

На правах рукописи

**Сафар Рашад Тельман оглы**

**МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ  
ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – «Океанология»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2008



Работа выполнена на кафедре ПО и ОПВ факультета океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ)

*Научный руководитель*

доктор географических наук, профессор Валерии Николаевич Малинин

*Официальные оппоненты*

доктор географических наук, профессор Николай Павлович Смирнов

доктор географических наук, профессор Владимир Юрьевич Георгиевский

Ведущая организация Ин-т Озероведения РАН (Санкт-Петербург)


Защита состоится «19» июня 2008 г в «15» часов «30» минут на заседании диссертационного совета Д 212 197 02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу 195196, г Санкт-Петербург, Малоохтинский пр , 98 (актовый зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2008 г

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат географических наук



В Н Воробьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Каспийское море является крупнейшим бессточным водоемом на земном шаре, уникальным по своим природным условиям и ресурсам. Оно играет большую роль в экономике пяти стран, расположенных на его побережье: Республики Азербайджан, Исламской Республики Иран, Республики Казахстан, Российской Федерации и Республики Туркменистан. На его шельфе сосредоточены значительные запасы нефти, для добычи которой уже в течение многих десятилетий используются нефтяные платформы и планируется строительство новых. Трудно переоценить рыбохозяйственное значение моря, поскольку здесь сосредоточены основные запасы осетровых, уловы которых составляют 90-95 % их мировой добычи.

Эффективность экономики Каспийского водохозяйственного комплекса, безопасность и благосостояние населения проживающего в прибрежной зоне, в значительной степени зависят от гидрометеорологического режима моря и, прежде всего от колебаний его уровня. С резкими колебаниями уровня связан комплекс серьезных негативных экономических и экологических последствий для прибрежной зоны всех прикаспийских стран. Так, в результате многоводной длительной серии, начавшейся в 1978 г. и вызвавшей подъем уровня более чем на два метра все созданное человеком в прибрежной полосе подверглось затоплению или подтоплению. Экономический ущерб от этого, даже по весьма приближенным оценкам, составляет не менее 2 млрд. долларов.

Для выявления причин колебаний уровня моря и разработки методов его долгосрочного прогноза необходимы данные об изменчивости компонент водного баланса, в том числе испарения и осадков за многолетний период времени. Данные наблюдений на береговых или островных станциях, как правило, являются нерепрезентативными при оценке испарения и осадков для открытой акватории моря. Кроме того, все большие трудности возникают из-за существенного сокращения сети метеорологического мониторинга после 1990 г., когда многие станции были закрыты. Поэтому необходимо искать другие источники гидрометеорологической информации.

**Цель работы** – статистическое описание характеристик водного баланса Каспийского моря по данным реанализа на основе методов многомерного статистического анализа и уточнение физико-статистического метода долгосрочного прогноза уровня моря.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1 Оценка возможности использования глобального архива «ретроспективного анализа» (реанализа) CDAS (Climate Data Assimilation System) для изучения пространственно-временных закономерностей полей испарения и осадков над морем.

2 Выявление пространственно-временных закономерностей полей испарения, осадков и их разности (эффективного испарения) за длительный

период времени (1949-2005 гг) с помощью методов многомерного статистического анализа, в том числе,

– районирование акватории моря по межгодовым колебаниям компонент вертикального влагообмена с помощью методов кластерного и факторного анализов,

– типизация межгодовых колебаний компонент вертикального влагообмена на однородные градации методом кластерного анализа,

– классификация сезонного хода полей вертикального влагообмена для всех районов моря,

3 Анализ трендов и цикличностей в межвековых и межгодовых колебаниях уровня моря и трендов в межгодовых колебаниях компонент вертикального влагообмена

4 Комплексный анализ факторов формирования межгодовых колебаний уровня моря и уточнение физико-статистического метода долгосрочного прогноза уровня

#### **На защиту выносятся:**

1 Закономерности межгодовой изменчивости полей испарения, осадков, эффективного испарения и уровня моря,

2 Пространственно-временная классификация полей испарения, осадков и эффективного испарения на основе методов многомерного статистического анализа,

3 Уточнение физико-статистического метода долгосрочного прогноза уровня моря

#### **Научная новизна:**

- Показано, что глобальный архив реанализа CDAS (Climate Data Assimilation System) может служить основой системы мониторинга полей испарения и осадков для Каспийского моря,

- Впервые выполнено районирование акватории моря по межгодовым колебаниям компонент вертикального влагообмена с помощью методов кластерного и факторного анализов,

- Осуществлена типизация межгодовых колебаний и сезонного хода полей испарения, осадков и их разности за период 1949-2005 гг на основе алгоритмов кластерного анализа,

- В межвековом ходе уровня моря за последние 2000 лет с помощью спектрального анализа выделены циклы с периодами 1990, 830, 560, 410, 320, 240, 200 и 110 лет,

- Предложены две модели долгосрочного прогноза среднегодового уровня моря, являющиеся естественным уточнением физико-статистического метода прогноза уровня, точность которых удовлетворяет практическим требованиям

**Практическая значимость работы.** Для оценки таких трудно определяемых компонент водного баланса, как испарение и осадки целесообразно

использовать глобальный гидрометеорологический архив CDAS (Climate Data Assimilation System), который дает возможность выявить не только временную, но и пространственную изменчивость указанных компонент Долгосрочный прои ноз среднегодовых значений уровня является исключительно важным для всего комплекса прибрежной инфраструктуры моря, безопасного осуществления хозяйственно-экономической деятельности на берегах Каспийского моря, функционирования шельфовых сооружений и рыбного хозяйства

