

УДК 502.2.05.



Олейник О.В.

Анализ спектрально-временной структуры временных рядов уровня Каспийского моря

Олейник Ольга Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва.

E-mail: ooleinik@rambler.ru

Предпринята попытка выявить динамику гидрологических процессов на основе анализа среднегодовых и среднемесячных временных рядов уровня воды в Каспийском море по данным водомерных вековых постов – Баку, Махачкала, Красноводск, Форт Шевченко – за инструментальный период наблюдения с 1900 по 2007 гг. Установлено, что вариации уровня моря характеризуются сложной нерегулярной формой, имеют трендовую, ритмическую и хаотическую составляющие. Выделены высокоамплитудные межгодовые и внутригодовые ритмические составляющие. Динамика изменения уровня Каспийского моря на разных постах характеризуется как общими глобальными, так и индивидуальными локальными закономерностями.

Ключевые слова: Каспийское море, изменения уровня моря, временные ряды, ритмические вариации, спектрально-временные диаграммы, параметр хаотизации.

В статье предпринята попытка выявить ритмическую динамику гидрологических процессов на основе анализа среднегодовых и среднемесячных временных рядов уровня воды в Каспийском море. Каспий – это исключительно важный и интересный для исследования объект, параметры которого могут изменяться непредсказуемо. В научной литературе имеется множество работ, связанных с анализом изменений уровня Каспийского моря¹. Нас интересовали вопросы сходства и различия в динамике колебаний уровня Каспия в различных точках, а именно наличие, выраженность и продолжительность ритмических процессов и их перестройки.

Ранее автором совместно с Р.В.Николаевой (Институт водных проблем РАН) и А.Г.Гамбурцевым (ИФЗ РАН) выполнен анализ годовых вариаций уровня и годовых приращений уровня Каспия с начала инструментального периода наблюдения до 1990 г. по данным пяти постов². В той же работе проведен анализ временных вариаций стока рек в Каспийского моря и вариаций количества атмосферных осадков в те же интервалы времени. Результаты анализа были сопоставлены и сделан вывод о том, что основную роль в колебаниях уровня Каспия играет сток; характеристики тренда зависят от вариаций, связанных с тектонической жизнью региона.

В работе³ проведен анализ материалов по уровню Каспия по данным Дагестанского Гидрометцентра, полученным с 1994 по 1998 гг. с 6-часовым периодом опроса на о-ве Тюлений. Получены уверенные высокочастотные переменные по амплитуде ритмы: полусуточный, суточный, 2-недельный, скорее всего, приливного характера. Таким образом, в первом и третьем томах Атласа рассмотрены низкочастотные и высокочастотные вариации уровня Каспия, причем низкочастотные вариации – до 1990 г.

Ритмичность отмечена практически во всех геологических и геофизических процессах⁴. Диапазон ритмов очень велик – от долей секунд до сотен миллионов лет. Наиболее известные ритмы – это суточный и полусуточный приливные ритмы, годичный ритм и 11-летний солнечный ритм. Причины (источники) рит-

¹ См.: Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.; Олейник О.В. Анализ временных рядов уровня Каспийского моря за последние 100 лет // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. № 2. С. 5–26.

² Атлас временных вариаций природных процессов. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН. 1994. С. 124–140.

³ Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. С. 383–384.

⁴ Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука. 1992. 200 с.; Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4.; Олейник О.В. Указ. соч.; Атлас временных вариаций... Т. 1. С. 124–140; Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов... Т. 3. С. 383–384

мических вариаций удаётся однозначно определить только в редких случаях¹.

В данной работе впервые проанализированы среднегодовые и среднемесячные временные ряды уровня воды в Каспийском море, а также их среднегодовые и среднемесячные приращения по данным четырёх вековых водомерных постов – Баку, Махачкала, Красноводск, Форт Шевченко, за инструментальный период наблюдения с 1900 по 2007 гг. Проведён анализ спектрально-временных характеристик рядов. Данные предоставлены Государственным океанографическим институтом (ГОИН).

Следует отметить, что исходные данные об уровне Каспийского моря носят неоднородный и разрозненный характер. Официальными источниками данных об уровне Каспийского моря являются². В них помещены Таблицы ежесуточных и ежемесячных наблюдений за уровнем моря. С 1990 г. данные официально не публикуются.

Единственный Каталог уровней наблюдений составлен Бакинской гидрометеорологической обсерваторией и издан в 1964 г.³. В нем осуществлена проверка достоверности расчётов нулей постов и представлены Таблицы среднемесячных и экстремальных значений уровня; проведен анализ достоверности данных, построены графики связи, выявлены окончательные значения уровня и произведено восполнение данных.

В начале 70-х гг. также были изданы Справочники⁴. В них представлены Таблицы среднемесячных и экстремальных значений уровня с начала наблюдений по 1970 г. В Справочниках было проведено сравнение данных с соответствующими таблицами из Каталога 1964 г., проведен анализ расхождений, построены графики связи, выявлены окончательные значения уровня и произведено восполнение данных. Однако анализ проводился выборочно и не для всех станций.

Данные, предоставленные ГОИН и используемые в этой статье, являются наиболее достоверными. Они получены в ходе работы над Генеральным каталогом уровня Каспийского моря, которая в настоящее время проводится в ГОИНе. Данные обобщены и откорректированы.

Обработка материалов была ориентирована на анализ нестационарных процессов и выявление ритмических составляющих временных рядов. Основной процедурой являлся спектрально-временной анализ⁵.

В исследуемом временном диапазоне для Каспийского моря выделяются следующие циклы: внутривековые (межгодовые и внутригодовые), столетние и тысячелетние. В ходе количественного анализа инструментальных наблюдений за уровнем Каспийского моря выделяют нерегулярные циклические колебания: от 2–3 лет до квазивековых⁶, а именно 1,5 года и 2,5 года, 5, 7, 11, 19 лет, 22 года, 40 и 60–70 лет⁷. Отметим, что в рассматриваемом диапазоне выявление ритмических вариаций проводилось очень малым количеством авторов.

На рис. 1 представлена схема расположения водомерных постов. Схема взята из 4-го тома «Гидрометеорологии и гидрохимии морей»⁸. Отметим, что в настоящее время на территории Российской Федерации находится только один из рассматриваемых постов – Махачкала, остальные принадлежат другим государствам. Посты расположены на разных побережьях Каспийского моря – Баку и Махачкала находятся на западном, Красноводск и Форт Шевченко – на восточном. В тектоническом отношении районы расположения постов различны.

На рис. 2 представлены временные ряды годовых значений уровня воды для четырёх постов. Ряды рассмотрены для всего инструментального интервала наблюдений: Баку и Махачкала с 1900 по 2007 гг., Красноводск 1915 по 2007 гг., Форт Шевченко с 1921 по 2007 гг. Видно, что кривые очень схожи между собой. Все временные ряды с высокой степенью точности аппроксимируются полиномом четвертой степени с практически одинаковыми степенными коэффициентами, далее в работе будем называть его трендовой составляющей. В то же время можно говорить, но с меньшей точностью, о квадратичном тренде с точкой перегиба в конце 70-х гг., или о том, что до конца 70-х гг. временные ряды характеризуются отрицательным линейным трендом, а после – положительным. Общий вид ряда практически одинаков. Коэффициенты корреляции временных рядов между постами – очень высоки и достигают 0,9.

Для более детального анализа различий между рядами построены временные ряды разности годовых значений уровня воды между постами. Они приводятся на рисунках 3 и 4. Видно, что величина уровня моря на посту Баку значительно меньше, чем величины уровня для других станций (рис. 3). К середине 50-х гг. эта разница практически нивелируется, а с середины 60-х гг. начинает колебаться около некоторого среднего уровня.

¹ Гамбурцев А.Г., Олейник О.В., Александров С.И., Галкин И.Н. Особенности приливной сейсмичности Луны // Докл. РАН, 2000. Т.3 72, № 2, С.226–239; Гамбурцев А.Г. Ритмы в жизни земной коры // Природа. 1990. № 6. С. 64–67; Вассоевич Н.Б. Условия образования флиша. М.: Гостотехиздат. 1951. 198 с.; Калесник С.В. Ритмические явления в ландшафтной оболочке // Ритм. 2008. № 1. С. 69–80

² Морские гидрометеорологические ежегодники. 1936–1959; Морские гидрометеорологические ежемесячники. 1961–1975; Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Ч. 1. Море. 1976–1989.

³ Каталог уровней наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море. Баку, 1964. 131 с.

⁴ Справочник основных гидрологических характеристик морей и устьев рек СССР. Ч. 1. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Каспийское море. Вып. 2. Северная часть. Ростов-на-Дону, 1971; Справочник по гидрологическому режиму морей и устьев рек СССР. Ч. 1. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Каспийское море. Вып. 2. Средняя и южная части. Баку, 1972.

