

ГЛАВА VIII

ДИНАМИКА ВОД

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ И ИХ ПРОГНОЗ

Уровень Каспийского моря претерпевает значительные колебания во времени, причина которых главным образом в изменении элементов водного баланса в связи с изменением климата, а последние годы и в хозяйственной деятельности человека, а также тектонических движениях земной коры в районе моря. Последние работы (Калинин, Марков, Суетова, 1966) подтверждают эту гипотезу.

Регулярные наблюдения за уровнем моря начаты в 1830 г. Ленцем. Более ранние сведения за историческое время имеются во многих работах русских ученых (Берг, 1934; Бруевич, 1948; Колебания уровня Каспийского моря, 1956).

Ход среднегодового уровня за последние 200 лет представлен на рис. 26, а. Наиболее достоверные сведения имеются с 1900 г. по водпосту Махачкала, с 1915 г. по водпосту Красноводск и с 1921 г. по водпосту Форт Шевченко. Одна из старейших станций — водпост Баку — испытывает постепенное опускание, в связи с этим показания по ней менее надежны.

Разность между наивысшим и наинизшим уровнями с 1900 по 1963 г. была 3,08 м. Максимальные градиенты падения наблюдались с 1930 по 1940 г. Наибольшее годовое падение с 1937 по 1938 г. составило 33 см, наибольший годовой подъем с 1926 до 1927 г. — 19 см. В табл. 23 приведены некоторые статистические характеристики среднего годового уровня.

В связи с большим народнохозяйственным значением Каспийского моря прогноз его уровня имеет первостепенное значение. При прогнозах на год, а также на более длительные сроки существенно характеристики изменчивости уровня от года к году. В связи с этим была предпринята попытка ее статистической обработки. Ход годовой изменчивости уровня за 1760—1963 гг. представлен на рис. 26, б.

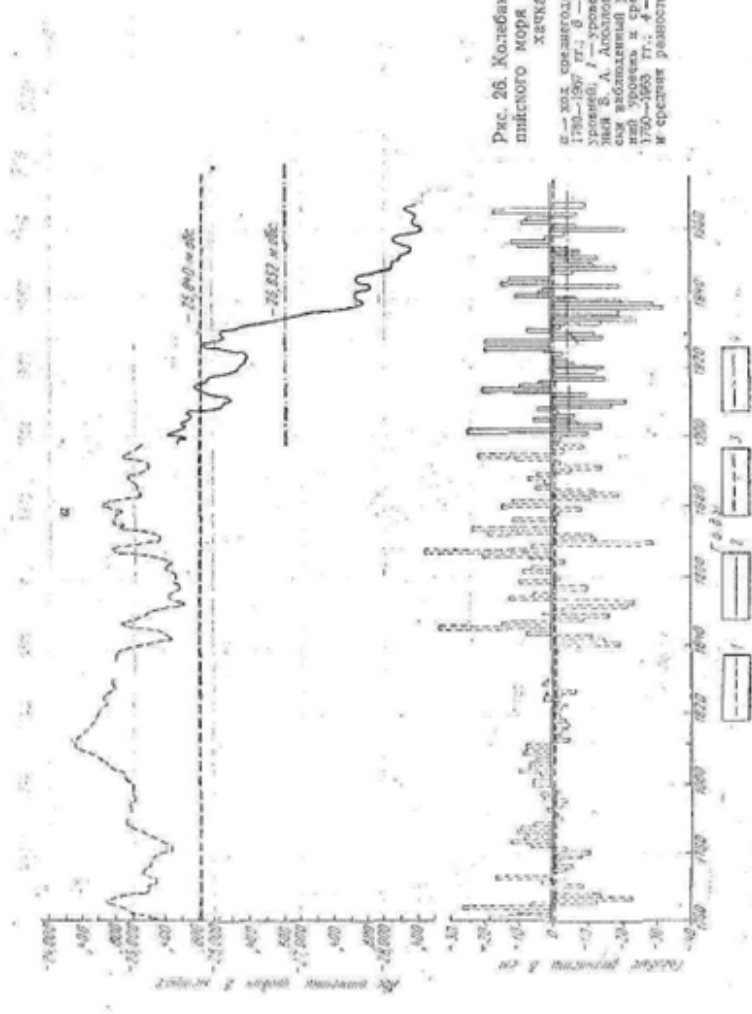


Рис. 26. Колебания уровня Каспийского моря (по Г.И.С. Мачкал):

а — ход среднегодового уровня за 1750—1957 гг.; б — годовые разности уровня; в — уровень, восстановленный В. А. Ахмедовым; г — разности уровней; д — годовые разности уровней; е — средний уровень за 1750—1897 гг.; ж — средний уровень за 1900—1953 гг.; з — средняя разность за 1900—1953 гг.

Таблица 23

Статистические характеристики средних годовых уровней Каспийского моря по водосту Махачкала (отм. «0» поста — 27,382 м в системе высот каталога ГУГКа, изд. 1949 — 1952 гг.) за 1900 — 1963 гг.

Характеристика	Расчетная формула	Значения	Примечание
Число лет наблюдений	n	64 года	1900—1963 гг.
Амплитуда колебаний уровня	$H_{\max} - H_{\min}$	3,08 м	
Высота среднего многолетнего уровня над «0» поста (\bar{H})	$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}$	53 см	—26,852 м абс.
Среднее квадратичное отклонение	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}}$	1,06 м	
Средняя ошибка среднего многолетнего уровня за счет ограниченности числа лет наблюдений	$\Delta = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	± 13 см	

Результаты статистической обработки в виде гистограммы приведены на рис. 27, а. Размах распределения (наибольшее положительное и отрицательное изменения уровня от года к году) составил за 1760—1963 г. +37 — (—33) см. Учитывая характер эмпирической кривой функции плотности распределения вероятностей годовой разности уровня ($f(\Delta H)$), представлялось наиболее целесообразным аппроксимировать эту кривую β -распределением, задаваемым в ограниченном интервале возможных значений годового градиента уровня (ΔH):

$$f_{\beta}(\Delta H) = A(\Delta H_{\max} - \Delta H)^{\alpha} \cdot (\Delta H - \Delta H_{\min})^{\beta}, \quad (1)$$

где $f_{\beta}(\Delta H)$ — плотность вероятности β распределения; ΔH_{\max} — наибольший положительный годовой градиент уровня; ΔH_{\min} — наибольший отрицательный годовой градиент уровня; $\Delta H_{\min} < \Delta H < \Delta H_{\max}$; α и β — параметры распределения, определяющие форму кривой; A — постоянный коэффициент, который может быть определен из следующего соотношения. Так как по определению функции плотности распределения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta H) d\Delta H = 1, \quad (2)$$

то, подставляя формулу (1) в формулу (2) и решая ее относительно A , находим:

$$A \approx \int_{\Delta H_{\min}}^{\Delta H_{\max}} (\Delta H_{\max} - \Delta H)^{\alpha} \cdot (\Delta H - \Delta H_{\min})^{\beta} d\Delta H$$

$$\approx \sum_{i=1}^k (\Delta H_{\max} - \Delta H_i)^{\alpha} \cdot (\Delta H_i - \Delta H_{\min})^{\beta} \cdot \Delta(\Delta H)$$

где k — число интервалов деления годовой разности уровня ΔH ,
 ΔH_i — значение годовой разности уровня в i -том интервале (все
наблюдаемые значения ΔH разбивались на интервалы через 5 см).

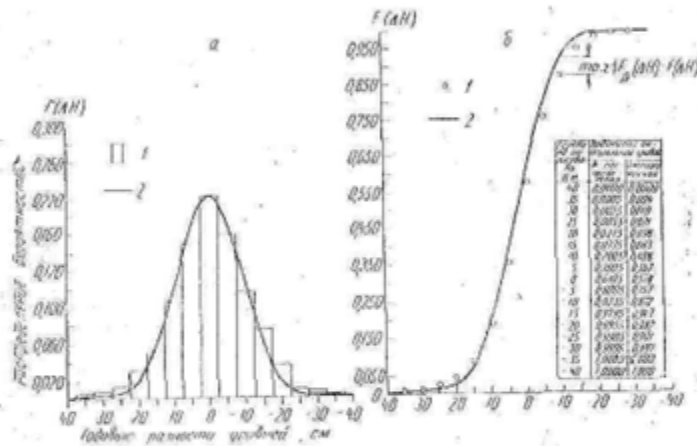


Рис. 27. Распределение годовой разности уровней Каспийского моря:
а — гистограмма по выборке: 1 — эмпирическое распределение; 2 — дифференциальная
кривая распределения с параметрами $\alpha = \beta = 9$, $\Delta H_{\max} = +50$ см, $\Delta H_{\min} = -40$ см;
б — интегральная кривая: 1 — эмпирические точки; 2 — интегральная кривая β -распреде-
ления.

Математическое ожидание ($\bar{\Delta H}$), дисперсия ($\sigma_{\Delta H}^2$) и мода (ΔH_m)
 β -распределения выражаются соответственно:

$$\bar{\Delta H} = \frac{(\Delta H_{\max} - \Delta H_m)(\beta + 1)}{\alpha + \beta + 2} + \Delta H_{\min}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \frac{(\Delta H_{\max} - \Delta H_{\min})^2(\beta + 1) \cdot (\alpha + 1)}{(\alpha + \beta + 2)^2(\alpha + \beta + 3)}, \quad (4)$$

$$\Delta H_m = \frac{\Delta H_{\min} \cdot \alpha + \Delta H_{\max} \cdot \beta}{\alpha + \beta}. \quad (5)$$

Универсальность и гибкость этого распределения, обусловленные его четырехпараметричностью (ΔH_{\max} , ΔH_{\min} , α и β), способствовали широкому его применению в решении сложнейших задач планирования управления, разработанными в трудах советских и американских ученых (Mittagey John E., 1963).

В зависимости от выбора параметров кривая β -распределения может принимать различные формы.

При $\alpha < 0$, $\beta > 0$ она возрастает от 0 до $+\infty$, при $\alpha > 0$, $\beta < 0$ — убывает от $+\infty$ до 0. При $\alpha > 0$ и $\beta > 0$ кривая соответствует одномодальному распределению с одной точкой максимума; при $\alpha < 0$, $\beta < 0$ — распределение антимодальное с одной точкой минимума. При $\alpha > \beta$ мода сдвигается к левой границе размаха распределения; при $\alpha < \beta$ — к правой; при $\alpha = \beta$ β -распределение симметрично, а формулы (3) и (5) совпадают.

Гистограмма годовой разности уровня хорошо аппроксимируется β -распределением при значениях $\alpha = \beta = 9$, $H_{\max} = 40$ см, $H_{\min} = -40$ см, $A = 1,32^{32}$ (см. рис. 27).

Соответствие теоретического и эмпирического распределения определялось по двум критериям согласия: Пирсона (χ^2) и Колмогорова (D)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 22,8, \quad (6)$$

где m_i — число наблюдений в одном интервале; n — общее число наблюдений (равное 203); p_i — теоретическая вероятность попадания годовой разности уровня в i -тый интервал, определяемая в соответствии с формулой (1).

По таблицам (Смирнов и др., 1965) величина χ^2 при 5%-ном уровне значимости (отклонения меньше 5% принимаются практически невозможными) и $K-1$, т. е. $17-1=16$ степенями свободы, равно 26,3. Полученное значение $\chi^2=22,8$ лежит в области допустимых значений, что не противоречит гипотезе — годовая разность уровней подчинена β -распределению.

$$D = 1 - \varphi \{ \max | F_{\beta}(\Delta H) - F(\Delta H) | \sqrt{n} \}, \quad (7)$$

где $F_{\beta}(\Delta H)$ — интегральная функция β -распределения (см. рис. 27); $F(\Delta H)$ — интегральная эмпирическая функция распределения; φ — функция Колмогорова, значение которой помещено в таблицах (Гнеденко, 1961).

Критерий Колмогорова рассчитывался так: по теоретической и эмпирической кривой определялся максимум модуля разности между ними

$$\max | F_{\beta}(\Delta H) - F(\Delta H) | = 0,0515,$$

далее находилась величина

$$\max | F_{\beta}(\Delta H) - F(\Delta H) | \sqrt{n} = 0,731,$$

тогда

$$\varphi \{ \max F_p(\Delta H) - F(\Delta H) \} \sqrt{n} = 0,339; \quad (8)$$

а

$$D = 1 - 0,339 = 0,661,$$

что также не противоречит высказанной гипотезе.

Существующие в настоящее время методы прогноза уровня Каспийского моря базируются на следующих закономерностях:

- 1) прогнозы уровня, основанные на непосредственном расчете составляющих водного баланса;
- 2) прогнозы уровня по циркуляции атмосферы;
- 3) прогнозы уровня по солнечной активности и температуре воздуха;
- 4) прогнозы уровня на основе методов математической статистики.

Так как Каспийское море — замкнутый водоем, то естественно, что соотношение элементов водного баланса — стока, испарения, осадков — в значительной степени определяют высоту стояния уровня. Причем основным фактором колебаний является изменение речного стока, 78% которого составляет сток Волги. В связи с этим среднегодовые и внутригодовые колебания уровня моря обычно повторяют колебания стока Волги. Большинство долгосрочных прогнозов (месячных, годовых) основано на непосредственном расчете элементов водного баланса. Сверхдолгосрочные прогнозы основываются на связи стока Волги, а следовательно и уровня, с закономерностями атмосферной циркуляции в северном полушарии и солнечной активностью.

Еще Л. С. Бергом (1943) было замечено, что для периодов потепления арктических морей характерно низкое стояние уровня Каспийского моря, для периодов похолодания — высокое. В настоящее время установлено (Белинский, 1957), что ход атмосферной циркуляции над материком и океаном противоположен: в период развития над океаном циклонической деятельности над материком преобладает антициклональная циркуляция и наоборот. Формирование стока Волги происходит в холодную часть года, когда в тепловом отношении суша пассивна, а океан активен. Поэтому вполне закономерной оказалась связь колебаний уровня Каспийского моря с индексом циркуляции атмосферы над океаном. Гидрометцентр СССР на основе этих закономерностей прогнозирует уровень на 5 и более лет вперед.

