

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И КЛАССЫ МОРСКИХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ УКРАИНЫ НА МАСШТАБАХ МЕЖДЕСЯТИЛЕТНЕЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Представлены результаты факторного и кластерного анализов рядов средних годовых и пятилетних величин основных показателей гидрометеорологического режима. Выделены две основные моды, определяющие изменчивость гидрометеорологических условий, и предложена их интерпретация в терминах глобальных и региональных изменений климата. В рамках сокращения размерности пространства признаков выполнена объективная классификация гидрометеорологических условий, в результате которой получены три класса, различающиеся по степени близости исходных признаков к среднемноголетним нормам как для междесятилетнего, так и для межгодового масштабов изменчивости.

Ключевые слова: скорость ветра, температура воздуха и воды, атмосферные осадки, уровень моря, соленость морской воды, изменчивость гидрометеорологических условий, главные компоненты, факторный анализ, кластерный анализ.

Введение

Влияние глобальных изменений климата на регионы прибрежной зоны морей Украины проявляется в виде вариаций и трендов ветра, температуры воздуха и воды, потоков пресной воды и связанных с этим изменений уровня моря, солёности и циркуляции морских вод. Для оценки региональной реакции гидрометеорологических условий морской прибрежной зоны Украины на глобальные изменения климата исследуется межгодовая и междесятилетняя (декадная) изменчивость перечисленных и других параметров с помощью длительных рядов наблюдений на сети морских гидрометстанций, оцениваются линейные тренды и низкочастотные нелинейные изменения, которые сравниваются с изменениями индексов атмосферной циркуляции, солнечной активности (СА), Северо-Атлантического Колебания (САК) и Атлантической Мультидекадной Осцилляции (АМО) [1-10, 12-14]. Традиционный подход представляет собой раздельный анализ временных рядов средних месячных, годовых, пятилетних и т.д. значений показателей с целью определения многолетних норм, разброса, трендов и скрытых периодичностей. В метеорологической и климатологической практике для характеристики гидрометеорологических условий (ГМУ) обычно используются градации «близко к норме», «ниже» и «выше» нормы, относящиеся к отдельным гидрометеорологическим величинам, осредненным за некоторый период.

Цель данной работы - выяснение возможности описания изменений ГМУ по сокращённому числу исходных или некоторых обобщённых показателей, которые могут быть связаны с основными факторами их изменчивости. Кроме того, ставится задача поиска некоего естественного разделения на классы ГМУ по комплексу исходных или обобщённых показателей на масштабах межгодовой и междесятилетней (декадной) изменчивости.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались наиболее полные ряды наблюдений морских гидрометстанций Украины, расположенных вдоль берегов северо-западной части Чёрного моря и Крыма: Приморское, Одесса, Хорлы, Евпатория, Севастополь, Херсонесский маяк, Ялта и Феодосия [4, 7, 8]. Построены временные ряды среднегодовых значений скорости ветра (W , м/с), температуры воздуха (T_A , °C) и воды (T_W , °C), атмосферных осадков (PR , мм), уровня моря (SL , см) и солёности (S , ‰) за период 1945–2009 гг. (для солёности – за 1952–2009 гг.). Кроме того, для анализа декадной изменчивости построены ряды пятилетних средних за период 1925–2009 гг., 17 значений (для солёности – за 1950–2009 гг., 12 значений). В работе [4] показано, что в пределах черноморского побережья Украины на межгодовую и декадную изменчивость перечисленных показателей преимущественное

влияние оказывают внешние для региона факторы (за исключением солёности, где значимый вклад вносят местные условия). Поэтому далее в настоящей работе использовались ряды среднегодовых и пятилетних величин, осреднённых для всех указанных станций черноморского побережья Украины.

Для количественного описания основных факторов, влияющих на межгодовую и декадную изменчивость всей совокупности указанных гидрометеорологических показателей, использован алгоритм факторного анализа посредством выделения главных компонент корреляционной матрицы, реализованный в пакете статистического анализа PAST [15] (последняя версия программы – <http://folk.uio.no/ohammer/past>). На основе среднегодовых или пентадных величин гидрометеорологических показателей получается набор новых переменных – скрытых (не измеряемых непосредственно) факторов, ранжированных по их вкладу в суммарную дисперсию изменчивости исходных переменных. Анализ факторных нагрузок позволяет интерпретировать выделенные факторы как проявления влияния различных процессов (тенденций) на изменения региональных гидрометеорологических условий. При этом многомерное пространство описания ГМУ может быть сокращено от 5-6 исходных величин до 2 новых обобщённых переменных (факторов), описывающих максимальный вклад в суммарную изменчивость. Выбор этих факторов (главных мод) осуществляется на основе анализа графика ранжированных собственных чисел корреляционной матрицы, характеризующих дисперсию, описываемую каждой модой, а также в соответствии с критерием отсечения Джоллиффе [15]. Остальные факторы обычно отождествляются с вкладом мелкомасштабных процессов или шума в исходных данных. Коэффициенты вклада новых переменных в ГМУ каждого конкретного года или пятилетия можно рассматривать в качестве временных рядов вместо рядов исходных показателей либо подвергнуть субъективной или объективной классификации в двухмерном факторном пространстве с целью определения количества и характеристик типов (классов), различающихся по степени вклада основных мод в ГМУ побережья.

Сокращение пространства признаков ГМУ может быть сделано также на этапе анализа корреляционных матриц исходных переменных. Для описания условий меньшим числом переменных выбираются те, которые наименее статистически связаны с остальными, а из переменных, коррелирующих с одной или несколькими другими,

выбираются те, которые лучше характеризуют определённые свойства ГМУ (термический фон, динамика, «водность»). Дальнейшая классификация может быть выполнена в этом сокращённом пространстве исходных переменных, причем интерпретация результатов в этом случае более очевидна, чем для факторного пространства, поскольку они имеют привычный физический смысл.

Объективная классификация выполнялась путем последовательного применения двух стандартных методов кластерного анализа [15]. На первом этапе методом Варда по графику классификации («дереву кластеров») визуально определялось число классов. Затем применялся метод К-средних, который производит автоматическое разбиение на заданное количество классов, вычисляет характеристики переменных в каждом классе и производит дисперсионный анализ внутри- и межгрупповой изменчивости. Оба метода используют евклидову метрику для характеристики расстояния в многомерном пространстве признаков.

Анализ и обсуждение результатов

Рассмотрение полученных результатов начнем с иллюстрации анализа рядов средних пятилетних (пентадных) значений метеорологических и гидрологических показателей, представленных на рис. 1.