⁵ Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. Человек и три окружающие его среды. М.: ООО СветочПлюс, 2009.

⁶ Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного состояний гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 239–253.

⁷ Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 231 с.; Атлас временных вариаций природных процессов... Т. 1; Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.

⁸ Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.

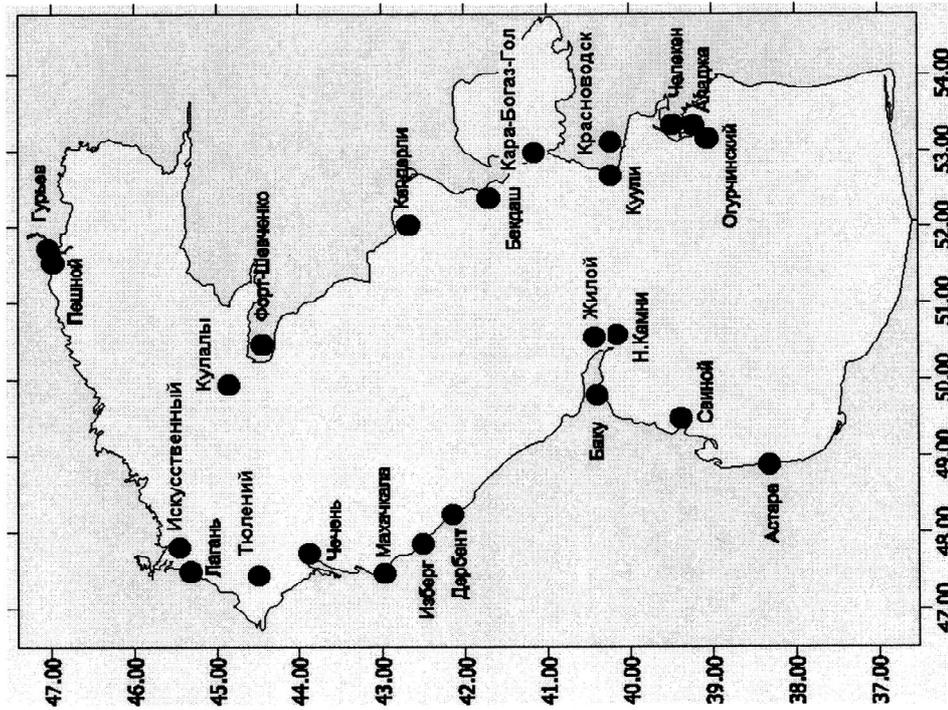


Рис. 1. Схема расположения водомерных постов на побережье Каспийского моря. Крупные кружки – вековые водомерные посты, упоминаемые в статье.

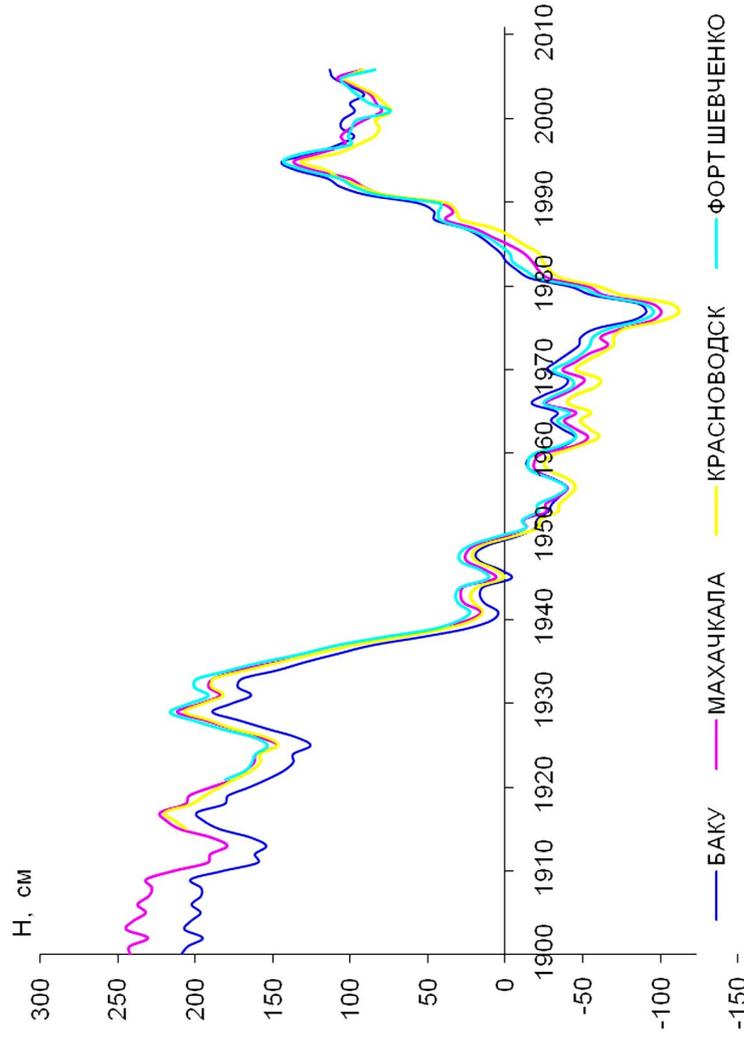


Рис. 2. Временные ряды годовых значений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку (1900–2007 гг.), Махачкала (1900–2007 гг.), Красноводск (1915–2007 гг.), Форт Шевченко (1921–2007 гг.).

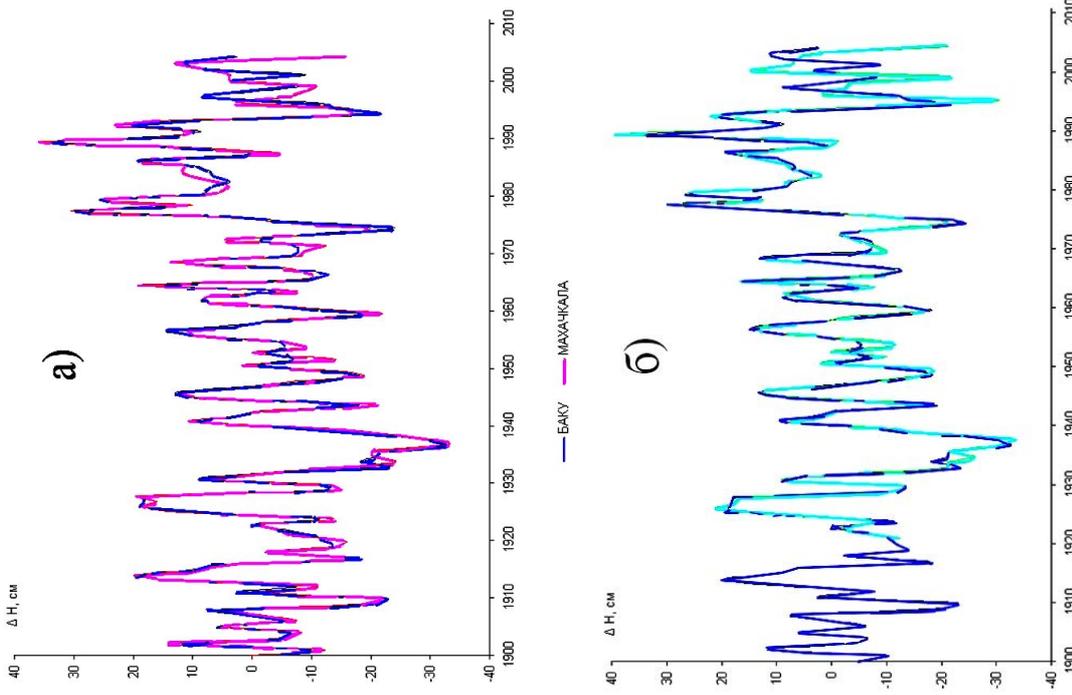


Рис. 5. Временные ряды годовых приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку и Махачкала – 1900–2007 гг. (а), Баку и Форт Шевченко – 1921–2007 гг. (б).

