

Глава 5

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА И ИСПАРЕНИЯ

Анализ пространственной изменчивости теплообмена и испарения и параметров их определяющих, сделанный в предыдущей главе, позволил выявить непосредственную зависимость ее от сезона года. В связи с этим остановимся специально на рассмотрении внутригодовой изменчивости характеристик взаимодействия, осредненных по всему морю и его частям (северной, средней и южной), т.е. характеристик интегрального взаимодействия. Анализ внутригодовой изменчивости интегральных характеристик взаимодействия, а также межгодовых их колебаний в сочетании с уже проведенным исследованием пространственной их

изменчивости, должен дать исчерпывающее представление о тепломассообмене Каспийского моря с атмосферой. Указанной информацией необходимо располагать как для изучения водного и солевого балансов моря, описания его гидрологического режима, так и для принятия решений при проведении оптимизационных водохозяйственных мероприятий на акватории моря и в его бассейне.

Временную изменчивость характеристик взаимодействия рассмотрим по тем же параметрам и в той же последовательности, как это делалось при анализе пространственной изменчивости.

Температура водной поверхности (T_w), как уже отмечалось, является фактически термодинамической температурой верхнего полуметрового слоя воды. Внутригодовой ход интегральных значений T_w для трех частей моря (северной, средней и южной) и всего моря представлены на рис. 24. Все кривые имеют аналогичный ход с минимумом в феврале и максимумом в августе. Южный Каспий характеризуется наиболее теплой водой в течение всего года. В осенне-зимний сезон наиболее холодная вода в Северном, а в весенне-летний — в Среднем Каспии. Наибольшие отличия в температуре водной поверхности всей акватории моря наблюдаются в осенне-зимний сезон (составляют 7–8 °C), причем существует тенденция к увеличению этого различия от осени к зиме. Наименьшие отличия в температуре водной поверхности (T_w) наблюдаются в весенне-летний сезон (составляют 2–3 °C), причем закономерно уменьшается это различие от весны к лету. Море в целом и три его части характеризуются следующими среднегодовыми температурами водной поверхности: 14,9 °C — все море; 12,5 °C; 14,1 °C и 16,8 °C — северная, средняя и южная части соответственно.

Температура воздуха (T_a) для всего моря, а также средней и южной частей достигает максимальных значений в августе, над Северным Каспием наиболее теплые воздушные массы формируются в июле (рис. 25). Минимальные значения для всех частей и всего моря температура воздуха принимает в феврале. В течение почти всего года над Южным Каспием наблюдается более теплый воздух (исключение составляет время с мая по июль, когда наиболее теплый воздух отмечается над Северным Каспием). В осенне-зимний сезон наиболее холодные воздушные массы наблюдаются над Северным Каспием. Наибольшие отличия в температуре воздуха отмечаются между северной и южной частями моря в осенне-зимний сезон (составляют 7–8 °C). С конца весны до середины лета (с мая по июль) температура воздушных масс над всеми тремя частями моря практически совпадает (различия не превышают 1 °C). Среднегодовые значения температуры воздуха следующие: 14,6 °C — все море; 12,3 — северная; 13,9 — средняя и 16,4 °C — южная его части. Воздушные массы над всем морем и над тремя его частями в среднем за год оказываются на 0,2–0,4 °C холоднее верхнего (полуметрового) слоя воды. Это свидетельствует о том, что взаимодействие с атмосферой моря в целом и трех его частей характеризуется неустойчивой стратификацией.

Температура точки росы (T_p). Внутригодовой ход температуры точки росы, представленный на рис. 26, согласуется в основном с внутригодовым ходом величин T_w и T_a (см. рис. 24, 25). Максимальных значений температура точки росы достигает в августе (исключение составляет только

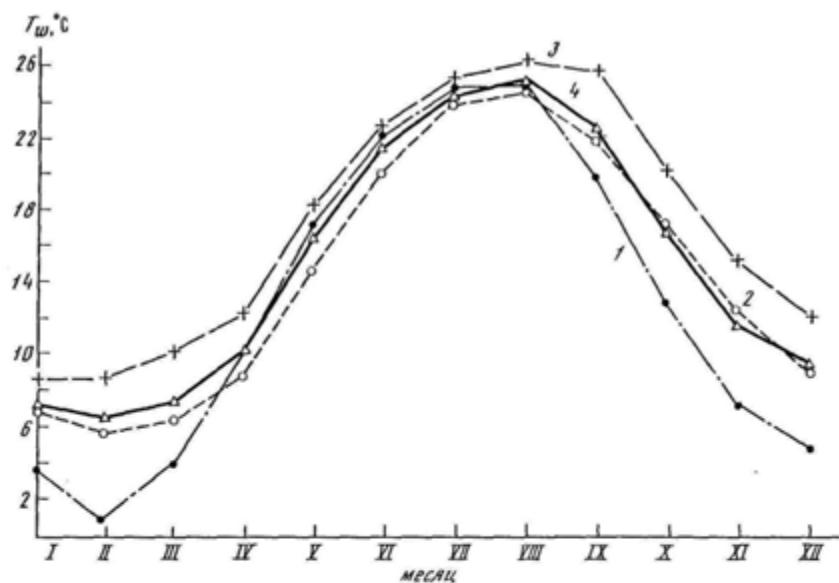


Рис. 24. Внутригодовой ход температуры водной поверхности T_w , $^{\circ}\text{C}$ для Северного (1), Среднего (2), Южного Каспия (3) и всего моря (4)