Каждое значение отнесено к срединному году пятилетнего интервала осреднения, т.е. для интервала 1925-1929 гг. – 1927; 1930-1934 гг. – 1932 и т.д. Корреляционная матрица (табл. 1) показывает, что некоторые переменные значимо коррелируют между собой, что должно отразиться на результатах факторного анализа.

Таблица 1
Корреляционная матрица средних пятилетних значений элементов гидрометеорологического режима украинского побережья Черного моря (подчеркнуты коэффициенты корреляции выше 0,5)

	W	TA	TW	PR	SL	S
W	1					
TA	-0,470	1				
TW	-0,401	<u>0,975</u>	1			
PR	<u>-0,509</u>	0,254	0,271	1		
SL	<u>-0,700</u>	<u>0,537</u>	<u>0,534</u>	<u>0,894</u>	1	
S	<u>0,838</u>	<u>-0,781</u>	<u>-0,741</u>	<u>-0,604</u>	<u>-0,825</u>	1

Анализу главных компонент подвергалась усечённая корреляционная матрица, без солёно-

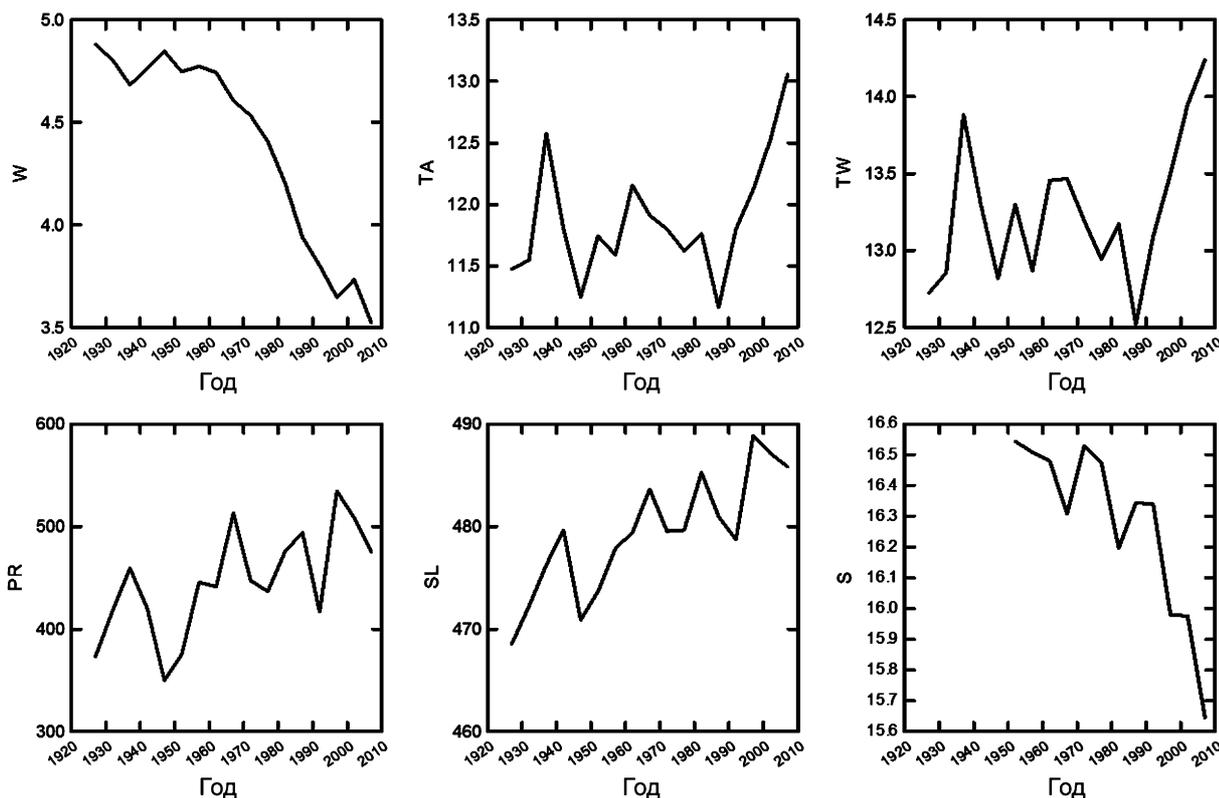


Рис. 1. Средние пятилетние величины показателей гидрометеорологического режима украинского побережья Черного моря за период 1925-2009 гг.

сти, поскольку ряд солёности более чем на треть короче остальных рядов. При этом солёность на декадном масштабе изменчивости сильно коррелирована с другими показателями.

Первые два собственных значения корреляционной матрицы в сумме описывают около 90 % суммарной дисперсии исходных рядов, причем основная (первая) мода дает вклад около 70%. Соответствующие собственные векторы корреляционной матрицы линейно зависят от исходных переменных. Факторные нагрузки, пропорциональные коэффициентам корреляции между новыми и старыми переменными, представлены в табл. 2. Они позволяют дать интерпретацию выделенным факторам (модам).

Таблица 2

Факторные нагрузки для средних пятилетних величин

Мода	W	TA	TW	PR	SL
1	-0,448	0,420	0,410	0,469	0,486
2	0,339	0,568	0,575	-0,382	-0,294

Первая мода определяется однонаправленным вкладом температур воздуха и воды, осадков и уровня моря и противоположно направленным вкладом скорости ветра, причем факторные на-

грузки распределены равномерно. Иными словами, она характеризует процесс усиления (ослабления) ветровой активности с одновременным понижением (повышением) термического фона и «водности». Вторая мода, вклад которой составляет около 20 % общей дисперсии, характеризуется однонаправленным изменением ветра и температурных показателей при противоположных изменениях показателей «водности». При этом преобладают факторные нагрузки от температур воздуха и воды.

На рис. 2а показаны кривые временного хода коэффициентов главных мод (цифры у кривых – номер моды), характеризующих декадную изменчивость ГМУ.