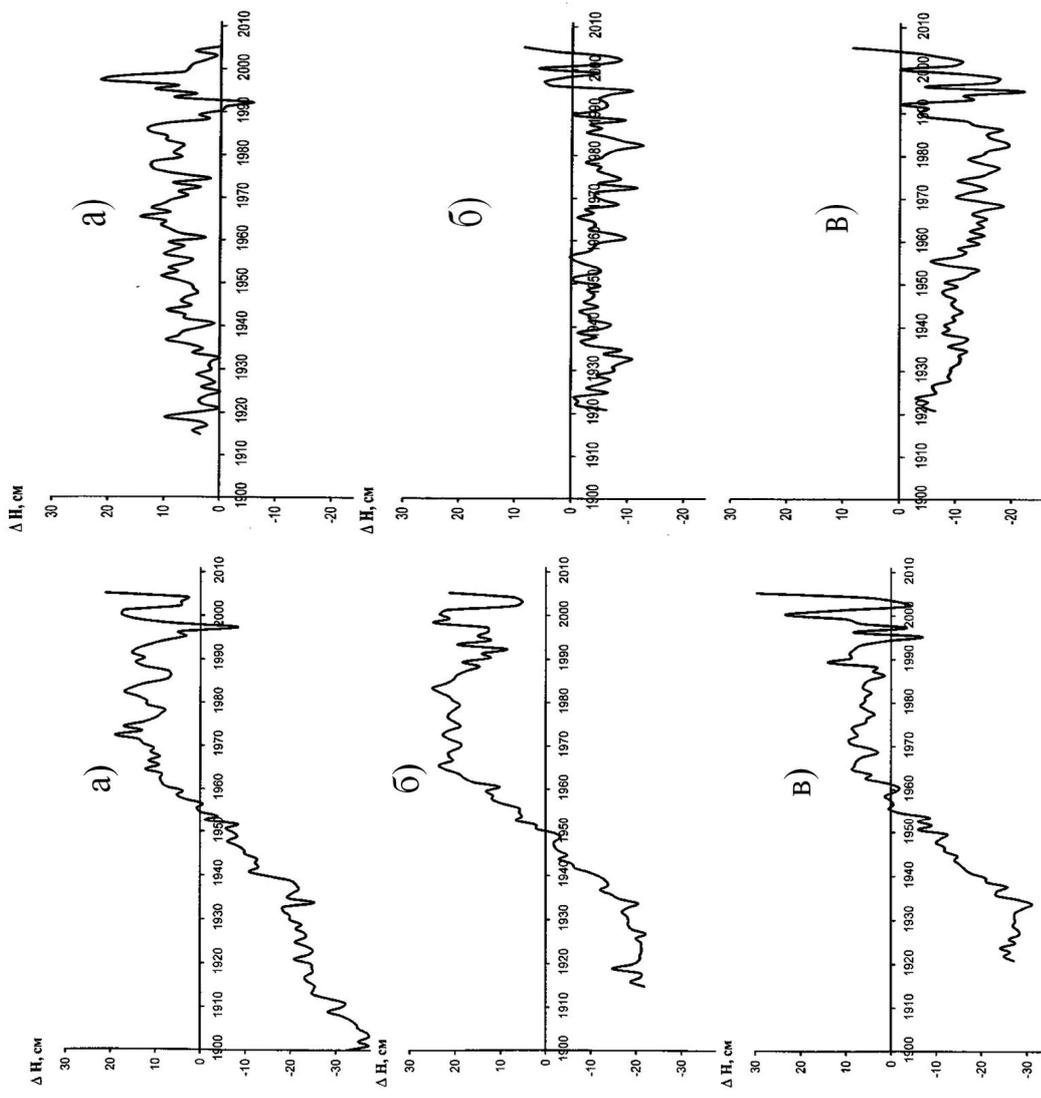


Рис. 4. Временные ряды разности годовых значений уровня Каспийского моря между постами Махачкала и Касноводск 1915 – 2007 гг. (а), Махачкала и Форт Шевченко 1921–2007 гг. (б), Касноводск и Форт Шевченко 1921–2007 гг. (в).

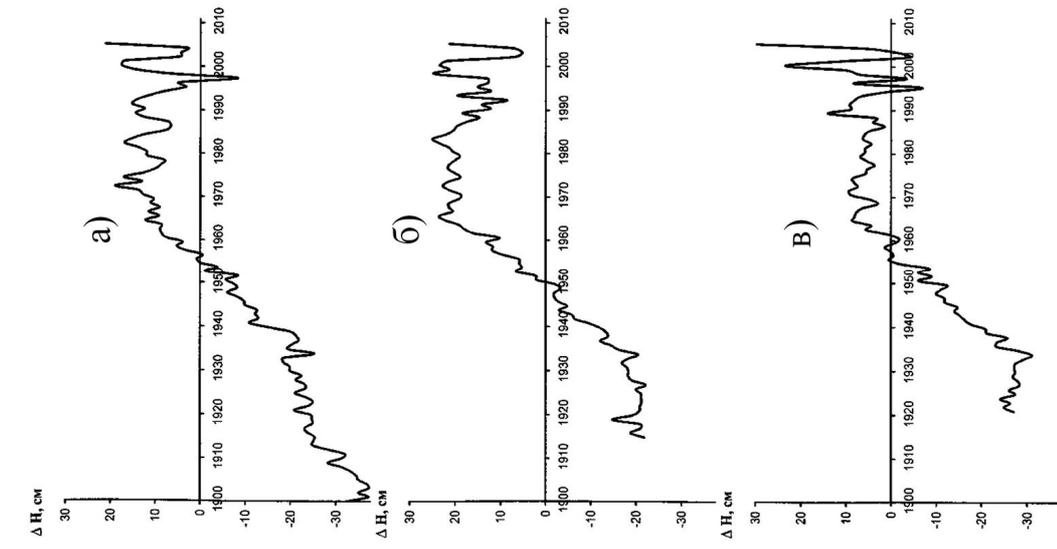


Рис. 3. Временные ряды разности годовых значений уровня Каспийского моря между постами Баку и Махачкала – 1900–2007 гг. (а), Баку и Касноводск 1915–2007 гг. (б), Баку и Форт Шевченко 1921–2007 гг. (в).

Совершенно другая картина наблюдается при рассмотрении разности годовых значений уровня воды между постами Махачкала, Красноводск и Форт Шевченко (рис. 4). Для Махачкалы и Красноводска величина разности колеблется относительно некоторого среднего уровня, обладая очень незначительным положительным трендом. График разности уровня между постами Красноводск и Махачкала характеризуется слабо выраженным квадратичным трендом, который в середине 60-х годов меняет знак.

Анализ разности годовых значений уровня воды между постами позволяет сделать вывод о вкладе вертикальных движений земной коры в изменения уровня Каспийского моря. Можно предполагать, что пост Баку находится значительно ниже, чем другие посты, но с начала 60-гг. территория, на которой он расположен, постоянно поднимается, относительно территорий, на которых находятся другие посты. К концу 60-х гг. подъем заканчивается, и начинаются нестабильные колебательные движения земной коры в области постов относительно друг друга. В работе С.Н.Крицкого с соавт.¹ большую разность между величиной уровня на посту Баку и другими постами с 1900 приблизительно по 1965 гг. связывают с опусканием Бакинского фудштока.

Из рис. 4 следует, что территории, на которых находятся посты Махачкала, Красноводск и Форт Шевченко, также испытывают вертикальные смещения относительно друг друга, но амплитуда этих смещений не велика, ярко выраженных однонаправленных движений не наблюдается.

В т. 4 «Гидрометеорологии и гидрохимии морей» делается вывод, что современные тектонические движения на побережье Каспийского моря приводит к вертикальным перемещениям нулей уровенных постов, и их необходимо учитывать. При этом относительное высотное положение уровенных постов Махачкала, Форт Шевченко и Красноводск изменяется незначительно, а относительное опускание нуля уровенного поста Бакинского фудштока прослеживается отчетливо.

Для годовых значений уровня Каспийского моря были рассчитаны годовые приращения, что можно считать проведением низкочастотной фильтрации. Из рис. 5 видно, что годовые приращения уровня на разных постах также очень схожи между собой, но более четко видны отличия во второстепенных экстремумах, особенно после 80-х гг. Начиная примерно с 1940 г. на всех графиках наблюдается слабый положительный тренд.

Коэффициенты корреляции временных рядов годовых приращений уровня между постами так же очень высоки – от 0,93 до 0,98. Коэффициенты корреляции в принципе не зависят от расположения постов, хотя между Баку и Махачкалой коэффициент корреляции самый высокий – 0,98.

Отмечаемые с начала 90-х гг. резкие колебания разности уровня между постами скорее всего связаны с наступившим после распада СССР развалом гидрометеорологической службы, вследствие чего качество проведения наблюдений на постах, по видимому, стало различным.

Были проанализированы временные ряды среднемесячных значений и среднемесячных приращений уровня Каспийского моря, пример которых приведен на рис. 6. Видно, что на фоне основного трендового процесса происходят постоянные колебания. Коэффициенты корреляции среднемесячных значений уровня также очень высоки – 0,9–0,99. Коэффициенты корреляции среднемесячных приращений значений уровня колеблются от 0,6 до 0,85 и не зависят от расположения постов.

Таким образом, мы видим, что основные процессы, формирующие межгодовые и внутригодовые изменения уровня в различных постах, совпадают.

