения уровня соответственно. Тренд для периода повышения уровня является значимым и составляет 3,15 мм/год. Коэффициент детерминации равен 0,11. Для периода понижения уровня величина тренда составляет 0,68 мм/год, а коэффициент детерминации равен 0,015. Тренд также является значимым.

Таблица 2.2 Статистические характеристики испарения с акватории Каспийского моря для периодов повышения (1978—1995 гг.) и понижения (с 1996 г.) уровня Каспийского моря

| Период | Характеристики | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_{ср}$, мм/год | СКО, мм/год | К-т вариации | Tr, мм/год | $R^2$ |
| Повышение уровня (1978—1995 гг.) | 916,52 | 50,68 | 0,06 | 3,15 | 0,11 |
| Понижение уровня (с 1996 г.) | 1025,56 | 46,91 | 0,05 | 0,68 | 0,015 |

Таким образом, испарение как в период повышения уровня Каспийского моря, так и в период его понижения, имеет положительные тренды. Такие тренды в основном задаются в Южном и Среднем районах моря, а в Северном Каспии тренды отсутствуют. В сезонном ходе испарения выделяются осенний максимум и весенний минимум. В Северном Каспии наблюдается наименьшая сезонная амплитуда колебаний, а в Южном – наибольшая. При анализе пространственного распределения климатических значений испарения стоит отметить, что минимум испарения отмечается у побережья Северного Каспия, а максимум – в центральных районах Среднего и Южного Каспия.

# ГЛАВА 3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСАДКОВ ДЛЯ ПЕРИОДОВ ПОВЫШЕНИЯ И ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Оценка количества осадков по данным натурных измерений для акватории Каспийского моря также обладает существенными недостатками. Также как и для испарения это связано с малым числом станций и отсутствием регулярных наблюдений на открытой акватории моря. в работе [19] приведен анализ оценок осадков разных авторов (таблица 3.1).

Расхождение между крайними среднемноголетними оценками осадков (246 мм и 194 мм) составляет 52 мм или 25 % от общей средней (208 мм). В работе Нестерова [3] дается диапазон изменчивости оценок осадков по данным разных авторов, среднее значение которого равно 218 мм. В работе [11] также приводится среднее значение по данным разных авторов, которое, как нетрудно видеть, заметно ниже аналогичных оценок, полученных другими авторами. Все это свидетельствует о явно неудовлетворительном состоянии определения осадков над акваторией моря на основе использования стационарных метеорологических станций. Однако с учетом того, что величина осадков в несколько раз меньше притока речных вод и испарения, это во многих случаях позволяет удовлетворительно замыкать уравнение водного баланса моря.

Таким образом, для оценки количества осадков над Каспийским морем также необходимо привлекать альтернативные источники данных. На сегодняшний день в качестве таких источников выступают архивы спутникового ре-анализа. Однако, также как и для испарения, оценка точности таких данных практически невозможна по причине отсутствия подспутниковых измерений и описания методик и алгоритмов определения осадков в архивах ре-анализа.

В работе [19] рассмотрены 4 архива ре-анализа: ERA-5, MERRA-2, R1 и R2. Они были объединены попарно ERA-5 и MERRA-2 ($P_{(ERA,MERRA))}$, R1 и R2 ($P_{(R-1,R-2)}$) по причине их большого сходства между собой. При этом отмечается

существенное завышение значений $P_{(ERA,MERRA)}$ по отношению к $P_{(R-1,R-2)}$ и более чем в 1,5 раза к климатологическим оценкам осадков, определенных по данным метеорологических станций. В связи с этим в этой работе рассматриваются только осредненные осадки $P_{ср}$ по архивам R-1 и R-2.

Таблица 3.1 Климатические оценки осадков над Каспийским морем по метеорологическим данным в XX столетии

| Автор | Год публикации | Период наблюдений | Оценка, мм/год |
|---|---|---|---|
| Малинин [20] | 1994 | XX столетие | 194—246 |
| Терзиев, Никонова [25] | 2003 | XX столетие | 192 |
| Нестеров [3] | 2016 | XX столетие | 171—263 |
| Костяной и др. [11] | 2025 | XX столетие | 180 |

На рисунке 3.1 представлены графики межгодового хода осадков и уровня Каспийского моря. Как для периода повышения уровня, так и для периода его понижения наблюдается уменьшение количества осадков. Для периода повышения уровня моря отмечается отрицательный тренд, величина которого составляет -2,63 мм/год. Тренд значимый. Для периода понижения уровня также наблюдается отрицательный тренд, величина которого составляет -2,60 мм/год. Тренд также значимый. Величины трендов для периодов повышения и понижения уровня почти равны.

Также стоит отметить, что в ходе осадков прослеживается значимый положительный локальный тренд для периода с 1989 по 2006 год. Величина этого тренда составляет 11,77 мм/год.

Для периода повышения уровня моря минимальное значение количества осадков составило 118,21 мм в 1989 году. Максимум для этого периода наблюдался в 1981 году и составил 256,95 мм. Для периода понижения УКМ максимум был достигнут в 2006 году и составил 368,78 мм, а минимум (149,81 мм) отмечался в 2021 году. Абсолютный максимум для всего рассматриваемого

периода совпадает с максимумом в период понижения уровня, а абсолютный минимум для всего периода – с минимумом в период повышения УКМ.

Такое поведение осадков представляется достаточно странным. Учитывая, что осадки – приходная компонента водного баланса, то при увеличении количества осадков с течением времени величина уровня моря должна повышаться, а при уменьшении осадков – уровень должен уменьшаться. В данном случае из графика мы видим, что количество осадков уменьшается как в период понижения уровня, так и в период его повышения. Однако, как будет рассмотрено далее, осадки составляют крайне малую часть водного баланса Каспийского моря по сравнению с другими компонентами, и такое их поведение компенсируется другими характеристиками.

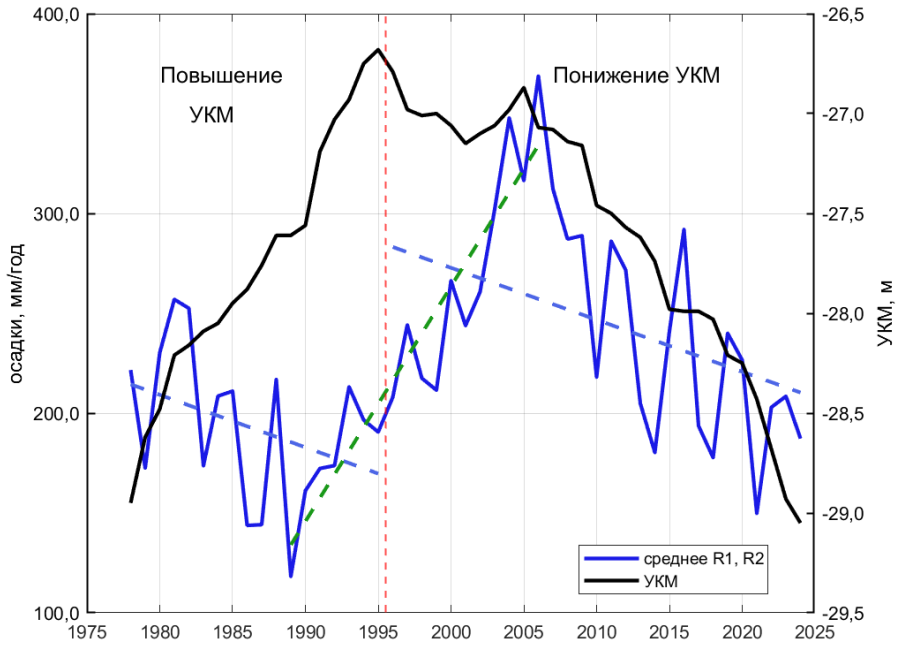



Рисунок 3.1 Межгодовой ход осадков и УКМ за периоды повышения (1978 – 1995гг) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