**Личный вклад автора.** Автором выполнена пространственно-временная классификация полей испарения, осадков и эффективного испарения за многолетний период времени (1949-2005 гг) С помощью методов многомерного статистического анализа и предложена географическая интерпретация полученных результатов Проведен анализ трендов и цикличностей в межвековых и межгодовых колебаниях уровня моря и трендов в межгодовых колебаниях компонент вертикального влагообмена Осуществлено уточнение физико-статистического метода долгосрочного прогноза уровня моря

**Апробация работы** Основные положения и отдельные результаты работы обсуждались на международной конференции «Изменение климата и окружающая среда» РГГМУ Санкт- Петербург, 2005, на третьей международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и научных работников «Международные и отечественные технологии освоения природных минеральных ресурсов и глобальной энергии» АГУ Астрахань, 2004, на международной конференции ЮНЕСКО по теме «Водные запасы проблемы, перспективы» БГУ 2003, на итоговой сессии УС РГГМУ 2006 и итоговой сессии УС БГУ 2004, на семинаре кафедры ПО и ОПВ РГГМУ

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 1 статья в журнале из списка ВАК

**Структура и объем работы** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 96 страниц, включая 34 рисунка и 19 таблиц Список литературы составляет 98 наименований, в том числе 10 на иностранных языках

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту и практическая значимость полученных результатов

В первой главе «*Краткий обзор методов многомерного статистического анализа*» рассматриваются те методы многомерного анализа, которые непосредственно используются при выполнении расчетов в данной работе Это метод главных компонент, метод факторного анализа, метод кластерного анализа Обсуждаются их конкретные алгоритмы в рамках прикладного пакета статистических программ Statistica 6 0

Вторая глава «Пространственно-временная изменчивость полей испарения и осадков» включает описание исходных данных полей испарения и осадков, районирование акватории моря по межгодовым колебаниям испарения, осадков и эффективного испарения, а также типизацию их межгодовых колебаний и классификацию сезонного хода

В разделе 2.1 «Исходные данные» обосновывается необходимость альтернативного источника информации для оценки испарения и осадков над морем, поскольку традиционные гидрометеорологические данные для их оценки являются нерепрезентативными для открытой акватории моря. Кроме того, все большие трудности возникают из-за существенного сокращения сети метеорологического мониторинга в последнее десятилетие XX века. Очевидно, в качестве такого альтернативного источника может быть использован глобальный архив CDAS (Climate Data Assimilation System), являющийся частью системы так называемого «ретроспективного» анализа» (реанализ) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis, находящегося в свободном доступе на одном из интернетовских сайтов ([http //sg162 wwb noaa gov 8080](http://sg162.wwb.noaa.gov/8080)), в котором одновременно приводятся среднемесячные данные по осадкам и испарению.

Их значения заданы в узлах первичной широтно-долготной сетки  $1875^{\circ}\text{Ч}1875^{\circ}$  с 1949 г и оперативно пополняются с очень небольшим запаздыванием во времени. Основное преимущество их состоит в равномерном покрытии, как по акватории, так и во времени. В данной работе значения осадков и испарения выбирались для 11 точек сеточной области, схема расположения которых дается на рис 1.

В разделе 2.2 «Межгодовая изменчивость испарения и осадков над морем» дается сравнение рассчитанных нами среднегодовых значений компонент влагообмена с данными других авторов и рассматривается их межгодовой ход для моря в целом за период 1949-2005 гг. Среднегодовое значение испарения после исключения систематической ошибки оказалось равным 1098 мм, осадков – 230 мм, а эффективного испарения – 868 мм, что неплохо согласуется с данными других авторов. На рис 2 приводится межгодовой ход испарения, осадков и эффективного испарения за указанный период времени для моря в целом. Нетрудно видеть, что для всех компонент влагообмена характерен отрицательный линейный тренд, который значим по критерию Стьюдента на уровне  $\alpha=0,05$ . При этом тренд в испарении описывает 14 % дисперсии исходного процесса, тренд в осадках – 7 %, в эффективном испарении – 11 %.

Что касается пространственных особенностей формирования трендов в компонентах влагообмена на акватории моря, то максимальные тренды в испарении отмечаются в юго-восточной части моря, а минимальные – в северной части моря. В осадках дело обстоит несколько иначе. Максимальные значения тренда наблюдаются в северо-западной части моря, а ми-

нимальные – в южной части моря. В эффективном испарении величины трендов распределены аналогично испарению, так как их максимальные значения наблюдаются в юго-западной части моря, а минимальные – в северной его части.

В разделе 2.3 «Районирование акватории моря по межгодовым колебаниям испарения и осадков» использовались иерархическая классификация методом Уорда и факторный анализ. Акваторию моря по межгодовым колебаниям испарения можно разделить на 3 класса, а по межгодовым колебаниям осадков – на 2 класса. Перенесение результатов классификации на карту позволило для испарения выделить три квазиоднородных района: северный, центральный и южный, причем распределение их носит достаточно хорошо выраженный зональный характер (рис. 3). Для осадков северный и центральный районы объединились в один. Также 2 района выделено в пространственном распределении эффективного испарения.

Чтобы убедиться в достоверности выделенных районов, мы дополнительно использовали для классификации факторный анализ. Разложению подвергались матрицы размером 11×57. В табл. 1 представлены собственные числа разложения после первого и второго вращений для рассматриваемых компонент водного баланса.