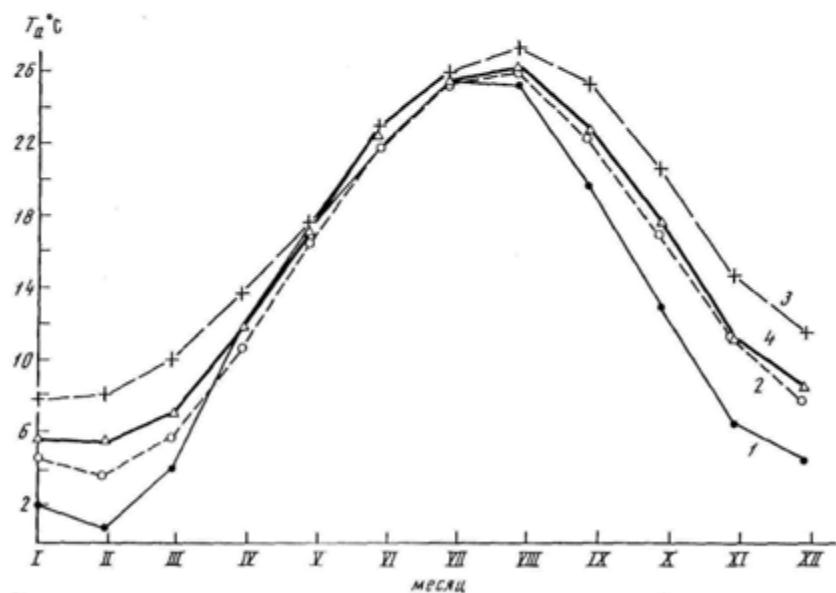


Рис. 25. Внутригодовой ход температуры приводного воздуха T_a , $^{\circ}\text{C}$ (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

Северный Каспий, где максимум T_p приходится на июль). Минимальные значения T_p наблюдаются в феврале. В течение всего года над Южным Каспием наблюдаются наиболее влажные, а над Северным наиболее сухие воздушные массы. Среднегодовые значения температуры точки росы следующие: 10,4 °C – все море; 8,0 – северная; 10,1 – средняя и 12,4 °C – южная части моря. Давление водяного пара (e , мб), соответствующее приведенным значениям температуры точки росы, будет следующим: 13,8 мб; 11,9; 13,6; 15,5 мб.

Скорость ветра (U). Внутригодовой ход скорости приводного ветра (рис. 27) имеет противоположную величинам T_w , T_a , T_p картину изменения (минимум скорости ветра приходится на лето, а максимум – на зиму). Сильно отличается и внутригодовой ход скорости ветра для трех частей моря. В течение всего года над Южным Каспием наблюдаются минимальные значения скорости ветра (U колеблется от 4 м/с до 5,0–5,5 м/с). Внутригодовой ход U над Северным и Средним Каспием отличается некоторым сходством между собой. Наиболее высокие значения скорости ветра в течение всего года наблюдаются над Средним Каспием (исключение составляют апрель и май, когда максимальные значения наблюдаются над Северным Каспием). Некоторое усиление скорости ветра в апреле и мае над Северным Каспием связано, по-видимому, с быстрым прогревом здесь воды и соответствующим развитием неустойчивой стратификации приводного воздуха. Наименьшие различия в скоростях ветра над тремя частями моря наблюдаются летом и частично весной, наибольшие (приблизительно в 1,5 раза) – осенью и зимой. Море в целом и три его части характеризуются следующими среднегодовыми значениями скорости ветра: 5,6 м/с – все море; 6,1; 6,1 и 4,7 м/с – северная, средняя и южная части соответственно.

Большой интерес представляет внутригодовой ход разности температур водной поверхности и приводного воздуха $\Delta T = T_w - T_a$ и разности давления водяного пара $\Delta e = e_s - e_a$ (рис. 28, 29). Внутригодовой ход разности температур ΔT (см. рис. 28) хорошо коррелирует с ходом скорости ветра (см. рис. 27), что служит дополнительным указанием на необходимость с осторожностью подходить к временному осреднению исходной информации. Аналогий между внутригодовым ходом разности влажностей Δe (см. рис. 29) и ходом скорости ветра намного меньше, наибольшее подобие между Δe и U наблюдается, пожалуй, над Средним Каспием. Данное сопоставление внутригодового хода разностей ΔT и Δe со скоростью ветра U некоторым образом объясняет полученные различия в изменении коэффициентов K_e и K_T (см. рис. 10–12). При анализе внутригодового хода разности ΔT (см. рис. 28) особый интерес представляет момент перехода от положительных к отрицательным ее значениям и наоборот, так как эти точки характеризуют фактически момент смены условий температурной стратификации приводного воздуха. В частности определенно можно говорить о смене условий, характерных для неустойчивой стратификации на условия, характерные для устойчивой стратификации над всеми тремя частями моря в период с марта по апрель (причем раньше других этому подвергаются воздушные массы над Северным Каспием). Наиболее сильная и наиболее продолжительное время (с апреля по сентябрь) устойчивая стратификация воздуха наблюдается над Средним Каспием. Внутригодовой ход разности Δe (см. рис. 29) в то же время

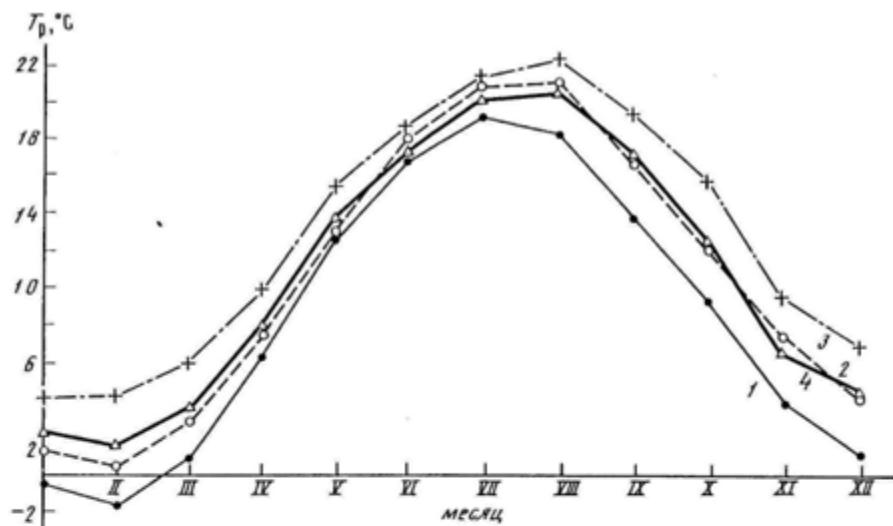


Рис. 26. Внутригодовой ход температуры точки росы T_p , °C (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