На рисунке 3.2 представлен межгодовой ход осадков для трех районов Каспийского моря: Северного, Среднего и Южного Каспия. В период повышения уровня моря наибольшие значения выпавших на акваторию осадков достигаются в Южном Каспии: до 388,19 мм в 1982 году. Минимум осадков в период повышения уровня моря отмечался в Среднем Каспии в 1989 году, когда на

акваторию моря выпало всего 54,62 мм. В период повышения УКМ наибольших значений осадки достигали также в южной части моря и абсолютный максимум для этого периода составил 470,64 мм в 2020 году. Колебания осадков в Среднем и Северном Каспии очень близки, однако абсолютный минимум достигается в Среднем Каспии в 2022 году и составляет 88,96 мм. Таким образом, минимальное значение для всего рассматриваемого периода (1978-2024 гг.) достигается в период повышения уровня моря (в 1989 году), а максимум для всего периода отмечается в период понижения уровня в 2020 году. Наибольшие значения выпавших на акваторию моря осадков на протяжении всего исследуемого периода отмечаются в Южном Каспии. Межгодовая изменчивость осадков в Среднем и Северном Каспии схожа.

Также стоит отметить, что тренды, отмеченные ранее, задаются именно в северной и средней частях моря, а в Южном Каспии не прослеживаются.

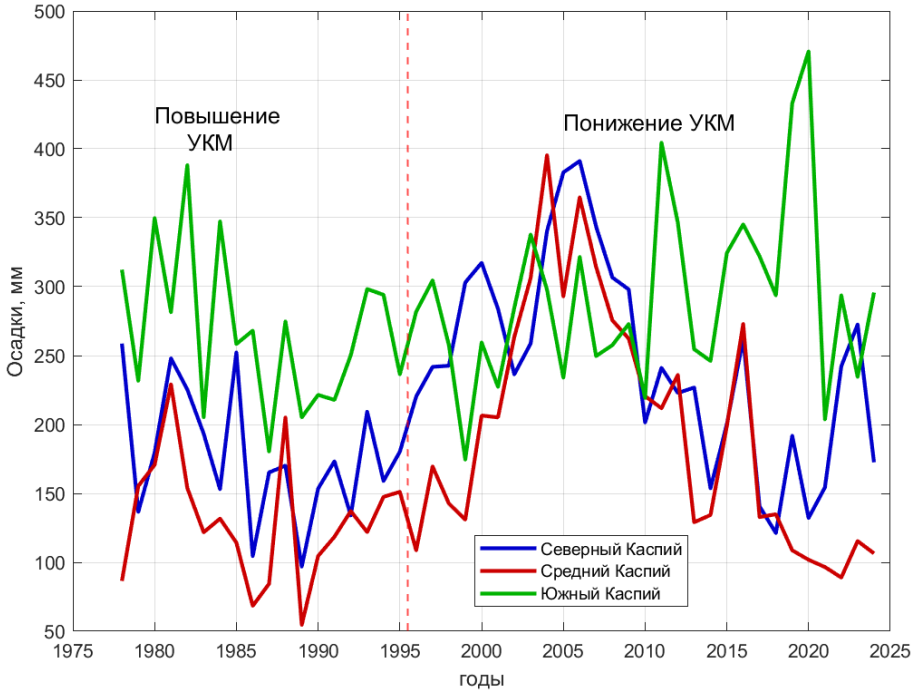



Рисунок 3.2 Межгодовой ход осадков для трех районов Каспийского моря за периоды повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

На рисунке 3.3 приведен сезонный ход осадков для всей акватории моря для периодов повышения и понижения уровня моря и для всего

рассматриваемого периода. Для всех рассматриваемых периодов наблюдаются главный максимум в ноябре, локальный максимум в феврале и минимум в августе. Наибольшая амплитуда колебаний отмечается для периода понижения уровня моря. Размах колебаний для этой кривой составляет 32,05 мм. Для периода понижения УКМ отмечаются наибольшие главный и локальный максимумы: 35,86 мм и 32,56 мм соответственно, а также наименьший минимум 3,81 мм. Для периода повышения уровня наблюдается наименьшая амплитуда колебаний, равная 20,57 мм. Отсюда следует, что для этого промежутка времени, по сравнению с другими, главный (26,93 мм) и локальный (21,18 мм) максимумы принимают наименьшие значения, а минимум (6,36 мм) – наибольшее. В целом, величина выпавших на акваторию моря осадков снижается в летние месяцы и значительно увеличивается в зимние.

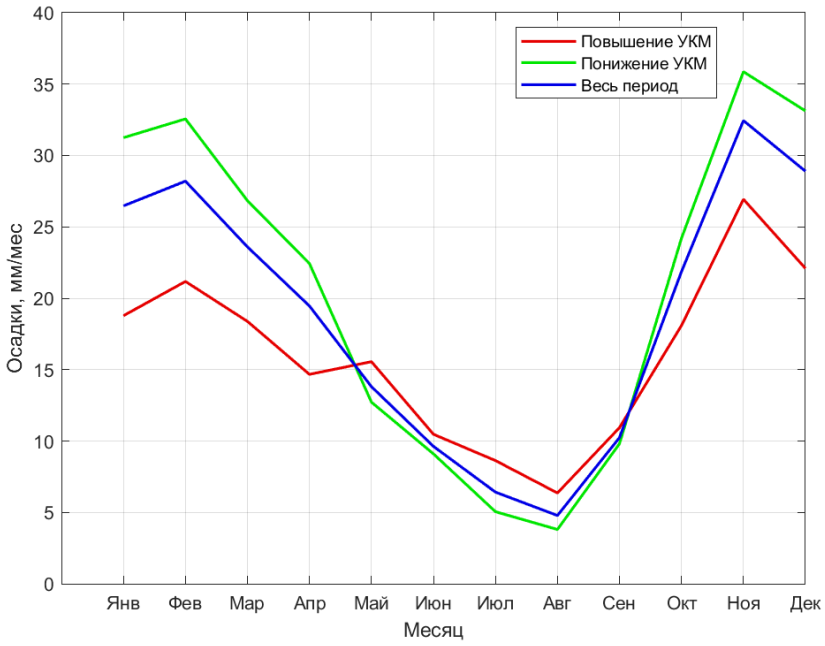



Рисунок 3.3 Сезонный ход осадков для периодов повышения (1978-1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) УКМ, а также для всего расчетного периода (1978-2024 гг.)

