

Рассматривается межгодовая изменчивость полей испарения и осадков над морем за период 1949-2005 гг. по данным архива реанализа CDAS (Climate Data Assimilation System). Показано в их колебаниях наличие значимых отрицательных трендов. Выполнено районирование акватории моря, осуществлена типизация по межгодовым колебаниям и классификация сезонного хода компонент вертикального влагообмена с помощью методов многомерного статистического анализа.

Осадки и испарение с водной поверхности относятся к числу основных составляющих водного баланса. Поэтому для выявления причин колебаний уровня моря и разработки методов его прогноза необходимы данные об изменчивости испарения и осадков за многолетний период времени. К сожалению, обе компоненты водного баланса относятся к числу трудно определяемых. Действительно, вследствие огромных размеров Каспийского моря данные наблюдений на береговых или островных станциях являются нерепрезентативными для оценки как испарения, так и осадков для открытой акватории моря. Кроме того, все большие трудности возникают из-за существенного сокращения сети метеорологического мониторинга в последнее десятилетие XX века. Практически невозможно найти гидрометеорологическую информацию по южной части моря (иранское побережье), а судовые наблюдения непостоянны, так как зависят от маршрутов судов и немногочисленны. Таким образом, становится достаточно очевидно, что необходимо искать другие источники гидрометеорологической информации.

В качестве альтернативного источника информации нами был использован глобальный архив CDAS (Climate Data Assimilation System), являющийся частью системы так называемого «ретроспективного» анализа» (реанализ) NOAA NCEP/NCAR Reanalysis [8], находящегося в свободном доступе на одном из интернетовских сайтов (<http://sgi62.wwb.noaa.gov:8080>), в котором одновременно приводятся среднемесячные данные по осадкам и испарению. Их значения заданы в узлах первичной широтно-долготной сетки $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 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.

Принципиальный недостаток архива CDAS заключается в том, что значения испарения и осадков по существу являются модельными полями, полученными в

результате численного моделирования системы океан-атмосфера-суша, которые лишь корректируются данными наблюдений. Вследствие этого, безусловно, в рядах испарения и осадков возможно наличие систематических погрешностей, которые очень трудно выявить, но еще труднее исключить.

В данной работе среднемесячные значения осадков и испарения выбирались за период 1949-2005 гг. для района, ограниченного координатами 37,08-46,4⁰ с. ш. и 48,45-52,30⁰ в.д. В этот район на акваторию моря попадает 11 точек (рис.1). Очевидно, прежде всего, представляет интерес оценка точности указанных компонент вертикального влагообмена.

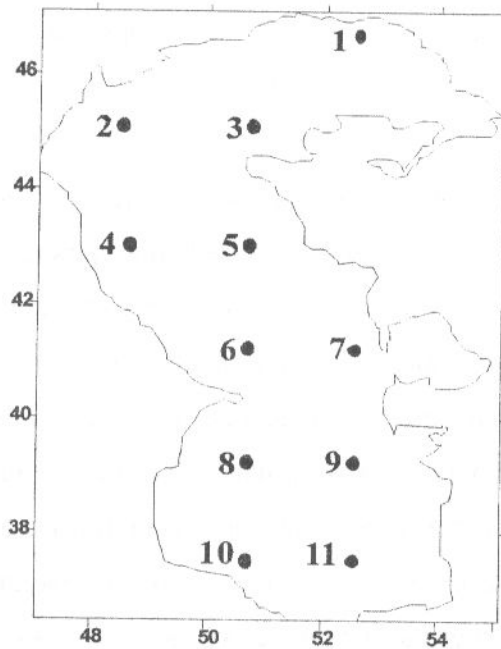


Рис. 1. Схема расположения точек широтно-долготной сетки архива CDAS, приходящихся на акваторию моря.

Поскольку «эталонных» оценок испарения и осадков над Каспием не существует, то единственный вариант проверки их точности состоит в сравнении с аналогичными оценками, полученных разными авторами за различные многолетние периоды времени [1,2,5-7 и др.]. В табл. 1 представлены оценки такого сопоставления. Достаточно очевидно, что среднемноголетнее значение испарения должно составлять около 1000 мм. Однако архив CDAS завышает испарение, равное 1346 мм, по отношению к данным других авторов примерно на 35 %, т.е. на весьма существенную величину.