Сток рек, впадающих в Каспийское море, зависит от климата, определяющегося деятельностью Солнца. Было замечено (Эйгенсон, 1963), что усилению солнечной активности соответствует понижение уровня Каспийского моря, а ослаблению — повышение его. Б. А. Аполлов разработал метод прогноза уровня, основанный на закономерностях изменения солнечной активности (последняя обычно характеризуется числами Вольфа).

Известно, что в солнечной активности имеется периодичность в 9-13 лет (в среднем — в 11 лет). При этом существенно, что эффект влияния солнечных пятен на климат Земли зависит не только от числа и площади пятен, но также и от их широты, от их положения относительно центрального меридиана Солнца и от интенсивности их поля. Особенно сильное влияние солнечные пятна оказывают в случае, когда при прохождении через центральный меридиан Солнца они находятся в центре диска, т. е. совпадают с проекцией Земли на солнечный диск, что имеет место при нахождении пятен в экваториальной зоне Солнца.

При исследовании влияния солнечной активности на колебания уровня Каспия Б. А. Аполлов проводил осреднение чисел Вольфа по 10 периодам с 1840 по 1956 г. При этом осреднении совмещались годы с максимумами солнечных пятен и получался вполне закономерный ход изменений солнечной активности. Таким же образом были обработаны наблюдения над уровнем моря, причем за основу совмещения брался тот же год, что и для солнечной активности. При этом оказалось, что изменения уровня запаздывают по сравнению с максимумом солнечных пятен на 1 год.

Кроме того, Б. А. Аполлов (1954) предложил методику прогноза уровня моря по температуре воздуха в Москве. Он обнаружил наличие тесной связи стока, а следовательно, и уровня Каспия с температурой воздуха в бассейне Волги. Эта температура легко увязывается со средней температурой воздуха Москвы при рассмотрении длительных периодов.

В последнее время много внимания отводится возможности прогноза уровня непроточных озер и, в частности, Каспийского моря на основе методов математической статистики (Будыко, Юдин, 1960; Дроздов, Покровская, 1961; Багров, 1963; Крицкий, Менкель, 1964). Впервые эти методы применили в 1940 г. (Крицкий, Менкель, 1946). Исследование колебаний уровня этими методами основывается либо на композиции распределения вероятностей элементов режима моря, либо на применении уравнения марковских случайных последовательностей.

Прогнозы среднемесячного, среднегодового и весенне-летнего подъема уровня Каспийского моря выпускает Гидрометцентр СССР с 1938 г. по методу Г. П. Калинин (1941), основанному на непосредственной соотношении элементов водного баланса моря. Так как объем половодья Волги определяется зимними осадками и потеплениями весной и осенью, то для прогноза подъема уровня моря у г. Баку за весенне-летнее половодье, которое продолжается обычно с марта до августа, Г. П. Калинин предложил соотношение:

$$\Delta H = 0,17x_{x-III} - 0,73t_{x-IV, V} - 4, \quad (9)$$

где ΔH — изменение уровня от минимума (обычно в феврале) до максимума; x_{x-III} — осадки за сентябрь—март в бассейне Волги; t — температура воздуха в бассейне Волги за осенний и весенний периоды.

Обеспеченность ошибок менее 10 см в Баку по уравнению (9) составила 97% за период 1909—1937 гг. и 81% — с 1938 по 1963 г. При составлении прогнозов в последние годы учитывалось изъятие воды из общего объема стока на заполнение верхневолжских водохранилищ.

Для прогноза годового изменения уровня (Δh) у Баку Г. П. Калинин предложил уравнение:

$$\pm \Delta h = 1,9 (\Delta H - 36), \quad (10)$$

где ΔH — разность между минимальными среднемесячными уровнями смежных лет.

Впоследствии, учитывая наличие тектонических движений в районе Бакинского футштока, Смирнова К. И. (1966) составила зависимости, аналогичные (9) и (10), для прогноза уровня на станциях Махачкала, Форт Шевченко, Красноводск, а также уравнения прогноза весенне-летнего подъема уровня, используя данные по объему стока весеннего половодья Волги у Волгоградской ГЭС.

Для прогноза среднемесячного уровня Каспийского моря Г. П. Калинин предложил уравнения:

$$H_i = H_0 + k_i \Delta H, \quad (11)$$

для фазы спада

$$H_i = H_{\max} - k \Delta H_{\text{вод}}, \quad (12)$$

где H_i — среднемесячный уровень i -того месяца; H_0 — начальный уровень (февраль — март); k_i — интерполяционный коэффициент, определенный по графику типового внутригодового хода уровня моря (Смирнова, 1966); H_{\max} — максимальный среднемесячный уровень по прогнозу; $\Delta H_{\text{вод}}$ — разность между ожидаемыми значениями максимального и минимального уровней. Ошибки прогноза среднемесячных уровней по соотношениям (11) и (12) для лет с естественным режимом стока Волги не превышали 7—8 см. За последние годы и осенние месяцы (октябрь — декабрь) они достигали 14 см, а в 1963 г. — 21 см.

В связи со строительством ГЭС изменился режим моря, и для Каспийского моря разработан метод прогноза уровня путем непосредственных расчетов приращений уровня от месяца к месяцу по уравнению водного баланса:

$$\Delta H = \frac{Q_{\text{пов}}}{F} - \frac{Q_{\text{обг}}}{F} + \frac{Q_{\text{подл}}}{F} - z + x \pm \Delta H_{\text{ст}}$$

где ΔH — приращение уровня от месяца к месяцу; $Q_{\text{пов}}$ — увеличение объема моря за счет суммарного притока рек; $Q_{\text{обг}}$ — уменьшение объема моря из-за стока в Кара-Богаз-Гол; $Q_{\text{подл}}$ — увеличение объема моря за счет подземного притока; F — площадь моря;

z — понижение уровня моря вследствие испарения; x — повышение уровня моря за счет выпадающих на поверхность моря осадков; ΔH_0 — изменение уровня моря из-за колебаний плотности воды, обусловленных изменениями ее температуры и солености.

Для определения среднемесячных величин отдельных составляющих водного баланса К. И. Смирновой и О. И. Шереметевской (1967) разработан метод, позволяющий рассчитывать компоненты уравнения по данным гидрометеорологических наблюдений. Анализ результатов расчета баланса за конкретные годы подтвердил предыдущие предположения о решающей роли изменений поверхностного притока в колебаниях уровня моря.

Прогноз годового хода уровня моря составляется путем расчета изменений уровня от месяца к месяцу по уравнению водного баланса и суммирования рассчитанных изменений. При этом величину поверхностного стока воды в Каспийское море можно считать заранее заданной в соответствии с планируемым режимом работы ГЭС, а сумма остальных компонентов баланса вследствие ее сравнительно малой изменчивости принимается приближительной, по средним многолетним данным.

Прогноз среднегодового уровня на 5—10 лет вперед. Развитие народного хозяйства и гидротехнического строительства ставят задачу разработки метода прогноза уровня Каспийского моря на перспективу.

В настоящее время Гидрометцентром СССР ежегодно прогнозируется уровень на 6 лет по методу, разработанному Н. А. Белинским и Г. П. Калининым (1946). Метод основан на зависимости уровня моря от циркуляции атмосферы над Атлантическим океаном. В качестве индекса атмосферной циркуляции (I) принята $\sum_0^M (P_{\text{ц}} - P_{\text{ан}})$ — сумма разностей между давлением в циклоническом ($P_{\text{ц}}$) и антициклоническом ($P_{\text{ан}}$) полях на той или иной территории за произвольно взятый отрезок времени. Наиболее тесная зависимость уровня Каспия от интегральных значений индекса циркуляции за предшествующие годы получилась для района Азорского максимума, со сдвигом интегральной кривой уровня на 5 лет ($r = -0,95 \pm 0,02$) и на 6 лет ($r = -0,96 \pm 0,01$). На основе этого Н. А. Белинский и Г. П. Калинин составили уравнения для прогноза уровня у г. Баку на 5 и 6 лет вперед:

$$H_n = 356 - 0,079 \sum_{1900}^{n-5} (I + 320),$$

$$H_n = 352 - 0,083 \sum_{1900}^{n-6} (I + 320),$$

где H_n — среднегодовой уровень Каспийского моря n -го года; I — индексе циркуляции, рассчитанный в районе Азорского макси-

Таблица 24

Пункт	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Обеспеченность, %
Баку	$H_n = 356 - 0,068 \left(\sum_{1900}^{n-6} I - \sum_{1900}^{n-6} I_0 \right)$	0,98	98
Махачкала	$H_n = 183 + 0,074 \left(\sum_{1900}^{n-6} I - \sum_{1900}^{n-6} I_0 \right)$	0,98	100
Форт Шевченко	$H_n = 173 - 0,076 \left(\sum_{1900}^{n-6} I - \sum_{1900}^{n-6} I_0 \right)$	0,98	100
Краснодарск	$H_n = 196 + 0,079 \left(\sum_{1900}^{n-6} I - \sum_{1900}^{n-6} I_0 \right)$	0,98	100

H_n — среднегодовой уровень n -го года; I — индекс атмосферной циркуляции; I_0 — среднее значение индекса циркуляции, соответствующее некоторому среднему величине уровня Каспийского моря.

муму; n — порядковый номер года начиная с 1900. Максимальная ошибка при прогнозе на 5 лет равна 40 см, а при прогнозе на 6 лет — 32 см. Средняя погрешность в первом случае — 17, а во втором — 15 см.

В настоящее время аналогичные уравнения получены К. И. Смирновой (1966) для прогноза уровня Каспийского моря на 6 лет вперед для других пунктов (табл. 24).

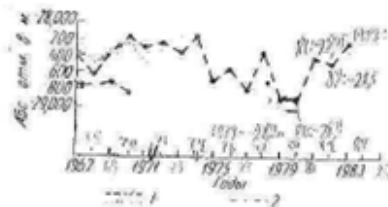


Рис. 28. Прогноз уровня Каспийского моря; 1 — по Смирновой; 2 — по Анолову

При составлении этих уравнений имелось в виду, что при некотором индексе циркуляции приходная и расходная части водного баланса взаимно уравновешиваются; тогда отклонения (с одним знаком) индекса циркуляции от этого значения должны отвечать соответствующим изменениям уровня Каспия. Следовательно, интегральная кривая индекса циркуляции должна повторять ход уровня моря. Прогноз уровня по этой методике, рассчитанный К. И. Смирновой, в среднем для всей поверхности моря представлен на рис. 28.

Для разработки методики прогноза уровня Каспийского моря по солнечной активности на длительный срок Б. А. Анолов анализировал связь средних величин числа Вольфа за предшествующий период и уровня моря за последующий период. На основе анализа

Таблица 25

Пункт	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибки прогноза, см	Примечание
Махачкала	$H_5 = 129,7 - 0,12 W_{35}$	-0,80	от -27 до +19	Годы 1, 32, 33, 34 берутся с уд. в. 1. Годы 2, 3, 4, 31 — с уд. в. 2. Годы 5, 30 — с уд. в. 3. Годы 1, 2, 33, 34, 35 брались с уд. в. 1. Годы 3, 4, 5, 31, 32 — с уд. в. 2. Остальные — с уд. в. 3. Годы 1, 33 брались с уд. в. 1/2. Годы 2, 32 — с уд. в. 1. Годы 1, 32 взяты уд. в. 1: годы 2, 31 — с уд. в. 2. Остальные — с уд. в. 3. Учитывались средняя солнечная активность 30- и 40-летнего периодов
	$H_5 = 85,3 - 0,089 W_{34}$	-0,74	от -13 до +13	
	$H_{10} = 138,6 - 0,147 W_{33}$	-0,74	от -25 до +35	
	$H_{10} = 133,2 - 0,138 W_{32}$	-0,72	от -24 до +27	
	$H_{10} = 119,0 - 0,117 \frac{\Sigma W_{30+40}}{2}$	-0,71	—	

H_5, H_{10} — уровень на 5 и 10 лет вперед, соответственно, $W_{35, 34, 33}$ — солнечная активность за предшествующие 35, 34, 33 года.

им были найдены следующие уравнения для прогноза уровня на 5 и 10 лет вперед (табл. 25).

На основе зависимости уровня моря от температуры воздуха в Москве Б. А. Аполлов составил следующие уравнения регрессии для прогноза уровня на 5 и 10 лет (табл. 26).

В 1947 г. впервые был дан прогноз уровня по температуре воздуха в Москве на 5 лет (табл. 27). Из прогноза следует (табл. 28), что в 1970 г. уровень Каспийского моря будет примерно на 30—40 см

Таблица 26

Пункт	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибки прогноза, см	Примечание
Махачкала	$H_5 = 654,3 - 4,6t_{45}$	-0,75	от -38 до +38	Первые и последние 5 лет брались с уд. в. 1, остальные — с 2. 1—5 и 41—45 годы брались с уд. в. 0,5, для остальных лет — 1
	$H_5 = 128 - 3,4t_{45}$	-0,78	от -29 до +24	
	$H_{10} = 774 - 5,4t_{45}$	-0,80	от 0 до +23	

H_5, H_{10} — значение уровня на 5 и 10 лет вперед соответственно; t_{45} — температура воздуха по Москве за предшествующие 45 лет с различными удельными весами.

ниже современного. В прогнозе не учтено возможное значительное возрастание потребления воды для хозяйственных нужд, а также влияние тектонических процессов, так как продолжительность в 10–15 лет слишком мала для того, чтобы это влияние было ощутимым.

Таблица 27
Оправданность прогноза уровня Каспийского моря у Махачкалы на 5 лет вперед по температуре воздуха Москвы (отм. «0» графика поста — — 27,38 м абс.)