Табл. 2 и рис. 2а показывают, что в качестве обобщенного показателя изменчивости ГМУ могут служить коэффициенты 1-й моды, которая в одинаковой степени зависит от всех использованных первичных характеристик. Поскольку рост температурных показателей с одновременным увеличением притока пресных вод и ослаблением, в среднем, ветровой активности являются характерными признаками т.н. «глобального потепления», эта мода может интерпретироваться как показатель влияния глобальных климатических изменений на регион черноморского побережья

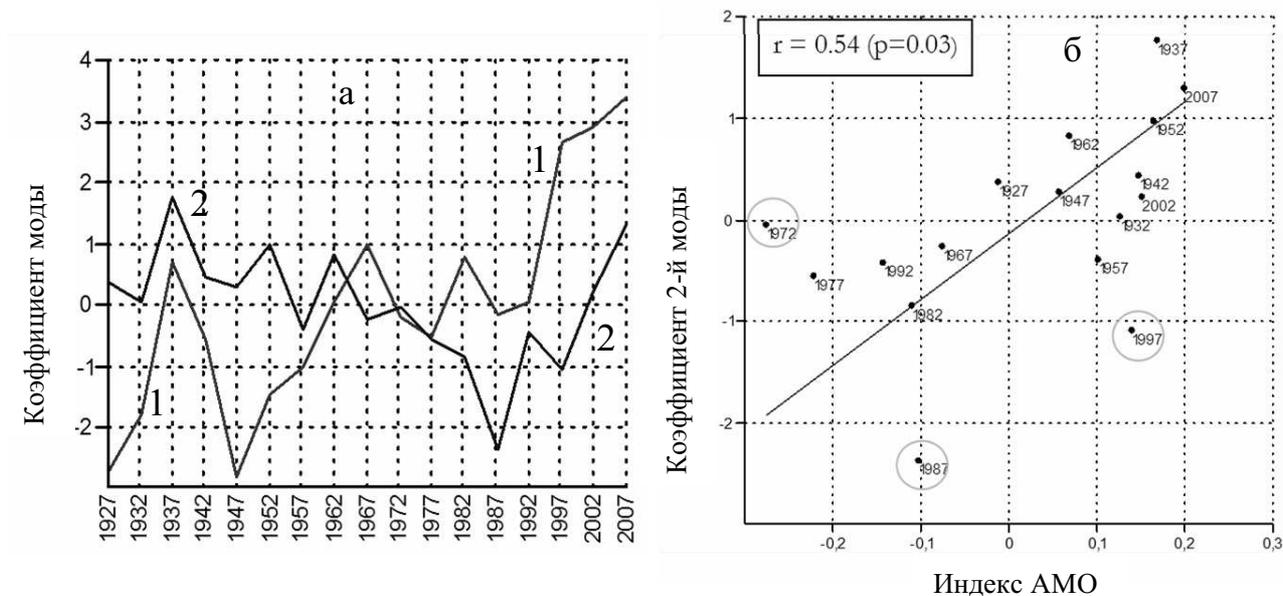


Рис. 2. (а) временной ход коэффициентов главных мод (1, 2) декадной изменчивости; (б) корреляция коэффициентов 2-й моды и средних пятилетних значений индекса АМО (коэффициент корреляции r и доверительная вероятность p – в рамке на рисунке)

Украины. Временной ход коэффициентов 1-й моды отличается присутствием ярко выраженного положительного линейного тренда, на фоне которого происходят колебания с периодом примерно 10-20 лет. Наиболее заметными являются потепление, увлажнение и снижение ветровой активности второй половины 1920-х – конца 1930-х годов с последующим похолоданием, ростом скорости ветра и снижением «водности» 1940-х годов. Затем наблюдается следующая фаза роста коэффициентов 1-й моды в 1950-1960-е годы, сменяющаяся относительно короткопериодными (10-15 лет) колебаниями в 1970-1980-х годах, после чего наступила фаза устойчивого потепления (вместе с увеличением «водности» и ослаблением ветра) в 1990-2000-е годы.

Коэффициенты второй моды демонстрируют ее наиболее заметный вклад в потепление 1930-х годов, похолодание 1980-х годов и современную фазу потепления. На фоне этого долгопериодного (50-60 лет) колебания также отмечаются относительно короткие флуктуации с периодом около 10 лет.

Попытка прямого сопоставления коэффициентов выделенных мод с соответственно осредненными по пентадам индексами глобальных климатических изменений СА, САК и АМО дала результаты только для пары «2-я мода – АМО» (рис. 26). Обнаружена значимая линейная корреляция, которая, очевидно, будет более тесной, если отбросить экстремальные пятилетки с центрами в 1972, 1987 и 1997 годах (обведены круж-

ками на рис. 26). Известно, что индекс АМО, представляющий собой среднюю аномалию температуры поверхности воды северной части Атлантического океана, служит хорошим показателем долгопериодных колебаний меридионального переноса тепла в Атлантике, т.е. автоколебательного процесса с основным периодом около 60 лет, не связанного напрямую с естественными или антропогенными факторами глобального потепления климата. Доказательства его воздействия на климатические и погодные условия в регионах Европы, а также Средиземного и Черного морей, обобщены в работе [11].

Таким образом, факторный анализ позволил выделить две основные моды (режима) изменений средних ГМУ черноморского побережья Украины, причем вторая мода, условно интерпретируемая как влияние АМО, вносит всего лишь около 20 % в изменчивость на декадных масштабах, а основную роль играет первая мода, которую условно можно связать с глобальными климатическими изменениями.

Кластерный анализ по методу Варда в факторном пространстве двух главных мод позволяет визуально выделить 3 группы пятилеток (рис. 3а). Автоматическая кластеризация по методу К-средних для этого числа классов дает такое разбиение: класс 1 – пятилетки с центральными годами 1927, 1932, 1937, 1942, 1947, 1952, 1957, 1962, 1972; класс 2 – 1967, 1977, 1982, 1987, 1992; класс 3 – 1997, 2002, 2007 (рис. 3б).