Чтобы разобраться в причинах этого завышения, был выполнен анализ годового хода среднемноголетних значений испарения по данным разных авторов и архива CDAS. Было выяснено, что амплитуда колебаний испарения по данным архива CDAS существенно завышена. Причина этого заключается в завышении максимальных значений испарения в осенне-зимний период. На наш взгляд, это свидетельствует о наличии в рядах

испарения систематической ошибки. В связи с этим было принято решение произвести корректировку значений испарения с целью устранения данной систематической ошибки. Основным принцип корректировки заключался в приведении амплитуды годового хода испарения архива CDAS к средней амплитуде испарения по данным других авторов. В результате выполненной корректировки, результаты которой практически никак не влияют на последующие статистические расчеты, годовое значение испарения уменьшилось до 1098 мм, т.е. более чем на 20 %.

Таблица 1

Сравнение среднегодовых значений компонент вертикального влагообмена, полученных по архиву CDAS, с данными разных авторов в мм/год

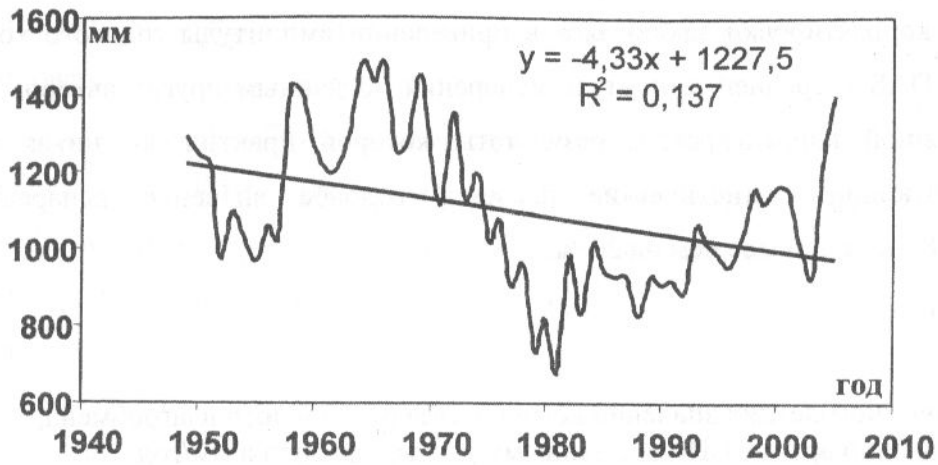
| Источник оценок влагообмена | Испарение, Е | Осадки, Р | Эффективное испарение, Е-Р |
|--|--------------|-----------|----------------------------|
| Диапазон оценок по данным разных авторов [1,2,5-7 и др.] | 934-1062 | 192-246 | 725-771 |
| Архив CDAS (1949-2005 гг.) | 1098 (1346) | 230 | 868 |

В отличие от испарения среднегодовое количество осадков над акваторией моря, полученное из архива CDAS (230 мм), очень мало отличается от аналогичных оценок других авторов (табл. 1). Поэтому будем считать, что заметные систематические ошибки в распределении осадков отсутствуют. Эффективное испарение (ЭИ), понимаемое как разность между испарением и количеством осадков, непосредственно влияет на изменения объема вод моря, а, следовательно, на колебания уровня. Некоторое завышение данных из архива CDAS (868 мм/год) относительно наших оценок ЭИ обусловлено более высокими значениями испарения.