Таблица 1

**Собственные числа разложения до вращения и после вращения испарения, осадков и эффективного испарения**

Собственные числа	Испарение			Осадки		Эффективное испарение	
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
до вращения	7,48	1,58	1,12	5,55	2,77	5,98	2,5
Вклад, %	68	14	10	51	25	54	23
после вращения	3,76	2,54	3,99	5,29	3,04	5,67	2,82
Вклад, %	34	22	36	48	28	51	26

Суммарный вклад первых трех факторов в дисперсию поля испарения составляет 92 %, двух факторов в дисперсию поля осадков – 76 %, эффективного испарения – 77 %. В таблице 2 дается распределение факторных нагрузок. Полуужирным шрифтом выделены максимальные нагрузки в каждой строке. Перенесение этих результатов на карту показывает, что выделенные квазиоднородные районы в точности соответствуют районированию компонент водного баланса, полученного с помощью кластерного анализа.

**Распределение факторных нагрузок (ФН) полей испарения,  
осадков и эффективного испарения**

Номер точек	Испарение			Осадки		Эффективное испарение	
	1 ФН	2 ФН	3 ФН	1 ФН	2 ФН	1 ФН	2 ФН
точка 1	0,05	<b>0,95</b>	0,02	<b>0,69</b>	-0,18	-0,13	<b>0,79</b>
точка 2	0,27	<b>0,77</b>	0,51	<b>0,93</b>	-0,07	0,07	<b>0,89</b>
точка 3	0,25	<b>0,81</b>	0,47	<b>0,85</b>	0,06	0,39	<b>0,84</b>
точка 4	0,31	0,28	<b>0,85</b>	<b>0,92</b>	0,09	0,05	<b>0,59</b>
точка 5	0,36	0,22	<b>0,88</b>	<b>0,89</b>	0,26	<b>0,75</b>	0,43
точка 6	0,52	0,22	<b>0,81</b>	<b>0,80</b>	0,46	<b>0,88</b>	0,26
точка 7	0,59	0,22	<b>0,74</b>	<b>0,65</b>	0,62	<b>0,95</b>	0,18
точка 8	<b>0,75</b>	0,22	0,59	0,28	<b>0,80</b>	<b>0,95</b>	0,01
точка 9	<b>0,78</b>	0,26	0,53	0,31	<b>0,77</b>	<b>0,95</b>	0,11
точка 10	<b>0,89</b>	0,05	0,25	-0,50	<b>0,65</b>	<b>0,81</b>	-0,18
точка 11	<b>0,91</b>	0,19	0,31	-0,32	<b>0,83</b>	<b>0,90</b>	0,00

В разделе 2 4 «Типизация межгодовых колебаний испарения и осадков» приводятся результаты разбиения временных рядов компонент водного баланса на 5 однородных градаций «ниже нормы», «норма», «выше нормы», «значительно ниже нормы» и «значительно выше нормы» Использование для этой цели кластерного анализа представляется наиболее адекватным решением, поскольку в данном случае значения временного ряда, отнесенные в одну градацию, оказываются наиболее близкими, в то время как различия значений, принадлежащих разным градациям, напротив, максимальны При этом границы между классами могут не совпадать с долями среднеквадратического отклонения и даже среднее значение в градации «норма» может отличаться от среднего арифметического всего ряда В таблице 3 приведены оценки границ распределения среднегодовых значений испарения, осадков и эффективного испарения за 1949-2005 гг для указанных градаций

В разделе 2 5 «Классификация сезонного хода компонент водного баланса» рассматривается выделение квазиоднородных сезонов года путем построения дендрограмм методом Уорда для квазиоднородных районов моря для среднемноголетних месячных значений испарения, осадков и их разности Результаты классификации приводятся в табл 4

Таблица 3

Распределение среднегодовых значений испарения, осадков, и эффективного испарения на пять градаций для всей акватории моря

Параметр	Градация				
	Значительно ниже нормы	Ниже нормы	Норма	Выше нормы	Значительно выше нормы
	Испарение				
Нижняя граница	684	886	1060	1196	1355
Среднее	778	966	1112	1241	1427
Верхняя граница	831	1031	1160	1296	1460
	Осадки				
Нижняя граница	138	173	202	246	345
Среднее	158	188	219	274	366
Верхняя граница	172	201	245	312	423
	Эффективное испарение				
Нижняя граница	475	652	783	879	1152
Среднее	561	723	810	989	1197
Верхняя граница	615	766	843	1074	1296

Таблица 4

Структура квазиоднородных сезонов для испарения, осадков и эффективного испарения в различных районах моря

Район		Холодный период	Теплый период		
		Зимний сезон	весенний сезон	летний сезон	осенний сезон
испарение	северный	I, II, III, XI, XII	IV, V	VI, VII, VIII	IX, X
	центральный	I, II, III	VI, V	VI, VII, VIII, IX, X	XI, XII
	южный	I, II, XII	III, IV, V	VI, VII, VIII, IX	X, XI
	море	I, II, III	VI, V	VI, VII, VIII, IX, X	XI, XII

Район		Холодный период	Теплый период		
		Зимний сезон	весенний сезон	летний сезон	осенний сезон
осадки	северный	I, II, III, XI, XII	IV, V	VI, VII, VIII	IX, X
	южный	I, XI, XII	II, III, IV	V, VI, VII, VIII	X, IX
	море	I, II, III	IV, V, VI	VII, VIII, IX	X, XI, XII
Е-Р	северный	I, II, III	IV, V	VI, VII, VIII, IX, X	XI, XII
	южный	I, II, III, XI, XII	IV, V	VI, VII, VIII	IX, X
	море	I, II, III	IV, V	VI, VII, VIII, IX, X	XI, XII

В целом структура сезонов в испарении и осадках очень похожа. Переходные сезоны (весна и осень) в основном состоят из двух месяцев. В северном районе зимний сезон длиннее летнего сезона, а в центральном и южном, наоборот, он короче.