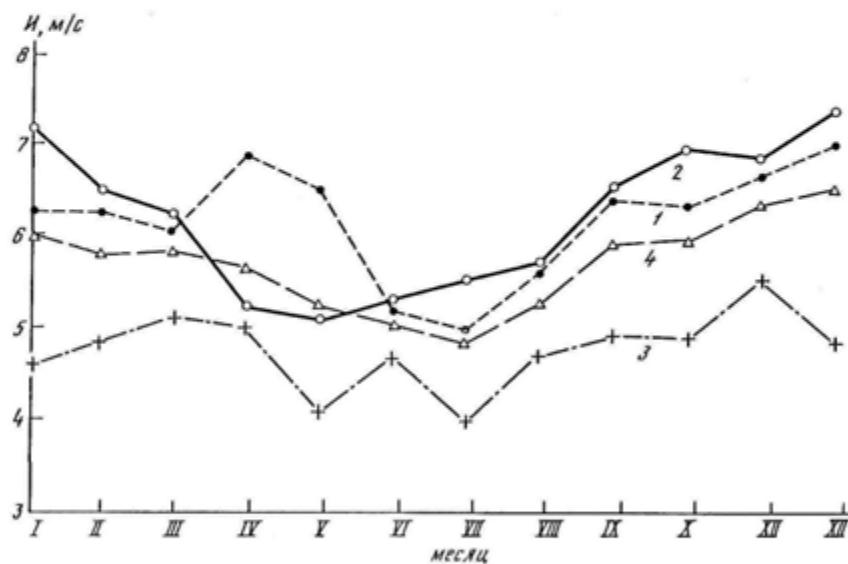


Рис. 27. Внутригодовой ход скорости приводного ветра U , м/с (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

свидетельствует о том, что с апреля по сентябрь над Средним Каспием должен быть наименьший (по сравнению с другими частями моря) тепломассообмен. В весенне-летний же сезон, судя по рис. 29, у Северного Каспия имеются наибольшие потенциальные возможности в тепломассообмене по сравнению со Средним и Южным Каспием. В осенне-зимний сезон большими потенциальными возможностями в тепло-массообмене отличаются Южный

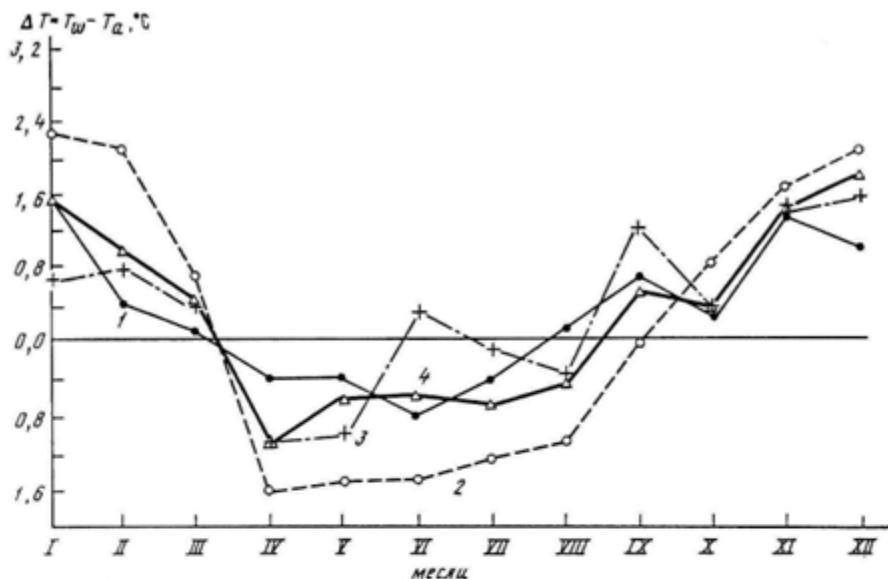


Рис. 28. Внутригодовой ход разности температур водной поверхности и приводного воздуха $\Delta T = T_w - T_a$, $^{\circ}\text{C}$ (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

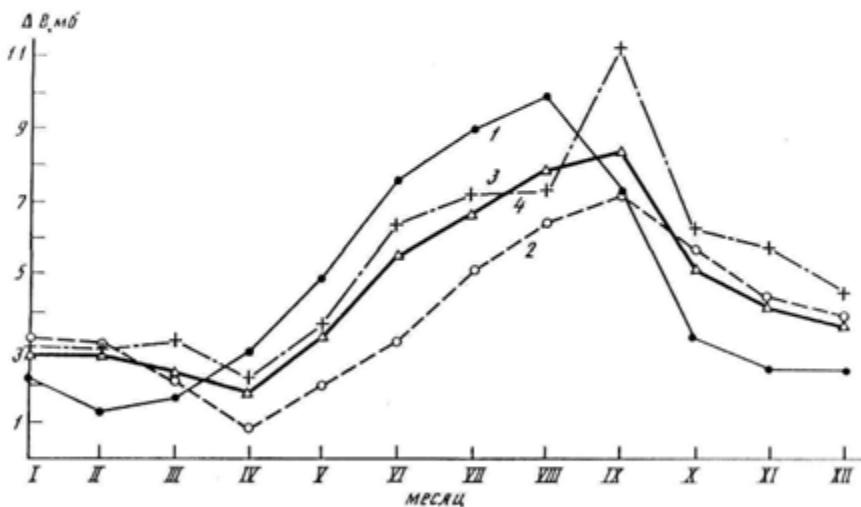


Рис. 29. Внутригодовой ход перепада упругости водяного пара в приводном слое воздуха $\Delta e = e_s - e_a$, мб (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

и Средний Каспий. Среднегодовые значения разности температур (влажности) соответственно следующие: $0,3\ ^{\circ}\text{C}$ ($4,6$ мб) — все море; $0,3$ ($4,5$ мб) — северная; $0,2$ ($3,9$ мб) — средняя и $0,4\ ^{\circ}\text{C}$ ($5,2$ мб) — южная его части.