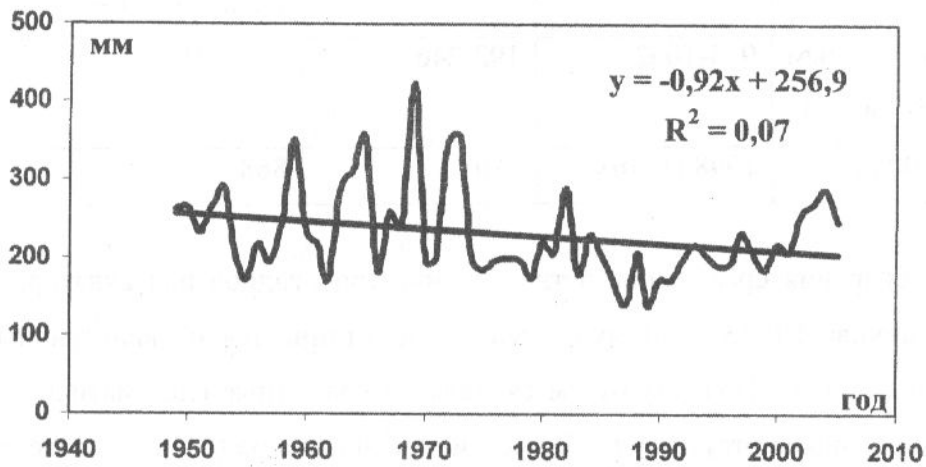
На рис. 2 приводится межгодовой ход откорректированных значений испарения, а также осадков и эффективного испарения за 1949-2005 гг. Максимальное значение испарения отмечается в 1966 году и равно 1480 мм, а минимальное в 1981 году - 684 мм, т.е. размах колебаний составляет 796 мм или 30 % от средней величины. При этом четко выделяются 3 периода: два с ростом испарения (1951-1966 гг. и 1981-2005 гг.) и один с его падением (1966-1981 гг.).

Как видно из рис. 2 максимальное количество выпавших осадков составило 423 мм в 1970 г., а минимальное – 138 мм в 1989 г. Таким образом, амплитуда колебаний равна 285 мм, что существенно превышает его среднюю величину. По сравнению с испарением в колебаниях осадков не прослеживаются длительных периодов повышения или пониже

а)



б)



в)

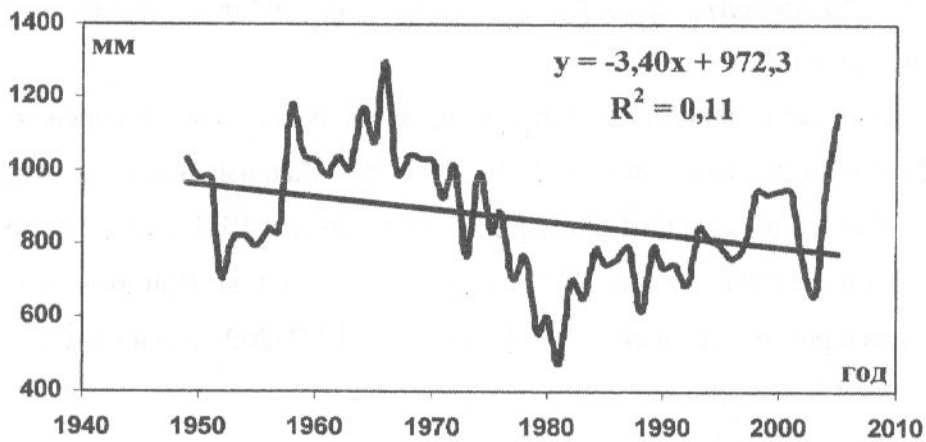


Рис. 2. Межгодовой ход откорректированных значений испарения, осадков и эффективного испарения за 1949-2005 гг.

а) – испарение, б) – осадки, в) – эффективное испарение

ния. Среднее значение ЭИ за период 1949-2005 гг. равно 868 мм, максимальное значение составило 1296 мм в 1966 г., минимальное 475 мм в 1981 г.

В межгодовом ходе компонент влагообмена присутствуют линейные тренды, статистические характеристики которых приводятся в табл. 2. Все они отражают уменьшение компонент влагообмена за рассматриваемый промежуток времени. Наиболее мощный отрицательный тренд характерен для испарения, а самый слабый, но значимый по критерию Стьюдента отмечается в колебаниях осадков. Естественно, коэффициент детерминации R^2 , показывающий относительный вклад тренда в описание дисперсии исходного процесса, также максимален для испарения и составляет 14 %.

Таблица 2

Статистические характеристики трендов в испарении, осадках и эффективном испарении над морем

| Характеристика | Коэффициент детерминации, R^2 | Величина тренда, Тг, мм/год, | Критерий Стьюдента, T^* | Критическое значение $T_{кр}$ при $\alpha=0,05$ |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| Испарение | 0,14 | -4,3 | 3,21 | 2,00 |
| Осадки | 0,07 | -0,9 | 2,15 | 2,00 |
| Эффективное испарение | 0,11 | -3,4 | 2,85 | 2,00 |

Представляет интерес выяснение пространственных особенностей формирования трендов в компонентах влагообмена на акватории моря. В табл. 3 представлены оценки величин трендов для испарения, осадков и эффективного испарения в отдельных точках. Нетрудно видеть, что максимальные тренды в испарении отмечаются в юго-восточной части моря, а минимальные – в северной части моря. В осадках несколько иначе. Максимальные значения тренда наблюдаются в северо-западной части моря, а минимальные – 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.