Год прогноза	Год прогнозный	Уровень прогнозный, см	Уровень фактический, см	Ошибка, см
1947	1952	—67	—74	+ 7
1948	1953	—77	—88	+11
1949	1953	—75	—88	+13

Таблица 28
Оправданность прогноза уровня Каспийского моря у Махачкалы на 10 лет вперед по температуре воздуха Москвы

Год прогноза	Год прогнозный	Уровень прогнозный, см	Уровень фактический, см	Ошибка, см
1947	1957	— 94	— 93	+ 1
1948	1958	— 98	— 82	+16
1949	1959	—102	— 81	+21
1950	1960	—108	— 85	+23
1951	1961	—116	—107	+ 9
1952	1962	—124	—115	+ 9
1953	1963	—131	—107	+24
1954	1964	—137	—100	+37
1955	1965	—144	—110	+34
1956	1966	—144	—	—
1957	1967	—137	—	—
1958	1968	—135	—	—
1959	1969	—133	—	—
1960	1970	—144	—	—

Для периода, охватывающего следующее после 1970 г. десятилетие, следует ожидать дальнейшее понижение уровня в 1975 г. до отметки 160 см, в 1980 г. — до 180 см. Эти ориентировочные цифры дал Б. А. Аполлов на основе прогноза по температурам воздуха Москвы по 30-летним периодам.

Прогноз уровня Каспийского моря на 15–18 лет вперед.

Б. А. Аполлов обнаружил зависимость уровня моря от солнечной активности предшествующего периода и температуры воздуха в Москве со сдвигом в 15 лет, это позволяло прогнозировать уровень на довольно значительный срок вперед (табл. 29).

Таблица 29

Прогнозные уравнения водности Махачкала (по Б. А. Аполлову)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Силабля прогноза, см
$H_{15} = 122,2 - 0,152 \Sigma W_{23+34}^2$	-0,82	от -22 до +21
$H_{15} = 259 - 0,17 \Sigma W_{40+45}^2$	-0,70	от 23 до +37
$H_{15} = 251 - 0,168 W_{41}$	-0,72	от -21 до +25
$H_{15} = 796 - 0,6 t_{30}$	-0,77	от -40 до +34

H_{15} — прогнозируемый уровень на 15 лет вперед; ΣW_{23+34}^2 — средняя суммарная активность за 23- и 34-летний предшествующий период.

К. И. Смирнова определила зависимость уровня Каспийского моря от общей ледовитости Баренцева моря (L) и интегральных значений индекса атмосферной циркуляции в северной части Атлантического океана и в южной части Западной Сибири и Казахстана (5 и 8 районы, по каталогу Вительса) со сдвигом во времени порядка 18 лет (табл. 30). Это дало возможность прогнозировать уровень на значительный срок вперед.

Таблица 30

Прогнозные уравнения уровня Каспийского моря (по Смирновой, 1966)

Пункт	Уравнения регрессии	Коэффициент корреляции	Обеспеченность, %
Баку	$H_{18} = 0,96L - 0,05\Delta I_5 + 1,05\Delta I_8 + 237$	0,94	97
Краснодарск	$H_{18} = 0,96L - 0,11\Delta I_5 + 1,15\Delta I_8 + 68$	0,95	100
Форт Шевченко	$H_{18} = 1,05L - 0,11\Delta I_5 + 1,14\Delta I_8 + 61$	0,95	100
Махачкала	$H_{18} = 1,04L - 0,11\Delta I_5 + 1,09\Delta I_8 + 58$	0,95	97

L — ледовитость Баренцева моря; ΔI_5 — разность интегральных сумм индекса атмосферной циркуляции в северной части Атлантического океана (5 район по каталогу Вительса); ΔI_8 — разность интегральных сумм индекса атмосферной циркуляции в южной части Западной Сибири и Казахстана (8 район по каталогу Вительса).

Прогноз уровней Каспийского моря на перспективу 2000 года. Как указывает Г. П. Калинин (1968), в дальнейшем прогноз уровня Каспийского моря будет основан на расчете элементов его водного баланса, с дополнительным учетом деятельности человека и изменения площади моря. При прогнозах уровня воды по интегральным значениям индекса циркуляции экономия воды за счет уменьшения площади моря существенно сказывается на получае-

мых кривых. При разработке методики прогноза за период 1915—1965 гг. влияние деятельности человека (забор стока на хозяйственные нужды) компенсировалось экономией воды благодаря уменьшению испарения при сокращении площади моря.

В дальнейшем при составлении прогнозов нужно учитывать поправки на сток и экономию воды вследствие уменьшения площади моря:

$$\Delta H = Q - (z_m - x_m) \cdot F \pm \Delta Q,$$

где ΔH — изменение уровня моря за расчетный интервал времени; Q — приток поверхностных и подземных вод в море за расчетный интервал с учетом изъятий стока; z_m и x_m — соответственно испарение с поверхности моря и осадки за расчетный интервал времени; F — площадь моря в течение расчетного интервала времени; ΔQ — водообмен со смежными морями, заливами.

Суммарное изменение уровня моря за время Δt может быть рассчитано по соотношению:

$$\Delta H_t = \sum_0^t Q + \sum_0^t (z_m - x_m) F \pm \sum_0^t \Delta Q.$$

Г. П. Калинин, К. И. Смирнова и О. И. Шереметевская провели расчеты возможного изменения уровня за период 1965—2000 гг. с учетом хозяйственной деятельности человека. Результаты этих расчетов таковы:

1) уровень Каспийского моря к 1980 г. понизится на 2 м, а к 2000 г. — на 3 м по сравнению с 1965 г., если поверхностный сток составит 95% обеспеченности от среднего многолетнего (неблагоприятные климатические условия);

2) уровень Каспийского моря понизится к 1980 г. на 1,5 м, а к 2000 г. — на 2 м, если приток поверхностных вод будет равен 50% обеспеченности (средние климатические условия);

3) уровень Каспийского моря повысится на 0,2—0,5 м к 2000 г., если поверхностный сток составит 5% обеспеченности (благоприятные климатические условия).

Ориентировочные величины изъятий стока из баланса оцениваются на 1965 г. в $38 \text{ км}^3/\text{год}$, на 1980 г. — $62 \text{ км}^3/\text{год}$, на 2000 г. — $82 \text{ км}^3/\text{год}$.

Для прогноза уровня Каспия на 2000 г. Г. П. Калинин учитывал некоторые возможные изменения влагооборота в атмосфере: увеличение осадков на 5 и стока на 8%. Приток воды определялся по следующим зависимостям:

1) сток 50% обеспеченности равен норме стока за предшествующий многолетний период;

2) коэффициент вариации за n лет вычислялся по формуле

$$C_{\text{вн}} = \frac{C_{\text{вн}}}{\sqrt{n}};$$

3) сток 5 и 95%-ной обеспеченности равен

$$Q_n = \bar{Q} \pm 2C_{v_n} \bar{Q},$$

где C_v — коэффициент вариации среднегодового стока за весь период наблюдений; C_{v_n} — коэффициент вариации среднегодового стока, осредненного по n -леткам;

4) учитывая связь между средними значениями притока воды в море и разностью $z-x$, по полученным зависимостям $z-x=f(\bar{Q})$ в соответствии с принятыми значениями \bar{Q} , определялись и расчетные значения $z-x$.

К концу 1980 г. предполагается переброска вод Вычегды и Печоры в объеме 40 км³/год. При таком режиме можно ожидать:

1) при неблагоприятных климатических условиях (95% обеспеченности) — падение около 1 м;

2) при средних условиях (обеспеченность 50%) — сохранение современного уровня;

3) при благоприятных климатических условиях — повышение уровня до 1,3 м.

ТЕЧЕНИЯ

Основными причинами, вызывающими течения в Каспийском море, являются атмосферная циркуляция, в особенности ветровые поля над морем, а также неравномерное распределение плотности в различных частях моря. Кроме этого, течения зависят от колебаний уровня, речного стока, имеющего основное значение для северной части моря, испарения. На направления и скорости течений Каспийского моря оказывают существенное влияние и сила Корiolиса, конфигурация берегов, рельеф дна.

Распределение полей ветра над морем вызывает дрейфовые течения, а плотностная неравномерность обуславливает конвективные течения. На предустьевых пространствах крупных рек под влиянием речного стока образуются стоковые течения.

Значительное место занимают в Каспийском море компенсационные течения. Так, длительные и сильные северо-западные ветры создают нагон воды в южной части моря. В результате, еще до прекращения ветра возникает компенсационное течение на север. Сильные южные ветры способствуют повышению уровня в северной части моря, откуда вода еще до смены ветра устремляется на юг, усиливая течение вдоль западного берега средней части Каспия.

В прибрежных районах течения сильно осложняются влиянием конфигурации берегов и рельефа дна. Встречающиеся на пути течений надводные и подводные препятствия значительно изменяют направления существующих течений.

Таким образом, режим течений Каспийского моря очень сложен. Он зависит от многих факторов, проявляющихся в природе одновременно. Как следствие взаимодействия всех факторов в Каспий-

ском море возникает некоторая результирующая система течений — общая циркуляция вод моря.

Различные факторы, вызывающие течения в Каспийском море, по своему значению далеко не равноценны. Главную роль в создании течений в верхних слоях моря играет ветер. Роль речного стока, разности температур воды и испарения в различных районах моря незначительны. Эти факторы лишь создают неоднородность водных масс (Леднев, 1943). Глубинные движения вод в основном определяются неравномерным распределением плотности.

Совокупное влияние всех факторов обуславливает результирующую циклоническую циркуляцию вод моря. Преобладающая циклоническая циркуляция вод отражена на всех схемах результирующих течений на поверхности, полученных в разное время на основании статистического осреднения многолетних материалов наблюдений над течениями, а также путем анализа ветровых условий над морем и связи течений с ветром. Назовем две последние схемы — В. А. Леднева (1943) и Г. В. Ржеплинского (1955), полученные в результате анализа полей ветра над морем. Эти схемы весьма сходны и различаются только для северной части моря. На обеих схемах показана общая циклоническая циркуляция, охватывающая среднюю и южную части моря. Эта циркуляция, соответствующая некоторым среднесезонным гидрометеорологическим условиям над морем, не должна приниматься как неизменная и существующая в любое время. Она очень слабая и может частично или даже полностью изменяться в зависимости от перераспределения поля масс и конкретной гидрометеорологической обстановки в различных районах. Тем не менее эта циркуляция создает тот общий фон, на котором развивается вся сложная система течений Каспийского моря. На рис. 29 показана схема общей циркуляции вод Каспийского моря, полученная Ледневым (1943). Основные ее особенности следующие. Массы воды из северной части моря движутся на юг вдоль западного берега до Апшеронского полуострова. Здесь часть вод обгибает полуостров, и, войдя в Южный Каспий, продолжает двигаться на юг, а часть отклоняется на восток, доходя до восточного берега, и соединяется с водами, двигающимися на север. Таким образом, в Среднем Каспии образуется собственная циклоническая циркуляция. Та часть вод, которая вошла в Южный Каспий, распространяется до южного берега моря, где также поворачивает на восток, а вблизи шельфа восточного берега — на север. Двигаясь вдоль шельфа эти воды поступают в среднюю, а затем в северную часть моря. В районе п-ова Магьшлак часть вод, движущихся на север, отклоняется на запад, замыкая циркуляцию в средней части моря.

В южной части моря, между Апшеронским полуостровом и устьем Куры показана местная антициклоническая циркуляция. Существование ее подтверждается многочисленными инструментальными наблюдениями, выполненными в последние годы на пазорье Куры. На поверхности и на горизонте 10 м наибольшую

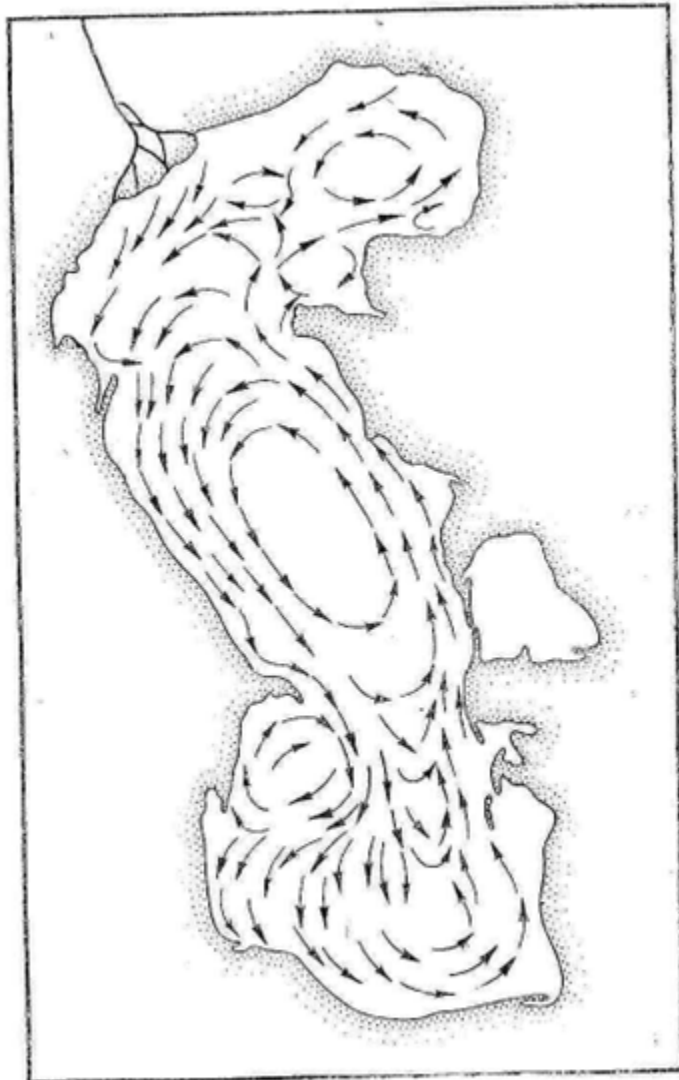


Рис. 29. Схема течений Каспийского моря (по Ледневу, 1943)

постояемость при всех направлениях ветра имеют северные течения вдоль берега. Возможность переноса вод от устья Куры на север согласуется также с геологическими и биологическими данными (Леднев, 1943). Характер результирующих течений в Южном Каспии сложнее, чем в Среднем. Циклоническая циркуляция выражена здесь менее явно и охватывает в основном восточную часть района.