Масштаб стратификации (длины Монина—Обухова L). Внутригодовой ход масштаба стратификации L (рис. 30) наглядно показывает зависи-

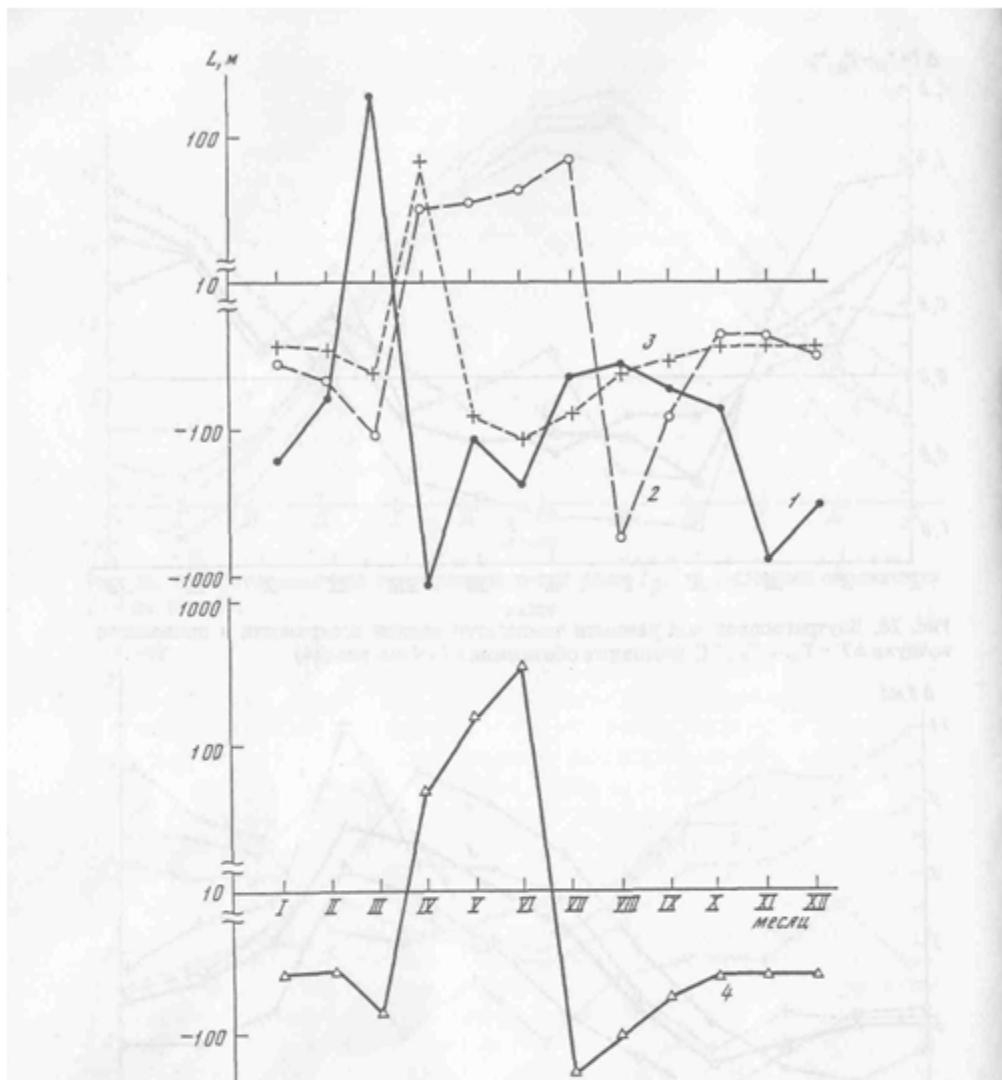


Рис. 30. Внутригодовой ход масштаба длины Монина–Обухова L , м (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

мость стратификации приводного воздуха над морем от сезона года. Здесь следует отметить и существенные различия во временном ходе масштаба L для трех частей моря (см. рис. 30). Различия эти проявляются в основном в весенний период и связаны, с одной стороны, с моментом перехода масштаба стратификации L через ноль (смена знака стратификации), а с другой — с продолжительностью действий устойчивой стратификации воздуха. Раньше всего стратификация меняет знак над Северным Каспием (уже в марте масштаб длины L становится положительным и достигает значений 150–200 м), но на относительно короткое время (уже в апреле стратифика-

ция здесь становится неустойчивой и остается такой до конца года). Малую инерционность северной части моря, как мы отмечали, можно связывать с ее малой глубиной. Переход приводного слоя над средней и южной частями моря от неустойчивого к устойчивому состоянию происходит практически одновременно — в апреле, но если над средней частью состояние устойчивой стратификации держится почти все лето, то над Южным Каспием возвращение к неустойчивой стратификации происходит уже в мае. Это фактически делит море на три практически независимые по тепломассообмену части в весенне-летний период. Тепло- и массообмен моря в целом (см. рис. 30) характеризуется в основном неустойчивостью (исключение составляет период апрель–июнь, когда $L > 0$). Среднегодовые значения масштаба длины Монина–Обухова L оказались следующие: для Северного Каспия $L = -140$, для Среднего $L = -150$, для Южного $L = -80$, для моря в целом $L = -100$ м.

Коэффициент тепловлагообмена ($C_{T,e}$). Сопоставление внутригодового хода коэффициентов тепловлагообмена $C_{T,e}$ (рис. 31) не выявляет столь заметного различия в их поведении для разных частей моря, хотя и здесь можно отметить закономерно более низкие значения $C_{T,e}$ для Среднего Каспия в весенне-летний период. В течение года $C_{T,e}$ изменяется более чем в 2 раза (от менее $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$) и для моря в целом составляет в среднем $1,64 \cdot 10^{-3}$ (в Северном Каспии $\bar{C}_{T,e} = 1,63 \cdot 10^{-3}$; в Среднем Каспии $\bar{C}_{T,e} = 1,54 \cdot 10^{-3}$; в Южном $\bar{C}_{T,e} = 1,69 \cdot 10^{-3}$).