Рассмотрим теперь проблему пространственно-временной классификации крупномасштабной изменчивости компонент влагообмена на основе методов многомерного статистического анализа (МСА), которую удобно разбить на следующие локальные задачи [3]:

- районирование акватории моря по характеру межгодовых колебаний,
- разбиение межгодового хода заданной характеристики на однородные градации,
- классификация сезонного хода, т.е. выделение квазиоднородных сезонов года.

Таблица 3

Величина трендов компонентов водного баланса Каспийского моря в отдельных точках

| Номер точек | Величина тренда, мм/год | | |
|-------------|-------------------------|--------|-----------------------|
| | Испарение | Осадки | Эффективное испарение |
| точка 1 | -0,46 | -0,54 | 0,08 |
| точка 2 | -1,94 | -2,81 | 0,86 |
| точка 3 | -3,31 | -1,09 | -2,21 |
| точка 4 | -1,11 | -4,03 | 2,91 |
| точка 5 | -3,34 | -1,52 | -1,81 |
| точка 6 | -4,77 | -1,92 | -2,84 |
| точка 7 | -9,33 | -0,68 | -8,63 |
| точка 8 | -5,59 | 0,06 | -5,65 |
| точка 9 | -9,99 | 0,15 | -10,15 |
| точка 10 | -2,51 | 1,27 | -3,77 |
| точка 11 | -5,28 | 0,91 | -6,19 |

Прежде всего, обратимся к задаче районирования, которая заключается в том, что осуществляется классификация исходных полей тем или иным методом МСА с последующим переносом результатов на карту. Исходные поля среднегодовых значений испарения, осадков и их разности были заданы в 11 точках (узлах) акватории моря за 57 лет (1949-2005 гг.), т.е. матрицы имели размер 11x57. Прежде всего, были рассчитаны корреляционные матрицы размером 11x11, что позволило использовать в качестве меры близости аналог евклидовой метрики в виде $d = 1 - |r|$, где r - выборочный коэффициент корреляции между узлами. После этого выполнялась классификация путем построения дендрограммы агломеративным алгоритмом Уорда, минимизирующим сумму квадратов расстояний для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге [4].

На рис. 3 в качестве примера приведена дендрограмма испарения. Нетрудно видеть, что акваторию моря по межгодовым колебаниям испарения целесообразно разделить на три класса. Перенесение результатов классификации на карту позволило выделить три квазиоднородных района: северный, центральный и южный, причем распределение их носит хорошо выраженный зональный характер (рис. 4). Аналогичным образом была осуществлена классификация и районирование осадков и эффективного испарения (рис. 4). Однако в отличие от испарения акватория моря разделилась только на два района. Для осадков северный и центральный районы объединились вместе, а для эффективного испарения, наоборот, вместе объединились центральный и южный районы.

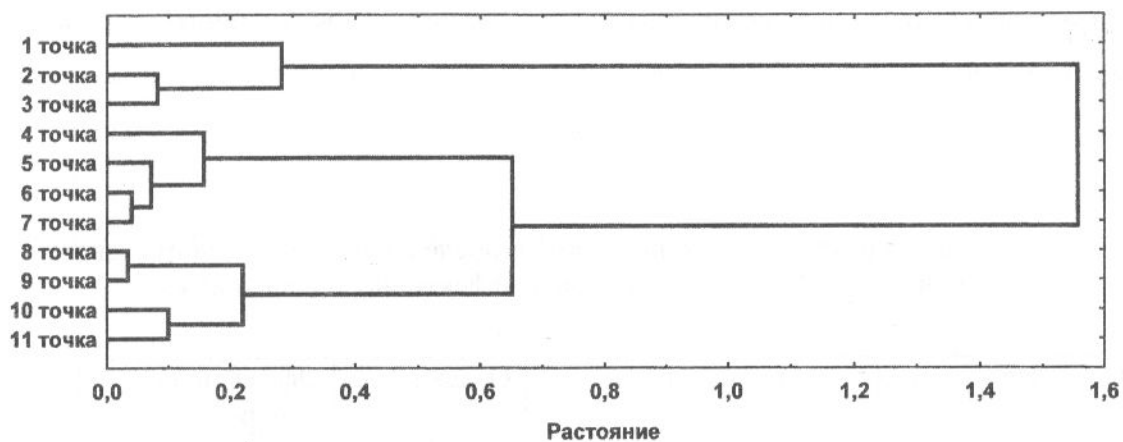


Рис. 3. Дендрограмма поля годовых значений испарения над морем, полученная методом Уорда