Характеристику выделенных классов можно

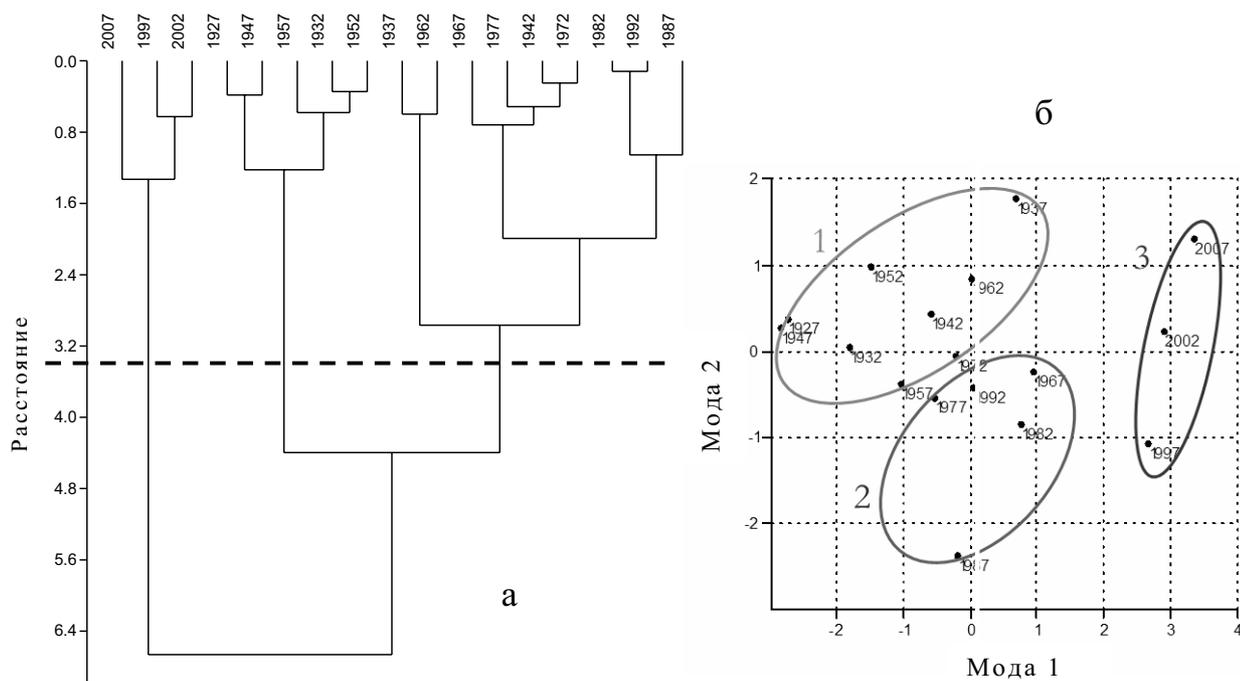


Рис. 3. Дерево кластеров по методу Варда (а) и визуализация классов пятилеток по методу К-средних в пространстве двух первых мод (б)

дать по величине и знаку вклада основных мод в изменчивость ГМУ: класс 1 – отрицательный или небольшой положительный вклад 1-й моды при положительном или небольшом отрицательном вкладе 2-й моды; класс 2 – минимальный вклад 1-й моды при отрицательном вкладе 2-й моды; класс 3 – положительный вклад 1-й моды (вклад 2-й моды меняется от отрицательного в конце 1990-х до положительного в конце 2000-х годов). Такая классификация позволяет дать генерализованную интерпретацию влияния основных факторов на ГМУ: если в довоенный и послевоенный период в ГМУ черноморского побережья Украины проявлялось воздействие обоих мод, то в период 1960-х – начала 1990-х годов основное влияние принадлежало 2-й моде («АМО»), а вторая половина 1990-х – конец 2000-х характеризовалась преобладанием 1-й моды («глобальное потепление»).

Следующий шаг – это попытка классификации ГМУ в пространстве исходных средних пятилетних показателей. На основе рассмотрения корреляционной матрицы (табл. 1) и матрицы факторных нагрузок (табл. 2) можно без потери информативности сократить размерность пространства с 5 до 3, при этом сохранив физический смысл описания гидрометусловий морского региона. Таким образом, остаются скорость ветра как показатель динамики атмосферы (ветровой активности), температура воздуха как показатель

термического фона и уровень моря как результат водного баланса (речной сток + осадки – испарение + суммарный поток через проливы), т.е. «водности». Поскольку указанные физические величины имеют различную размерность, выполняется их предварительная стандартизация – вычитание среднееголетнего значения и нормировка на среднеквадратическое отклонение (СКО).

Кластерный анализ по методу Варда позволяет выделить три отчетливых класса пятилеток в пространстве нормированных признаков (рис. 4а).

При заданном числе классов 3 метод К-средних дает разбиение, несколько отличающееся от результатов метода Варда: пятилетки с центральными годами 1967 и 1982 отнесены к классу пятилеток 1937, 1942, 1957, 1967, 1972, 1977, 1987, 1992 гг. Рис. 5 показывает, что к классу 1 отнесены пятилетки с термическим фоном и «водностью» ниже нормы, а ветровой активностью выше нормы. Класс 2 характеризуется близкими к норме температурой, ветром и «водностью». У пятилеток класса 3 – температура и уровень моря выше нормы, а скорость ветра ниже нормы.

В табл. 3 содержатся характеристики дисперсионного анализа полученной классификации. Высокие значения отношения Фишера указывают на значимое преобладание межгрупповой дисперсии над внутрigrупповой, при этом его

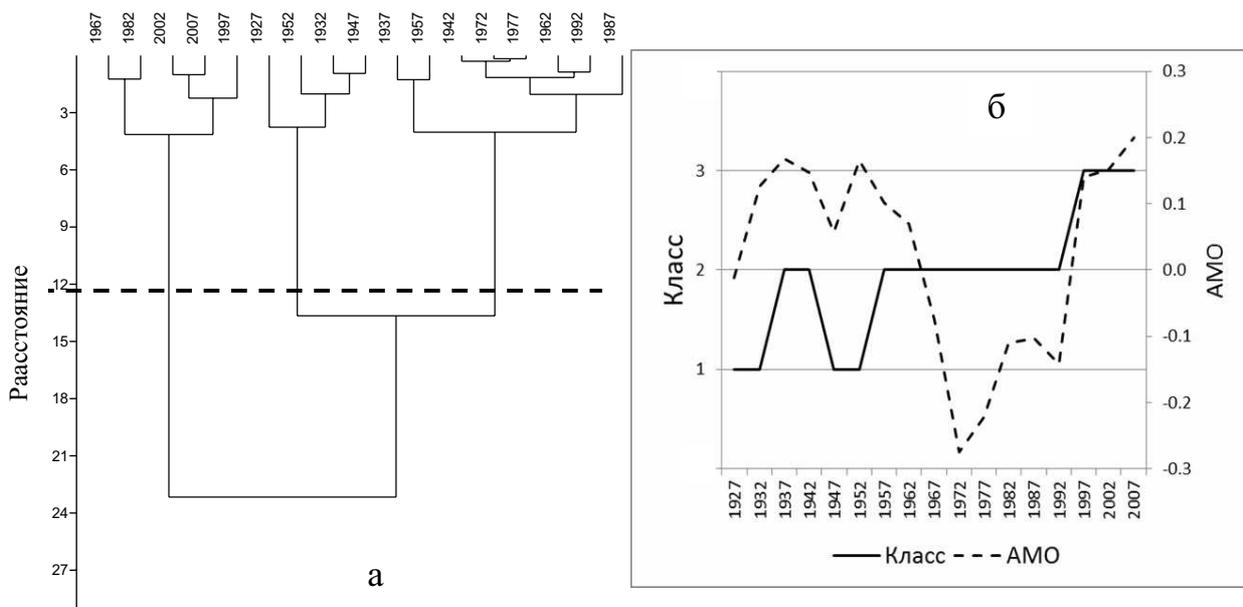


Рис. 4. Дерево кластеров по методу Варда (а) и временной ход классов по методу К-средних в сопоставлении с индексом АМО (б) для стандартизованных средних пятилетних гидрометеорологических переменных