Испарение (E) и теплообмен ($IE + Q_T$). Внутригодовой ход испарения E и теплообмена $IE + Q_T$ (рис. 32, 33) особенно наглядно иллюстрирует различия трех частей моря. Северная часть, как мы и отмечали, наименее инерционна, и уже в августе величина испарения E достигает максимального значения. Испарение с поверхности Среднего и Южного Каспия достигает максимального значения в сентябре, хотя в октябре (для средней части) и в октябре и ноябре (для южной части) испарение по величине также близко к максимуму. Еще более разительные отличия внутригодового хода Среднего и особенно Южного Каспия от Северного можно видеть на примере сопоставления величин теплообмена $IE + Q_T$. В Северном Каспии максимум теплообмена, также как и испарения, приходится на август. В среднем же Каспии максимум сместился на октябрь, т.е. на 1 месяц, а в Южном Каспии — на ноябрь, т.е. на 2 месяца позже пика испарения. Принципиальных различий во внутригодовом ходе величин испарения E и теплообмена $IE + Q_T$ Среднего и Южного Каспия нет, если не считать более интенсивный (~ на 30%) тепло- и массообмен Южного Каспия с атмосферой по сравнению со Средним. Внутригодовой ход испарения и теплообмена моря в целом практически аналогичен, в том и в другом случае максимум приходится на сентябрь. Заметим, что более ранние наши расчеты [Гоптагрев, Панин, 1970] по некоторым методикам, данные Е.Г. Архиповой и др. [1970] также дали максимальное значение испарения в сентябре.

Вклад в испарение и теплообмен от учета корреляции между метеорологическими параметрами и эмиссии водяных капель в испарение и теплообмен в течение года наглядно представлен на рис. 32 и 33. Здесь важно подчеркнуть, что наиболее эффективен этот вклад осенью и зимой, когда поправки достигают 30–35%. Неучет этих эффектов для моря приводит к занижению испарения на 23%, а теплообмена — на 27%. В целом средне-

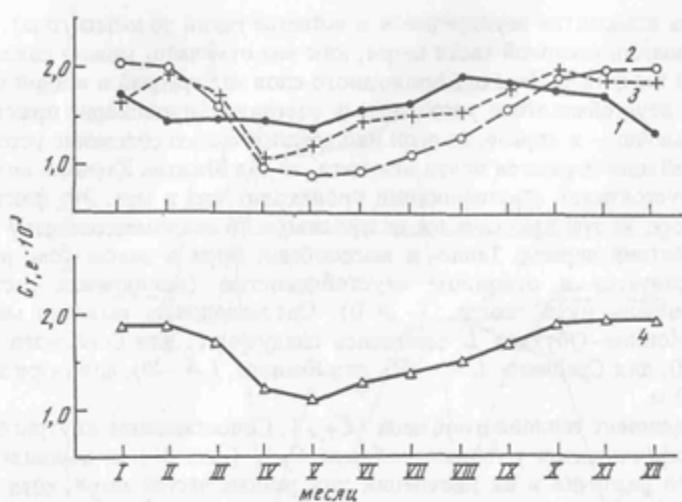


Рис. 31. Внутригодовой ход коэффициента тепловлагообмена $C_{T,e} \cdot 10^3$ (условные обозначения 1–4 см. рис. 24)

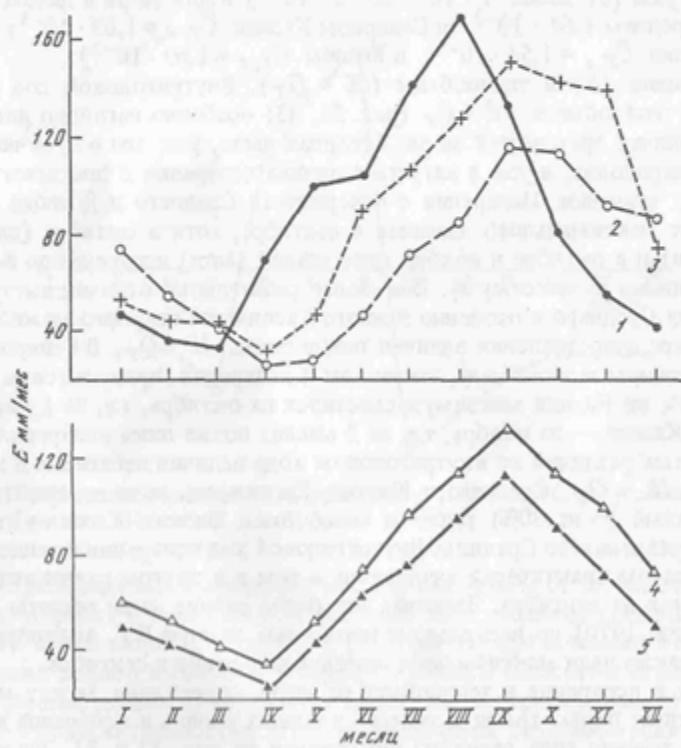


Рис. 32. Внутригодовой ход испарения E , мм/мес. для Северного – 1; Среднего (2); Южного Каспия (3) и всего моря с учетом (4) и без учета (5) корреляции между исходной гидрометеорологической информацией и штормовых ситуаций