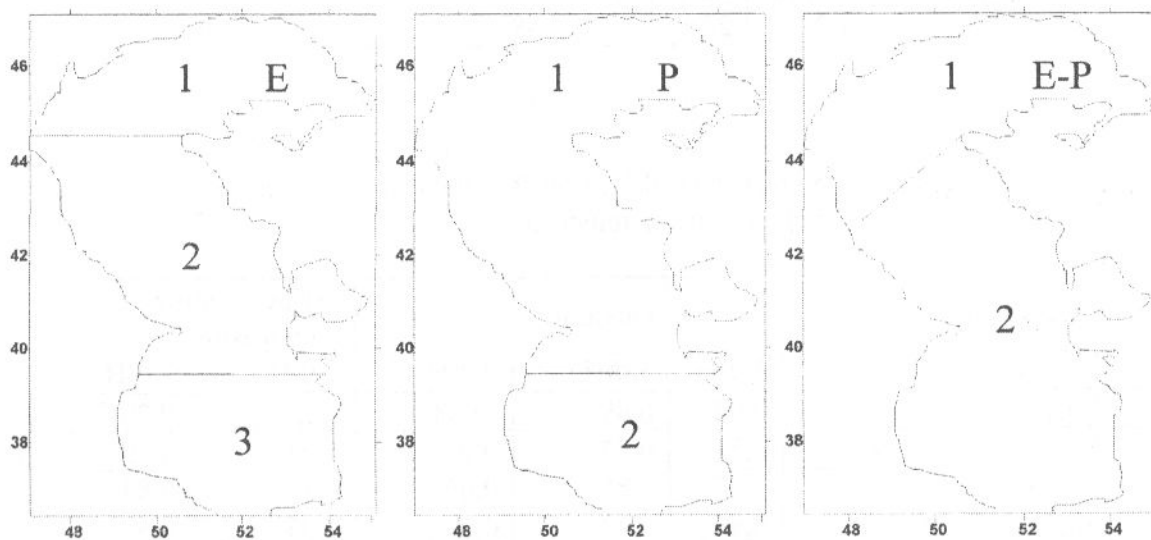


Рис. 4. Районирование акватории Каспийского моря по характеру межгодовых колебаний испарения (E), осадков (P) и эффективного испарения (E-P).

Чтобы убедиться в достоверности выделенных районов, дополнительно использовался факторный анализ. В табл. 4 представлены собственные числа разложения после первого и второго вращений для рассматриваемых компонент водного баланса. Суммарный вклад первых трех факторов в дисперсию поля испарения составляет 92 %, двух факторов в дисперсию поля осадков – 76 %, эффективного испарения – 77 %. В результате второго вращения в поле испарения произошла «перекачка» дисперсии между факторами, в результате чего третий фактор оказался больше первого. Впрочем, это никак не отразилось на результатах классификации.

В табл. 5 дается распределение факторных нагрузок, в которой полужирным 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.

Таблица 4

Собственные числа разложения до вращения и после вращения методом главных факторов полей испарения, осадков и эффективного испарения

| Собственные числа | Испарение | | | Осадки | | Эффективное испарение | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_1 | λ_2 | λ_1 | λ_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 |

Таблица 5

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

Типизация межгодового хода заданной характеристики обычно осуществляется разделением на три градации: «ниже нормы», «норма», «выше нормы». Иногда временной ряд делится на пять градаций, когда дополнительно вводятся градации «значительно ниже нормы» и «значительно выше нормы». При этом чаще всего в качестве критериев служат среднее арифметическое X_{cp} и доли среднеквадратического отклонения σ . Например, к норме могут быть отнесены значения временного ряда, попадающие в интервал $\bar{X} \pm \sigma$, а те значения, которые лежат выше или ниже этого интервала относятся соответственно к градациям «выше нормы» и «ниже нормы». Отметим, что в качестве границы между классами используются также значения $0,67\sigma$, $0,8\sigma$, $1,5\sigma$, 2σ и т.п. Естественно, такое

разделение на градации во многом является искусственным, поскольку не учитывает особенности внутренней структуры временного ряда.