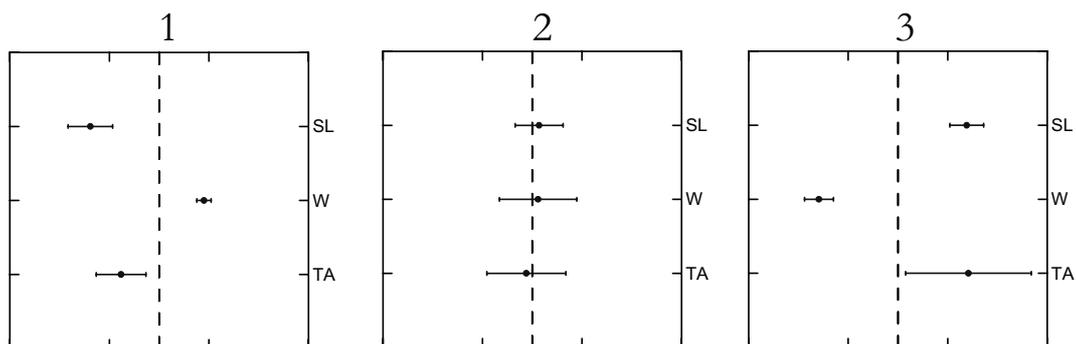


Рис. 5. Стандартизованные величины для трех классов средних пятилетних гидрометеорологических условий (вертикальный пунктир — среднемноголетняя норма, точки — средние значения показателей в классах, горизонтальные отрезки — пределы изменчивости соответствующих переменных)

Таблица 3
Дисперсионный анализ разбиения на классы среднепятилетних ГМУ по методу К-средних

Переменная	Межгрупповая сумма квадратов	Степени свободы	Внутригрупповая сумма квадратов	Степени свободы	Отношение Фишера
W	10,935	2	5,065	14	15,114
TA	8,501	2	7,499	14	7,935
SL	13,546	2	2,454	14	38,644
СУММА	32,983	6	15,017	42	

величина для каждой переменной характеризует роль этой переменной в результирующем разбиении на классы. Наибольший вклад в данную классификацию вносит уровень моря, наименьший — температура воздуха, как наиболее изменчивый (флуктуирующий) показатель (см. рис. 5).

Возвращаясь к размерным величинам, можно определить характеристики исходных переменных в каждом классе (табл. 4). Хотя классификация производилась без учета солёности, ее средние характеристики для каждого класса также приведены в табл. 4. Видно, что полученная классификация в большей степени отражает

Таблиця 4

Статистика среднепятилетних гидрометеорологических показателей в выделенных классах ГМУ
 -(N – число лет, СКО – средне-квадратическое отклонение от средней величины для класса)

Класс	Стат.	W	TA	TW	PR	SL	S
1	N	4	4	4	4	4	1
	Среднее	4,82	11,50	12,93	379	471	16,54
	СКО	0,06	0,21	0,26	28,5	2,2	-
2	N	10	10	10	10	10	8
	Среднее	4,45	11,82	13,19	455	480	16,39
	СКО	0,35	0,37	0,38	31,0	2,6	0,11
3	N	3	3	3	3	3	3
	Среднее	3,63	12,57	13,90	506	487	15,86
	СКО	0,11	0,47	0,37	29,4	1,5	0,19

воздействие 1-й моды и характеризуется увеличением средних температур, осадков и уровня моря при уменьшении скорости ветра и солёности с ростом номера класса.

На рис. 4б представлен временной ход классов средних пятилетних ГМУ, который показывает, что до середины 1950-х годов происходило переключение от класса 1 к классу 2 с периодом около 10 лет. Затем гидрометусловия оставались в рамках 2-го класса (близкие к норме) до середины 1990-х годов, после чего до последнего времени относились к 3-му классу (теплые, маловетренные условия, с повышенной «водностью» и пониженной солёностью прибрежных вод). Для сравнения на рис. 4б приведена кривая средних пятилетних индексов АМО. Видно, что переключение между 1-м и 2-м классами до середины 1950-х, а также переход к 3-му классу в 1990-х происходили квазисинхронно с изменениями индекса АМО. Однако существенное уменьшение АМО в период с начала 1960-х до начала 1990-х не сопровождалось переключением от 2-го к 1-му классу. Это можно объяснить, воспользовавшись рис. 1, 2б и табл. 2, 3. Поскольку ведущая роль в последней классификации принадлежит уровню моря SL, а вклад TA наименьший (табл. 3), индекс АМО, который лучше всего связан со второй модой (рис. 2 б), описываемой преимущественно термическими показателями (табл. 2), очевидно слабо влияет на рост уровня моря и количества осадков, которые отмечались в 1970-1980 гг. наряду со снижением температуры воздуха и воды (рис. 1). Иными словами, возможное влияние АМО на переключение от класса 2 к классу 1 через похолодание в этот период компенсировалось ослаблением ветровой активности и увеличением «водности», которые, наоборот, способствовали переключению к классу 3. Последующее потепление позволило реализовать этот переход.

Повторение вышеизложенного анализа для

рядов среднегодовых величин тех же показателей (рис. 6) позволило получить аналогичное описание межгодовой изменчивости ГМУ за 1945-2009 гг.

Картина декадной изменчивости сохраняется такой же, как и на рис. 1 для этого интервала, однако на нее накладываются флуктуации с периодами 2-5 лет. Амплитуда межгодовых флуктуаций относительно диапазона изменчивости наибольшая у показателей термического фона (TA, TW). Наличие высокочастотных компонент межгодовой изменчивости отражается, прежде всего, на величинах коэффициентов корреляции между переменными (табл. 5), а также на матрице факторных нагрузок после выделения главных мод (табл. 6).

Таблиця 5

Корреляционная матрица среднегодовых значений элементов гидрометеорологического режима украинского побережья Черного моря (подчеркнуты коэффициенты корреляции выше 0,5)

	W	TA	TW	PR	SL	S
W	1					
TA	-0,305	1				
TW	-0,292	<u>0,933</u>	1			
PR	-0,157	0,106	0,156	1		
SL	-0,390	0,430	0,483	<u>0,550</u>	1	
S	<u>0,585</u>	-0,392	-0,453	-0,238	<u>-0,668</u>	1

Таблиця 6

Факторные нагрузки для среднегодовых величин

Мода	W	TA	TW	PR	SL
1	-0,387	0,502	0,510	0,327	0,482
2	0,215	0,470	0,438	-0,654	-0,336