На рисунке 3.4 представлены графики сезонных колебаний осадков, выпавших на акваторию Каспийского моря для трех районов: Северного, Среднего и Южного Каспия. Здесь также наблюдаются по два максимума в

зимний период и один минимум в летний период для каждой кривой, однако их наступление не совпадает. Для Южного Каспия отмечается наибольшая амплитуда колебаний. Главный максимум в этом районе моря отмечается в ноябре и составляет 51,04 мм. Локальный максимум приходится на февраль и составляет 41,23 мм. Минимум (3,26 мм) отмечается в июле. Размах колебаний для южного района моря составляет 47,78 мм. Для Северного и Среднего Каспия наблюдается меньшая амплитуда колебаний по сравнению с южным районом моря. Для Среднего Каспия главный максимум (24,19 мм) достигается в ноябре, а локальный (20,52 мм) в феврале. Минимум в этом районе моря отмечается в августе и составляет 3,24 мм. Размах колебаний составил всего 20,95 мм. Для Северного Каспия главный максимум наблюдается в декабре и составляет 25,75 мм. Локальный максимум в этом районе море также отмечается в феврале, он равен 23,64 мм. Минимальное значение выпавших на акваторию Северного Каспия осадков составляет 7,94 мм и приходится на август. Таким образом главный максимум осадков приходится на ноябрь и только в северном районе моря смещается к декабрю. Локальный максимум на всей акватории моря отмечается в феврале. Минимум осадков приходится на август, однако в Южном Каспии смещается к июлю.

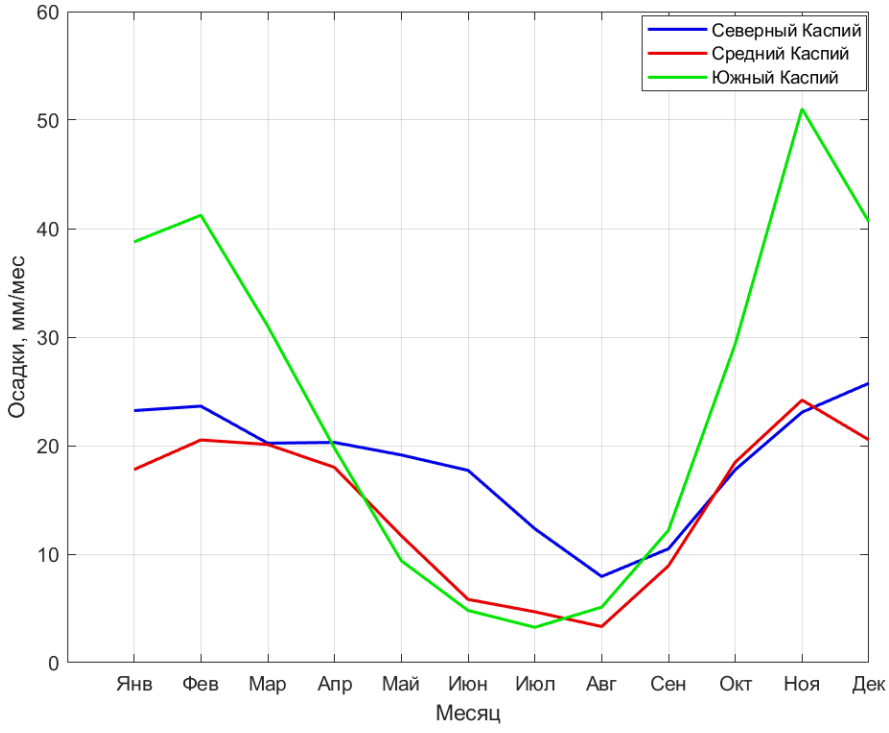


Рисунок 3.4 Сезонный ход осадков для трех районов Каспийского моря за период с 1978 по 2024 год

В таблице 3.2 приведены простые статистические характеристики осадков для периода повышения уровня моря и его понижения. Средняя величина осадков за весь рассматриваемый период составляет 218,48 мм. В период понижения уровня среднее значение осадков составляет 244,87 мм/год и превышает количество осадков в период повышения уровня (192,08 мм/год) на 52,79 мм/год.

Стандартное отклонение в период понижения уровня моря (53,6 мм/год) также превышает стандартное отклонение в период повышения УКМ (37,9 мм/год).

Величины трендов для периода повышения (-2,63 мм/год) и понижения (-2,60) уровня моря различаются всего на 3 сотых и оба являются отрицательными, что говорит об уменьшении количества осадков в оба периода.

Коэффициенты детерминации для периодов повышения и понижения уровня моря равны соответственно 0,14 и 0,11.

Таблица 3.2 Статистические характеристики осадков для периодов повышения (1978-1995гг) и понижения (1996-2024гг) УКМ

| Архив | Статистические характеристики | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_{ср}$, мм/год | СКО, мм/год | К-т вариации | Tr, мм/год | $R^2$ |
| Рост уровня (1978—1995 гг.) | 192,08 | 37,9 | 0,20 | −2,63 | 0,14 |
| Понижение уровня (с 1996 г.) | 244,87 | 53,6 | 0,22 | -2,60 | 0,11 |

На карте пространственного распределения климатических значений осадков за период с 1978 по 2024 год (рисунок 3.5) можно явно выделить область максимальных значений выпавших осадков над юго-западным районом моря. К

северу и востоку эти значения снижаются. Минимальное количество осадков (менее 100 мм/год) выпадает вблизи восточного побережья моря в его центральной части и у залива Кара-Богаз-Гол. Наибольший пространственный широтный градиент отмечается в южном районе моря примерно в районе 39 градусов северной широты. Наименьший пространственный широтный градиент расположен в северной части моря, где изменение величины осадков при движении в широтном направлении практически не наблюдается.