Наблюдаемые отличия во временных рядах, вероятно, связаны с вертикальными движениями земной коры и их величиной в конкретном пункте. Кроме того, на каждом посту действуют локальные процессы, вносящие вклад во второстепенные особенности наблюдаемых временных рядов и различающиеся для разных побережий.

Спектрально-временной анализ среднемесячных и годовых приращений уровня Каспийского моря выявил наличие ритмических составляющих в вариациях уровня на всех постах (рис. 7, 8, 9). На спектрально-временных диаграммах (СВАН диаграммах) по горизонтальной оси откладывается календарное время (годы), а по вертикальной – частота (циклы/год). Продолжительность зачернения на диаграммах определяет время существования

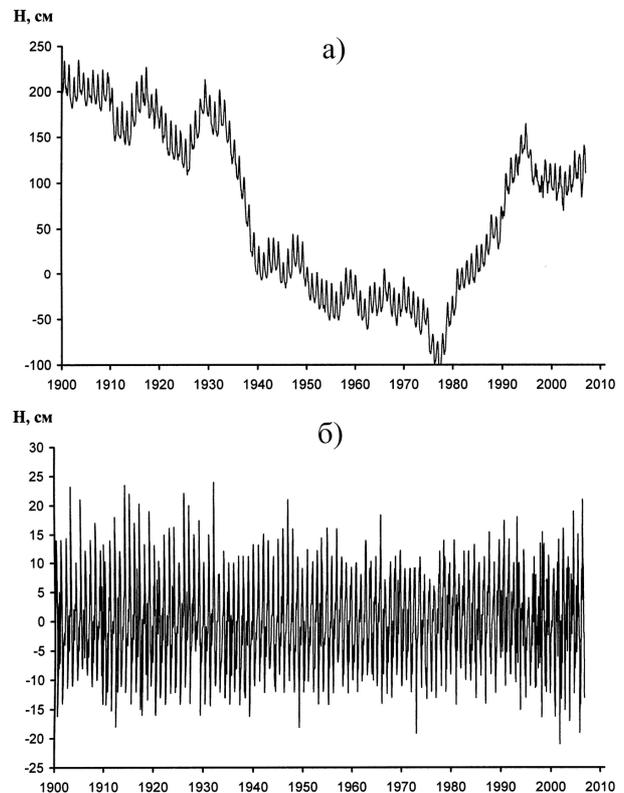


Рис. 6. Временные ряды среднемесячных значений уровня Каспийского моря (а) и его среднемесячных приращений (б) по данным водомерного поста Баку с 1900 по 2007 гг.

¹ Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 157 с.

спектральных составляющих. Справа от каждой из диаграмм помещены легенды, показывающиеся амплитуды процесса для разной степени зачернения. Все выделенные в работе ритмические составляющие значимы и с вероятностью 95% превышают критический уровень выделения сигнала от шума. Продолжительная и уверенная прослеживаемость одинаковых ритмов по разным параметрам также свидетельствует о надежности их выделения.

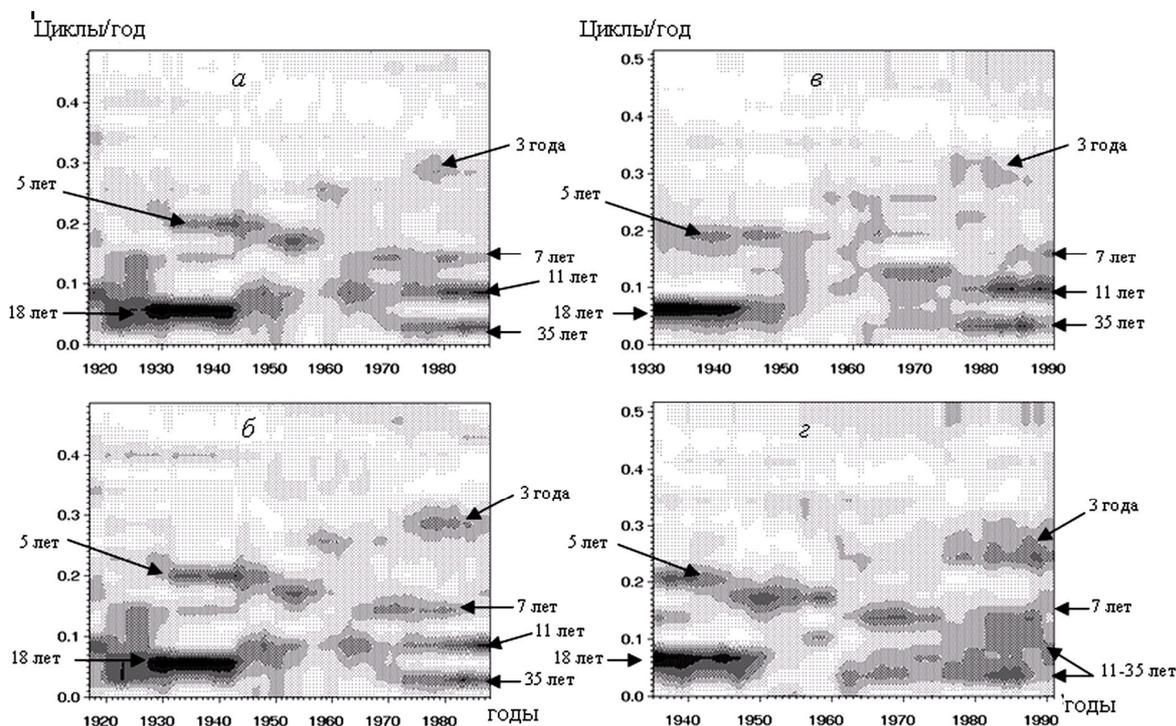


Рис.7. СВАН-диаграммы временных рядов годовых приращений значений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку (а), Махачкала (б), Красноводск (в), Форт Шевченко (г). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

Рассмотрим ритмические составляющие в двух частотных областях – межгодовой и внутригодовой.

В межгодовой частотной области (рис. 7) на всех четырёх пунктах наблюдения выделяются ритмы с периодами ~35 лет (0,03 цикла/год), ~18 лет (0,056 циклов/год), ~11 лет (0,09 циклов/год), 7 лет (0,14 циклов/год), 5 лет (0,2 циклов/год), 3,5 года (0,3 циклов/год). Все ритмы достаточно протяженные и их динамика очень схожа. Характерной особенностью всех диаграмм является то, что в 50-х–60-х гг. происходит перестройка ритмических составляющих: 18-летний и 5-летний ритмы исчезают, и появляются три составляющих – 35, 11 и 7 лет.

Построение спектрально-временных диаграмм среднемесячных приращений уровня Каспийского моря (рис. 8, 9) выявило наличие внутригодовых ритмических составляющих с периодами 1 год (1 цикл/год), 6 мес. (2 цикла/год) и 4 мес. (3 цикла/год). Природа этих ритмов носит сезонный характер и не вызывает сомнения.

Следует отметить, что типичный спектр колебаний уровня моря имеет годовую гармонику и её полугодовой обертона. На спектрально-временных диаграммах мы видим динамику этих гармоник. Все ритмы начинают ослабевать с начала 60-х гг., причем годичный ритм только немного уменьшается по амплитуде, а 4-месячный ритм практически исчезает. Причина ослабления не понятна.

Из временных рядов среднемесячных приращений были вычтены три доминирующих составляющих 1 год, 6 мес., 4 мес., что позволило выявить более тонкую структуру процесса – как межгодового, так и внутригодового (рис.10, 11).

Из диаграмм видно, что в межгодовой частотной области (верхние диаграммы) прослеживаются те же ритмические вариации, что и на диаграммах, построенных для годового опроса (рис. 7). Однако спектрально-временная картина и динамика ритмов становятся более понятными. Прослеживаются новые ритмы с периодами ~2 года (0,45 циклов/год) и ~1,5 года (0,6 циклов/год).

Опять обращают на себя внимание 60-е годы, которые являются в известном смысле перестроочными: ранее происходящие процессы замирают, вслед за эти ритмическая активность ритмов усиливается, меняется характер ритмов. Интересно, что эта перестройка не находит отражение на графиках исходных рядов, совпадая по времени с плавным стабильным спадом уровня моря.

Более подробный анализ процесса во внутригодовой частотной области выявил наличие индивидуальных особенностей динамики ритмических составляющих на разных постах. После вычитание этих трех ритмов между годом и 0,5 года (средние диаграммы) просматриваются также сравнительно устойчивые ритмические изменения с периодами ~9 мес. (1,4 циклов/год), ~7 мес. (1,7–1,8 циклов/год). Все они появляются в первой половине интервала наблюдений. В более высокочастотном диапазоне (нижние диаграммы) также присутствуют ритмические вариации, но они малоамплитудны и более хаотичны.