Наименьшую достоверность результирующая циркуляция имеет для северной, мелководной части моря, которая характеризуется неустойчивыми течениями, сильным развитием сгонно-нагонных явлений. В этой части моря преобладают ветровые течения, а на взморье Волги наблюдается течение, вызванное речным стоком. Основная часть вод Волги и Урала распространяется в западную часть Северного Каспия, поступаая оттуда в среднюю часть моря. В. А. Леднев (1943) отмечает, что для Северного Каспия наиболее значительные скорости течений наблюдаются в западной части, где они могут достигать до 50 см/сек. Восточная часть Северного Каспия характеризуется малыми скоростями, в среднем 10—15 см/сек.

Хотя существование циклонической циркуляции вод неоднократно подтверждалось многочисленными инструментальными наблюдениями над течениями в различных районах моря, циклоническая схема представляет собой только первое приближение к реальной картине. Показывая преобладающие пути переноса вод, она не отражает областей сходимости и расходимости течений, всей сложной их структуры, которая выявлена инструментальными наблюдениями и путем расчетов косвенными методами.

Достигнутые к настоящему времени результаты изучения течений Каспийского моря не позволяют одинаково подробно охарактеризовать все их виды. Лучше всего изучены течения, имеющие основное значение для Каспийского моря, — дрейфовые. Но и они, охватывающие верхние слои моря, исследованы недостаточно. Еще хуже обстоит дело с другими видами течений. Особенно плохо изучена циркуляция глубинных вод Каспийского моря.

Давно заметили связь течений и ветров на Каспийском море. Исследованием этой связи еще в 30-х годах занимались Н. Н. Струйский и А. И. Михалевский, а позднее В. А. Леднев, В. А. Зенин и др. Струйский (1930) получил линейную связь между скоростью ветра и дрейфовым течением. Клевцова (1966) показала, что связь между скоростью ветра и течением гораздо сложнее, так как в море наблюдается не чисто дрейфовое течение. Для анализа Клевцова использовала материалы стационарных наблюдений над течениями с 1952 по 1963 г., проводимых с морских эстакад, оснований и островных гидрометеостанций (Изберг, о. Жидой, Нефтяные Камни, Челекен и др.).

Анализ этих материалов показал, что по достижении ветром скорости 13—14 м/сек происходит медленное увеличение средней скорости течений, затем резкое ее возрастание. Зависимость между ветром и течением для различных районов имеет следующий вид:

Изберг: $V^2 = 8,5 e^{0,011V} + 0,0014 W^2$,

Нефтяные Камни: $\bar{V} = 12,5 e^{0,0225W} + 0,0005 W^2$,

Челекен: $V = 10 e^{0,020W} + 0,00036 W^2$,

где \bar{V} — средняя скорость течения, *см/сек*; W — скорость ветра в *м/сек*.

Фактическое распределение скоростей течений показывает, что зависимость течения от скорости ветра неоднозначна. Считая суммарные течения случайным процессом, Клевцова применила для их исследования статистический метод, позволяющий рассчитывать вероятность определенных скоростей течений при данной силе ветра. Результаты вычисления скоростей течений этим методом показывают хорошую согласованность между наблюдаемыми и рассчитанными величинами (Клевцова, 1966а).

Тесная связь, существующая между ветрами и течениями Каспийского моря, выражается не только в возрастании скорости течения при увеличении силы ветра, но и в зависимости направлений течений от скорости и направления действующего и предшествующего ветра. При увеличении силы ветра связь между направлением ветра и течения становится все более тесной. Однако исследование этой связи затрудняется тем, что число наблюдений над течениями при больших скоростях ветра еще невелико. Другую трудность представляет учет влияния местных условий.

Проведенные исследования показывают, что с увеличением скорости ветра угол между направлением течения и ветра уменьшается, а при ветрах 8—9 баллов отмечается почти полное их совпадение. Однако скорость течения обычно возрастает медленнее, чем скорость ветра.

Результаты проведенной Ледневым обработки показывают, что при ветре 4—5 баллов течения почти в 50% случаев направлены по ветру, а при ветре 6—7 баллов вероятность повышается до 70%. Б. Л. Лагутин (1955) считает, что при ветрах до 5 баллов течение в среднем совпадает с ветром на 70%. Все исследователи отмечают, что при ветрах 8—9 баллов течение почти всегда совпадает с ветром. При ветре силой 4—5 баллов скорость дрейфового течения в среднем равна 20 *см/сек*, а при ветре 6 баллов и более она возрастает до 60 *см/сек* (Гюль, 1956).

При штилях, по данным Леднева (1943), более чем в 50% случаев течение отсутствует или может иметь самые различные направления, связанные с предыдущей деятельностью ветра и вызванным ею изменением уровней поверхности моря.

Клевцова (1966б) попыталась найти результирующие направления течений, исходя из различных типов ветровых полей по Каспийскому (1964). Правда, все наблюдения за течениями проводились при слабых ветрах (1—4 балла). Наибольшую повторяемость во время наблюдений имели северный, северо-западный, южный и юго-восточный ветры, поэтому результирующие направления течений были построены для четырех полей ветра Каспийского: I, II,

III и IV. Повторяемость схем течений, по Клевцовой, согласуется с повторяемостью этих полей ветра. Постоянство течения характеризовалось коэффициентом устойчивости:

$$K^{\circ}/a = \frac{V_r}{V_a} 100,$$

где V_r — средняя векториальная скорость; V_a — средняя арифметическая скорость.

Схемы Клевцовой показывают довольно хорошую согласованность в направлении течений и ветров. Так, при типах I и II с ветрами северных направлений преобладают течения южных направлений, устойчивость которых в большинстве случаев превышает 50%. При юго-восточных ветрах (IV тип) результирующие течения в основном направлены на северо-запад. Устойчивость их несколько ниже, чем южных течений при типах I и II, хотя и в этом случае по всему морю преобладают величины устойчивости свыше 50%. Такую же устойчивость имели течения, направленные по ветру при III типе ветрового поля (северо-восточные и восток-северо-восточные ветры).

Вдоль западного побережья Среднего Каспия при всех четырех типах полей ветра течение направлено на юго-восток. При типах I, II устойчивость течения равна здесь 80—90%, при IV типе, когда течение, в общем, направлено против ветра, устойчивость понижается до 10—50%. Преобладание у этого побережья течений южных направлений подтверждается стационарными наблюдениями на гидрометстанциях Изберг и Нефтяные Камни, а также съемками течений и рейдовыми наблюдениями. Таким образом, схемы, полученные Клевцовой, еще раз подтверждают существование результирующего течения вдоль западного побережья Среднего Каспия на юг, основными причинами которого являются господствующие ветры, неравномерное распределение плотности между северной и южной частями моря и нагоны в Северном Каспии. Весьма сложный режим течений наблюдается к северу от Апшеронского полуострова и в районе Апшеронского архипелага, что отмечал еще Штокман. Он показал, что Апшеронский полуостров, как препятствие, способствует возникновению компенсационного течения, направленного против основного потока. Этот вывод в некоторой степени подтверждается результатами стационарных и рейдовых наблюдений и съемками течений, выявивших большую повторяемость в районе северо-западных и юго-восточных течений. При III и IV типах полей ветра устойчивость юго-восточных течений весьма мала, они могут легко нарушаться.

В районе Апшеронского порога результирующие течения при всех направлениях ветра имеют небольшой коэффициент устойчивости (10—30%). Течения над порогом обусловлены не только непосредственно ветрами, но в значительной мере зависят от рельефа дна и компенсационных течений. Это относится к скоростям ветра

Таблица 31

Повторяемость направлений течений (%) при различных направлениях ветров
(по Касацкой, 1966)

Направленные течения	Направленные ветры							
	СЗ	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З

Район Махачкалы (наблюдения 1940—1941 и 1948—1962 гг.)

СЗ	25	—	×	9	5	10	8	17	
С	6	—	×	2	2	—	3	2	
СВ	5	—	×	6	2	2	5	3	
В	7	—	—**	12	9	7	8	6	
ЮВ	14	—	×	37	35	24	18	24	
Ю	11	—	—	20	27	26	25	11	
ЮЗ	16	—	—	6	9	17	19	21	
З	10	—	—	8	11	14	13	16	
Всего...	100	—	—	100	100	100	100	100	
Число наблюдений	358	—	11	223	333	105	239	339	1608

ГМС Нефтяные Камни (наблюдения 1954—1963 гг.)

СЗ	1	1	2	7	3	3	3	1	
С	3	5	6	8	9	10	4	2	
СВ	8	10	16	17	23	24	18	12	
В	13	10	7	6	10	19	22	17	
ЮВ	19	13	5	9	6	10	15	17	
Ю	44	42	35	26	23	21	28	35	
ЮЗ	10	16	21	22	19	10	9	13	
З	2	3	8	5	7	3	1	2	
Всего...	100	100	100	100	100	100	100	100	
Число наблюдений	331	480	207	190	295	345	208	168	2224

* — наблюдений недостаточно для расчета повторяемости течений,
** — наблюдений не было.

до 10 м/сек. При больших скоростях ветра устойчивость результирующих течений выше.

У восточного побережья Среднего Каспия, в районах мысов Суэ, Песчаный, Ракушечный наблюдениями БПВ на горизонте 5 м отмечены колебания в направлении течений с периодичностью 10—30 ч, в среднем около 16 ч, не зависящие от ветра. У м. Суэ в штиль скорости течений были 20—25 см/сек, а при ветрах, совпадающих с направлением течения, скорости достигали 40—50 см/сек. Сопоставление этих течений с колебаниями уровня позволило сделать вывод, что подобные течения — результат сейсмических колебаний уровня.

В южной части Каспийского моря, в частности у западного побережья, течения, в общем, совпадают по направлению с ветром. И в Среднем и в Южном Каспии в основном преобладают слабые течения — до 20 см/сек. Наиболее слабые течения — у восточного побережья южной части моря, а наиболее сильные — у западного побережья средней части.

Таблица 32
Повторяемость скоростей течений в различных районах Каспийского моря, % (по Клевцовой, 1966)

Скорость, см/сек	Средняя часть		Южная часть	
	побережье			
	западное	восточное	западное	восточное
0—10	32	50	49	62
11—20	46	36	34	30
21—30	12	10	11	5
31—40	6	1	4	1
41—50	2	2	2	2
51—75	2	1		
Всего . . .	100	100	100	100
Число наблюдений	1185	875	1185	1105

Лучше всего течения изучены в районе западного побережья Среднего Каспия. Стационарные наблюдения над течениями, проведенные здесь в 1935—1937 гг., были обобщены В. Б. Штокманом (1938), построившим схемы линий тока. Основные особенности течений этого района, выявленные Штокманом, подтвердились потом другими исследователями. По данным Штокмана, основной поток южного течения в районе Дербента движется вдоль 50-метровой изобаты со средней скоростью 30—40 см/сек.

Течения Среднего Каспия, в том числе района западного побережья, исследовались Г. М. Мамедовым по материалам инструментальных наблюдений, выполненных в 1936—1964 гг. Анализ этих материалов подтверждает существование местного антициклонического круговорота в районе залива Аграханского, выявленного Штокманом. Между Махачкалой и Дербентом наблюдается зона расхождимости течений, связанная с дивергенцией ветровых потоков. Севернее зоны дивергенции течение направлено на северо-запад, а южнее — на юго-восток. Расхождимость течений наблюдается на поверхности и на горизонте 10 м, а на горизонте 25 м она отсутствует. Положение зоны расхождимости может смещаться на север или на юг.

В районе к югу от Избербаша до Апшеронского полуострова преобладают юго-восточные течения, устойчивость которых превышает 60%, а при сильных северо-западных ветрах доходит до

80—90%. Устойчивость северо-западных течений, вызванных юго-восточными ветрами, — около 30%, т. е. в 2 раза меньше, чем юго-восточных. К северу от Апшеронского полуострова течение под влиянием рельефа берегов отклоняется на восток, а в открытой части моря поворачивает на север, образуя циклонический круговорот.

При продолжительных северо-западных ветрах скорости юго-восточных течений у западного побережья Среднего Каспия весьма значительны, чему способствует направление и выпуклость береговой черты и приглубость берегов. Как отмечалось, средние скорости этих течений в слое 0—25 м, по различным данным, равны 15—40 см/сек, а максимальные могут достигать до 60—70 и даже до 100 см/сек. Скорость северо-западных течений, вызываемых юго-восточными ветрами, в этом слое меньше и равна в среднем 12—15 см/сек, но может достигать до 50—75 см/сек.

У восточного берега средней части моря режим течений более сложный, чем у западного, что прежде всего связано с неустойчивостью атмосферных процессов. Кроме того, на течения в этом районе оказывает влияние изрезанность береговой черты, наличие многочисленных мысов и заливов. Течения здесь, особенно в верхних слоях, менее устойчивы, чем у западного берега, а скорости меньше.

Материалы инструментальных наблюдений показывают, что в районе между мысами Ракушечный и Куудли результирующие течения преимущественно направлены на юго-восток, устойчивость их 40—50%; устойчивость северо-западных течений несколько ниже. В районе м. Песчаный наблюдается зона расходимости течений, обусловленная дивергенцией ветровых потоков и рельефом берегов и дна. Эта расходимость наблюдается в слое до 90—100 м. Часть потока вод движется на северо-запад, а другая — на запад и юго-запад.

Преобладание западных течений в районе м. Песчаный и Бекдаша, связанное с ветрами северной четверти, создает благоприятные условия для подъема к поверхности холодных глубинных вод. При сильных ветрах северного и юго-восточного направлений зоны расходимости течений в Среднем Каспии отсутствуют и течения на поверхности направлены почти по ветру.

Между м. Песчаный и Мангышлаком повышается вероятность северо-западных течений по сравнению с западными и юго-западными в связи с преобладанием здесь юго-восточных ветров. Скорости течений у восточного берега Среднего Каспия весьма малы — порядка 10—15 см/сек, но при сильных ветрах могут возрастать до 30—50 см/сек.