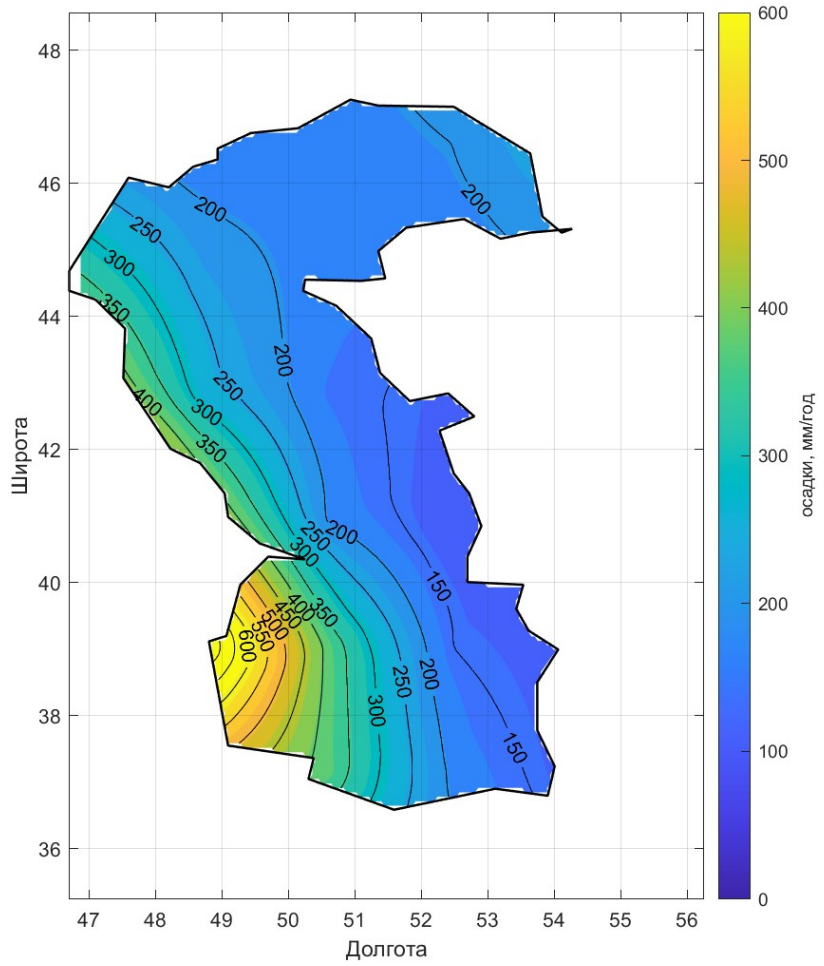



Рисунок 3.5 Карта пространственного распределения климатических значений осадков на акватории Каспийского моря за период с 1978 по 2024 год

Выраженная плавность изолиний на рисунке 3.5 обусловлена низким пространственным разрешением используемых архивов ре-анализа и, как следствие, значительным осреднением количества осадков, распределенных на больших площадях. Тем не менее, несмотря на грубость представленной карты, она достоверно отражает главные особенности распределения климатических

значений осадков, выпавших на акваторию Каспийского моря за период с 1978 по 2024 год.

В результате можно отметить, что как в период повышения УКМ, так и в период его понижения для осадков наблюдаются отрицательные тренды, то есть значение осадков уменьшается с течением времени. Однако в период с 1989 по 2006 год отмечается локальный положительный тренд. Тренды осадков в Каспийском море задаются в северном и среднем районах моря. В анализе сезонной изменчивости осадков выявлено два максимума – осенью и зимой, а также летний минимум. Наибольшие значения осадков наблюдаются в Южном Каспии. При анализе пространственного распределения климатических значений осадков было отмечено, что их максимум достигается в юго-западном районе моря, а минимум – вблизи пролива Кара-Богаз-Гол.

В работе [19] предложена концепция косвенной оценки точности осадков. Прямую оценку произвести невозможно по причине отсутствия подспутниковых экспериментов. За некоторый длительный период времени уравнение водного баланса Каспийского моря имеет следующий вид:

$$n^{-1}\sum(\nu_{(Q+P)i} - \nu_{(E+q)i}) - \Delta h = \eta$$

где $\nu_{(Q+P)i}$ — приток воды к морю за счет годового суммарного стока речных вод ($Q_{сум}$) и выпадения осадков на поверхность моря (P) в *i*-тый год, в см, $\nu_{(E+q)i}$ — отток воды за счет годовых значений испарения (E) и стока в з. Кара-Богаз-Гол (q) в *i*-тый год, в см, $\Delta h$ — разность между конечным ($h_{кон}$) и начальным ($h_{нач}$) значением уровня Каспия, $\eta$ — невязка (суммарная систематическая погрешность) компонент водного баланса.

Несмотря на простой вид представленного уравнения, оценка невязки компонент водного баланса представляет существенные сложности, ибо кроме ошибок приходных и расходных компонент баланса необходимо дополнительно учитывать ошибки величин $\Delta h$. Ошибок $\Delta h$ можно избежать, если в качестве начального и конечного уровня задать одну и ту же его величину. В этом случае $\Delta h = h_{кон} - h_{нач} = 0$.

В работе [19] в качестве «реперных» значений уровня приняты его оценки через 0,5 м: −27,0, −27,5 … −29,0 м. За рассматриваемый период 1978—2024 гг. начальная оценка −27,0 м отмечалась в 1992 г., конечная – в 2006 г., т. е. продолжительность периода составила 15 лет (табл. 3.3). Продолжительность следующих периодов увеличивалась по нарастающей. Как видно из табл. 3.3 только для уровня −28 м невязка по модулю была выше 1 см. Это связано со стоком Волги ниже нормы и одновременно испарением выше нормы в промежутке уровня между −27, 5 и −28,0 м. Для остальных периодов невязка меньше 1 см, причем для длинных промежутков (более 35 лет) она стремится к нулю. Выполненные расчеты свидетельствуют о полной согласованности компонент водного баланса. Если в компонентах водного баланса присутствуют систематические ошибки, то они за счет разных знаков компенсируют друг друга. Итак, осредненные над морем спутниковые осадки $P_{ср}$, рассчитанные по архивам R-1 и R-2, имеют вполне достаточную точность с точки зрения воднобалансовых расчетов.

Таблица 3.3 Оценки невязки уравнения водного баланса для различных промежутков времени при условии $\Delta h_{ср} = 0$

| Отметка уровня, м. | Продолжительность периода, годы | Длина периода, годы | $\sum(v_{(Q+P)i} — v_{(E+q)i})$, см | Невязка, см/год |
|---|---|---|---|---|
| −27,0 | 1992—2006 | 15 | 10,6 | 0,70 |
| −27,5 | 1990—2011 | 15+7 = 22 | −17,75 | −0,80 |
| −28,0 | 1984—2018 | 22+13 = 35 | −45,85 | −1,3 |
| −28,5 | 1980 —2021 | 35+7 = 42 | −7,13 | −0,17 |
| −29,0 | 1978—2024 | 42+ 5 = 47 | 10,05 | 0,22 |

Средняя величина осадков, рассчитанных по данным архивов ре-анализа, за весь рассматриваемый период составляет 218,48 мм или 21,85 см. Наибольшая по модулю невязка составляет 5,9% от среднего количества осадков, что говорит об удовлетворительном качестве результатов.

# ГЛАВА 4. ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОМПОНЕНТ ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Как уже говорилось ранее, Каспийское море – замкнутый водоем, не имеющий связи с океаном. Вследствие этого на водный баланс моря оказывают влияние приходные – речной сток (Q) и осадки (P), и расходные – испарение E и, с 1996 года, сток в залив Кара-Богаз-Гол ($Q_{КБГ}$) компоненты. На рисунке 4.1 представлена схема водного баланса и его влияния на изменение уровня Каспийского моря.