Более адекватное решение можно получить при помощи алгоритмов кластерного анализа. Действительно, в этом 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.

Предварительно оценивалось оптимальное число градаций (3 или 5) с помощью эвристического алгоритма *k*-средних. Критерием оптимальности послужила разность межклассового и внутриклассового расстояний для указанных выше чисел градаций. Было получено, что почти во всех случаях эта разность для пяти градаций больше. Поэтому в данной работе было принято разбиение межгодовых колебаний компонент вертикального влагообмена на 5 градаций. На рис. 5 в качестве примера приводятся результаты такого разбиения для испарения над всем морем в целом.

В табл. 6 приведены оценки границ распределения среднегодовых значений испарения, осадков и эффективного испарения за 1949-2005 гг. для указанных градаций. Градация «норма» соответствует значениям испарения в пределах 1060-1160 мм, осадков – 202-245 мм, эффективного испарения – 783-843 мм. При этом среднее значение этой градации не равно среднему арифметическому по всей выборке. Максимальное расхождение отмечается для эффективного испарения, среднее арифметическое которого вообще выходит за пределы градации «норма».

Классификация сезонного хода полей среднемноголетних месячных значений компонент влагообмена также осуществлялась методом кластерного анализа. На рис. 6 приводится дендрограмма поля испарения для моря в целом. Как видно из рис. 6, исходная совокупность точек четко делится на два класса, которые можно интерпретировать как холодный (январь-март) и теплый (апрель-декабрь) периоды года. Но если холодный период однороден, и дальнейшее разбиение его уже не имеет смысла, то теплый в свою очередь целесообразно разделить на летний сезон (с июня по октябрь) и переходные сезоны: весну (май, июнь) и осень (ноябрь, декабрь).

В табл. 7 представлены результаты классификации сезонного хода компонент влагообмена для моря в целом. Зимний сезон для них полностью совпадает и составляет три месяца. Остальные сезоны года одинаковы в испарении и эффективном испарении. Что касается осадков, то переходные сезоны (весна и осень) для них на один месяц длиннее, а соответственно летний сезон – на два месяца короче.

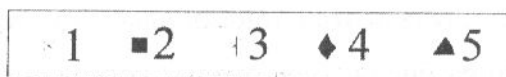
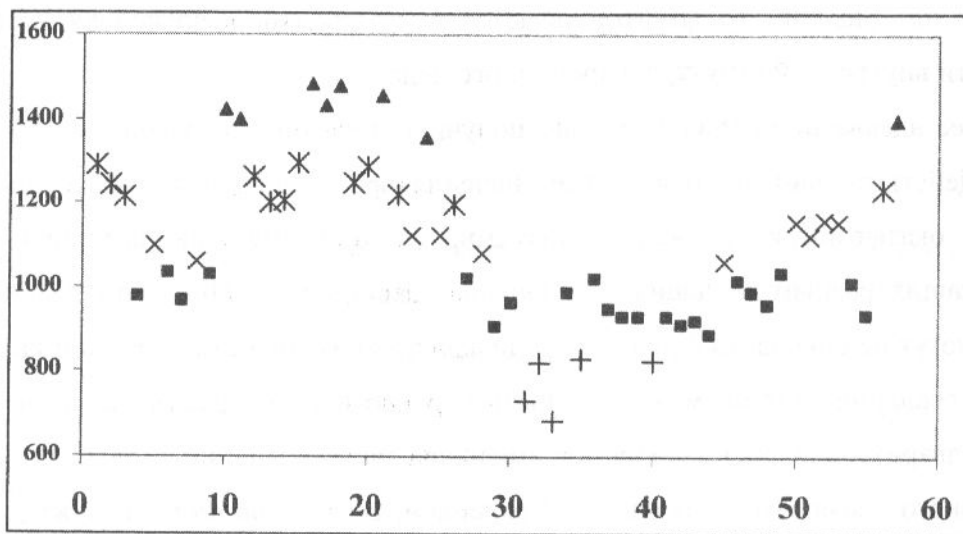