В третьей главе «Факторы формирования изменчивости уровня и долгосрочный прогноз» дается краткий обзор методов долгосрочного прогноза уровня Каспийского моря, рассматривается его межвековая и межгодовая изменчивость, обсуждаются факторы формирования и физико-статистический метод долгосрочного прогноза уровня.

В разделе 3.1 «Краткий обзор методов долгосрочного прогноза уровня Каспийского моря» приводится классификация морских прогнозов, исходя из которой методы долгосрочного прогноза делятся на 6 групп: гидродинамические, генетические, вероятностные, климатические, физико-статистические и статистические. Применительно к прогнозам уровня Каспийского моря дается краткий обзор исследований, посвященных данной чрезвычайно сложной проблеме, для каждой из этих групп. Впрочем, подчеркнем, что разделение на указанные группы в определенной степени условно, ибо некоторые методы сложно отнести к конкретной группе.

В разделе 3.2 «Межвековая и межгодовая изменчивость уровня моря» рассматриваются изменения уровня Каспия в историческое время, т.е. за последние 2000 лет. При этом используются палеоклиматические данные, полученные в работе (Варущенко и др., 1987), в которой восстановлен ход уровня моря по десятилетиям с начала нашей эры, а также данные инструментальных наблюдений в г. Баку с 1840 г. по настоящее время. Хотя

точность восстановленных палеоклиматических значений уровня практически невозможно проконтролировать, тем не менее, это дает возможность приближенного сравнения колебаний уровня на современном этапе и в отдаленном прошлом

Следует отметить, что в прошлом неоднократно наблюдались периоды, в течение которых уровень был существенно выше или ниже современных отметок. Так, полный размах колебаний по палеоклиматическим данным составляет 8,5 м, а по инструментальным данным – только 3,7 м (рис 4) Это означает, что колебания уровня в прошлом столетии не относятся к числу выдающихся событий в истории Каспия, а представляют рядовое явление

Десятилетние данные временного ряда уровня за последние 2000 лет были подвергнуты спектральному анализу Выделен ряд гармоник, характеристики которых с оценкой значимости по критерию Стьюдента, даются в табл 5 Все представленные в табл 5 гармоники являются значимыми на уровне значимости  $\alpha=0.05$

Таблица 5

Характеристика циклов в межвековом ходе уровня Каспийского моря за последние 2000 лет

Период, годы	Амплитуда см	Вклад %	$T_{\text{крит}}$	$T^*$
1990	188,8	30,1	1,96	11,5
830	122,7	11,9	1,96	5,8
560	112,9	10,1	1,96	5,2
410	126,3	13,3	1,96	6,2
320	93,7	7,4	1,96	4,2
240	76,4	5,5	1,96	3,7
200	55,8	3,9	1,96	3,1
110	78,3	5,8	1,96	3,9

Наиболее мощная гармоника, имеющая период 1990 лет, в данном случае имеет смысл нелинейного тренда Вклад ее в дисперсию исходного ряда достигает 30 % Выделенные нами циклы описывают около 88 % дисперсии исходного ряда. Аппроксимация уровня моря данными гармониками имеет следующий вид

$$h_{\text{загрм}} = A_{1990} \sin(\omega_{1990} t - \varphi_{1990}) + A_{830} \sin(\omega_{830} t - \varphi_{830}) + A_{560} \sin(\omega_{560} t - \varphi_{560}) + A_{410} \sin(\omega_{410} t - \varphi_{410}) + A_{320} \sin(\omega_{320} t - \varphi_{320}) + A_{240} \sin(\omega_{240} t - \varphi_{240}) + A_{200} \sin(\omega_{200} t - \varphi_{200}) + A_{110} \sin(\omega_{110} t - \varphi_{110}) \quad (1)$$

Результаты предвычисления уровня по формуле (1) приводятся на рис 4 Нетрудно видеть, что гармоники довольно хорошо описывают основные закономерности в межвековых колебаниях уровня

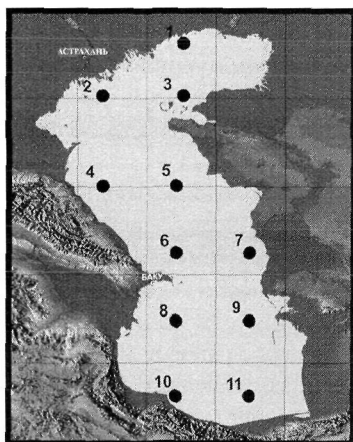


Рис. 1. Схема расположения точек широтно-долготной сетки архива CDAS, приходящихся на акваторию моря.

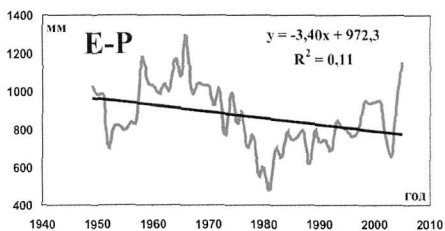
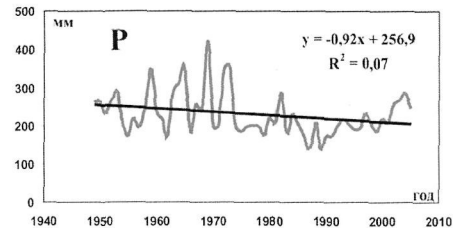
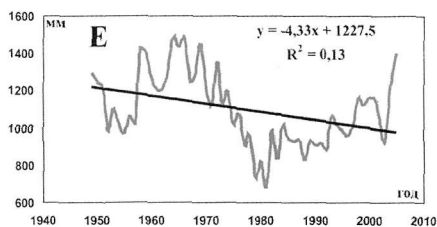