В районе между Северным и Средним Каспием течения зависят главным образом от направления и скорости ветра, так как этот район весьма мелководный, максимальные глубины не превышают 25 м. В восточной и западной частях разреза о. Чечень — Мангышлак, от поверхности до дна преобладает течение воды из Среднего

Каспия в Северный. Через центральную часть разреза воды поступает из Северного Каспия в Средний. Кроме того, поступление воды в среднюю часть моря может происходить узкой полосой у западного и восточного берегов.

Поскольку распределение течений в верхних слоях средней части моря главным образом зависит от ветров, циклоническая циркуляция в этих слоях может легко нарушаться. В слоях воды глубже 25 м циклонический круговорот более устойчив, как показывают данные инструментальных наблюдений и расчет течений динамическим методом.

Выше отмечалось, что режим течений в Апшеронском районе весьма сложен. Это связано с наблюдающимися здесь сильными ветрами северных и южных румбов, а также с характером рельефа берегов и дна. По материалам работ Каспийской экспедиции Государственного океанографического института в этом районе течения были исследованы в условиях развития северного ветра, относительно «ника порда» (Ржеллинский, 1955). За время от нуля до 30 ч после «ника порда» во всех случаях наблюдались течения с южной составляющей, скорость которых постепенно уменьшалась и через 30 ч ее значения становились минимальными. Однако в отдельных случаях и по прошествии 30 ч сохранялись значительные скорости течений. Затем южные течения резко переходили на северные, меняясь по часовой стрелке. Примерно через двое суток после пика скорости северных течений достигали максимума, после чего скорости снова уменьшались. При скорости ветра 17 м/сек южное течение имело наибольшую скорость — 50 см/сек, а при скорости ветра 28 м/сек — скорость 85—90 см/сек. Таким образом, ослабление или смена северных ветров всегда сопровождается развитием северных течений. При этом быстрее всего компенсационные течения развиваются на поверхности. Ветровые течения охватывают слой воды в 30—40 м, а глубже преобладают южные течения. Скорости течений, которые наблюдались в районе Нефтяных Камней при штормовых северо-западных и северных ветрах и достигавшие скорости 90, а по другим данным — 100—120 см/сек, максимальны для всего моря. Столь высокие скорости течений могут развиваться также и в районе Дербента.

Повторяемость течений с южной составляющей равна в Апшеронском районе 41, а в северной — 50%. На долю западных и восточных течений приходится всего 9%; эти течения очень неустойчивы, а скорости их малы. Течения Апшеронского порога изучал Х. К. Уланов (1963). Обобщив материалы наблюдений над течениями на разрезе о. Жилой — м. Куули с 1936 по 1960 г., он нашел средние значения проекций течений на меридиан на каждой станции разреза (рис. 30). Как видно из рисунка, над Апшеронским порогом отчетливо оконтуриваются две области с переносом вод на север и одна область с потоком на юг. Перенос на север происходит у восточного и западного побережий, а южный перенос — в центральной глубоководной части разреза.

В работе Уланова приведены и другие данные, подтверждающие поступление среднекаспийских вод в Южный Каспий через глубинные слои Апшеронского порога и движение южнокаспийских вод в Средний Каспий в верхних слоях. На картах распределения температуры в средней и южной частях Каспийского моря, на горизонте 10 м в различные сезоны 1958 и 1959 гг. в Среднем Каспии ясно видны «языки» теплых вод, поступающих из Южного Каспия. Особенно четко поступление южнокаспийских вод прослеживается по температурным данным в холодное время года. В то же время на карте распределения температуры воды на горизонте



Рис. 30. Средние проекции скоростей течений на плоскость меридиана на разрезе о. Жилой — м. Кура (по Уланову, 1963):
— течение на север,
+ течение на юг

100 м в феврале 1959 г., отчетливо виден «язык» холодной воды, прилегающей в южную часть моря из средней (Уланов, 1963).

Клевцова (1965) также рассмотрела многолетние инструментальные наблюдения над течениями в районе Апшеронского порога и получила результирующую схему направлений течений, сходную со схемой Уланова. Вместе с тем она отмечает, что результирующие схемы течений над Апшеронским порогом могут подвергаться значительным изменениям в зависимости от синоптических и метеорологических условий. Режим течений порога весьма сложен и формируется в результате взаимодействия ветровых, плотностных и компенсационных течений.

Южнее Баку, в районе Бакинского архипелага и в районе Ленкорани также в основном преобладают южные течения, довольно устойчивые, со скоростью в среднем 10—20 см/сек. При сильных южных ветрах течение поворачивает на север и северо-восток. У восточного побережья Южного Каспия течения весьма слабые и неустойчивые.

При характеристике скоростей течений Каспийского моря необходимо помнить об их пульсациях, которые, как показали наблюдения, бывают весьма значительными. Е. М. Конягородский (1958)

исследовал структуру течений в Апшеронском районе на основании данных самописцев, полученных на различных горизонтах до глубины 50 м. Он установил, что скорости течений весьма неустойчивы и за 5 мин могут измениться вдвое и втрое.

Из уравнения $K = \frac{v}{v_{ср}}$ был получен коэффициент пульсации.

Здесь v — скорость течения, средняя за 2 мин; $v_{ср}$ — средняя часовая скорость. Для района о. Жилой — Нефтяные Камни, на горизонте 5 м вероятность кратковременных отклонений скорости течений $\pm 20\%$ от среднечасового значения оказалась равной 74%. Наибольший коэффициент пульсации был 2,0. Почти такие же результаты оказались и для горизонта 10 м. Наибольший коэффициент пульсации здесь был 2,86.

В открытом море, к северо-востоку от Нефтяных Камней, на глубинах 40–50 м, на горизонте 10 м вероятность того, что измеренные скорости течений не будут отличаться более чем на 20% от среднего значения скорости, составила 77%. Наибольший коэффициент пульсации оказался 3,20.

Очевидна зависимость устойчивости потока от средней скорости течения. С увеличением средней скорости лоток становится более устойчивым и коэффициенты пульсации уменьшаются. Однако и при значительных скоростях течений измеренные самописцем величины могут заметно отклоняться от среднего значения. Так, при средних часовых скоростях течений около 35–50 см/сек коэффициенты пульсации менее 0,90 и более 1,10 составили 39%, а при средних скоростях 50–70 см/сек они составили 8%. Копайгородский отмечает, что уменьшение коэффициентов пульсации при скоростях более 50 см/сек происходит не только вследствие увеличения средних скоростей, но и вследствие небольшого числа таких наблюдений. Уменьшение коэффициентов пульсации наблюдается также с переходом в районы моря со значительными глубинами. В среднем, по данным всех наблюдений, вероятность того, что коэффициент пульсации не выйдет за пределы значений 0,80–1,20, оказалась равной 70%.

Для выяснения характера геострофических течений в Каспийском море и их влияния на результирующую циркуляцию вод производились расчеты течений динамическим методом.

В Каспийском море существуют как благоприятные, так и неблагоприятные условия для применения динамического метода. Основные затруднения для применения этого метода связаны со значительной мелководностью многих районов моря, с неравномерностью распределения глубин, а также с малыми скоростями и большой изменчивостью течений.

Благоприятные обстоятельства — это, прежде всего, отсутствие приливных явлений, сильно осложняющих исследование течений, а также наблюдаемая в море значительная плотностная стратификация вод (в теплое время года). Кроме того, стандартные гидрологические разрезы в Каспийском море расположены поперек основ-

ных направлений устоявшихся течений, что также относится к благоприятным условиям для применения динамического метода.

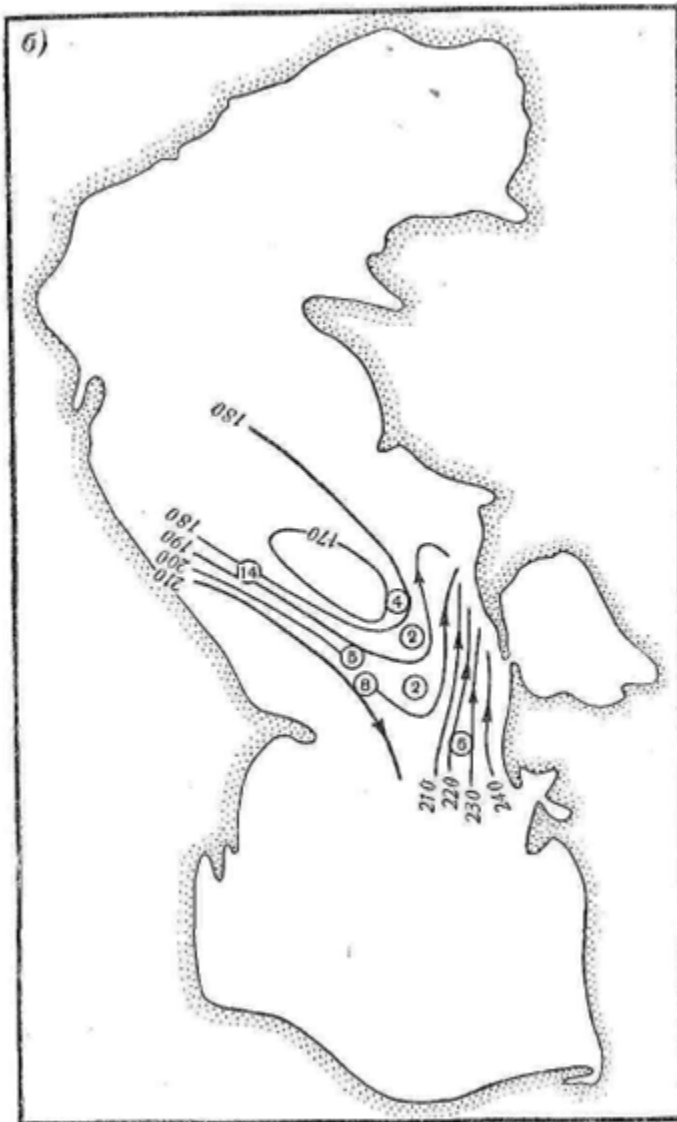
Первые динамические карты Каспийского моря были построены Г. Н. Зайцевым (1935) для Южного Каспия. Затем, в 1940 г. В. А. Зенным были построены динамические карты для средней и южной частей моря, которые, к сожалению, не были опубликованы. Динамические карты Зайцева и Зенна в основном правильно отражают черты результирующей циркуляции под моря.

Серия динамических карт для Среднего и Южного Каспия была построена А. Н. Касаревым и Г. М. Мамедовым (1967) по данным синхронной съемки, выполненной в октябре 1958 г. Кроме того, карты строились по материалам августовской съемки 1956 г., апрельской и августовской съемок 1959 г. К сожалению, количество станций в Южном Каспии во время съемок 1956 и 1959 гг. было недостаточно для построения динамических карт. За нулевую поверхность для всей акватории была выбрана поверхность 400 дбар. Ввиду сложности рельефа и мелководности многих районов моря, при обработке было сделано приведение станций на разрезах по методу Гелланд-Гаусена — Сомова. В результате обработки были построены карты для поверхностей 10, 25, 50, 75 и 100 дбар.

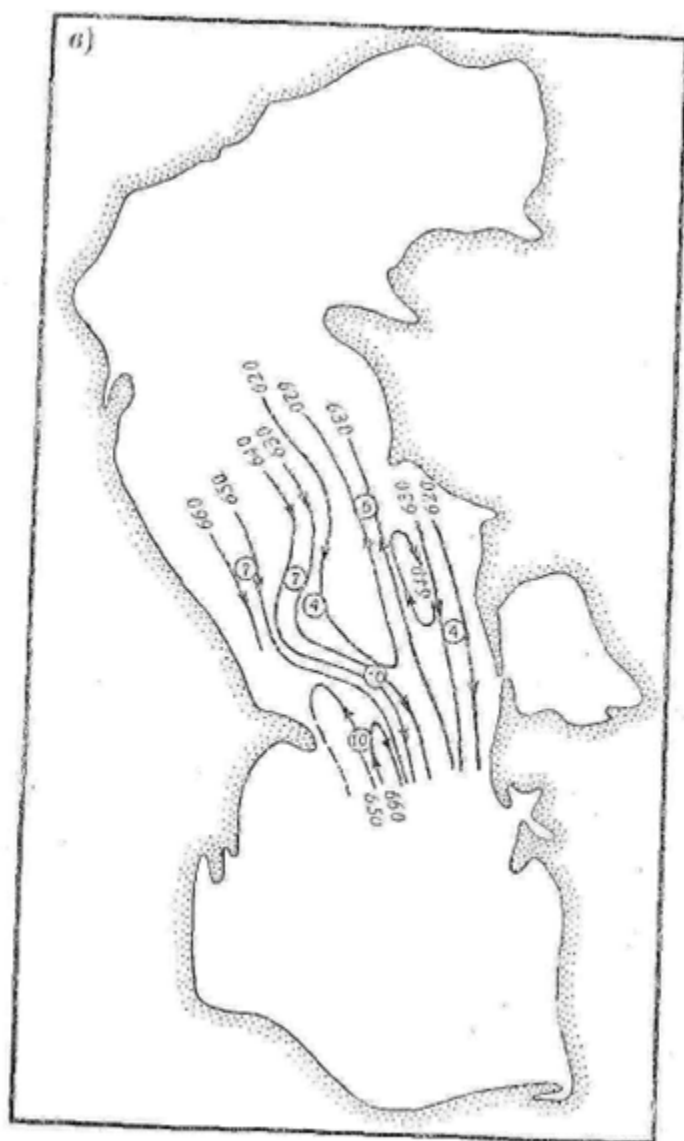
На динамических картах, построенных по результатам октябрьской съемки 1958 г., черты геострофической циркуляции на поверхностях 10, 25 и 50 дбар весьма схожи, что указывает на устойчивость движения вод в этом слое. В средней части моря выделяется четкая циклоническая циркуляция. В центральном районе Среднего Каспия на всех картах движение водных масс очень слабое. Из Среднего Каспия воды поступают в центральный район южной части, где наблюдается довольно сложная система циркуляции. В западном районе Южного Каспия, между Апшеронским полуостровом и устьем Куры выделяется местный антициклонический круговорот (рис. 31, а). Находит отражение и перенос вод на север вдоль широкого шельфа восточного побережья Южного Каспия, что ясно видно на картах для поверхностей 10 и 25 дбар. Таким образом, динамика вод южной части довольно сложна.