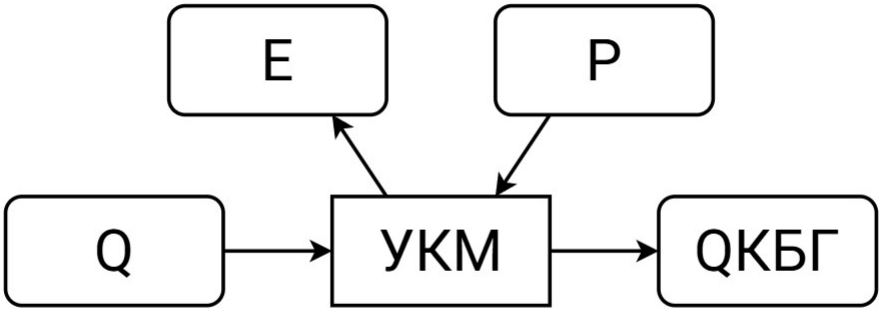



Рисунок 4.1 Схема водного баланса Каспийского моря

Таким образом уравнение водного баланса для Каспийского моря выглядит следующим образом:

$$Б_i = Q_i + P_i - E_i - Q_{КБГ}$$

Где $Б_i$ – водный баланс, мм, $Q_i$ – речной сток, мм, $P_i$ – осадки, мм, $E_i$ – испарение с акватории моря, мм, $Q_{КБГ}$ – сток в залив Кара-Богаз-Гол, мм, i – годы.

Сток в залив Кара-Богаз-Гол учитывается только с 1996 года, то есть для периода понижения УКМ. Это сделано по причине того, что сток в залив КБГ оказывает большое влияние на снижение уровня моря, а до разрушения дамбы являлся совершенно незначительным.

Рассмотрим вклад каждой характеристики в водный баланс Каспийского моря. Для более наглядного представления соотношения компонент водного баланса на рисунке 4.2 представлена гистограмма соотношения компонент водного баланса. Как видим из гистограммы, наибольший вклад вносит испарение (48,14%), а наименьший отмечается для стока в залив Кара-Богаз-Гол (2,19%). Речной сток также вносит значительный вклад в водный баланс моря, составляя 38,74% от него. Вклад осадков в водный баланс Каспийского моря по сравнению с испарением и речным стоком довольно мал и составляет всего 10,92%. Этим соотношением объясняется слабое влияние снижения количества осадков в период повышения уровня.

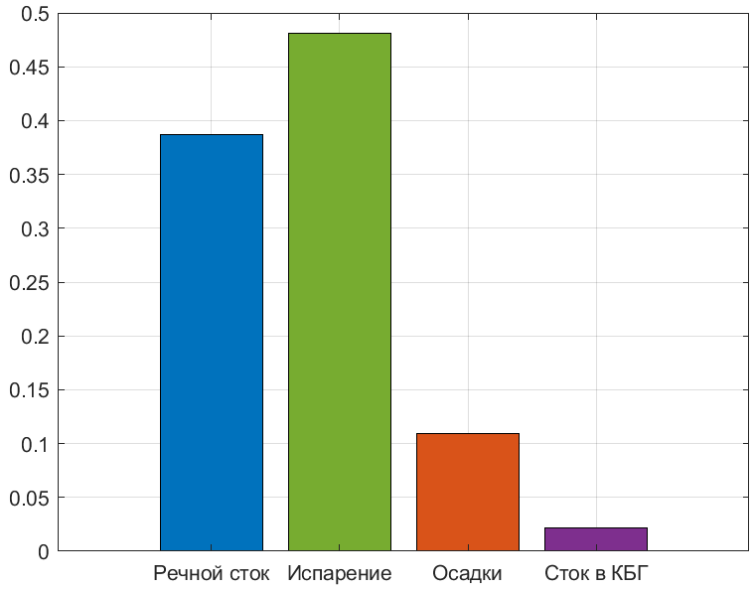



Рисунок 4.2 Гистограмма соотношения компонент водного баланса

На рисунке 4.3 представлен график аномалий компонент водного баланса, то есть отклонений значений характеристик от среднего.

Наибольшие аномалии наблюдаются для речного стока. В период повышения уровня моря значения аномалий речного стока достигает 286,83 мм в 1979 году, а в период понижения УКМ -257,71 мм в 1996 году. Наименьшие аномалии отмечаются для стока в залив Кара-Богаз-Гол по причине того, что сами значения стока минимальны. Максимального положительного аномального

значения (28,07 мм) сток в залив КБГ достигает в 1996 году, а максимальная отрицательная аномалия (-16,51 мм) отмечается в 2015 году.

Интересным представляется сходство поведения аномалий осадков и испарения. Несмотря на то, что из всех компонент водного баланса наибольших значений достигает испарение, величины его аномалий близки к аномалиям осадков, которые расположены лишь на третьем месте по количественному распределению. Наибольшая положительная аномалия для испарения приходится на 2005 год, то есть на период понижения уровня моря, и составляет 139,36 мм. Наибольшая отрицательная аномалия испарения отмечается в 1981 году, то есть в период повышения уровня моря. Она составила -127,02 мм.

Для осадков наибольшая положительная аномалия (142,97 мм) также приходится на период понижения УКМ и отмечается в 2006 году. Наибольшая отрицательная аномалия для осадков (-107,60 мм) наблюдается в 1989 году.

Для периода повышения уровня Каспийского моря характерны значительные положительные аномалии речного стока, а также отрицательные аномалии испарения, что свидетельствует о преобладании приходных компонент водного баланса и приводит к повышению уровня моря, что мы и наблюдаем в этот период. С 1996 года для речного стока преобладают отрицательные аномалии, а для испарения – положительные, что также соотносится с понижением уровня моря в этот период.

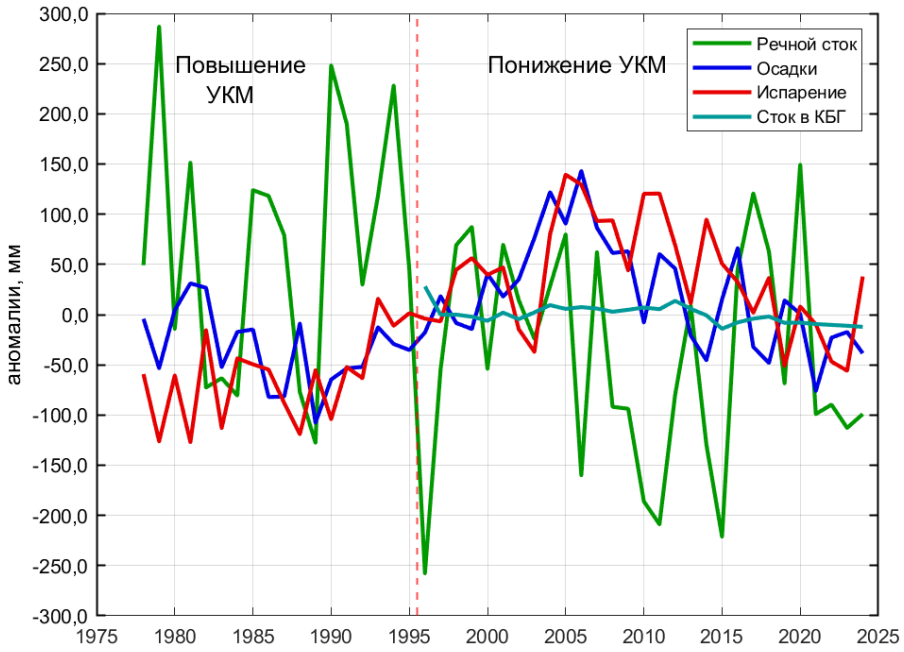



Рисунок 4.3 Аномалии компонент водного баланса для периодов повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