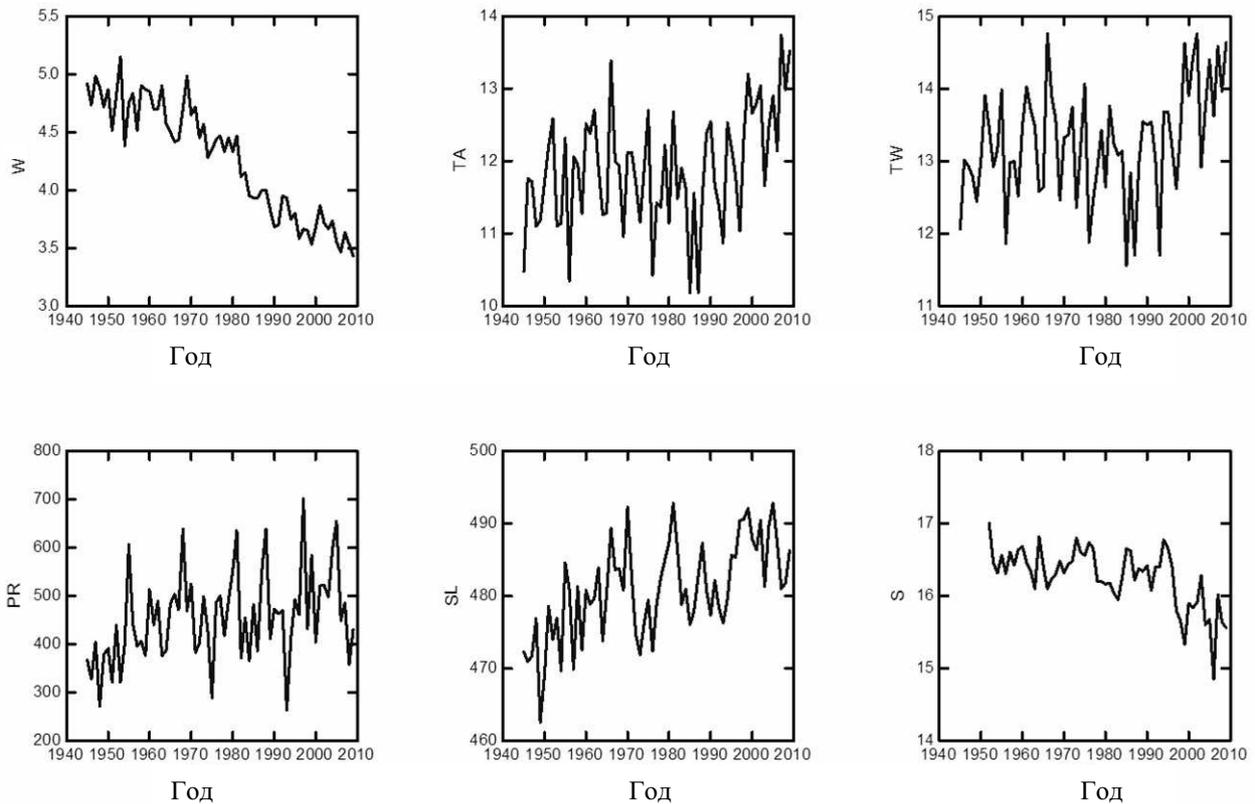


Рис. 6. Среднегодовые величины показателей гидрометеорологического режима украинского побережья Черного моря за период 1945–2009 гг.

Как следует из табл. 5, наиболее тесная корреляция по-прежнему наблюдается между температурами воздуха и воды. Сохранились высокие коэффициенты корреляции между уровнем моря и количеством осадков и между уровнем моря и соленостью (повышение уровня связано с притоком пресных вод, в том числе с осадками, а значит — с уменьшением солености морской воды). Относительно высокая положительная корреляция между скоростью ветра и соленостью является, скорее всего, следствием наличия значимого отрицательного тренда обеих переменных, но она также отражает и природный процесс повышения поверхностной солености прибрежных вод при усилении вертикального ветро-волнового перемешивания и сгонно-нагонных явлений, что способствует подъему более соленых вод нижних слоев к поверхности моря. Кроме того, значимый отрицательный тренд скорости ветра объясняет систематическое уменьшение испарения с поверхности моря, наблюдавшееся с начала 1950-х годов [10], а значит и рост пресноводного бюджета Черного моря, способствовавший повсеместному уменьшению поверхностной солености [1, 8, 13, 14]. Для сохранения единообразия подхода, соленость также была исключена из переменных, участвующих в факторном и кластерном анализе среднегодовых рядов.

Первая мода объясняет более 55 %, а вторая — 23 % суммарной дисперсии нормированных переменных. Из табл. 6 видно, что знаки факторных нагрузок не изменились по сравнению с табл. 2, однако распределение нагрузок стало неравномерным. Наибольшее влияние на первую моду оказывают термические показатели при однонаправленных с ними показателях «водности» и противоположно направленным вкладом скорости ветра. Иными словами, первая мода по-прежнему описывает процессы потепления и увлажнения региона при снижении ветровой активности (и наоборот), однако роль термических переменных в этих процессах более выражена, чем на декадном масштабе. Положительный коэффициент первой моды означает преобладание на черноморском побережье Украины в течение соответствующего года теплой маловетреной погоды с повышенным притоком вод в море. Отрицательный — преобладание относительно холодной, ветреной и засушливой погоды.

Вторая мода описывает разнонаправленный вклад термодинамических показателей (ветер, температура воздуха и воды) и притока воды, причем наибольшая факторная нагрузка принадлежит атмосферным осадкам. Положительные коэффициенты второй моды означают преобладание теплой, ветреной и засушливой пого-

ды, отрицательные – холодной, маловетреной и влажной погоды в прибрежной системе «море-атмосфера».

Классификация лет в пространстве двух главных мод, полученная путем последовательного применения методов Варда и К-средних, показана на рис. 7.

Видно, что ведущая роль при разбиении на классы в двумерном факторном пространстве принадлежит первой моде (рис. 7а): класс 1 – отрицательный вклад первой моды; класс 2 – минимальный вклад первой моды; класс 3 – положительный вклад первой моды. В пределах каждого класса вклад второй моды может изменяться от отрицательного к положительному, причем наибольший разброс наблюдается во втором классе, когда вклад первой моды минимальный. Временной ход выделенных классов (рис. 7б) демонстрирует высокочастотную межгодовую изменчивость переключения классов с периодами 2-5 лет, при этом класс 1 имеет наибольшую повторяемость в период похолодания 1970-1980-х годов.

Попытка найти линейную связь изменений классов с индексами глобальных климатических сигналов не увенчалась успехом. Также

привлекались среднегодовые значения индекса Эль-Ниньо (средние аномалии температуры поверхности воды экваториальной части Тихого океана), который является основным показателем межгодовой изменчивости в глобальной системе «океан – атмосфера» [11], однако тоже безрезультатно. Вероятно, это объясняется маскировкой полезного сигнала в рассматриваемом регионе высокочастотным шумом региональных и локальных процессов.