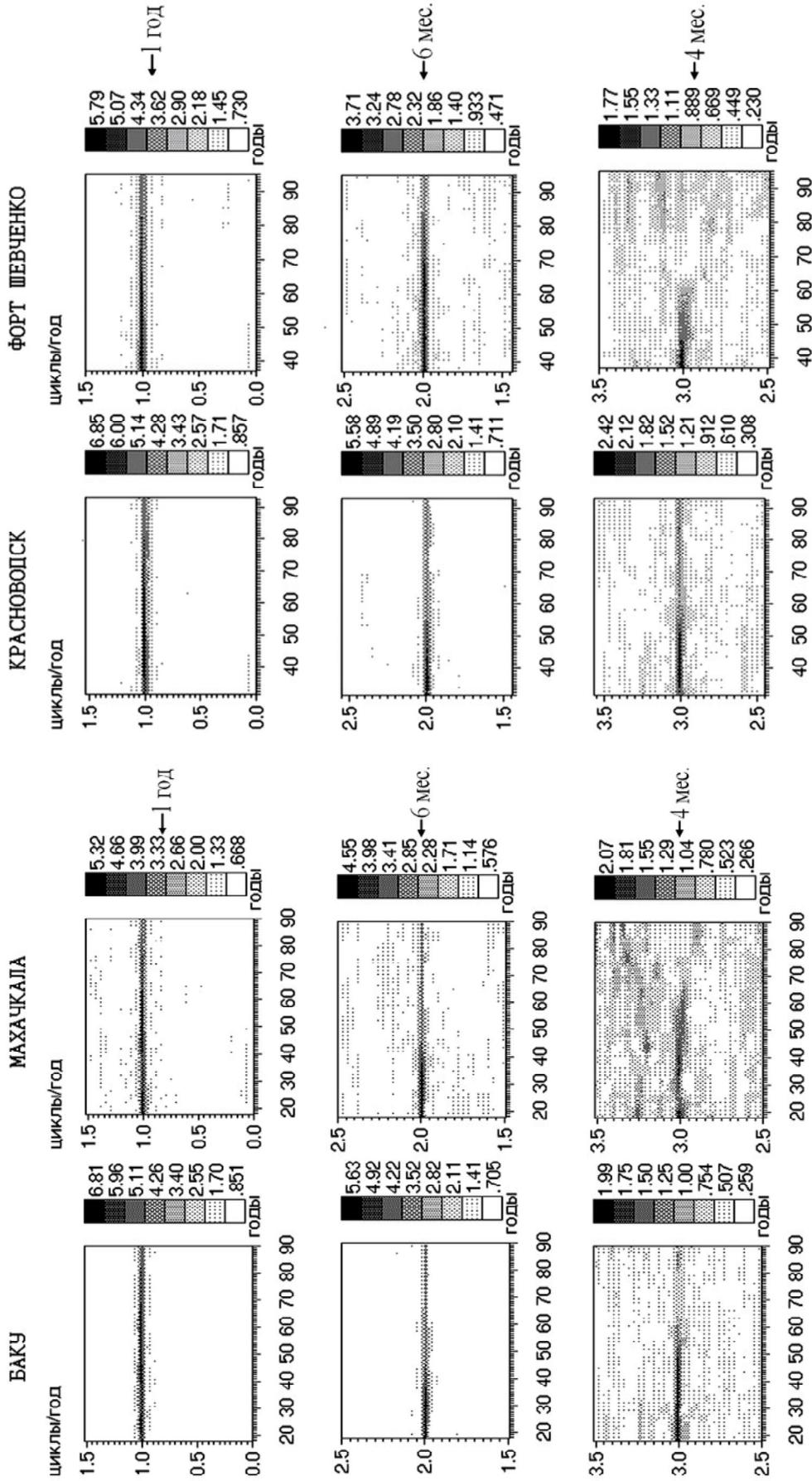


Рис. 8. СВАН-диаграммы временных рядов среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку, Махачкала, построенные в трех частотных диапазонах: от 0 до 8 мес. (верхние диаграммы); от 8 мес. до 5 мес. (средние диаграммы); от 5 мес. до 3,5 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

Рис. 9. СВАН-диаграммы временных рядов среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Красноводск, Форт Шевченко, построенные в трех частотных диапазонах: от 0 до 8 мес. (верхние диаграммы); от 8 мес. до 5 мес. (средние диаграммы); от 5 мес. до 3,5 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

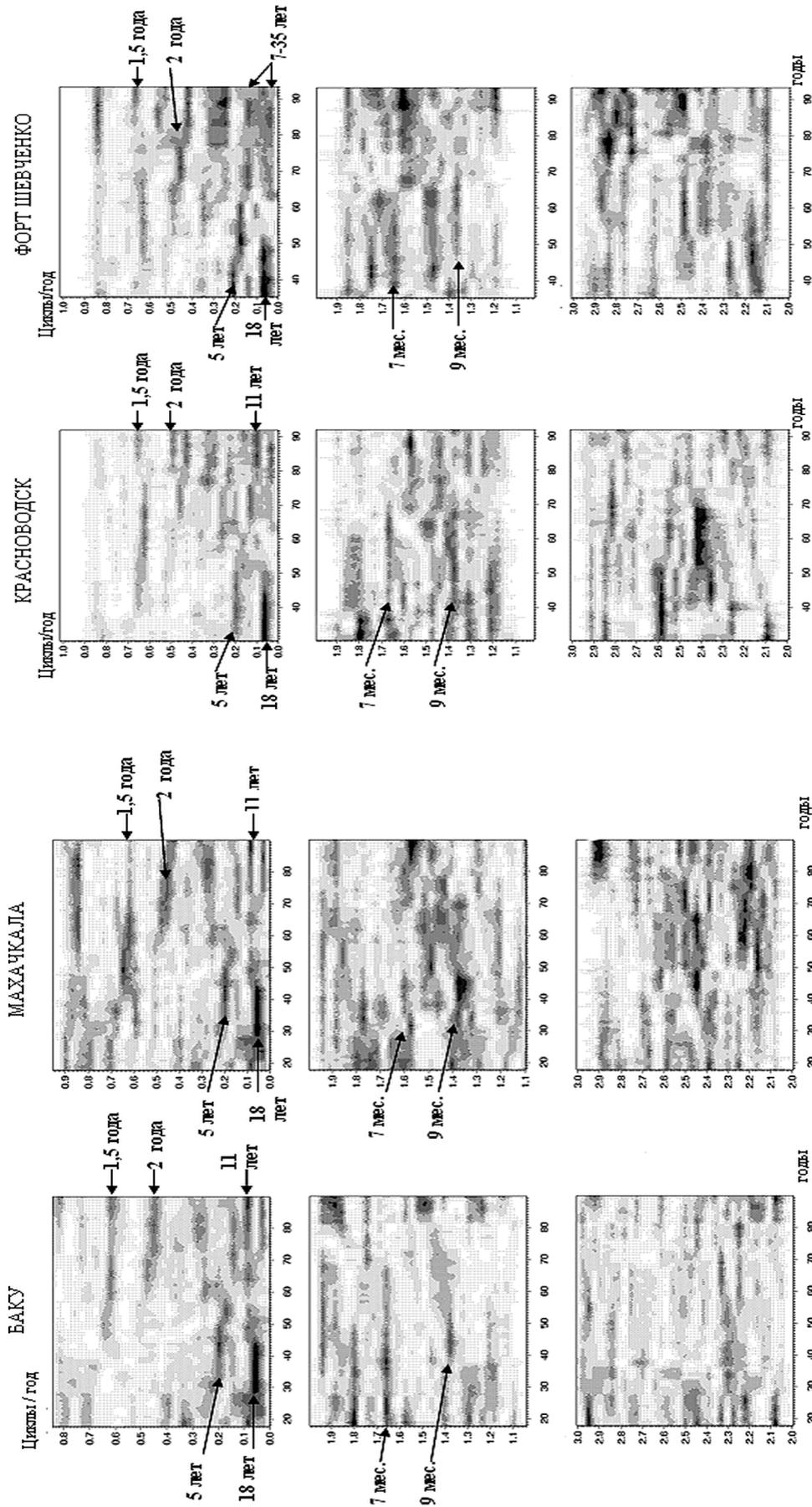


Рис. 10. СВД-диаграммы временных рядов среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку, Махачкала после вычитания трех гармоник с периодами 1 г., 6 мес. и 4 мес. Построения выполнены для трех частотных диапазонов: от 0 до 1 г. (верхние диаграммы); от 1 г. до 6 мес. (средние диаграммы); от 6 мес. до 4 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