Графики межгодовой изменчивости водного баланса и уровня Каспийского моря приведены на рисунке 4.4. Стоит отметить значительный размах колебаний водного баланса. Например, в 1979 году его величина составила 391,19 мм, что соответствует максимальному значению водного баланса. Это свидетельствует о том, что в этот год сумма приходных компонент водного баланса превышала испарение на наибольшую величину. Минимум водного баланса, то есть год максимального превышения расходными компонентами приходных, приходится на 2010 год, когда величина водного баланса составляла -335,1 мм. Для периодов повышения и понижения УКМ наблюдаются отрицательные тренды. Это значит, что со временем растет преобладание расходных компонент водного баланса над приходными. В первую очередь это можно объяснить появлением дополнительной расходной компоненты баланса в период понижения УКМ – стока в залив Кара-Богаз-Гол. Почти на всем протяжении периода повышения уровня моря водный баланс положителен, что говорит о преобладании приходных компонент баланса. Это согласуется с поведением УКМ: положительный водный баланс обеспечивает повышение уровня моря. В период

понижения УКМ отмечаются отрицательные значения водного баланса, что также согласуется и объясняется преобладанием расходных компонент баланса.

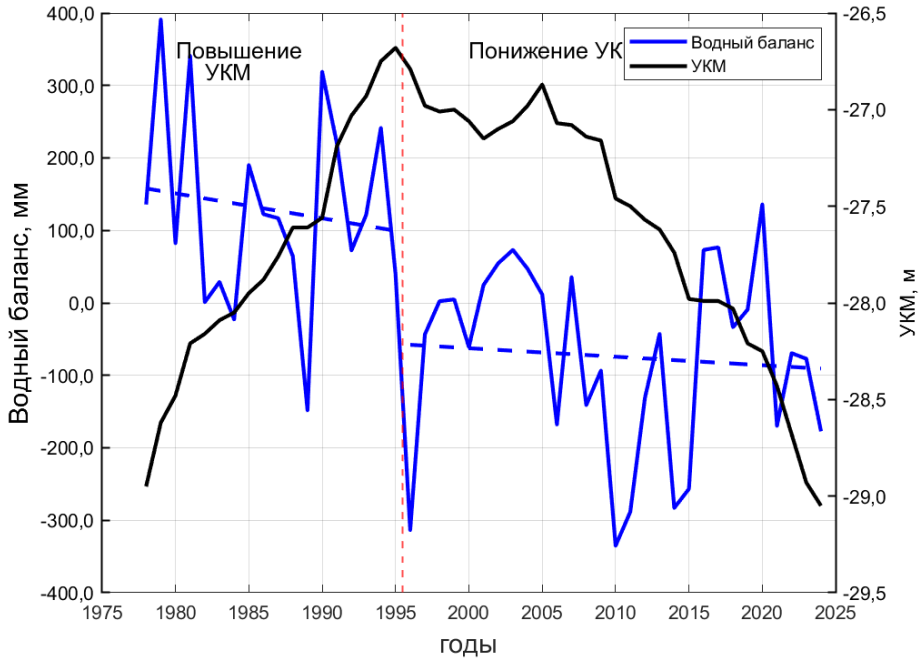



Рисунок 4.4 График межгодовой изменчивости водного баланса и УКМ для периодов повышения (1978 – 1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

Проанализируем вклад компонент водного баланса в приходную и расходную части. Наибольший вклад в приходную часть баланса вносит речной сток: 78,01%. Вклад осадков в приходную часть водного баланса составляет 21,99%. Для периода повышения уровня моря 100% расходной части водного баланса приходится на испарение. Сток в залив Кара-Богаз-Гол учитывается только с 1996 года. Тогда для периода понижения УКМ вклад испарения в расходную часть баланса составляет 95,58%. На сток в залив Кара-Богаз-Гол приходится лишь 4,42%.

Рассмотрим также вклад компонент водного баланса в его дисперсию отдельно для периодов повышения и понижения уровня моря (таблица 4.1). Как для периода повышения УКМ, так и для периода его понижения наибольший вклад в дисперсию баланса вносит речной сток: для периода повышения уровня

это 82,73%, а для периода понижения 69,41%, то есть вклад речного стока для периода понижения УКМ меньше, чем для периода его повышения. В период повышения УКМ наименьший вклад в дисперсию водного баланса вносят осадки – всего 7,66%. Для периода понижения УКМ наименьший вклад в дисперсию вносит сток в залив Кара-Богаз-Гол и составляет 0,48%. При этом вклад испарения и осадков для периода понижения УКМ увеличился, по сравнению с периодом повышения уровня. Сумма вкладов компонент водного баланса в его дисперсию не равна 100% по причине наличия ковариационных связей между компонентами баланса. Ковариационные связи в данной работе не рассматриваются.

Таблица 4.1 Вклад компонент водного баланса в его дисперсию для периодов повышения (1978-1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

| Компонента водного баланса | Повышение УКМ | Понижение УКМ |
|---|---|---|
| Речной сток | 82,73% | 69,41% |
| Испарение | 10,10% | 18,14% |
| Осадки | 7,66% | 16,93% |
| Сток в КБГ | - | 0,48% |

Также необходимо проанализировать влияние каждой компоненты водного баланса на колебания уровня Каспийского моря, а именно – на внутригодовые приращения уровня моря. В таблице 4.2 приведены коэффициенты корреляции между приращениями УКМ и компонентами водного баланса.

Наибольший коэффициент корреляции 0,70 отмечается для речного стока в период повышения УКМ. Для периода понижения уровня корреляция с речным стоком также высокая (0,67). Оба коэффициента корреляции являются значимыми.

Для периода повышения уровня коэффициент корреляции между испарением и внутригодовыми приращениями уровня составляет -0,43 и

является значимым. Наблюдается обратная связь, то есть при увеличении приращений уровня испарение понижается. Для периода понижения уровня между осадками и приращениями уровня наблюдается положительный значимый коэффициент корреляции 0,38. Эти коэффициенты корреляции являются физически обоснованными.

Таблица 4.2 Коэффициенты корреляции между компонентами водного баланса и внутригодовыми приращениями уровня Каспийского моря для периодов повышения (1978-1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря

| | Повышение УКМ | Понижение УКМ |
|---|---|---|
| Речной сток | 0,70 | 0,67 |
| Испарение | -0,43 | 0,19 |
| Осадки | -0,08 | 0,38 |
| Сток в КБГ | | 0,36 |

В период повышения УКМ коэффициент корреляции между осадками и уровнем отрицателен и составляет -0,08. С физической точки зрения снижение количества осадков в период повышения уровня достаточно странно. Еще более странным является снижение испарения в период понижения УКМ (коэффициент корреляции составляет 0,19). Коэффициенты корреляции между испарением и уровнем в период понижения УКМ, а также осадками и уровнем в период его повышения являются незначимыми.