Классификация в трехмерном пространстве стандартизованных среднегодовых исходных переменных дала практически такие же результаты, как и для случая анализа среднепятилетних величин (см. рис. 5), несмотря на различные периоды времени, охватываемые временными рядами. Дисперсионный анализ (табл. 7) свидетельствует о существенном преобладании межгрупповой дисперсии переменных над внутрigrupповой дисперсией в трех выделенных классах, причем значения критерия Фишера в этом случае достаточно близки.

Тем не менее, следует отметить, что роль скорости ветра (W) наибольшая, затем идет уровень моря (SL), а минимальный вклад в классификацию опять принадлежит температуре воздуха (TA).

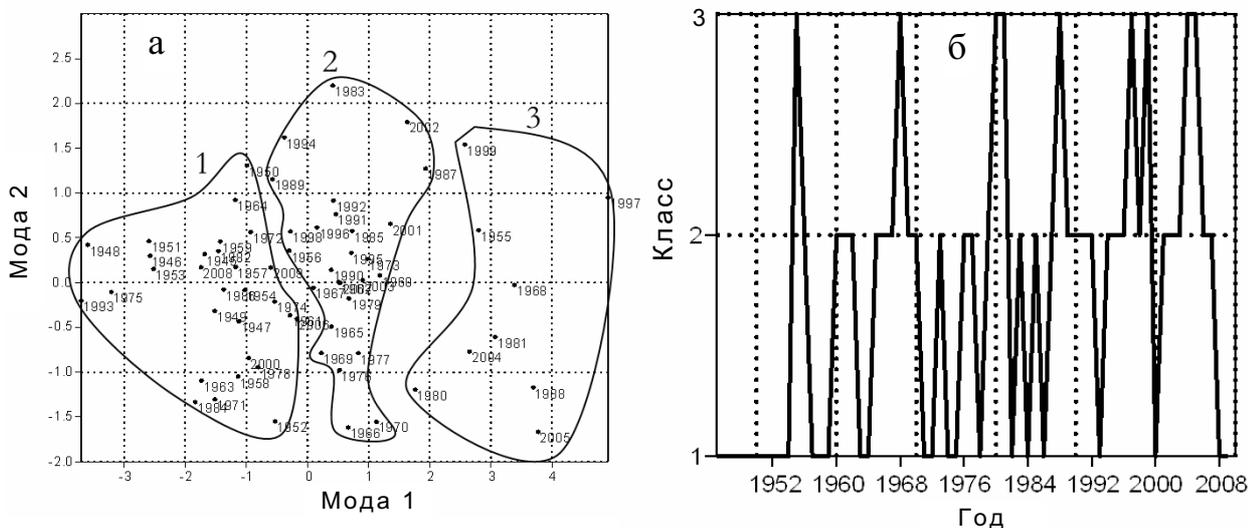


Рис. 7. Визуализация результатов классификации среднегодовых ГМУ в пространстве главных мод (а) и временной ход классов (б)

Таблица 7

Дисперсионный анализ разбиения на классы среднегодовых ГМУ по методу К-средних

Переменная	Межгрупповая сумма квадратов	Степени свободы	Внутрigrupповая сумма квадратов	Степени свободы	Отношение Фишера
W	39,318	2	24,682	62	49,383
TA	32,215	2	31,785	62	31,420
SL	36,428	2	27,572	62	40,957
СУММА	107,962	6	84,038	186	

Временной ход переключения классов среднегодовых ГМУ (рис. 8) демонстрирует, во-первых, увеличение повторяемости класса 3, начиная с середины 1960-х годов, вплоть до полного преобладания описываемых им ГМУ с конца 1980-х по конец 2000-х (исключением является аномальный холодный и засушливый 1993 г.), что явно отражает процесс глобального потепления. При этом в начале рассматриваемого интервала ГМУ соответствовали классу 1, затем наблюдалось переключение между классами 1 и 2 с периодами 2-5 лет, кроме 1966 и 1981 гг., когда этот режим нарушался переходом к классу 3. Помещенная на рис. 8 кривая среднегодовых значений АМО указывает на определенное соответствие их изменчивости с переключениями классов, если учесть, что общий тренд перехода от класса 1 к классу 3 лучше соответствует первой моде («глобальному потеплению»), а вторая мода («АМО»), по-видимому, отражает влияние Атлантического океана.

Переход от стандартизованных к размерным величинам среднегодовых гидрометеорологических показателей позволил определить их средние величины и СКО в выделенных классах (табл. 8).

Как и в табл. 4, в табл. 8 средние величины температур воздуха и воды, количества осадков и уровня моря возрастают с увеличением номера класса, а скорости ветра и солёности — убывают, причем их разброс в пределах классов больше, чем для среднепятилетних величин, в силу подавления высокочастотной межгодовой изменчивости при пятилетнем осреднении.

Выводы

1. Факторный анализ по методу главных компонент позволил выделить два основных фактора (моды) декадной и межгодовой изменчивости гидрометеорологических условий черноморского побережья Украины. Первая мода описывает изменения ветровых условий с противоположным

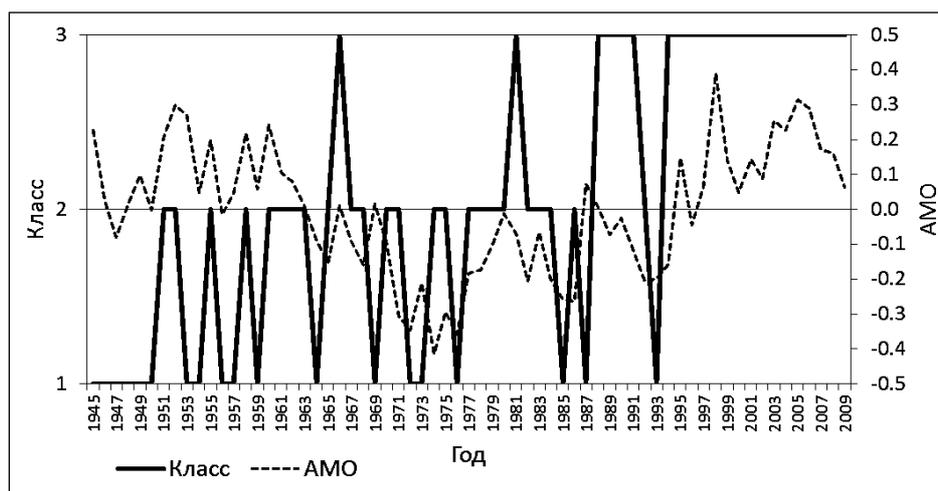


Рис. 8. Временной ход классов, выделенных в пространстве стандартизованных среднегодовых гидрометеорологических величин, в сопоставлении со среднегодовыми значениями индекса АМО