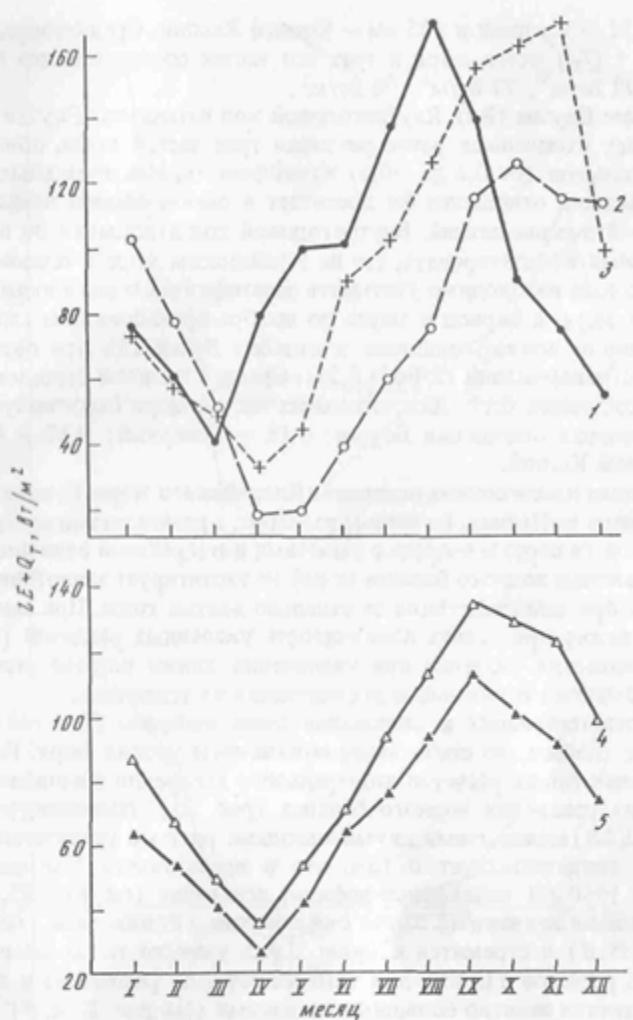


Рис. 33. Внутригодовой ход теплообмена $IE + Q_T$, Вт/м² для Северного (1), Среднего (2), Южного Каспия (3) и всего моря с учетом (4) и без учета (5) корреляций между исходной гидрометеорологической информацией и штормовых ситуаций

многолетняя величина испарения для всего моря составила 96,3 см, что очень хорошо (в пределах 4 см) согласуется со средней статистической величиной испарения, равной 1 м/год (см. гл. 1). В то же время можно констатировать, что среднее значение испарения 96,3 см, полученное нами, — минимальная величина. Этот вывод можно сделать на том основании, что статистика гидрометеорологических измерений с судов в штормовых условиях менее представительна, чем их повторяемость (во время штормов многие суда находятся в портах).

Для трех частей моря испарение в среднем за год составило: 101 см —

Северный, 81 – Средний и 103 см – Южный Каспий. Среднегодовой теплообмен ($I_E + Q_T$) всего моря и трех его частей соответственно составил: 89 Вт/м², 92 Вт/м², 77 Вт/м², 96 Вт/м².

Отношение Боузна (Bo). Внутригодовой ход отношения Боузна (рис. 34) подтверждает отмеченные ранее различия трех частей моря, обнаруживая при этом сильную (от 0,6 до –0,3) изменчивость. Максимальных положительных значений отношение Bo достигает в осенне-зимний период, минимальных – в весенне-летний. Внутригодовой ход отношения Bo позволяет в то же время констатировать, что на Каспийском море в течение практически всего года необходимо учитывать стратификацию влажности воздуха, по крайней мере, в период с марта по ноябрь пренебрежение стратификацией влажности должно привести к ошибке более 25% при определении параметра стратификаций ($b/Bo > 0,25$). Среднее значение отношения Боузна за год составило 0,17. Для отдельных частей моря были получены следующие значения отношения Боузна: 0,18 – Северный; 0,17 – Средний; 0,16 – Южный Каспий.

Межгодовая изменчивость испарения Каспийского моря. Неплохое согласование нормы испарения, по нашим расчетам, с результатами предшествующих расчетов (в первую очередь с расчетами интегральной величины испарения по уравнению водного баланса моря) не гарантирует аналогичной согласованности при сопоставлениях за отдельно взятые годы. При таком сопоставлении важно проследить изменчивость указанных различий (невязок) и, если среднее их значение при увеличении длины ряда не стремится к нулю, то возникает новая задача исследования их тенденции.

Для соответствующих исследований были выбраны 50-е годы, характеризуемые слабым, но стабильным понижением уровня моря. Результаты сопоставления наших расчетов интегрального испарения с величиной, определенной из уравнения водного баланса (рис. 35), показали, что сумма невязок ($\Sigma \Delta h$) между этими двумя методами растет с увеличением длины ряда. Это свидетельствует о том, что в исследуемый 5-летний период (начиная с 1950 г.) наблюдался дефицит испарения (см. рис. 35, а). Среднее же значение невязки ($\Sigma \Delta h/n$) с увеличением длины ряда уменьшается (см. рис. 35, б) и стремится к нулю. Здесь уместно также отметить, что результаты расчетов ГОИН'а для того же периода [Архипова и др., 1970] характеризуются заметно большими невязками (см. рис. 35, а, б).

Межгодовой хронологический (начиная с 1940 г.) ход испарения Каспийского моря представлен на рис. 36 (значения испарения рассчитаны как среднее из шести анализируемых ранее гидрометстанций: о-ва Тюлений, Кулалы, Избербаш, Огурчинский, Нефтяные Камни и Астара). Величина испарения (см. рис. 36, кривая 1) колеблется от 90 до 105 см/год без проявления какой-либо тенденции к уменьшению или увеличению его значения за более чем 40-летний период времени. Однако можно выделить периоды слабых падений и повышений его значений, которые иногда совпадают с изменениями уровня моря (см. рис. 36). Колебания уровня Каспийского моря, наоборот, характеризуются определенными тенденциями (см. рис. 36, кривая 3), связанными с рядом причин, основными из которых, по-видимому, следует считать антропогенные воздействия на море в последнее 50-летие и вековые климатические изменения. В частности, можно полагать, что в этих долгопериодных (вековых) колебаниях уровня