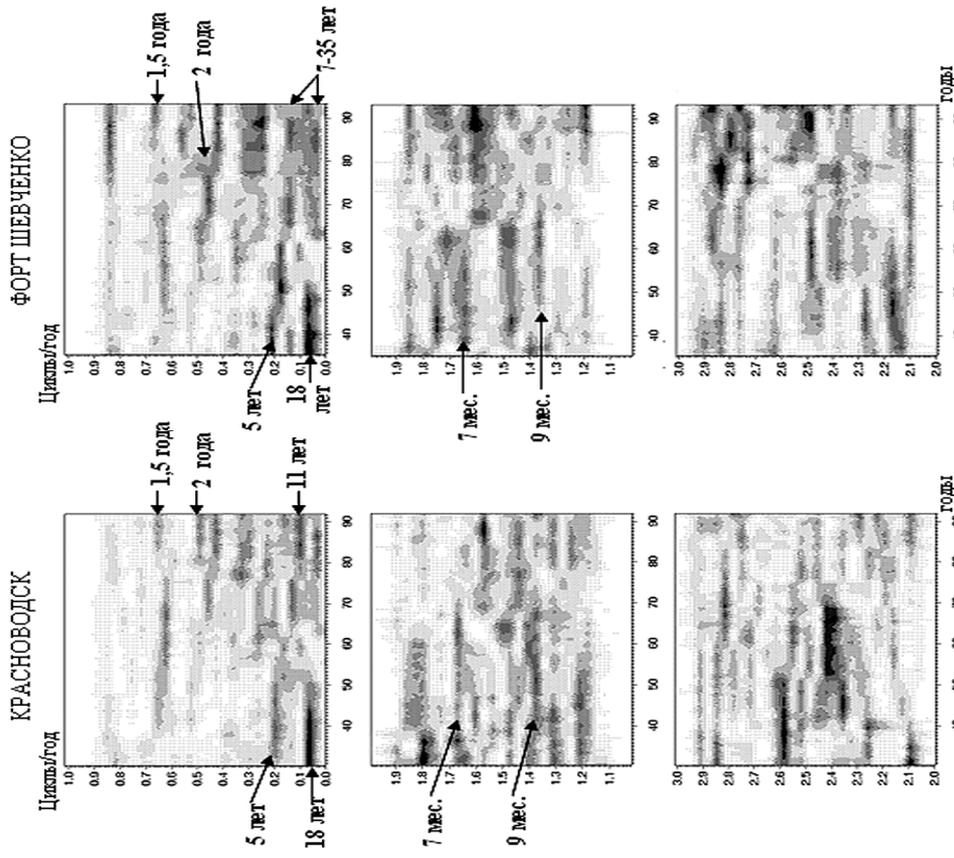


Рис. 11. СВД-диаграммы временных рядов среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Красновоодск, Форт Шевченко после вычитания трех гармоник с периодами 1 г., 6 мес. и 4 мес. Построения выполнены для трех частотных диапазонов: от 0 до 1 г. (верхние диаграммы); от 1 г. до 6 мес. (средние диаграммы); от 6 мес. до 4 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

Мы видим также, что для разных постов количество, амплитуда и время прослеживания (особенно высокочастотных) ритмических вариаций различаются. Для Махачкалы и Форты Шеченко процесс изменения уровня более активный – ритмов больше, они обладают более высокой амплитудой. Для Баку и Красноводска процесс ритмических изменений уровня более низкоамплитудный, количество ритмов меньше, и они более устойчивы.

Особенности спектрально-временной структуры ритмов, связанных с конкретным положением поста на западном или восточном побережье, не выявлено.

Для оценки уровня упорядоченности процессов проведено вычисление так называемого «параметра хаотизации»¹. Монохроматическому процессу (наличию одной спектральной линии, т.е. ряд состоит из одной синусоиды) соответствует нулевое значение параметра, а единичное значение – случаю белого шума. Таким образом, области повышенных значений параметра могут свидетельствовать о моментах повышенной «хаотизации» процесса (например, при распаде неустойчивости с образованием хаотических колебаний), а минимальные значения параметра – большей его «упорядоченности» (например, при синхронизации различных гармоник на единые предельные циклы или при линеаризации системы).

Параметр хаотизации годовых приращений рядов для всех постов имеет общие черты и различается в деталях (рис. 12). Его значения колеблются от 0,2 в 30-х–40-х гг., что соответствует хорошо упорядоченному процессу, до 0,6–0,7 в 60 гг., что говорит о более высокой степени хаотизации процесса. К началу 80-х гг. значения параметра начинают снова уменьшаться для всех постов.

Можно предположить, что до середины 30-х гг. упорядоченность процесса постоянно возрастает, что соответствует периоду, когда уровень моря находился в фазе высокого стояния. Но с конца 30-х гг. начинается резкое падение уровня, и хаотизация процесса возрастает. Подъем уровня в конце 80-х гг. вновь приводит к уменьшению параметра хаотизации, а значит и к большей упорядоченности процесса изменения уровня моря.

Отметим, что именно в 30-х–40-х гг. на спектрально-временных диаграммах исходных рядов, прослеживаются четкие высокоамплитудные ритмические составляющие, а в 60-х гг., происходит перестройка ритмов.

Параметр хаотизации среднемесячных приращений говорит о высокой упорядоченности месячных изменений уровня, его значения очень малы (рис. 13). Он колеблется в среднем от 0,02 до 0,08, достигая 0,14 только для Махачкалы. Параметр не сильно варьирует во времени, но для всех постов наблюдается его увеличение к концу 90-х гг. Это говорит о том, что процесс среднемесячных изменений уровня Каспийского моря – очень упорядочен, – по-видимому, это происходит из-за четкой сезонной ритмичности. Наибольшей величины параметр хаотизации достигает для Махачкалы, что говорит о чуть большей хаотичности процесса на этом посту.

На СВАН-диаграммах параметра хаотизации (рис. 14, 15) для всех постов выделяются ритмы с периодом: 1 год (1 цикл/год), 6 мес. (2 цикла/год), 4 мес. (3 цикла/год). Интерес представляет также тот факт, что для каждого поста на всем интервале наблюдения прослеживается только один из трёх ритмов, остальные неустойчивы.

Мы получаем нетривиальный результат, так как в рядах параметра хаотизации не должно присутствовать ритмических составляющих, это не предсказуемый процесс. Однако ритмы хорошо видны даже на исходных рядах. Объяснение этому результату пока нет. Наличие ритмов – 1 год, 6 мес., 4 мес., может свидетельствовать о хорошей управляемости процесса сезонными воздействиями, т.е. о периодически коррелированных случайных процессах. Ранее подобный результат был получен при исследовании приливной сейсмичности на Луне².

Итак, проведённый анализ показал, что исследуемые колебания уровня Каспийского моря имеют несколько составляющих, при этом основной является трендовая, а на её фоне имеют место ритмические и хаотические вариации.

Форма трендовой составляющей на всех постах – одинаковая. Её наличие, по нашему мнению, обусловлено современными движениями земной коры. Одной из причин расхождения тренда на разных постах, является различная амплитуда и направленность тектонических движений. Подъем уровня моря, зарегистрированный на посту Баку, можно объяснить однонаправленными вертикальными движениями. В первом выпуске т. 4 «Гидрометеорологии и гидрохимии морей»³ говорится о разнонаправленности вертикальных движений в различных частях моря и о различной скорости перемещений на каждом уровне поста, о чём свидетельствует анализ вертикальных перемещений нулей всех четырёх постов.

В тоже время в работе⁴ делается вывод, что влияние тектонических процессов ничтожно мало, а глобальная изменчивость уровня моря определяется главным образом климатической изменчивостью, а именно циркуляционных процессов.

На фоне тренда прослеживаются межгодовые ритмические вариации – 35, 18–20, 10–12, около 7, 5 и 2 лет. Динамика выделяемых ритмов достаточно неустойчива; в течение исследуемого временного интервала они изменяются по амплитуде, четкости прослеживания, устойчивости по периоду. Можно предположить, что описанный выше полиномиальный тренд является фрагментом более низкочастотной ритмической составляющей с периодом ~ 120 лет.

В табл. 1 совместно приведены квазипериодичности межгодовых процессов в акватории Каспийского моря и некоторых внешних воздействий, полученные разными авторами, в том числе и автором данной статьи. Из табли-

¹ Атлас временных вариаций природных процессов. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН. 1994. 176 с.; Т. 2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. 430 с.; Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 652 с.; Т. 4. Человек и три окружающие его среды. М.: ООО СветочПлюс, 2009.

² Гамбурцев А.Г., Олейник О.В., Александров С.И., Галкин И.Н. Особенности приливной сейсмичности Луны...

³ Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия...

⁴ Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 239–253.