Рис. 2. Межгодовой ход испарения (E), осадков (P) и эффективного испарения (E-P) за 1949-2005 гг. и их линейные тренды

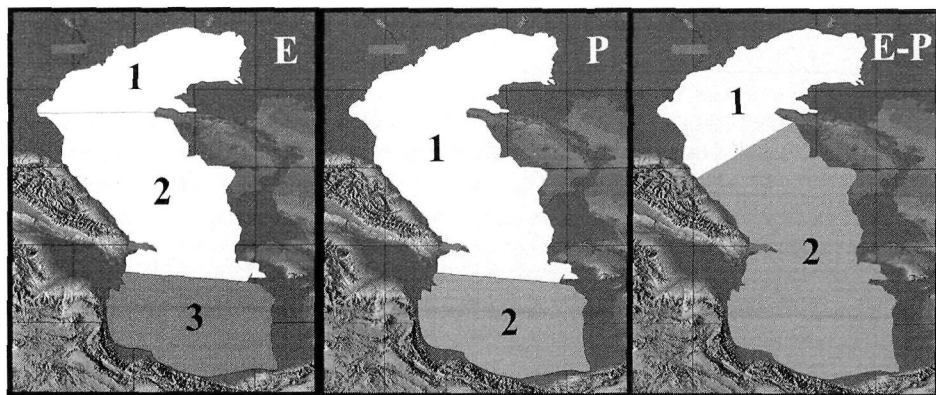


Рис. 3. Районирование акватории Каспийского моря по характеру межгодовых колебаний испарения (E), осадков (P) и эффективного испарения (E-P).

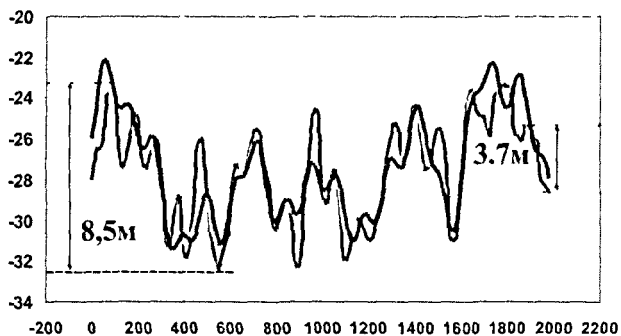


Рис 4 Межвековой ход уровня (красная кривая) и его аппроксимация (синяя кривая) по формуле (1)

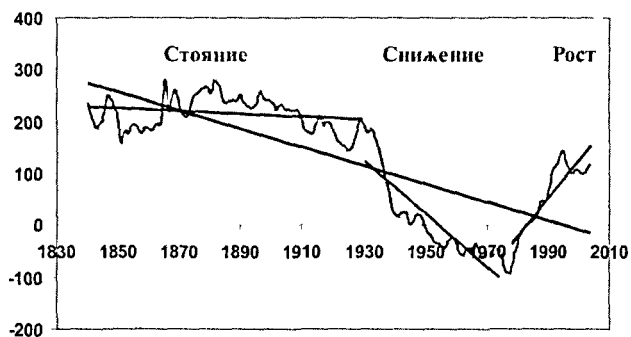


Рис 5 Межгодовой ход и тренды уровня моря



Рис 6 Сопоставление фактических и прогностических по модели (10) значений морского уровня в г Баку

Максимальная ошибка отмечается в V-VI веках и очевидно связана с ненадежными палеоклиматическими данными для этого периода времени

Анализ межгодовых колебаний уровня моря за период 1840-2005 гг. в г Баку показывает, что диапазон изменений уровня в указанный промежуток времени составил примерно 3,7 м. При этом можно выделить три достаточно стабильных периода, в течение которых уровень характеризуется однонаправленными изменениями. К ним относятся (рис. 5) фаза относительно стабильного стояния уровня (1840-1929 гг.), фаза резкого снижения уровня (1930-1977 гг.) и фаза его резкого повышения (1978-2005 гг.)

Как следует из рисунка 5, в межгодовом ходе отмечается ярко выраженный линейный тренд, который описывает 75 % дисперсии исходного ряда. Анализ первичных статистических характеристик для указанных выше трех однородных периодов показал, что минимальная изменчивость уровня, приходится на фазу стояния уровня. Из оценок положения (среднего, моды, медианы), а также коэффициентов асимметрии и эксцесса ясно, что распределение уровня для каждой фазы значительно отличается от нормального.

В разделе 3.3 «Факторы формирования колебаний уровня моря» довольно подробно обсуждается генезис межгодовых колебаний уровня. Данный вопрос представляется чрезвычайно важным, поскольку современная наука оказалась не в состоянии предсказать длительную многогодную серию, начавшуюся в 1978 г. и вызвавшую подъем уровня более чем на два метра. В результате этого подъема многочисленные объекты прибрежной инфраструктуры подверглись затоплению или подтоплению. Очевидно, главной причиной неудачных прогнозов следует считать отсутствие до последнего времени адекватных физических представлений о природе формирования межгодовой изменчивости уровня моря.