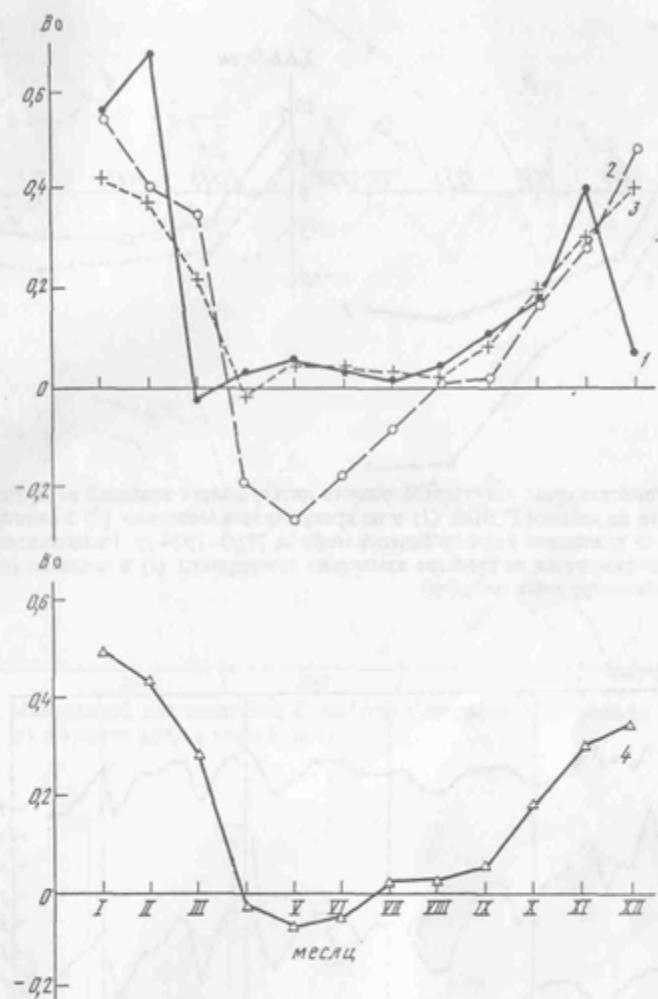


Рис. 34. Внутригодовой ход отношения Боузна B_0 для Северного (1), Среднего (2), Южного Каспия (3) и всего моря (4)

в последнее 10-летие (начиная с 1977 г.) появилась тенденция к его подъему.

Изменение уровня моря влечет за собой, как известно, изменение его площади. Это в итоге должно привести к коррекции интегрального значения влаги, испаряющейся с моря. Межгодовой ход интегральной величины испарившейся влаги (в $\text{км}^3/\text{год}$), приведенный на рис. 36 (кривая 2), убедительно свидетельствует о существовании определенных аналогий в изменении уровня моря и "объемного" испарения. Очевидно, проявления подобных аналогий должны быть более яркими для мелких водоемов с отмелыми берегами и практически отсутствовать для водоемов с крутыми берегами. Для такого водоема, как Каспийское море, решающее значение

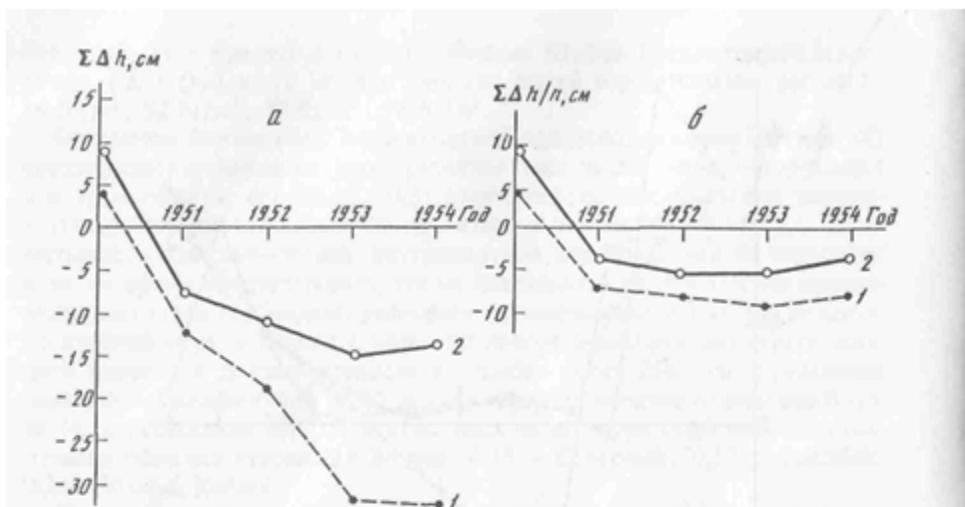


Рис. 35. Сопоставление результатов расчета интегральных значений испарения Каспийского моря по данным ГОИНа (1) и по предлагаемой методике (2) с величиной, определенной из уравнения водного баланса моря за 1950–1954 гг. (сопоставление результатов иллюстрируется на примере изменения суммарного (а) и среднего (б) значений невязок анализируемых методов)

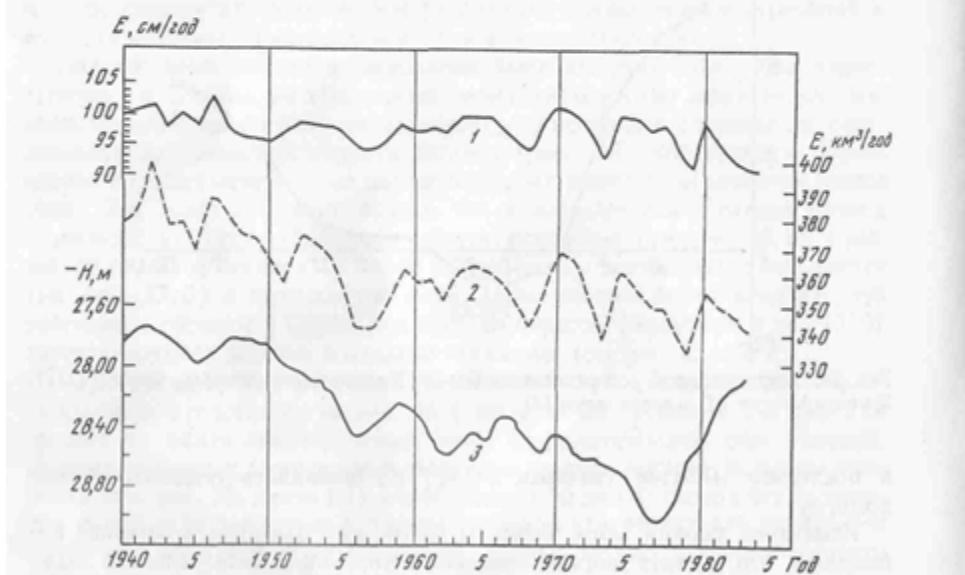


Рис. 36. Межгодовой ход испарения E , см/год (1); $\text{км}^3/\text{год}$ (2) и уровня воды H , м (3) Каспийского моря