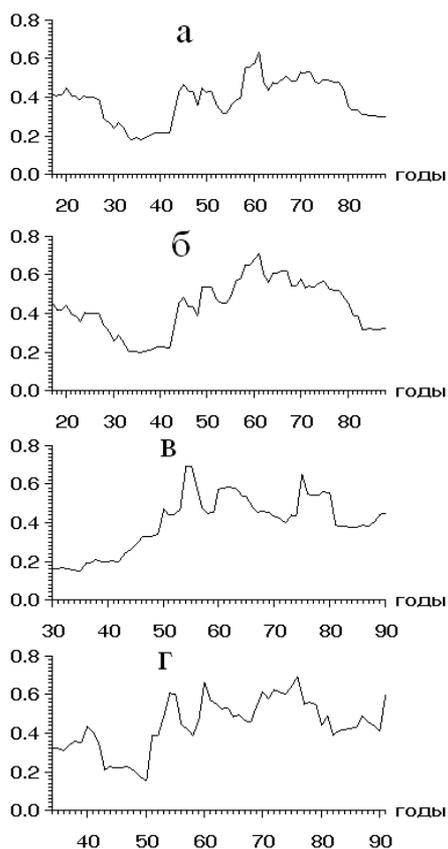


Рис.12 Временные ряды параметра хаотизации годовых приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку (а), Махачкала (б), Красноводск (в), Форт Шевченко (г). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

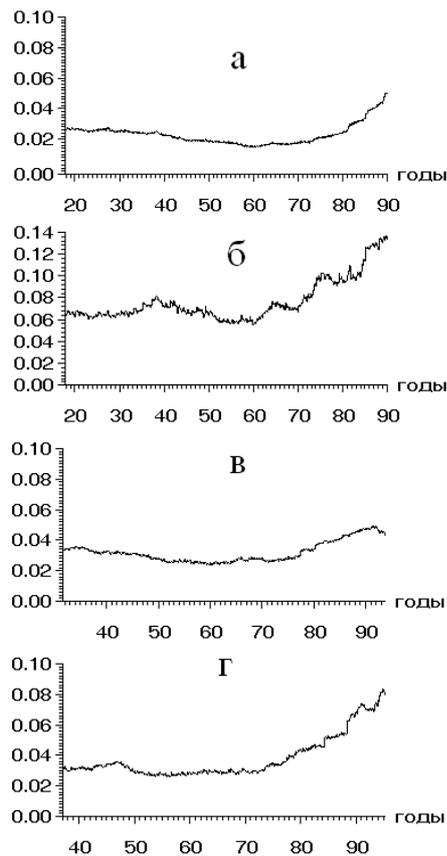


Рис.13. Временные ряды параметра хаотизации среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку (а), Махачкала (б), Красноводск (в), Форт Шевченко (г). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

цы видно, что ритмы различной причинности и иерархии в целом сопоставимы, поэтому говорить о причинно-следственных связях между вариациями уровня воды и возможными внешними воздействиями затруднительно.

Наличие около-11-летней составляющей во временных рядах уровня Каспия лишь на отдельных фрагментах временного ряда говорит или о слабом, или о косвенном влиянии солнечной активности на вариации уровня моря. То же самое можно сказать о вкладе 18,6-летнего приливного цикла в вариации уровня моря.

Представляется вероятным, что межгодовая ритмика вариаций уровня воды в Каспийском море формируется одновременно с атмосферными климатическими процессами, и прямым воздействием космических периодов, и колебаниями в самой системе, которые синхронизируются. При этом временные характеристики внешних воздействий также могут иметь нестационарную квазипериодическую структуру и способны принимать и упорядоченное, так и хаотическое состояние. Подобный вывод был сделан в работах¹ по отношению к земным и лунным процессам.

В ходе анализа выявлены также устойчивые внутригодовые ритмические вариации с периодами 1 год, 6 и 4 месяца.

Более высокочастотные внутригодовые вариации уровня – 9 мес., 7 мес. и др., характеризуются индивидуальной динамикой для каждого поста.

Внутригодовые вариации также отражают общие закономерности, характерные для моря в целом - сезонность, и имеют свои особенности на каждой станции. Причём годовой ход процесса может меняться в зависимости от рассматриваемого объекта.

В рядах присутствуют хаотические составляющие, которые являются следствием локальных эндогенных и экзогенных процессов на каждом водомерном посту. В работе² отмечается, что на фоне квазипериодических колебаний происходят короткопериодные колебания уровня непериодического характера. В работах³ говорится о локальных высокоамплитудных, знакопеременных, контрастных движений земной коры.

¹ Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев А.Г., Хромецкая Е.А. Указ. соч.; Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А. Указ. соч.

² Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Указ. соч.

³ Атлас временных вариаций природных процессов... Т. 1; Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 33–47.

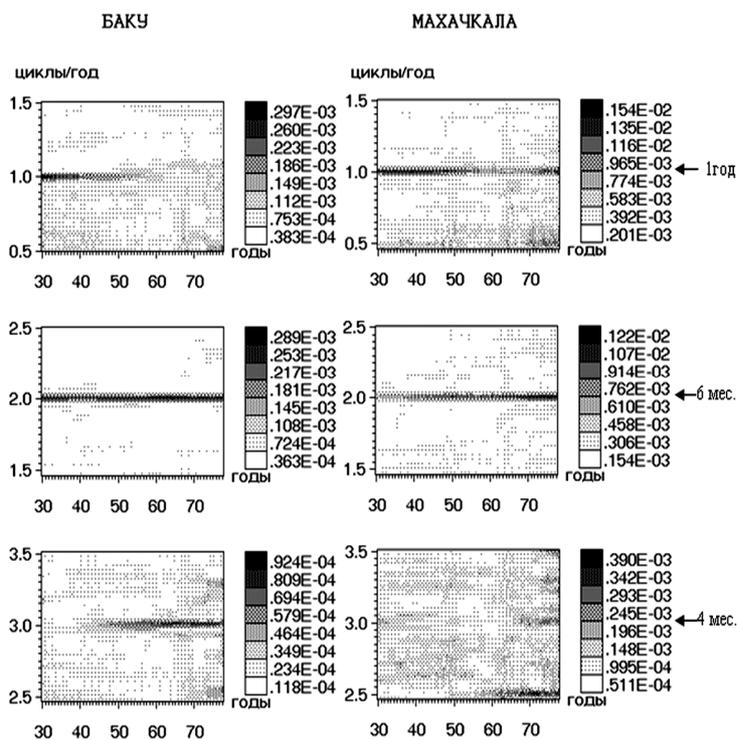


Рис.15. СВД-диаграммы временных рядов параметра хаотизации среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Красноводск, Форт Шевченко, построенные в трех частотных диапазонах: от 0 до 8 мес. (верхние диаграммы); от 8 мес. до 5 мес.(средние диаграммы); от 5 мес. до 3,5 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

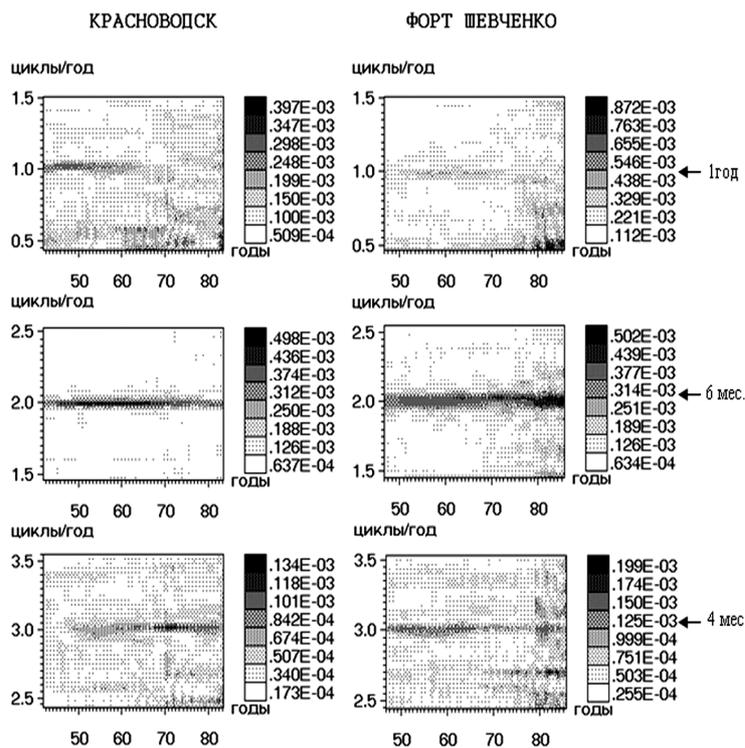


Рис.14. СВД-диаграммы временных рядов параметра хаотизации среднемесячных приращений уровня Каспийского моря по данным водомерных постов Баку, Махачкала, построенные в трех частотных диапазонах: от 0 до 8 мес. (верхние диаграммы); от 8 мес. до 5 мес.(средние диаграммы); от 5 мес. до 3,5 мес. (нижние диаграммы). Анализ проводился с 1900 по 2007 гг.