В общем случае на изменения уровня воздействует большое число различных по своей природе факторов, которые можно разделить на четыре группы:

- 1 Геолого-геодинамические факторы
- 2 Космогеофизические факторы
- 3 Антропогенные факторы
- 4 Гидрометеорологические факторы

Анализ этих факторов показывает, что именно гидрометеорологические факторы, прежде всего, обуславливают межгодовую изменчивость уровня моря через соответствующие изменения водного баланса. В частности, в работах В.Н. Малинина была достаточно достоверно установлена преимущественно климатическая обусловленность межгодовых колебаний уровня Каспийского моря и предложена концептуальная модель их формирования, суть которой сводится к следующему:

Межгодовые колебания уровня Каспия определяются процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике

При усилении процессов циклонической активности в Северной Атлантике и, прежде всего, в области исландской депрессии происходит возрастание испарения и понижение температуры поверхности океана. При этом увеличивается влагосодержание атмосферы. Кроме того, усиление циклонической активности вызывает повышение зональной составляющей эффективной скорости горизонтального переноса атмосферной влаги, характеризующей количество переносимого водяного пара в системе средней циркуляции атмосферы и крупномасштабных синоптических вихрей. Наконец, при росте циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его пространственные миграции. В свою очередь, его углубление усиливает интенсивность Северо-Атлантического колебания, которые в значительной степени регулирует адвективный (за счет средней циркуляции) зональный перенос атмосферы в умеренных широтах. Все это вместе взятое должно приводить к значительному повышению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрей на европейский континент и европейскую территорию России (ЕТР). Естественно, при ослаблении циклонической и возрастании антициклонической активности картина будет меняться на противоположную.

Таким образом, если вследствие процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике большее количество атмосферной влаги будет переноситься в системе преобладающего зонального переноса на континент, то соответственно большее количество осадков должно выпасть в бассейне Волги. Следовательно, происходит увеличение ее годового стока и наблюдается положительное приращение уровня моря. Обратная картина отмечается при ослаблении зонального переноса атмосферной влаги в Северной Атлантике, когда в бассейне Волги выпадает меньшее количество осадков, что приводит к уменьшению годового стока и отрицательным приращениям уровня. Итак, колебания уровня Каспия следует рассматривать как интегральный индикатор влагообмена в системе океан-атмосфера-суша.

В разделе 3.4 «Физико-статистический метод долгосрочного прогноза уровня» дается обоснование этого метода и представлены результаты двух прогностических моделей, позволяющих предвычислять уровень моря с практической точки зрения с достаточной точностью. Рассмотренная выше концептуальная модель формирования межгодовых колебаний УКМ послужила основой разработки физико-статистического метода его долгосрочного прогноза (В.Н. Малинин, 1994). Суть его состоит в том, что вначале устанавливаются физические связи функции отклика с определяющими факторами, а затем уже на статистической основе строится прогностическая модель, заблаговременность которой зависит от инерционности воздействующих на изучаемый процесс факторов. При этом статистическим аппаратом для решения указанной задачи обычно служит классический

метод множественной регрессии В общем случае прогностическую схему для уровня моря можно разбить на три последовательных этапа 1 – прогноз стока Волги, 2 – прогноз изменений объема моря, 3 – прогноз УКМ

При построении прогностической модели стока Волги предикторами служат осадки, выпавшие на территории бассейна за предшествующие два года Но поскольку, как было показано выше, осадки сами являются продуктом крупномасштабного влагообмена в системе океан-атмосфера-материк, то это вызывает необходимость учета процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике В результате возникает необходимость в построении многоступенчатой (иерархической) прогностической модели стока Волги, состоящей из нескольких локальных (частных), причем каждая новая модель учитывает результаты предыдущей Прогноз изменений объема моря с высокой точностью осуществляется по прогностическим данным стока Волги Для прогноза непосредственно среднегодового уровня ( $h_{(t+1)}$ ) моря используется двухпараметрическая модель вида

$$h_{(t+1)} = f(h_{12t}, \Delta V_{(t+1)}), \quad (2)$$

где  $h_{12t}$  – уровень в декабре предшествующего года Значения  $h_{12t}$  и  $\Delta V_{(t+1)}$  характеризуют соответственно инерционную и динамическую составляющие в изменениях уровня Если  $\Delta V > 0$ , то уровень повышается, если  $\Delta V < 0$ , то он понижается

Независимый прогноз уровня моря по указанной схеме был осуществлен за период с 1967 по 1986 гг Стандартная ошибка его составила 5,1 см/год, причем максимальная ошибка, которая отмечалась в 1979 г, была равна только 10 см.

Несмотря на довольно высокую точность долгосрочного прогноза уровня моря, достаточно очевидными являются определенные недостатки рассмотренной выше прогностической схемы В частности, окончательный прогноз УКМ основан на предварительном прогнозе изменений объема моря и стока Волги Отметим также громоздкость прогностической схемы для стока Волги, обусловленной необходимостью построения иерархических моделей, которые требуют привлечения большого объема данных не только по характеристикам увлажнения в бассейне, но и по характеристикам взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике

Учитывая, что межгодовые колебания  $\Delta V$  и приращения уровня  $\Delta h$ , происходят практически синхронно, то перепишем выражение (2) как

$$h_t = f(h_{12(t-1)}, \Delta h_t), \quad (3)$$

где  $\Delta h_t = h_{12(t)} - h_{12(t-1)}$  – внутригодовые изменения УКМ Отсюда видно, что среднегодовой уровень моря может быть предвычислен по данным об уровне за декабрь текущего и предшествующего года Использование классичес-