Для периода понижения уровня между УКМ и стоком в залив Кара-Богаз-Гол коэффициент корреляции равен 0,36. Коэффициент корреляции значим.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено поведение основных компонент водного баланса Каспийского моря – испарения и осадков, а также произведен анализ всего водного баланса моря для периодов длительного повышения (1978-1995 гг.) и понижения (1996-2024 гг.) уровня моря.

Рассмотрено сравнение результатов расчета испарения с акватории Каспийского моря по данным береговых и островных станций разных авторов. Для испарения с акватории Каспийского моря выполнен анализ межгодового хода, как в среднем для всей акватории моря, так и для трех его районов: Северного, Среднего и Южного Каспия. Также проанализирован сезонный ход испарения для трех районов моря за весь рассматриваемый период, а также для всей акватории моря в периоды повышения и понижения УКМ и для всего рассматриваемого интервала времени. Проведен анализ пространственного распределения климатических значений испарения с акватории моря, выявлены области максимальных и минимальных значений испарения. Вычислены основные статистические характеристики испарения для периодов повышения и понижения уровня Каспийского моря.

Абсолютный максимум испарения для всего рассматриваемого периода отмечается в период понижения уровня моря (1109,73 мм в 2005 году), а минимум - в период повышения УКМ (816,41 мм в 1979 году). Для периодов повышения и понижения уровня Каспийского моря для испарения наблюдаются положительные тренды (3,15 мм/год и 0,68 мм/год соответственно). При повышении УКМ величина испарения увеличивается почти в 5 раз быстрее, чем при его понижении. Также был отмечен 2005 год как переломный для испарения. С 2005 года в межгодовом ходе испарения выделяется отрицательный значимый тренд, величина которого составляет -4,56 мм/год. Эти тренды в большей степени задаются в Южном и Среднем районах моря, а в Северном Каспии отмечаются случайные колебания. В сезонном ходе испарения

выделяются осенний максимум и весенний минимум. В Северном Каспии наблюдается наименьшая сезонная амплитуда колебаний. Минимальное значение испарения здесь составляет 41,98 мм/мес, а максимальное 117,69 мм/мес, то есть размах колебаний составляет 75,71 мм. В Южном Каспии отмечается наибольшая амплитуда колебаний. Размах колебаний для Южного Каспия составляет 129,90 мм. Максимальное сезонное значение испарения как для периода повышения, так и для периода понижения уровня, и, соответственно, для всего периода в целом, отмечается в сентябре. Наибольшего значения испарение достигает в период понижения уровня (104,85 мм/мес). Минимум для периода повышения УКМ (22,68 мм) наблюдается в мае. Для периода понижения уровня минимум (23,89 мм) наблюдается в апреле. Минимум испарения для всего рассматриваемого периода (24,0 мм) также отмечается в апреле. При анализе пространственного распределения климатических значений испарения стоит отметить, что минимум испарения отмечается у побережья Северного Каспия и составляет 300-400 мм/год, а максимум – в центральных районах Среднего и Южного Каспия и составляет 1100-1200 мм/год.

Приведено сравнение работ разных авторов по расчету осадков, выпавших на акваторию Каспийского моря по результатам натурных данных. Сделан вывод о необходимости использования альтернативных методов оценки количества осадков. Для величины осадков, выпавших на акваторию Каспийского моря произведен анализ межгодового хода средних для всей акватории осадков. Рассмотрены тренды. Для трех районов моря: Северного, Среднего и Южного Каспия также рассмотрено межгодовое поведение осадков. Также проанализирован сезонный ход осадков для периода повышения и понижения уровня Каспийского моря и для всего рассматриваемого периода времени. Выявлены минимальные и максимальные значения осадков. Рассмотрен ход сезонных значений осадков для трех районов моря, также выявлены моменты наступления минимальных и максимальных значений. Проведен анализ пространственного распределения климатических значений осадков, отмечены

максимум и минимум, выявлены максимальный и минимальный пространственный градиент.

В результате можно отметить, что как в период повышения УКМ, так и в период его понижения для осадков наблюдаются отрицательные тренды (-2,63 мм/год и -2,60 мм/год соответственно), то есть значение осадков уменьшается с течением времени. Однако в период с 1989 по 2006 год отмечается локальный положительный тренд, величина которого составляет 11,77 мм/год. Тренды осадков в Каспийском море задаются в северном и среднем районах моря. В анализе сезонной изменчивости осадков за период с 1978 по 2024 год выявлено два максимума – осенью и зимой, а также летний минимум.

Абсолютный максимум количества осадков для всего рассматриваемого периода отмечается в период понижения уровня (368,78 мм в 2006 году), а абсолютный минимум - в период повышения УКМ (118,21 мм в 1989 году). Анализируя сезонный ход осадков для периодов повышения и понижения УКМ стоит отметить, что наибольшая амплитуда колебаний отмечается для периода понижения уровня моря. Размах колебаний для этого периода составляет 32,05 мм. Для периода понижения УКМ отмечаются наибольшие главный (35,86 мм) и локальный (32,56 мм) максимумы, а также наименьший минимум (3,81 мм). Для периода повышения уровня наблюдается наименьшая амплитуда колебаний, равная 20,57 мм. Отсюда следует, что для этого промежутка времени, по сравнению с другими, главный (26,93 мм) и локальный (21,18 мм) максимумы принимают наименьшие значения, а минимум (6,36 мм) – наибольшее. В целом, величина выпавших на акваторию моря осадков снижается в летние месяцы и значительно увеличивается в зимние. При анализе пространственного распределения климатических значений осадков было отмечено, что их максимум достигается в юго-западном районе моря (более 700 мм/год), а минимум – вблизи пролива Кара-Богаз-Гол (менее 100 мм/год). Также приведена проверка точности расчета осадков косвенным методом, приведенным в работе [19]. Результаты признаны качественными, использование спутниковых архивов ре-анализа для оценки количества осадков возможно.

В результате выполнен анализ водного баланса в общем и по его компонентам. Рассмотрена межгодовая изменчивость водного баланса. Рассмотрено соотношение компонент водного баланса, их вклад в баланс и его дисперсию. Проанализированы аномалии компонент водного баланса, а также корреляция между уровнем Каспийского моря и компонентами водного баланса.