Рис. 5. Распределение среднегодовых значения испарения по градациям «Норма» (1), «Ниже нормы» (2), «Выше нормы» (3), «Значительно ниже нормы» (4) и «Значительно выше нормы» (5) для Каспийского моря в целом

Таблица 6

Распределение среднегодовых значения испарения, осадков, и эффективного испарения для всей поверхности 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 |

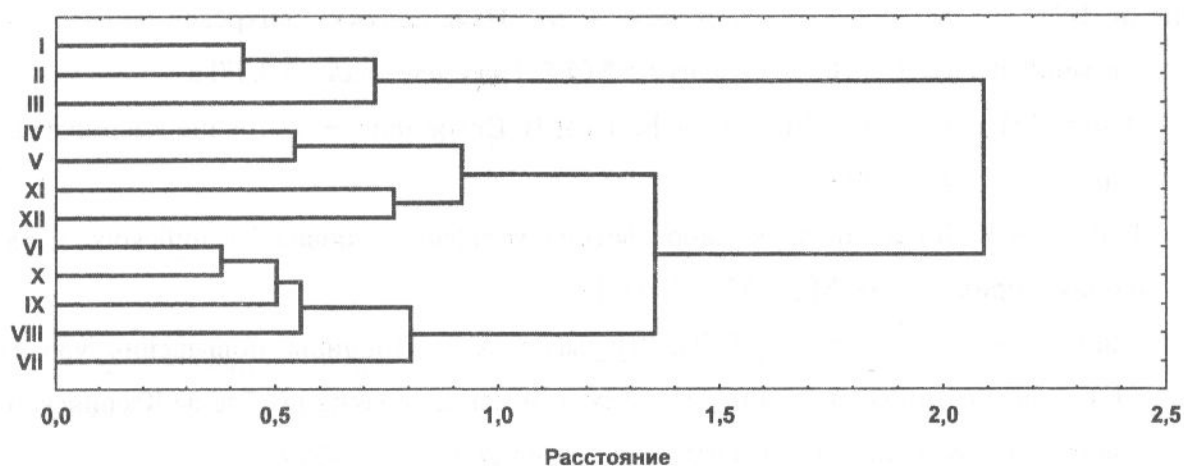


Рис. 6. Дендрограмма среднемноголетних месячных значений испарения для Каспийского моря

Итак, учитывая, что архив CDAS оперативно пополняется с очень небольшим запаздыванием во времени, то его можно рассматривать как основу системы мониторинга полей испарения и осадков для Каспийского моря. При этом следует иметь в виду, что в осенне-зимний (август-март) период года в значениях испарения из архива CDAS присутствует положительная систематическая ошибка порядка 20 %. Исключение этой ошибки не представляет какой-либо сложности и позволяет получить корректные ряды по испарению. В значениях осадков над морем заметных систематических ошибок не выявлено.

Таблица 7

Структура квазиоднородных сезонов компонент влагообмена для моря в целом

| Район | Холодный период | Теплый период | | |
|-----------------------|-----------------|----------------|----------------------|---------------|
| | Зимний сезон | Весенний сезон | Летний сезон | Осенний сезон |
| Испарение | I, II, III | IV, V | VI, VII, VIII, IX, X | XI, XII |
| Осадки | I, II, III | IV, V, VI | VII, VIII, IX | X, XI, XII |
| Эффективное испарение | I, II, III | IV, V | VI, VII, VIII, IX, X | XI, XII |

Литература

- Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. - М.: Наука, 1975. 175 с.
- Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб, РГГМУ, 1994, 160 с.
- Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик. Мурманск, Изд. ПИПРО, 2003, 164 с.

- Малинин В.Н., Радикович В.М., Гордеева С.М. Изменчивость вихревой активности атмосферы над Северной Атлантикой СПб.: Гидрометеиздат, 2003, 171 с.
- Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. - М.: Наука, 2005.- 355с.
- Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М., ГЕОС, 2003, 171 с.
- Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Шалыгин А.Л. Причины повышения уровня Каспийского моря. В кн: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. - СПб., Гидрометеиздат, 2003, с. 267-277.
- Kalnay, E.M. et al. 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project". Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-471.