кой модели множественной линейной регрессии для расчета среднегодового уровня моря на основе фактических данных об уровне за декабрь текущего и предшествующего года позволило получить следующее уравнение

$$h_1 = 10,41 + 0,46h_{12(i-1)} + 0,52h_{12(i)} \quad (4)$$

Отметим, что коэффициенты данной зависимости очень мало меняются с изменением объемов зависимой и независимой выборок. В таблице 6 приводятся параметры зависимости, когда в качестве зависимой выборки принимался период с 1949 по 1990 гг., а независимой – период с 1991 по 2005 гг. Естественно, что коэффициент детерминации данной модели, показывающий долю объясненной дисперсии функции отклика, очень близок к единице ( $R^2 = 0,997$ ). Очень важно, что расчет  $\hat{h}$  по независимым данным показал, что стандартная ошибка почти не изменилась по сравнению с обучающейся выборкой и составила  $\sigma_{y(x)} = 2,71$  см/год. Таким образом, данную величину можно рассматривать как теоретическую ошибку физико-статистического метода, т.е. тот предел, к которому нужно стремиться при построении прогностических моделей. На первом этапе, в качестве прогностической, рассматривалась инерционная модель вида

$$h_1 = 12,45 + 1,01h_{12(i-1)} \quad (5)$$

Таблица 6

**Оценки параметров регрессионных моделей для среднегодового уровня моря в г. Баку**

Модель	Коэффициент детерминации, $R^2$	Критерий Фишера, F	Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$ , см/год	Стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным, см/год
4	0,997	3652	2,71	3,12
5	0,946	707,3	8,51	7,24
7	0,854	114,5	15,49	12,38
8	0,948	357,6	8,47	6,18
9	0,954	293,0	8,04	7,58
10	0,954	293,0	8,04	5,90

Параметры данной модели, рассчитанные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 6. Для независимой выборки стандартная ошибка инерционного прогноза составляет  $\sigma_{y(x)} = 7,24$  см/год, что значительно ниже допустимой ошибки прогноза, определяемой по величине стандартного отклонения.

Из уравнения (3) следует, что поскольку величина  $h_{12(i-1)}$  является известной, то прогнозу подлежит только уровень моря в декабре текущего года  $h_{12i}$ . Очевидно, для его прогноза целесообразно вначале рассмотреть возможности чисто инерционной модели, предикторами в которой служат среднемесячные значения уровня моря предшествующего года, т е

$$h_{12i} = f(h_{12(i-1)}, h_{11(i-1)}, h_{1(i-1)}, h_{12(i-2)}), \quad (6)$$

где  $h_{12(i-2)}$  – среднемесячный уровень в декабре с заблаговременностью два года. Отсюда видно, что общее число предикторов в прогностической модели (6) равно  $m=13$ . В результате пошаговой регрессии получена оптимальная модель, которая включает в качестве предикторов уровень моря в декабре двух предшествующих лет и имеет вид

$$h_{12(i)} = 2,62 + 1,18 h_{12(i-1)} - 0,16 h_{12(i-2)}, \quad (7)$$

параметры которой, также представлены в табл. 6. Коэффициент детерминации модели составляет  $R^2=0,854$ , а стандартная ошибка прогноза по независимой выборке  $\sigma_{y(x)}=12,38$  см/год.

Подставляя (7) в основную модель (5), получаем окончательно следующую прогностическую модель для среднегодовых значений уровня моря

$$h_1 = 11,58 + 1,10 h_{12(i-1)} - 0,11 h_{12(i-2)} \quad (8)$$

Как видно из результатов моделирования (табл. 6), точность прогноза уровня заметно возросла, причем самое важное, что прогноз по независимой выборке оказался даже лучше, чем по зависимой выборке. Итак, по данным об уровне моря в декабре за два предшествующих года можно довольно уверенно прогнозировать среднегодовой уровень в г. Баку.

Однако, учитывая, что еще не все прогностические резервы исчерпаны, то было осуществлено дополнительное изучение возможных предикторов из числа компонент водного баланса моря и внешних факторов. Более эффективной по сравнению с (6) является прогностическая модель, которая содержит значения эффективного испарения  $E_{\phi}$  в точке с координатами ( $\varphi=37,08$  с. ш.,  $\lambda=50,37$  в. д.), находящейся вблизи г. Баку и аномалии температуры воздуха северного полушария  $\Delta T_{\text{сн}}$ , взятые в предшествующий год.

Итак, сформулируем модель в виде

$$h_1 = b_0 + b_1 h_{12(i-1)} + b_2 E_{\phi(i-1)} + b_3 \Delta T_{\text{сн}(i-1)} \quad (9)$$

В качестве зависимой выборки в регрессионной модели (10) принимался период с 1949 по 1990 гг., а независимой – период с 1991 по 2005 гг. Параметры модели (9) приводятся в табл. 6. Нетрудно видеть, что точность прогноза уровня заметно повысилась. В результате расчетов было установлено, что ошибки прогноза уровня могут быть еще более уменьшены, если удлинять зависимую выборку каждый раз на один год, заново пересчитывая коэф-

коэффициенты модели и делать независимый прогноз на один шаг вперед. Тогда коэффициенты регрессии в модели (9) зависят от времени  $t$

$$h_{t+1} = b_0(t) + b_1(t) h_{12t} + b_2(t) E_{\text{эф}} + b_3(t) \Gamma_{\text{см}} \quad (10)$$

Действительно, в этом случае стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным составляет лишь 5,9 см/год, что вполне соответствует практическим требованиям. Сопоставление прогностических и фактических значений уровня в г. Баку за независимый период времени дается на рис. 6. Нетрудно видеть, что максимальная ошибка отмечается в 1996 г. и равна 15 см. Таким образом, для практического использования можно рекомендовать прогностические модели (9) и (10). Первая из них требует минимум исходной информации, а вторая имеет минимальную среднеквадратическую ошибку прогноза морского уровня.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в настоящем исследовании.