Нельзя исключить помехи в наблюдениях, связанные с человеческим фактором (нестабильность рейки на местах, некачественная работа наблюдателя и т.п.), тем более, что после распада СССР должного внимания уровенным наблюдениям на Каспии не уделялось.

Расчитанный параметр хаотизации временных рядов уровня моря говорит о переменной упорядоченности процесса, вплоть до высокой. Среднемесячные вариации уровня обладают очень сильной упорядоченностью, что говорит о том, что сезонный фактор их жестко контролирует.

Стоит особо отметить период 50-х–60-х гг., в течение которого наблюдается уменьшение корреляции между постами, изменение динамики ритмических составляющих и рост хаотизации процесса. Вероятно в это время, когда наблюдается падение уровня, произошла общая разбалансировка хода уровня. Это позволяет сделать вывод, что высокое стояние уровня моря соответствует высокой организации процесса, дальнейшее падение уровня приводит к его хаотизации, а возобновившийся подъем снова упорядочивает процесс.

Таблица 1.

Квазипериодичность межгодовых процессов в акватории Каспийского моря по данным разных авторов

Процессы и параметры: источник данных	Периоды выявленных ритмических составляющих (циклов), годы							
Вертикальные движения: геодезические данные уровнемерные данные Лилиенберг Д.А. Новые подходы к оценке современной эндодинамики Каспийского региона и вопросы ее мониторинга // Изв. РАН, Сер. географ. 1994. № 2. С. 16–35.	60	40	25–30 25–30		10–15 10–12	5–7 5–7	3–4	
Грязевой вулканизм Лилиенберг Д.А. Указ. соч.; Горин В.А, Буниятзаде З.Г. Глубинные разломы, газонефтяной вулканизм и залежи нефти и газа Южно-Каспийской впадины. Баку: Азгосиздат, 1971. 190 с.	50–60		25–30		10			
Сейсмический режим Кавказа Лилиенберг Д.А. Указ. соч.	50–60		20–30		10–15			
Сейсмический режим Кавказа Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев А.Г., Хромецкая Е.А. Ритмы по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 68–80.			30	15–6	10–11	5–7		2–3
Солнечная активность: Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А. Космические ритмы. Симферополь, 1994. 176 с.	55	35	22			5,5 7,2	3; 4	1,5 2,1
Индекс геомагнитной возмущенности Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев А.Г., Хромецкая Е.А. Указ. соч.	60	35	22	16,1	10,5 12,5	5,2 7,1	3,7 4,3	1,47 2,15 2,8
Годовые вариации уровня Мирового океана Герман В.Х., Левиков С.П. Указ. соч.		40	22		11	5–7		2,5
Годовые вариации уровня Каспийского моря Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Указ. соч.	60							2–3
Годовые и месячные значения уровня Каспийского моря Атлас временных вариаций природных процессов... Т. 1.			20–30		9–18	5–6		2,5–3,5
Годовые и месячные приращения уровня по данным разных постов данная статья		35	17–18		11–12	7	5	2,5–3,5

Выводы

Впервые проанализированы временные ряды годовых и среднемесячных вариаций уровня Каспийского моря и их приращений в четырёх пунктах вековых наблюдений – Баку, Махачкала, Красноводск, Форт Шевченко – для временного интервала 1900–2007 гг. и их спектрально-временная структура.

Вариации уровня характеризуются сложной и нерегулярной формой и имеют трендовую, ритмическую и хаотическую составляющие.

1. Трендовая составляющая временных рядов одинакова для всех постов, величина тренда различается.
2. Ритмическая структура временных рядов – полиритмична и изменяется во времени. Выделяются:
 - межгодовые ритмы с периодами около 35, 18–20, 10–12, 7, 5 и 2 лет, которые находят свое место в иерархии ритмов, наблюдаемых в Каспийском регионе;
 - внутригодовые сезонные ритмы с периодами 1 год, 6 мес., 4 мес., которые изменяются по амплитуде, вплоть до исчезновения.
 - высокочастотные ритмы 7 и 9 мес.
3. Различия в динамике межгодовых и внутригодовых ритмов для разных постов очень невелики. Динамика высокочастотных ритмов индивидуальна для каждого поста.
4. Для разных постов Каспийского моря выявлено сходство общей динамики ритмических вариаций и её различие в деталях – амплитуды ритмов, их прослеживаемость и степень хаотичности, особенно в высокочастотной области.

5. Середина XX века является временем общей перестройки процессов в акватории Каспийского моря.

Причины расхождения характера тренда на разных постах связаны, по нашему мнению, с различной амплитудой и направленностью тектонических движений. Разная динамика ритмических вариаций связана с различным соотношением составляющих водного баланса для каждого конкретного поста и с комплексом индивидуальных процессов, происходящих на них.

Особенностей в динамике временных вариаций, позволяющие провести различия в изменениях уровня на разных побережьях Каспийского моря, не выявлено. Изменения уровня воды, связанные с локальными процессами, имеют характерные особенности для каждого поста и не зависят от его берегового положения.

Анализ процессов самоорганизации и хаотизации временных рядов уровня Каспийского моря говорит о переменной упорядоченности процесса, вплоть до высокой. Высокое стояние воды соответствует самоорганизации процессов, а падение уровня – хаотизации.

Месячные вариации уровня обладают очень сильной упорядоченностью, что говорит о том, что сезонные факторы их жестко контролируют. Наличие ритмических составляющих в параметре хаотизации позволяет сделать вывод о периодически коррелированном случайном процессе.

В заключение можно сказать, что Каспийское море – это целостная геосистема, в которой взаимодействует эндогенные и экзогенные, в том числе космические и антропогенные факторы. Характер суперпозиции различных компонент очень сложен и может быть близок к случайному. Несмотря на это в геосистеме прослеживаются определённые закономерности динамики процессов.

Изменения уровня Каспийского моря для разных постов характеризуются как общими глобальными, так и индивидуальными локальными закономерностями динамики, т.е. имеет место глобальная устойчивость процесса на некоторых периодах в сочетании с его локальной неустойчивостью для конкретно рассматриваемого поста.

Благодарности

Автор благодарит Государственный океанографический институт Росгидромета за предоставление данных и выражает особую признательность А.Г.Гамбурцеву и Ф.С.Терзиеву за ценные замечания, высказанные при обсуждении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас временных вариаций природных процессов. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН. 1994. 176 с.
2. Атлас временных вариаций природных процессов. Т. 2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. 430 с.
3. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 652 с.
4. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. Человек и три окружающие его среды. М.: ООО СветочПлюс, 2009.
5. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука 2007. 381 с.
6. Вассоевич Н.Б. Условия образования флиша. М.: Гостехиздат. 1951. 198 с.
7. Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А. Космические ритмы. Симферополь, 1994. 176 с.
8. Гамбурцев А.Г. Ритмы в жизни земной коры // Природа. 1990. № 6. С. 64–67.
9. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука. 1992. 200 с.
10. Гамбурцев А.Г., Олейник О.В., Александров С.И., Галкин И.Н. Особенности приливной сейсмичности Луны // Докл. РАН. 2000. Т. 372. № 2. С. 226–239.
11. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 231 с.
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 359 с.
13. Горин В.А., Буниятзаде З.Г. Глубинные разломы, газонефтяной вулканизм и залежи нефти и газа Южно-Каспийской впадины. Баку: Азгосиздат, 1971. 190 с.
14. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Ч. 1. Море. 1976–1989.
15. Калесник С.В. Ритмические явления в ландшафтной оболочке // Ритм. 2008. № 1. С. 69–80
16. Каталог уровней наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море. Баку, 1964. 131 с.
17. Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев А.Г., Хромецкая Е.А. Ритмы по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 68–80.
18. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 157 с.
19. Либлиенберг Д.А. Новые подходы к оценке современной эндодинамики Каспийского региона и вопросы ее мониторинга // Изв. РАН, Сер. географ. 1994. № 2. С. 16–35.
20. Морские гидрометеорологические ежегодники. 1936–1959 гг.
21. Морские гидрометеорологические ежемесячники. 1961–1975.
22. Олейник О.В. Анализ временных рядов уровня Каспийского моря за последние 100 лет // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. № 2. С. 5–26.
23. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 33–47.
24. Справочник основных гидрологических характеристик морей и устьев рек СССР. Ч. 1. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Каспийское море. Вып. 2. Северная часть. Ростов-н/Д, 1971.
25. Справочник по гидрологическому режиму морей и устьев рек СССР. Ч. 1. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Каспийское море. Вып. 2. Средняя и южная части. Баку, 1972.
26. Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного состояния гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 239–253.