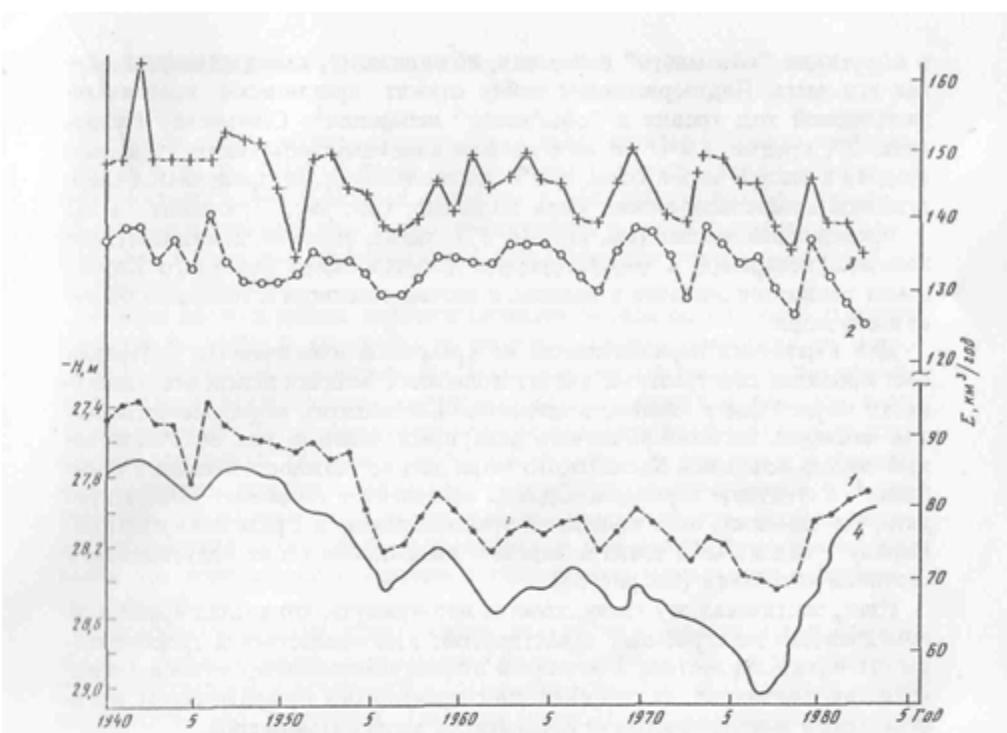


Рис. 37. Межгодовой ход испарения E , $\text{km}^3/\text{год}$ Северного (1), Среднего (2), Южного Каспия (3) и уровня воды в море H , м (4)

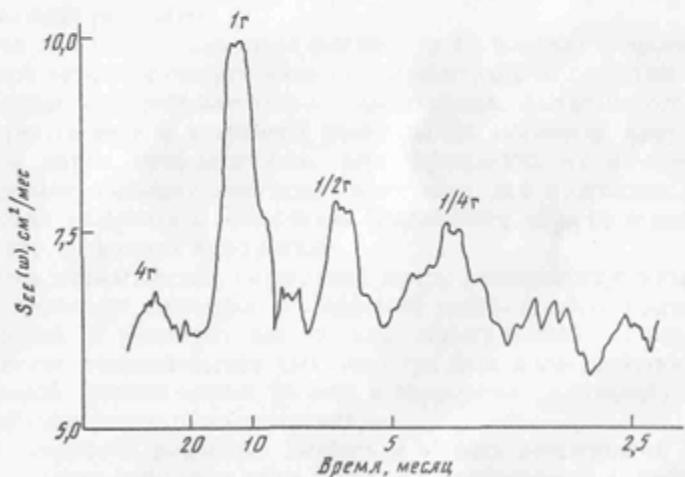


Рис. 38. Спектр колебаний испарения Каспийского моря $SEE(\omega)$, $\text{см}^2/\text{мес}$ по данным наблюдений в период 1940–1983 гг

в коррекции "объемного" испарения, по-видимому, имеет отмеченную северную его часть. Подтверждением этому служит практически идентичный межгодовой ход уровня и "объемного" испарения¹ Северного Каспия (рис. 37, кривые 1 и 4). В межгодовом изменении объемного испарения средней и южной частей моря, как и предполагалось, не проявляется собственной изменению уровня моря тенденции (см. рис. 37, кривые 2 и 3).

Проведенный анализ (см. рис. 36, 37), таким образом, показывает, что величина испарения, а соответственно и теплообмена Северного Каспия имеет решающее значение в водном, а соответственно и в тепловом балансе всего моря.

Для выявления периодичностей во временной изменчивости испарения был проведен спектральный анализ колебаний величин испарения Каспийского моря. Спектр мощности испарения Каспийского моря, рассчитанный для месячных значений 40-летнего ряда, представлен на рис. 38. Рассчитанный спектр испарения Каспийского моря дает возможность выделить колебания² с 4-летним периодом. Однако вид спектра позволяет констатировать, что мощность этих колебаний приблизительно в 2 раза ниже годовых. Наряду с годовыми в спектре надежно выделяются также полугодовые и сезонные колебания (см. рис. 38).

Итак, заканчивая эту главу, хочется подчеркнуть, что анализ временной изменчивости интегральных характеристик взаимодействия и гидрометеорологических параметров в сочетании с пространственно-временной изменчивостью локальных их значений дает практически исчерпывающее представление о тепломассообмене Каспийского моря с атмосферой.

¹ Значения величин испарения для трех частей моря рассчитывались здесь в предположении горизонтальной однородности поля испарения.

² Более низкочастотные колебания проследить не удается, так как сделать это достаточно надежно по 40-летнему ряду не представляется возможным.