Главные особенности циркуляции вод в глубоководных районах моря — циклоническая циркуляция в Среднем Каспии, перенос вод с севера на юг в западной части Апшеронского порога и с юга на север в восточной его части — прослеживаются на картах для поверхностей 75 и 100 дбар, хотя интенсивность циркуляции значительно слабее, чем в слое 0—50 дбар. Глубже 170 дбар в средней и южной частях моря, по данным динамической обработки глубинных станций, движения вод очень слабые.

На картах, построенных по материалам съемки для августа 1959 г., в Среднем Каспии наблюдается перенос вод к восточному берегу (рис. 31, б), а для августа 1956 г. — движение вод на юг в районе Кара-Богаз-Гала (рис. 31, в). Наличие южных течений у восточного берега Среднего Каспия подтверждается данными инструментальных наблюдений. Сезонные и межгодовые изменения



б — август 1959 г., поверхность 50 дбар;



a — август 1956 г., поверхность 10 дбар

геострофической циркуляции, отраженные на динамических картах, подтверждают, что в Каспийском море существуют значительные стергические колебания уровня.

Вычисленные на всех горизонтах относительные скорости течений оказались весьма незначительными и не превышали 25 см/сек, а в большинстве районов были равны 10—15 см/сек. На поверхности 75 дбар происходит уменьшение скоростей течений и они становятся совсем малыми — порядка 5 см/сек. На всех картах наибольшие скорости течений отмечались у западного берега Среднего Каспия и в районе Аншеронского порога. Самые слабые течения, по данным динамической обработки, наблюдаются в центральных районах моря.

Таким образом, динамические карты подтверждают существование циклонической циркуляции вод в Среднем Каспии и возможность ее изменений. Они показывают, что циркуляция вод в центральных районах южной части моря сложнее, чем в средней. Отсутствие достаточного количества данных не позволяет с уверенностью говорить о существовании циклонической циркуляции в Южном Каспии, хотя предполагать ее наличие можно. Относительные скорости течений согласуются со скоростями результирующих течений Каспийского моря, полученных на основании других данных. Геострофические течения играют существенную роль в общей результирующей циркуляции вод моря, особенно в глубинных слоях.

ВОЛНЕНИЕ

Каспийское море весьма неспокойно. При частых и сильных ветрах волнение очень быстро достигает штормовой силы. Значение исследования волнения и ветров Каспийского моря особенно возросло в связи с развитием морской нефтедобычи. Знание достоверных параметров ветра и волн крайне необходимо для проектирования, строительства и эксплуатации морских нефтепромысловых сооружений, а также для обеспечения безопасности людей, работающих на море.

С этой целью Государственным океанографическим институтом и Гидрометслужбой Азербайджанской ССР с 1950 г. на Каспии проводятся систематические исследования волнения в районах морских нефтепромыслов. Особенно ценные результаты получены на специализированной гидрометеостанции Нефтяные Камни, находящейся в открытом море, в 30 км к востоку от Аншеронского полуострова. Со времени организации этой станции в 1952 г. там ведутся регулярные наблюдения за ветром и волнением с помощью разнотипной измерительной аппаратуры. Здесь проводятся также экспериментальные работы по изучению давления волн на свайные сооружения.

Исследования волнения, выполненные в районе Нефтяных Камней, позволили установить следующие основные его особенно-

сти. Режим ветров в районе Нефтяных Камней характеризуется преобладанием в течение года ветров северного и северо-западного направлений, повторяемость которых в теплую половину года 56%, а в холодную — до 38%. Довольно часто наблюдаются южные ветры, повторяемость восточных и западных ветров весьма мала. Слабые ветры имеют повторяемость за год 48%, умеренные — 41%, на долю сильных и штормовых ветров (15 м/сек и выше) приходится 11% (Кяримов, 1963).

Наибольшие средние и максимальные скорости имеют ветры северных направлений. Максимальная скорость ветра на Нефтяных Камнях — 40 м/сек — была отмечена при север-северо-западном ветре в марте 1952 и 1953 г. Максимальные скорости при других направлениях ветра не превышают 30 м/сек. За год наблюдается в среднем 50 дней со штормами. Больше всего штормов приходится на зимнее время; в теплую половину года штормовая деятельность гораздо слабее, но и летом штормы могут достигать большой силы. Резко преобладают штормы северо-западной четверти, отличающиеся не только большой повторяемостью, но и наибольшими разгонами волн.

Район Нефтяных Камней — своеобразный «полюс ветров» на Каспийском море, в нем отмечены наибольшие для всех пунктов на этом море скорости ветра. Почти для всех направлений ветра разгоны волн велики, а разгоны от севера близки к предельным для всего моря в целом. Важно и то, что банка Нефтяные Камни окружена большими глубинами, превышающими 50—100 м, лишь с запада к ней прилегает мелководье.

В районе Нефтяных Камней чаще всего наблюдается ветровое волнение северных направлений, но в холодную половину года возрастает повторяемость южного волнения. Чаще всего наблюдаются волны высотой до 2 м. За год отмечается 170 дней с волнами более 1 м высоты, из них около 100 — зимой. Волны высотой до 1 м могут непрерывно наблюдаться в течение 375 ч, а волны высотой более 4 м иногда поддерживаются около суток. Волны, развившиеся в открытом море над большими глубинами и подошедшие к банке Нефтяные Камни, в значительной степени деформируются на мелководье. Высота волн 1%-ной обеспеченности уменьшается почти на 25% при распространении из районов моря с глубинами 40 м в районы с глубинами 10 м. Таким образом, при выходе на мелководье разнообразие волн уменьшается (Глуховский, 1964).

Почти во всех случаях штормов развитие и затухание волн в районе Нефтяных Камней происходит в условиях неравномерного во времени ветра. Наиболее характерная черта волнения в этом районе — преобладание смешанного волнения (от 52 до 67% времени) и ничтожная повторяемость зыби. Постоянная смена сил и направления ветра приводят к тому, что в рассматриваемом районе волнение редко достигает полного развития. Отметим λοιпно, что в открытых районах моря, особенно средней и южной частях, нередко наблюдается крупная зыбь. В Среднем и Юж-

ном Каспии наиболее часто наблюдается зыбь с севера и северо-запада, а в Северном Каспии — с востока.

Указанные условия развития волнения обуславливают то, что в районе Нефтяных Камней наблюдаются самые большие волны на всем Каспийском море. Приведем некоторые характеристики штормов, прошедших в этом районе за 1950—1959 гг. Самый сильный шторм за время работ экспедиции Государственного океанографического института в районе Нефтяных Камней прошел 1—2 марта 1952 г. Визуально измеренные высоты волн доходили до 11 м, а наибольший средний период — 10 сек. Максимальная скорость ветра во время этого шторма доходила до 34—40 м/сек.

Редкий по продолжительности и интенсивности шторм юго-восточного направления наблюдался 10—14 ноября 1952 г. По Каспийскому, такие штормы наблюдаются один раз в 40 лет. Скорость ветра доходила до 30 м/сек. Исключительная интенсивность и продолжительность шторма привела к развитию сильного волнения по всем районам моря. Наибольшая высота волн наблюдалась вдоль западного побережья моря от Махачкалы до банки Дарвина, в районе банки Дарвина высота волн была 7 м. Развитие сильного волнения привело к затоплению прибрежной зоны и островов в северо-западной части моря (острова Жесткий, Чистая банка и др.). В мелководной северной части моря высота волн достигала 3 м. Параметры волн во время некоторых штормов приводятся в табл. 33.

Таблица 33

Элементы волн по наблюдениям на Нефтяных Камнях во время штормов в 1952 и 1955 гг. (по Сиротову, 1957)

Дата	Максимальная высота, м	Максимальная длина, м	Максимальный период, сек	Максимальная скорость распространения, м/сек
12—14/II 1952	9,4	94	9,0	17,0
2/III 1952	11	150	11,4	17,2
23/II 1955	8,6	(143)	9,5	15,2

Одним из самых сильных за последние 30—40 лет на Каспийском море был шторм 20—21 ноября 1957 г. Скорость ветра достигала 40 м/сек. Максимальная высота волн, наблюдаемая по пехе на глубине 12 м, достигала 9—10 м, а на участке с глубинами 20—30 м высота, по визуальным данным, превосходила 10 м, длина волн была около 200 м, период — 12,4 сек, скорость — 22,4 м/сек. Исключительно сильным в этот шторм было волнение в районе о. Артема. Ровно через год, 20—21 ноября 1958 г., над Апшероном снова пронесся сильный шторм, который, однако, был слабее шторма 1957 г. Высота волн доходила до 8,2 м при максимальной скорости ветра 24 м/сек. Весьма сильный шторм был зарегистрирован

и 26 ноября 1959 г., когда скорость ветра достигала 28 м/сек, а высота волны — 8,5 м.

Таким образом, в результате наблюдений в районе Нефтяных Камней были подробно исследованы условия развития и затухания волнения, повторяемость волнения различной силы и направления, функции обеспеченности высот и периодов волны и характеристики давления волны на свайные сооружения. Это позволило проверить точность различных теоретических методов расчета параметров волны и определить, какой из методов лучше согласуется с данными наблюдений для условий Каспийского моря.

Натурные наблюдения за воздействием волны на свайные сооружения позволили установить эмпирические зависимости силы давления от высоты волны, определить величины нагрузок, сопоставить их с рассчитанными и т. д. Основные результаты этих исследований содержатся в монографиях В. Х. Глуховского (1964) и А. М. Ибрагимова (1966). Так, в значительной степени благодаря требованиям практики были получены интересные результаты по исследованию морского волнения. В то же время изученность волнения в открытых районах моря и обширных мелководий все еще остается явно недостаточной. Нет работ, обобщающих инструментальные наблюдения над волнением в этих районах, что тормозит развитие теоретических исследований. Данные о волнении в различных прибрежных районах эпизодичны, многие районы изучены весьма слабо.

Рассмотрим более подробно некоторые результаты исследований волнения для всего Каспийского моря. Как показала проверка по данным натурных наблюдений, наиболее удовлетворительным для условий Каспийского моря оказался метод Ю. М. Крылова (1958). По Крылову, максимальная высота волны в районе с глубинами около 10—15 м составляет 10,5 м, а для районов открытого моря с глубинами около 100 м она может достигать 13 м. Эти высоты волны весьма близки к наблюдаемым в действительности (Ибрагимов, 1966).

В 1960 г. Л. Н. Иконникова опубликовала результаты расчета характеристик волны Каспийского моря и ветра над ним, полученные по методу Крылова. Иконникова построила типовые и экстремальные карты распределения элементов волны в Каспийском море для пяти основных типов полей ветра: северо-западного, северного, восточного, южного и западного. По этим картам нетрудно определить повторяемость параметров волны при различных скоростях и направлениях ветра для всего моря и отдельных районов, а также — максимально возможные элементы волны. По Иконниковой, наиболее часто на Каспии волнение северо-западного (51,3%) и северного (29,9%) направлений. На долю южного направления приходится 16,6%, а западный тип полей волны наблюдается чрезвычайно редко.

Типизацию полей волны по полям ветра недавно провела Л. П. Тамбовцева (1966). За исходные данные для расчета волне-

Справочная таблица 34.

Средняя и средняя в году истраниценая листов бумаги и относительности (%) и количество в процентах

Средняя в году истраниценая	Зима		Весна		Лето		Осень		В году	
	%	грамм	%	грамм	%	грамм	%	грамм	%	грамм
0-5	13,34	12,1	20,06	18,5	24,49	22,5	18,81	17,1	19,22	70,2
5-9	5,3	4,77	4,83	4,44	5,76	4,75	5,32	4,84	5,15	18,8
10-15	2,38	2,14	2,29	2,11	1,88	1,73	1,98	1,81	2,11	7,78
16-20	8,6	7,74	7,5	6,9	4,72	4,3	7,5	6,8	7,07	25,8
21-25	0,95	0,86	1,01	0,93	0,28	0,26	0,55	0,5	0,7	2,54
25-29	0,51	0,28	0,23	0,21	0,11	0,1	0,14	0,13	0,2	0,72

ния она взята классификацию полей ветра, произведенную С. Д. Коллинским (1964), несколько отличающуюся от классификации, принятой Ионинковой.

В соответствии с господствующим переломом воздушных масс над Каспийским морем поля волн подразделены Тамбовцевой на 6 типов (табл. 34). Чаще всего в открытых районах моря развиваются волны северных (32%) и южных направлений (36%), реже — восточных (9%). Годовая повторяемость циклонического типа составляет всего 4%. На маловетрие и безветрие приходится 20%.