Таблица 8
Статистика среднегодовых гидрометеорологических показателей в выделенных классах ГМУ
(N – число лет, СКО – среднееквадратическое отклонение от средней величины для класса)

Класс	Стат.	WV	TA	TW	PR	SL	S
1	N	19	19	19	19	19	13
	Среднее	4,62	11,09	12,51	401	474	16,53
	СКО	0,36	0,56	0,59	75,4	4,8	0,19
2	N	24	24	24	24	24	23
	Среднее	4,48	11,95	13,33	451	482	16,39
	СКО	0,30	0,46	0,46	83,7	4,0	0,24
3	N	22	22	22	22	22	22
	Среднее	3,74	12,51	13,83	506	486	15,97
	СКО	0,26	0,69	0,63	92,2	4,6	0,45

знаком по отношению к показателям термического фона и притока воды в море («водности»), вторая – однонаправленные изменения ветровых условий с термическим фоном и противоположные с показателями «водности». При этом временные изменения коэффициентов первой моды характеризуются наличием положительного линейного тренда, а второй – квазипериодических колебаний на масштабе около 50-60 лет.

2. Вторая мода, условно интерпретируемая как влияние естественного автоколебательного процесса меридионального переноса тепла в Атлантическом океане, вносит всего лишь около 20 % в изменчивость на декадных масштабах и 23 % в межгодовую изменчивость, а основной вклад (соответственно 70 и 55 %) вносит первая мода, которую можно объяснить глобальными климатическими изменениями. Кластерный анализ в пространстве главных компонент выделяет 3 класса по степени вклада основных мод в межгодовую и декадную изменчивость.

3. Установлено, что для характеристики гидрометеорологических условий прибрежной зоны моря могут использоваться 3 среднегодовые или пятилетние величины, осредненные для всего черноморского побережья Украины – скорость ветра как показатель динамики атмосферы над морем, температура воздуха как показатель термического фона и уровень моря как показатель «водности».

4. Объективная классификация в пространстве этих трех показателей выделяет три класса гидрометеорологических условий: 1 – скорость ветра выше среднемноголетней нормы, температура воздуха и уровень моря ниже нормы; 2 – все показатели близки к норме; 3 – ветер слабее нормы, температура и уровень моря выше нормы. Распределение классов во времени отражает тренды глобального потепления последних десятилетий, а также влияние Атлантической Мультидекадной Осцилляции на декадном и межгодовом масштабах изменчивости.

Результаты работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях по морской климатологии черноморского побережья Украины, а также при разработке методов долгосрочных морских прогнозов.

* *

1. *Ильин Ю.П.* Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. – Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2006. – Вып. 255. – С. 242-251.
2. *Ильин Ю.П.* Сезонные и многолетние изменения динамических высот и их уклонов на стандартных разрезах через Основное черноморское течение //

- Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 17. – С. 244-257.
3. *Ильин Ю.П.* Климатические изменения гидрометеорологических условий Черного моря // Глобальные и региональные изменения климата. – К.: Ника-Центр, 2011. – С. 247-254.
4. *Ильин Ю.П.* Вклад региональных и глобальных факторов в межгодовую изменчивость гидрометеорологических условий прибрежной зоны Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 26. – Т. 1. – С. 117-122.
5. *Ильин Ю.П., Білокопитов В.М., Долотов В.В., Репетин Л.Н., Дьяков М.М.* Р. 3: Кліматичні умови / Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів. – К.: ДУ „Держгідрографія”, 2009. – С. 59-87.
6. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н.* Вековые изменения температуры воздуха в Черноморском регионе и их сезонные особенности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – Вып. 14. – С. 444-456.
7. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н.* Климатические изменения гидрометеорологического режима северного и восточного побережий Чёрного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 25. – С. 157-169.
8. *Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопитов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Черное море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – 421 с.
9. *Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1: Азовское море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 402 с.
10. *Липченко А.Е., Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Липченко М.М.* Уменьшение испарения с поверхности Черного моря во второй половине XX столетия как следствие глобальных изменений климата // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – Вып. 14. – С. 457-471.
11. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. – К.: Наук. думка. – 2008. – 183 с.
12. *Репетин Л.Н., Ильин Ю.П., Долотов В.В., Липченко М.М.* Современные оценки атмосферных осадков, их вклада в водный баланс Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 18. – С. 193-204.
13. *Ilyin Y.P.* Climatic variability of salinity features on the Bosphorus and North-western shelves revealed from observational data // Journal of Environmental Protection and Ecology, 2010, V.11, No 3. – P. 993-1000.

14. *Ilyin Y.P.* Observed long-term changes in the Black Sea physical system and their possible environmental impacts // Climate forcing and its impact on the Black Sea marine biota. №39 in CIESM workshop monographs / F. Biand (ed.). – Monaco: CIESM, 2010. – P. 35-44.
15. *Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D.* PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. – 2001. – 4(1). – 9 p. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

Морское отделение УкрГМИ, г. Севастополь

Ю.П. Ильин

Головні фактори і класи морських гідрометеорологічних умов чорноморського узбережжя України на масштабах міждесятирічної та міжрічної мінливості

Представлено результати факторного і кластерного аналізів рядів середніх річних і п'ятирічних величин основних показників гідрометеорологічного режиму. Виділено дві головні моди, що визначають мінливість гідрометеорологічних умов, і запропоновано їхню інтерпретацію у термінах глобальних і регіональних змін клімату. У рамках скорочення розмірності простору ознак виконано об'єктивну класифікацію гідрометеорологічних умов, у результаті якої отримані три класи, що розрізняються за ступенем близькості вихідних ознак до середньо-багаторічних норм як для міждесятирічного, так і для міжрічного масштабів мінливості.

Ключові слова: швидкість вітру, температура повітря, атмосферні опади, рівень моря, температура і солоність морської води, мінливість гідрометеорологічних умов, головні компоненти, факторний аналіз, кластерний аналіз.

Y.P. Ilyin

Main factors and classes of the Ukrainian Black Sea coast hydro-meteorological conditions on the decadal and inter-annual scales of variability

Results of factor and cluster analyses are presented for annual and pentad time series of main hydro-meteorological variables. Two principal modes determining hydro-meteorological conditions variability were extracted and their interpretation was proposed in terms of global and regional climate changes. Objective classification of hydro-meteorological conditions was performed in the framework of the variables space reducing. As the result, three classes were obtained distinguishing by the closeness of initial properties to their long-term norms for both decadal and inter-annual scales of variability.

Keywords: wind velocity, air temperature, atmospheric precipitations, sea level, marine water temperature and salinity, variability of hydro-meteorological conditions, principal components, factor analysis, cluster analysis.