Наибольший вклад в водный баланс моря вносит испарение (48,14%), а наименьший отмечается для стока в залив Кара-Богаз-Гол (2,19%). Речной сток также вносит значительный вклад в водный баланс моря, составляя 38,74% от него. Вклад осадков в водный баланс Каспийского моря по сравнению с испарением и речным стоком довольно мал и составляет всего 10,92%. Наибольший вклад в приходную часть баланса вносит речной сток: 78,01%. Вклад осадков в приходную часть водного баланса составляет 21,99%. Для периода повышения уровня моря 100% расходной части водного баланса приходится на испарение. Сток в залив Кара-Богаз-Гол учитывается только с 1996 года. Тогда для периода понижения УКМ вклад испарения в расходную часть баланса составляет 95,58%. На сток в залив Кара-Богаз-Гол приходится лишь 4,42%. В период повышения уровня моря значения аномалий речного стока достигает 286,83 мм в 1979 году, а в период понижения УКМ -257,71 мм в 1996 году. Наименьшие аномалии отмечаются для стока в залив Кара-Богаз-Гол по причине того, что сами значения стока минимальны. Максимального положительного аномального значения (28,07 мм) сток в залив КБГ достигает в 1996 году, а максимальная отрицательная аномалия (-16,51 мм) отмечается в 2015 году. Как для периода повышения УКМ, так и для периода его понижения наибольший вклад в дисперсию баланса вносит речной сток: для периода повышения уровня это 82,73%, а для периода понижения 69,41%, то есть вклад речного стока для периода понижения УКМ меньше, чем для периода его повышения. В период повышения УКМ наименьший вклад в дисперсию водного баланса вносят осадки – всего 7,66%. Для периода понижения УКМ наименьший вклад в дисперсию вносит сток в залив Кара-Богаз-Гол и составляет 0,48%. Наибольшая корреляция между внутригодовыми приращениями уровня и

компонентами водного баланса как для периода повышения, так и для периода понижения уровня отмечается для речного стока (0,70 и 0,67 соответственно). Для периода повышения уровня коэффициент корреляции между испарением и внутригодовыми приращениями уровня составляет -0,43 и является значимым. Для периода понижения уровня между осадками и приращениями уровня наблюдается положительный значимый коэффициент корреляции 0,38. Эти коэффициенты корреляции являются физически обоснованными. Для периода понижения уровня между приращениями уровня и стоком в залив Кара-Богаз-Гол коэффициент корреляции равен 0,36. Коэффициент корреляции значим.

В работе были выполнены все поставленные задачи и достигнуты запланированные результаты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Архипова Е. Г., Макарова Р. Е., Крюков В. В. Многолетние изменения испарения на Каспийском море. Труды ГОИН, 1975. Вып. 125, С. 86—94.
2. Байдин С.С., Косарев А.Н. (Ред.) 1986. Каспийское море: Гидрология и гидрохимия. Москва: Наука, 261 с.
3. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. / Под ред. Е.С. Нестерова. – М.: Триада лтд, 2016. – 378 с.
4. Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А. Фоминс В.В. Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2020, том 47, № 2, с. 230–240.
5. Георгиевский В. Ю. Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений // Труды ЛГМИ, 1982. Вып. 79, С. 76—85.
6. Георгиевский В.Ю., Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка притока поверхностных вод в Каспийское море. В кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб., 2003. Гидрометеоиздат, С. 217—229.
7. Гордеева С.М. Практикум по курсу Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. СПБ., 2023.
8. Гордеева С.М., Малинин В.Н. О предвычислении годового стока крупных рек Европейской территории России на основе метода деревьев решений (decision trees) // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 53-65.
9. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
10. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А. 2014. Южные моря России. – В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и его последствиях на территории Российской Федерации /

Под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова. – М.: Институт глобального климата и экологии, с.644–683.

11. Костяной А.Г., Малинин В.Н., Фролов А.В. Основные причины изменения уровня каспийского моря. Фундаментальная и прикладная климатология. 2025. Т. 11. № 3. С. 338-373.

12. Лобанов В.В. Испарение с поверхности Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 1987. № 10. С. 47— 53.

13. Малинин, В. Н., Гордеева С. М. Климатические факторы межгодовых колебаний и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Озера Евразии: проблемы и пути их решения : Материалы 1-й Международной конференции, Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 года // Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводский государственный университет; Ответственный редактор Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2017. – С. 261-268. – EDN ZQUUFN.

14. Малинин, В. Н., Гордеева С. М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе "океан -атмосфера - суша" // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 4. – С. 5-20. – DOI 10.17076/lim1156. – EDN KAJTDV.

15. Малинин, В. Н. Грозит ли Каспию судьба Арала? // Гидрометеорология и экология. – 2022. – № 69. – С. 746-760. – EDN MKVVTI.

16. Малинин В. Н., Кудель М. Д., Изменчивость испарения в периоды повышения и понижения уровня Каспия // Гидрология и океанология - 2025: Сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ, Санкт-Петербург, 25 апреля 2025 года. – Казань: ООО "Бук", 2025. – С. 257-263. – EDN OQYTPS.

17. Малинин, В. Н., Кудель М. Д. Использование спутниковой информации для оценки изменчивости испарения в Каспийском море // Материалы 23-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 10–14 ноября 2025

года. – Москва: Институт космических исследований РАН, 2025. – С. 176. – EDN AKFNVN.

18. Малинин, В. Н., Кудель М. Д. К оценке межгодовой изменчивости испарения с акватории Каспия по спутниковым данным // Гидрометеорология и экология. – 2025. – № 80. – С. 510-529. – DOI 10.33933/2713-3001-2025-80-510-529. – EDN ZTGYCY.

19. Малинин В. Н, Кудель М. Д. Межгодовая изменчивость осадков над акваторией Каспия по спутниковым данным для периодов повышения и понижения уровня // Гидрометеорология и экология. – 2026. – № 82. – С. 75-89. – DOI 10.33933/2713-3001-2026-82-75-89.

20. Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: Изд-во РГМИ, 1994. 160 с.

21. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. – СПб.:изд. РГГМУ, 2008. – 408с.

22. Нестеров Е. С., Павлова А. В. Влияние колебаний циркуляции атмосферы на уровень Каспийского моря // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 56-70.

23. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 89 с.

24. Смирнова К. И. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря. Труды Гидрометцентра СССР, 1972. Вып. 94. 123 с.

25. 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., 2003. Гидрометеоиздат, С. 239—253.

26. Электронный атлас Каспийского моря [Электронный ресурс] // Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. URL: de.geogr.msu.ru/casp/ (дата обращения: 26.11.2025).

27. Copernicus Climate Change Service (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [Электронный ресурс] // Copernicus Climate Data Store. 2018. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download (дата обращения: 15.03.2025).

28. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavgU_2d_flx_Nx: 2d,diurnal,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Surface Flux Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TUNXFLX_5.12.4/summary (дата обращения: 16.03.2025).

29. Latent Heat Net Flux at Surface from NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 Monthly flx: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2). [Электронный ресурс] // Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2000. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-DOE/.Reanalysis-2/.Monthly/.flx/.flx/.lhtflsfc/ (дата обращения: 10.03.2025).

30. MONTHLY Diagnostic surface latent from NOAA NCEP-NCAR CDAS-1: Climate Data Assimilation System I; NCEP-NCAR Reanalysis Project. [Электронный ресурс] // NOAA Physical Sciences Laboratory. 2026. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.latent/ (дата обращения: 10.03.2025).

31. MONTHLY Diagnostic surface prate Precipitation rate from NOAA NCEP-NCAR CDAS-1: Climate Data Assimilation System I; NCEP-NCAR Reanalysis Project. [Электронный ресурс] // NOAA Physical Sciences Laboratory. 2026. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.prate/ (дата обращения: 10.03.1025).

32. Precipitation rate at Surface from NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 Monthly flx: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2). [Электронный ресурс] // Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2000. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-DOE/.Reanalysis-2/.Monthly/.flx/.flx/.pratesfc/ (дата обращения: 10.03.2025).