При всех типовых ситуациях полей ветра наибольшую повторяемость имеют поля волн, соответствующие скоростям ветра до

Таблица 34
Сезонная повторяемость полей волн, % и средняя продолжительность соответствующего типа (подтипа) ветрового потока, ч (по Тамбовцевой, 1966)

Тип	Подтип, (в зависимости скорости ветра), м/сек	Повторяемость по сезонам, %				Продолжительность по сезонам, ч			
		зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
I (ССЗ, СЗ)	5-9	9,0	11,0	15,1	9,0	14	14	21	16
	10-15	4,9	5,2	6,8	5,0	12	11	15	13
	16-20	1,9	2,7	2,7	2,8	10	13	13	13
	21-25	0,4	0,5	0,2	0,1	8	10	10	7
	25	0,33	0,03	0,05	0,04	6	6	8	6
II (С, ССВ)	5-9	6,4	6,2	10,8	7,6	14	16	23	17
	10-15	2,4	2,9	4,8	2,9	12	15	18	14
	16-20	1,4	0,7	1,2	0,6	13	12	16	11
	21-25	0,2	0,1	0,04	0,04	8	6	7	9
	25	0,2	0,0	0,02	0,0	6	0	6	0
III (СВ, СВ)	5-8	10,1	6,1	6,1	8,4	21	20	20	21
	10-15	1,5	2,1	0,8	1,0	15	17	16	14
	16-20	0,2	0,2	0,05	0,1	11	14	12	8
IV (ЮВ)	5-9	8,8	13,2	13,3	12,4	13	15	17	17
	10-15	5,9	7,8	6,2	6,5	13	12	16	14
	16-20	3,5	3,2	0,7	3,3	17	12	12	12
	21-25	0,3	0,4	0,04	0,3	9	10	9	11
	25	0,08	0,2	0,04	0,1	7	7	6	10
V (ЮВ сокращенный)	5-9	14,5	9,1	5,4	13,2	20	17	17	21
	10-15	6,9	3,6	1,1	3,7	16	14	14	15
	16-20	1,2	0,5	0,07	0,6	14	12	8	12
	21-25	0,05	0,01	0,0	0,01	10	6	6	6
VI (вихревой циклонический)	5-9	4,2	2,7	0,9	2,6	12	12	12	11
	10-15	2,2	1,3	0,1	0,7	10	11	9	10
	16-20	0,4	0,2	0,0	0,1	9	8	0	6
Ветры менее 5 м/сек		18,34	20,06	24,49	18,81				

10 м/сек, а наименьшую повторяемость — воли воли, соответствующие скорости ветра, превышающие 25 м/сек. При скоростях ветра до 15 м/сек летом преобладают волны северных направлений, а зимой — южных и восточных. Высоты воли 5%-пой обеспеченности в этих случаях не превышают 3 м.

Штормовое волнение чаще наблюдается зимой и весной при ветрах северных направлений, скоростью 21—25 м/сек. На Каспийском море развиваются волны довольно крупных размеров. Максимальные высоты воли 6 м наблюдаются ежегодно, а 10 м и более примерно 2 раза в 10 лет, при ветрах северных и южных направлений.

Л. П. Тамбовцева составила также карту максимально возможных высот воли 5%-пой обеспеченности на основании экстремальных карт полей воли различных типов (рис. 32). Отличие этой карты от карты обобщенного экстремального поля воли, по Иконниковой, состоит в том, что предлагаемое Тамбовцевой поле наибольших высот воли содержит уточненные поля воли северных направлений, построенные с учетом влияния орографии на скорость ветра. Это влияние, по данным Кошинского (1964), увеличивает скорость ветра при северо-западных штормах и довольно заметно.

Учет орографического эффекта выражается в сдвиге максимума штормовой деятельности к западному берегу Среднего Каспия, в результате этого область максимального волнения также получается сдвинутой к западу. По карте Тамбовцевой наиболее неспокойный район — западная часть Среднего Каспия. Особенности распределения ветровых потоков приводят к тому, что область экстремальных высот воли (более 10 м) лежит к северо-западу от Нефтяных Камней. Область высот до 9 м простирается намного южнее Апшерона (примерно до широты 39°30'). Вдоль восточного берега волнение слабее, чем вдоль западного, почти вдвое. На широте 41—42°, в прибрежной зоне высоты воли составляют 8—10 м, а у восточного — 4—5 м. Почти во всех районах моря наибольшие высоты воли наблюдаются при ветрах северных направлений. Только в северо-западной части Среднего Каспия максимальные высоты воли (до 6 м) развиваются при южных и юго-восточных ветрах.

Карты обобщенных полей экстремальных средних периодов и длин волн показывают, что максимальные значения этих элементов воли располагаются в области широт 42—39°. Максимальные периоды воли достигают примерно 10 сек, уменьшаясь к северу и югу до 7—8 сек. Наибольшие длины волн превышают 100 м, уменьшаясь в южной части моря до 70—80 м, а в северном районе средней части — до 40—50 м.

Развитие морской нефтедобычи поставило перед Гидрометслужбой и проектными организациями задачу — определить основные параметры ветровых волн в различных районах моря, где производится или намечается строительство нефтепромысловых

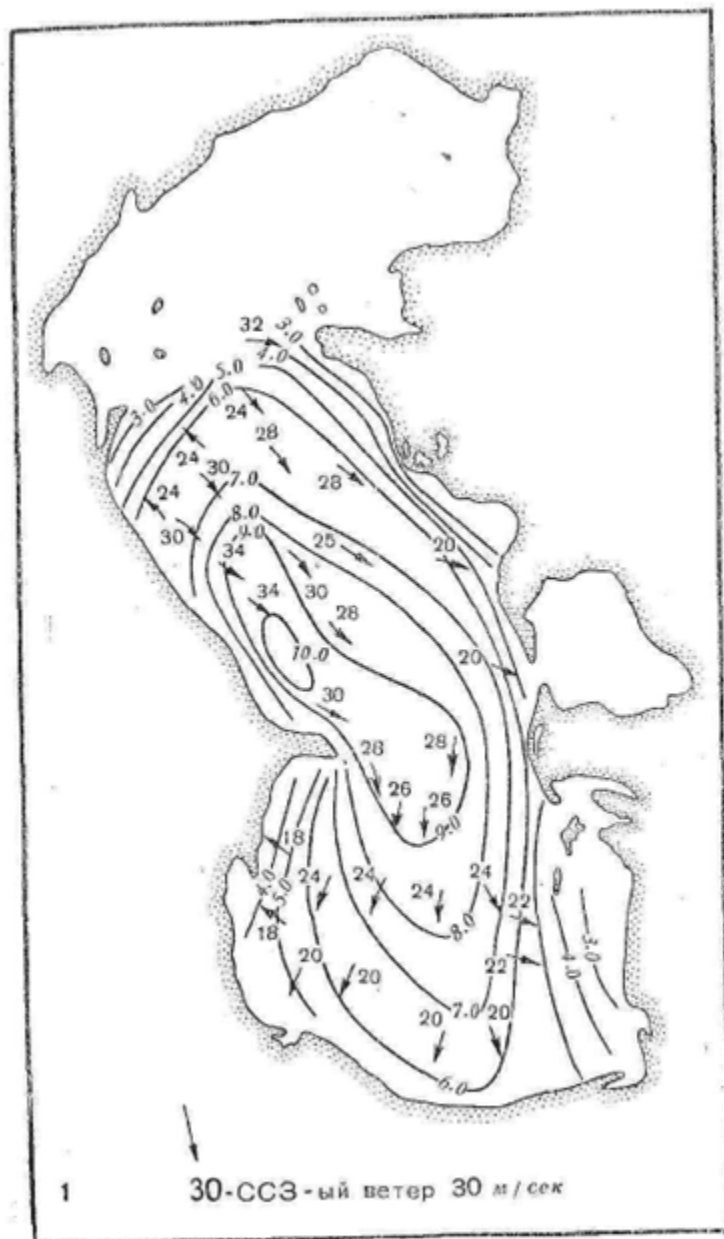


Рис. 32. Обобщенное поле наибольших высот волн 5%-ной обеспеченности (по Тамбовцевой, 1966)

сооружений. Возможные экстремальные высоты волн, рассчитанные для некоторых нефтепромысловых районов, показаны в табл. 35. Расчет параметров волн был произведен всего для 32 районов.

В настоящее время в Московском инженерно-строительном институте им. Куйбышева начаты исследования волнового режима нефтепромысловых акваторий Каспийского моря по новому, спектральному методу (Крылов, 1966). По этому методу сложная взволнованная поверхность моря рассматривается как сложение простых регулярных волн с различными направлениями распространения, высотами, длинами и случайными фазами.

Таблица 35
Возможные наибольшие высоты волн для освоенных и перспективных районов Каспийского моря (по Тамбовцевой, 1955)

Районы	Откуда распространяются волны	Наибольшие высоты волн для различных глубин, м			Кем произведен расчет
		10	20	50	
Банка Аншеронская	СЗ, ВЮВ	8,0	11,8	14,2	УГМС
Нефтяные Камни	ССЗ	8,0	11,8	14,2	ГОИН, УГМС
Карагай-море	ЮВ, ВЮВ	5,7	5,6	7,4	УГМС
Булла-море	ВЮВ	5,1	6,0	6,6	УГМС
Куринский казен.	В	5,9	7,1	7,5	ГОИН
Ленкорань-море	В	—	7,1	7,5	ГОИН
Челекен-море	СЗ	6,4	7,5	8,6	УГМС
о. Огурчакский	СЗ	6,7	7,9	—	ГОИН
Дербент	ЮВ	—	8,9—9,2	10,2—11,6	ГОИН
Изберь	ЮВ	—	8,9—9,9	—	ГОИН

Спектральный метод был применен С. С. Стрекаловым для расчета характеристик волн в юго-западном районе Каспийского моря. Для основной части этого района поле высот волн формируется в результате наложения двух систем волнения: волн, приходящих из открытого моря и испытывающих влияние рефракции, и местного поля волн. Высоты внешнего поля волн рассчитывались Стрекаловым новым спектральным методом, высоты местного поля волн — по нормативному документу СН-92-60. Расчеты были проведены для условий экстремального шторма северного направления, прошедшего 20—21 ноября 1957 г.

Результаты расчета показали, что на северо-востоке района волны практически не испытывают влияния берега и рельефа дна; именно в этом районе формируется поле максимальных высот волн Каспийского моря. Район южнее Аншеронского полуострова укрыт от прямого воздействия волн и они приходят сюда вследствие рефракции.

Для оценки совместного эффекта внешнего и местного полей волн были проведены расчеты суммарных высот волн однопроцентной обеспеченности по новой и старой методике для нескольких нефтепромысловых районов. Результаты расчетов показывают, что новый спектральный метод исследования нефтепромысловых районов южнее Апшеронского полуострова (Песчаный-море, Булла-море и др.) при экстремальном шторме северного направления даст увеличение высот волн на 20—30% по сравнению со старой методикой. Для района Нефтяных Камней расхождения несущественны и лежат в пределах точности расчетов.

Применение спектрального метода открывает возможность получения достаточно точных и обоснованных сведений о волнении в Каспийском море.

СГОННО-НАГОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Сгонно-нагонные явления, т. е. неперiodические колебания уровня и связанные с ними циркуляции вод — результат действия ветра, надо рассматривать как самостоятельную большую группу динамических процессов (Дуванин, 1956). Характер и величина сгонов и нагонов зависят от направления, скорости и продолжительности ветра, а также от конфигурации берегов и рельефа дна. Сгонно-нагонные явления оказывают особое влияние на гидрологические условия прибрежных районов моря.

В прибрежной зоне Каспийского моря наблюдаются интенсивные сгонно-нагонные колебания уровня и возникают течения. Сгоны и нагоны вызываются здесь не столько местным ветром, сколько действующим над всей акваторией моря или в большом районе (региональным). Наиболее значительные нагоны и сгоны в северо-западном районе моря, где при сильных и продолжительных восточных и юго-восточных ветрах уровень может повышаться до 230 см, а понижаться до 100 см от среднего. В этом районе моря возможны катастрофические нагоны, затопляющие обширные участки суши. Так, 10—13 ноября 1952 г. произошел исключительно сильный подъем уровня. В эти дни сильные восточные и юго-восточные ветры в северной и средней частях моря вызвали повышение уровня в северо-западном районе на 4—5 м, максимальная скорость подъема достигала 20 см/ч. Во время нагона, из-за поступления с юга более соленых вод, значительно возросла соленость. В районах, прилегающих к дельте Волги, соленость увеличилась на 8—9‰. Увеличилась она и в средней части моря. Интенсивное повышение уровня в северо-западном районе моря сопровождалось резким похолоданием. С 9 на 10 ноября среднесуточная температура воды у о. Куялы понизилась на 2°, в бухте Кендерляв — на 3°. В дальнейшем понижение температуры воды продолжалось. С 12 по 15 ноября в дельте Волги температура понизилась на 2,1—4,8°. В районе Астраханского рейда и

о. Тюлений с 12 по 14 ноября понижение температуры достигло 8—9° и образовался лед.

В северо-восточном районе Северного Каспия нагоны меньше — от 20 до 120, а сгоны — от 30 до 130 см. Зимой величина нагонов в Северном Каспии значительно уменьшается благодаря влиянию ледяного покрова.

В средней и южной частях моря величина сгонов и нагонов меньше, чем в северной, а характер их в различных пунктах западного и восточного побережий неодинаков. Сгонно-нагонные явления у западного побережья Среднего Каспия были исследованы В. М. Жирновым (1959). По его данным, в районе Махачкалы повышение уровня происходит главным образом при северо-западных и юго-восточных ветрах. Максимальная величина нагона достигает 1 м, сгона — 65—70 см. В районе Низовой пристани значительных колебаний уровня нет. Повышение уровня здесь происходит при ветрах южной четверти.

В районе Сумганга, расположенного у «основания» п-ова Апшеронского при сильных северных и северо-западных ветрах создается подпор воды. Сгон происходит здесь при южных и юго-восточных ветрах. В большинстве случаев сгоны и нагоны кратковременны — от 6 до 12 ч, но могут продолжаться до 48 ч и более, как это было в сентябре 1953 г., когда под действием сильных северных ветров высота нагона воды достигла 67 см. В среднем, однако, величина сгонов и нагонов не превышает 30 см.

На о. Артема повышение уровня происходит при северо-западных и северных ветрах, а сгон — при южных и юго-восточных. Наибольшая величина нагона — 1 м. По наблюдениям в 1953 г., средняя продолжительность нагона была 10 ч, сгона 11 ч, а максимальная продолжительность нагона 28 ч, а сгона — 17 ч. Как показали Ржеплинский и Арханова, с удалением в сторону открытого моря величина колебаний уровня постепенно уменьшается. Это подтверждается данными о колебаниях уровня на о. Жилой, удаленном от о. Артема на 13—15 км и на Нефтяных Камнях, находя-

Таблица 36

Повторяемость нагонов и сгонов (1949—1953 гг.) и их максимальные величины у западного побережья Среднего Каспия (по Жирнову, 1959)

Пункты	Повторяемость, %		Преобладающие направления ветров, вызывающих изменения уровня		Максимальные величины колебаний уровня, см		
	нагон	сгон	нагон	сгон	нагон	сгон	глубина
Махачкала	44,2	47,6	СЗ, СВ, В	С, СВ	100	65—70	165—170
Низовая пристань	61,9	23,8	Ю, ЮВ	С, СЗ	60	37	97
Сумганг	32,2	54,8	С, СВ	Ю, ЮВ	67	65	132
о. Артема	53,0	41,0	С, СЗ	Ю, ЮВ	90	66	156

щихся в открытом море в 20 км от о. Жилэй. В районе Нефтяных Камней стогно-нагонные колебания уровня равны 16–20 см, а максимальная суточная разность в 1953 г. была 25–30 см (Жарнов, 1959).