1. *Впервые* для выявления пространственно-временных закономерностей полей испарения и осадков над морем использован глобальный архив CDAS (Climate Data Assimilation System), являющийся частью системы так называемого «ретроспективного» анализа» (реанализ) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis. Показано, что в осенне-зимний (август-март) период года в значениях испарения из архива CDAS присутствует положительная систематическая ошибка порядка 20 %, исключение которой позволяет получить корректные ряды по испарению. В значениях осадков над морем заметных систематических ошибок не выявлено. Учитывая, что архив CDAS оперативно пополняется с очень небольшим запаздыванием во времени, то он может служить основой системы мониторинга полей испарения и осадков для Каспийского моря.

2. В межгодовом ходе испарения, осадков и их разности (эффективное испарение) за период 1949-2005 гг. присутствуют отрицательные тренды. Величина тренда и ее вклад в дисперсию исходного процесса составляют соответственно для испарения -4,3 см/год и 37 %, для осадков -0,9 см/год и 26 % и для эффективного испарения -3,4 см/год и 33 %.

3. *Впервые* выполнено районирование акватории моря по межгодовым колебаниям компонент вертикального влагообмена с помощью методов кластерного и факторного анализов. Показано, что по межгодовым колебаниям испарения акватория моря может быть разделена на три квазиоднородных района (северный, центральный и южный), распределение которых носит хорошо выраженный зональный характер. Для осадков выделяются лишь два района: южный, совпадающий с аналогичным районом в испарении, и центрально-северный, объединяющий северный и центральный районы вместе. Для эффективного испарения выделяются также два района: северный и центрально-южный.

4 Впервые с помощью кластерного анализа осуществлена типизация межодовых колебаний испарения, осадков и эффективного испарения на пять однородных градаций и классификация их сезонного хода с выделением квазиоднородных сезонов

5 В межвековом ходе уровня моря за последние 2000 лет с помощью спектрального анализа выделены циклы с периодами 1990, 830, 560, 410, 320, 240, 200 и 110 лет. Наиболее мощная гармоника с периодом 1990 лет, вклад которой в дисперсию исходного ряда достигает 30 %, имеет смысл нелинейного тренда. Выделенные циклы описывают около 88 % дисперсии исходного ряда и довольно хорошо описывают межвековую изменчивость уровня моря.

6 Предложены две модели долгосрочного прогноза среднегодового уровня моря в г. Баку, являющиеся естественным уточнением физико-статистического метода прогноза уровня. В первой модели предикторами служат значения уровня моря в Баку в декабре за два предшествующих года. Во второй – значения уровня в декабре, эффективного испарения над Каспием и аномалии температуры воздуха северного полушария за предшествующий год. Показано, что стандартная ошибка прогноза уровня по независимым данным за период с 1991 по 2005 гг. в первом случае составляет 6,2 см/год, а во втором – 5,9 см/год, что существенно ниже допустимой ошибки прогноза и вполне приемлемо с практической точки зрения.

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1 *Малинин В.Н., Сафар Р.Т.* К уточнению физико-статистического метода долгосрочного прогноза уровня Каспийского моря // Вестник ВГУ, серия География. Геоэкология, 2007, №2, июль-декабрь с 13-17 (*данный журнал входит в список ВАК*)

2 *Малинин В.Н., Сафар Р.Т.* Использование физико-статистического метода для прогноза уровня Каспийского моря // Материалы итоговой сессии ученого совета РГГМУ-СПб изд. РГГМУ, 2006 с 65-67

3 *Сафар Р.Т.* Межгодовая изменчивость и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря. Международная конференция «Изменение климата и окружающая среда» РГГМУ (06-09.12.2005) Санкт-Петербург, 2005 с 221-224

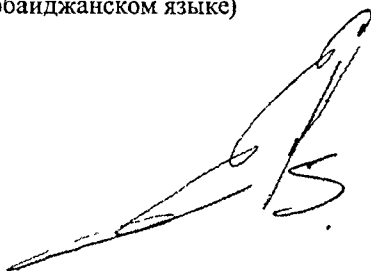
4 *Мехдиева Г.Н., Сафар Р.Т.* Долгосрочный прогноз стока реки Сулак. Материалы итоговой сессии ученого совета БГУ-Баку изд. БГУ, 2004 с 109-111. (оригинал на Азербайджанском языке)

5 *Сафар Р.Т.* Изучение временной структуры солнечной активности и колебания уровня Каспийского моря. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и научных работников «Международные и отечественные технологии освоения природных минеральных ресурсов и глобальной энергии» (06-08 октября 2004), АГУ Астрахань, 2004 с 83-85

6 Сафар РТ Изучение временной структуры солнечной активности  
Материалы итоговой сессии ученого совета БГУ- Баку изд БГУ, 2004  
с 142-144 ( оригинал на Азербайджанском языке)

7 Сафар РТ Долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря Мате-  
риалы итоговой сессии ученого совета БГУ- Баку изд, 2004 с 144-146 (   
оригинал на Азербайджанском языке)

8 Сафар РТ Сверхбольшие циклы временного хода стока реки Днеп-  
ра. Международная научно-практическая конференция ЮНЕСКО по теме  
«Водные запасы проблемы, перспективы» (10 09 2003), БГУ изд БГУ,  
2003 с 31-33 (оригинал на Азербайджанском языке)

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the left.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 130 Подписано в печать 15 05 2008 г Бумага офсетная  
Формат 60×84<sup>1/2</sup> Объем 15,1 п л Тираж 120 экз  
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, тел /факс (812) 275-73-00, 970-35-70  
asterion@asterion.ru