К северу и югу от Апшеронского полуострова, при одних и тех же направлениях региональных ветров, характер стогно-нагонных колебаний уровня различен. В северном районе повышение уровня происходит при северном и северо-западном ветрах пропорционально их скорости. В южной части района, при том же северном ветре, сначала наблюдается падение уровня, продолжающееся 4–5, а иногда 8–10 ч. Затем начинается подъем, средняя продолжительность которого 5–7 ч. Случается, что к моменту прекращения ветра уровень не успевает принять свое первоначальное положение и остается на 20–30 см выше. Такое явление объясняется тем, что северные ветры, действующие над всем районом, перемещают большие массы воды в южную часть моря, где и происходит подъем уровня. При южных ветрах из южной части моря наблюдается отток вод и соответственно падение уровня.

Условия, характерные для южной части Апшеронского района, хорошо прослеживаются в Бакинской бухте. По конфигурации берегов нагонными здесь должны быть ветры южных направлений, а стогнами — северных. В действительности при региональных ветрах наблюдается обратная картина: при южных ветрах — падение уровня, а при северных — подъем. При сильных северных ветрах в Бакинской бухте уровень повышается до 100 см, а при сильных южных падает на 20–30 см. При местных же северных ветрах, действующих только в Апшеронском районе, в бухте наблюдаются стогны в отдельных случаях до 130–160 см.

Таким образом, стогно-нагонные колебания уровня на западном побережье Среднего Каспия вообще невелики. Однако сильные и продолжительные ветры, дующие вдоль берега вызывают заметные колебания уровня, особенно в зонах подпора воды. Такую зону на западном побережье представляет собой Апшеронский полуостров с полосой отмелей, островов и банок, вытянутой к востоку. Для всего рассматриваемого района побережья характерны кратковременные колебания уровня. В Апшеронском районе стогны и нагоны бывают в среднем 3–5 раз в месяц (зимой) и продолжительность стогна или нагона — до суток. Повторяемость нагонов превышает стогны, она равна 49%, а повторяемость стогов — 40% (Жарнов, 1959).

Для района устья Куры, по данным А. Н. Цицарева (1967), нагонными являются ветры север-северо-восточного, северо-восточного и восток-северо-восточного направлений со скоростью 10 м/сек и более. Северо-восточные ветры наиболее часты и продолжительны по сравнению с ветрами других направлений. Сильные морские течения при северо-восточных ветрах создают подпор речных вод и способствуют образованию нагонной волны. Нагоны распространяются вверх по реке до с. Каравелли, на 27 км от дельты. Мак-

симальный рост уровня достигается в районе устья (30—35 см) и вверх по реке постепенно уменьшается. На южном берегу моря, в Пехлеви, наибольший нагон (до 60 см) вызывают ветры северной четверти. Стопный эффект ветров здесь незначителен.

В отличие от западного побережья, в Красноводском заливе величина стога преобладает величиной нагона. Резкие стоги воды в заливе вызываются северо-западными и северными ветрами. При этом понижение уровня у западных и северо-западных берегов залива доходит до 60—70 см. Восточные ветры также сопровождаются стогами. Нагоны воды в заливе вызываются юго-западными ветрами, но они незначительны, так как эти ветры непродолжительны и небольшой повторяемости. Кроме того, нагоны создаются при развитии сильных северо-западных ветров в средней части Каспийского моря. При этом происходит поступление значительных масс воды в южную часть моря и в Красноводском заливе повышается уровень благодаря притоку воды со стороны открытого моря. В отдельных случаях стоги и нагоны продолжаются более суток. Во время стогов и нагонов у входа в залив иногда развиваются довольно сильные течения — до 50 см/сек. Однако такие течения в районе залива наблюдаются редко.

На восточном берегу Среднего Каспия, как показывают материалы наблюдений, наибольшие стоги имеют место при северо-западных ветрах, чаще всего дующих летом, а наибольшие нагоны — при юго-восточных. В районе Форта Шевченко стоги-нагоны колебания уровня доходят до 120 см, в районе Векдаша — не более 30—40 см. Стоги и нагоны в этом районе имеют особое значение, так как с ними связана рекака отрицательная аномалия температуры воды в летнее время.

При действии ветра одного направления над всей экваторией моря или над значительной его частью (регионального ветра) стоги-нагоны колебания уровня в общих чертах характеризуются следующим образом. Северные ветры вызывают стоги во всей северной части моря и повышение уровня в средней и южной частях. Тем не менее, в отдельных районах средней и особенно южной частей моря могут быть и стоги. Северо-западные ветры вызывают стоги по всей северной половине моря. При юго-восточных ветрах — нагон в северной части моря и стог в южной. Южные ветры вызывают стоги во всей западной части моря и нагоны — в восточной. Такое же положение и при западных ветрах. Восточные и северо-восточные ветры вызывают нагоны в западной половине моря и стоги в восточной.

В районах, где преобладающие ветры способствуют нагонам воды, как следствие их создаются градиентные течения. Чаще все эти течения направлены навстречу ветру. Наиболее благоприятные условия для возникновения градиентных течений вследствие нагонов создаются в следующих районах моря: в Северном Каспии, на участках западного побережья Среднего Каспия к северу от Махачкалы, у северного и южного берегов Ашшеронского полу-

острова и в южной части моря, где эти течения особенно заметно проникают на Апшеронском пороге. На границе между Северным и Средним Каспием, у побережья к северу от Махачкалы, после продолжительных и сильных юго-восточных ветров возникает юго-восточное течение, повторяемость которого 50–60%. У северного побережья Апшерона и в Южном Каспии после продолжительных и сильных северо-западных и северных ветров течение имеет направление на север и северо-запад. У южного побережья Апшерона возникают юго-восточные и юго-западные течения, но они слабее, чем в остальных районах, так как ветры южной четверти, их вызывающие, имеют небольшую повторяемость.

Градиентные течения возникают при продолжительном (не менее двух суток), сильном (не менее 6 баллов) ветре и повышении уровня на 30 см и более. Направлены они чаще навстречу ветру, но возможны отклонения от линии ветра вправо и влево на 30–45°. Скорости градиентных течений примерно 20–25 см/сек. На поверхности их скорость меньше, чем на горизонтах более 10 м, благодаря действию встречного ветра (Клевцова, 1967).

Одна из характерных особенностей гидрологического режима Каспийского моря — интенсивная отрицательная аномалия температуры воды в летние месяцы в обширном районе у восточного побережья Среднего Каспия, от п-ова Мангышлак до Кара-Богаз-Гола. При температуре воды на поверхности в открытом море 23–24° температура воды у берега может быть 13–14°, т. е. горизонтальные градиенты температуры могут достигать до 10° и больше. Аномалия выделяется на картах среднемесячных температур для летнего времени. Почти все исследователи (И. Б. Шиндлер, Н. М. Кипнович, С. Я. Щербак, В. Б. Штокман и др.) связывали наличие этой аномалии с действием стоновых ветров. В 1960–1966 гг. появились статьи Х. К. Уланова, в которых высказывается мнение, что причина аномалии — не стоновый эффект ветров, а влияние подземного стока вод. Уланов, прежде всего, считает, что аномалия существует постоянно, значит, она должна вызываться постоянной причиной и такая причина — подземный сток в море. Ветры на восточном побережье, по мнению Уланова, таковы, что не могут обусловить существование аномалии вдоль всего побережья. Для доказательства своих доводов, он произвел анализ мареографных наблюдений по трем гидрометстанциям (ГМС): Форт Шевченко, Бекдаш и Кара-Богаз-Гол, условно принимая при этом за случай стога только понижения уровня не менее 30 см. В результате он пришел к выводу, что в рассматриваемом районе стоны имеют малую повторяемость и небольшую продолжительность, и никаких резких понижений температуры воды при стогах не происходит. Ссылаясь на некоторые общие работы по геологии восточных районов Прикаспия, Уланов окончательно утвердился во мнении об определяющем влиянии стока подземных вод на формирование температурной аномалии.

Работы Уланова вызвали дискуссию в печати. На страницах

журнала «Океанология» и других появились статьи и заметки Фурмана, 1962 и 1963; Мянцьева и Осянина, 1965; Соловьева и Кузовлева, 1966; Пахомовой, 1962 и 1966; Тамбовцевой, 1966; Мамедова, 1967. Во всех работах выражается несогласие с предположением Уланова и приводятся различные доводы в пользу старой точки зрения — объяснения температурной аномалии влиянием сгонного эффекта ветров. Правда, в статье Мянцьева и Осянина говорится, что, по их данным, с восточного побережья существует подземный сток *пресных* (курсив мой. — А. К.) вод. Но авторы не утверждают, достаточно ли он, чтобы вызывать аномалию в таком обширном районе. Они подчеркивают, что для полного освещения вопроса о стоке пресных вод в Каспийское море необходимы данные по температуре и химическому составу прибрежных вод моря. Отметим попутно, что ни в одной работе Уланова такой важный показатель, как химический состав вод в районе аномалии, не рассматривался.

Приведем основные доказательства в пользу гипотезы сгонной природы аномалии, содержащиеся в перечисленных работах. Ничем не обоснован учет Улановым лишь сгонно-нагонных колебаний уровня более 30 см, что сильно занижает действительную повторяемость сгонов (Фурман, 1963 и др.).

Использованные Улановым мареографные наблюдения в основном характеризуют местные особенности хода уровня и их нельзя распространять на весь район. Так на ГМС Форт Шенченко место установки мареографа совершенно изолировано от вод Среднего Каспия. ГМС Кара-Богаз-Гол расположена в Карабогазском проливе, в 600 м от входа в него. В проливе протекает постоянный сток каспийской воды в Кара-Богаз-Гол, обусловленный разностью уровней моря и залива. Поэтому мареограф здесь регистрирует, прежде всего, результаты колебаний уровня в проливе, а не сгоны у восточного берега Среднего Каспия. ГМС Бекдаш расположена в бухте, значительно врезанной в берег и отделенной от моря островами и грядами (Фурман, 1963). Из трех использованных пунктов Бекдаш наиболее отвечает условиям анализа рассматриваемого явления.

Таким образом, сама методика анализа и использованные материалы не дают возможности отрицать сгонную причину аномалии температуры. Далее. Температурную аномалию у восточного берега Среднего Каспия ни в коем случае нельзя считать постоянной, как это делает Уланов. В разные годы границы распространения аномалии и ее интенсивность сильно меняются. Так, в августе 1959 г. аномалия была выражена весьма резко — температура по направлению с моря к берегу понижалась от 24 до 14°. В августе 1960 г. аномалия практически отсутствовала, температура у берега была 23° (Тамбовцева, 1966).

Добавим, что отрицательная аномалия летом, вызываемая постоянной причиной, должна становиться положительной аномалией зимой, когда температура воды на поверхности в центральных

районах Среднего Каспия понижается до 6°. Между тем зимой температура воды на поверхности у восточного берега Среднего Каспия всего 3—4°, такая же, как и у западного берега, что обычно для зимнего термического режима моря, когда прибрежные воды холоднее под открытого моря.

Сравнение данных по температуре воды на гидрометеостанциях, расположенных на почти одинаковых широтах на восточном и западном берегах Среднего Каспия, показывает, что в летние месяцы у восточного берега может наблюдаться высокая температура, а у западного — низкая. Утверждению Уланова о постоянстве аномалии температуры у восточного берега противоречат резкие понижения температуры, наблюдаемые как у восточного, так и у западного берегов. Резкие понижения температуры воды в результате сгонов подтверждаются данными наблюдений, полученными во время съемок температуры в районе Актау в 1963—1965 гг. С 29 июля по 4 августа 1963 г. температура воды при нагонном ветре повысилась на 12,5° (с 12,1 до 24,6), а затем при сгоне с 4 по 11 августа понизилась на 13,9° (с 24,6 до 10,7). Летом того же года в районе Актау максимальная средняя декадная температура (21,6°) была во второй декаде июля, а минимальная из средних декадных температур (12,7°) — во второй декаде более жаркого месяца — августа. Наблюдения показывают, что действие ветра и вызываемые им течения обуславливают большое разнообразие распределения температуры летом в районе Актау (Соловьев и Кузовлев, 1966).

Многолетние данные по ветру на ГМС Бекдаш (1929—1959) показывают, что повторяемость сгонных ветров северной четверти в июне равна 63,5%, в июле — 68,7, в августе — 63,9%. Сгонные северо-западные и север-северо-западные ветры вызывают резкие понижения температуры воды, хотя спад уровня не превышает 30 см. Во время север-северо-западного ветра 5—6 июля 1964 г. среднесуточная температура воды понизилась от 15,5 до 11,5°, т. е. на 4° за сутки. При продолжительном северной, север-северо-западном и северо-западном ветре (18—31 июля 1964 г.) среднесуточная температура воды понизилась на 6,9° (с 17,9 до 11,0). При шестидневном сгонном ветре (18—23 июля 1965 г.) понижение температуры оказалось равным 5,4°, при понижении уровня на 46 см, и т. д. Следовательно, при сгонных ветрах происходят существенные понижения температуры при сравнительно небольшом падении уровня (Мамедов, 1967).

Предположение о выходе на дне у восточного побережья Среднего Каспия грунтовых вод гидрохимическими исследованиями не подтвердилось. Как показали специальные химические работы, проведенные Государственным океанографическим институтом в районе аномалии в августе 1960 и в апреле 1961 г., на солесность, на щелочность, на солевой состав вод этих районов не отличаются от прилегающих районов открытого моря (Пахомова и Затучная, 1966).