

УДК 551.464.5 (262.81)

**ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОЛЕННОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
СЕВЕРНОГО КАСПИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ
ЕЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ****Н. А. Тимофеев**

Влияние изменений солёности на воспроизводство и распределение организмов, обитающих в Северном Каспии, общеизвестно. В связи с этим весьма полезно иметь возможность предсказывать эти изменения. Однако сделать это невозможно без вскрытия численной зависимости их от основных факторов, вызывающих эти изменения: речного стока, циркуляции вод*, испарения с поверхности моря и осадков.

Качественная сторона влияния этих факторов на изменение солёности Северного Каспия в настоящее время довольно хорошо известна и выглядит следующим образом.

Поступление речной воды (преимущественно волжской) в море является основным фактором, вызывающим опреснение Северного Каспия. Вынос волжской воды в восточную часть Северного Каспия происходит в значительной мере благодаря дрейфовым течениям, возникающим под влиянием преобладающих ветров. Время прохождения волжской воды от Волгограда до восточной части Северного Каспия в среднем составляет около двух месяцев.

Количество волжской воды, поступающей в эту часть моря, зависит в основном от величины стока и интенсивности и повторяемости ветров западных и восточных румбов, способствующих или соответственно препятствующих поступлению волжских вод на восток (Зайцев, 1953; Пахомова и Затучная, 1966).

Основным фактором, вызывающим осолонение, является испарение с поверхности моря. Максимальное испарение наблюдается в июне, июле или августе и может достигать за месяц 15—18 км³. За год Северный Каспий теряет в результате испарения 75—90 км³ воды. С поверхности восточной части испаряется соответственно 7—9 и 35—40 км³ воды**.

В связи с приведенными величинами испарения следует сказать о некоторых разногласиях, существующих в вопросе о влиянии стока Волги и Урала на солёность восточной части Северного Каспия. Так, Г. Н. Зайцев (1965) считал, что основное влияние на колебания соле-

* Поскольку течения восточной части Северного Каспия определяются в основном ветровой деятельностью, а наблюдения над ветром (в отличие от течений) проводятся регулярно, то при дальнейшей статистической обработке мы пользовались характеристикой ветровой деятельности как показателем циркуляции вод.

** Данные об испарении любезно предоставлены нам Е. Г. Архиповой.

ности оказывает сток Урала. Свой вывод он основывал на полученных им коэффициентах корреляции между средней соленостью восточной части Северного Каспия, годовым стоком Волги ($-0,27$) и Урала ($-0,70$). Однако эти результаты совершенно не подтверждаются данными других авторов (Винецкая, 1959; Норина, 1955) и полученными нами. Кроме того, К. И. Иванов (1955) рассчитал в 1953—1955 гг. количество волжской воды, поступающей в восточную часть Северного Каспия. Результаты его расчетов показали, что только за летние месяцы сюда поступает $30-40 \text{ км}^3$ волжской воды, т. е. значительно больше годового стока Урала. Поэтому следует считать очевидным, что основную роль в колебаниях средней солености восточной части Северного Каспия играют волжские воды.

Поступление пресной воды в виде осадков на поверхность Северного Каспия не превышает обычно $9-12 \text{ км}^3$ в год и на среднегодовую соленость влияет незначительно. Подземный приток составляет еще меньшую величину и в настоящей работе не учитывается.

Так, в общих чертах выглядит качественная сторона вопроса о влиянии перечисленных факторов на колебания солености Северного Каспия. Количественная же сторона до сих пор остается в значительной мере неясной. Все имеющиеся количественные разработки касаются в основном пространственного распределения солености в зависимости от стока Волги и ветра (Зайцев, 1953, Норина, 1955, Скриптунов, 1958; Винецкая, 1959; Пахомова и Затучная, 1966).

В настоящей работе сделана попытка найти количественные характеристики связи межгодовых и внутригодовых изменений средней солености восточной части Северного Каспия со стоком Волги и Урала, деятельностью ветра и испарением и определить возможность прогнозирования по этим связям среднегодовой и среднемесячной солености этой части моря. В качестве математического аппарата при этом использовался корреляционный анализ.

В работе были использованы данные о солености (Винецкая, 1962; Катунин, 1967), стоке Волги (у Волгограда) и Урала (у пос. Тополи) (Фокин, 1959), ветрах* (ст. Гурьев) и испарении за 1934—1966 гг.

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЕДНЕГОДОВОЙ СОЛЕННОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Рассматривая зависимость солености восточной части Северного Каспия от стока, мы руководствовались соображением, что средняя соленость в данном году определяется стоком не только этого года, но и за ряд предыдущих лет, т. е. сточные речные воды данного года могут оставаться в восточной части моря и соответственно влиять на ее соленость в течение нескольких лет. Для определения лучшего варианта связи солености со стоком были прокоррелированы ряды данных о солености, стоке Волги (r_1), Урала (r_2) и их суммарному стоку (r_3) за 1, 2, 3, 4, 5 и 6 лет. Приводим эти данные:

Коэффициент корреляции	Ряды данных о солености за число лет					
	1	2	3	4	5	6
r_1	$-0,595$	$-0,759$	$-0,837$	$-0,880$	$-0,883$	$-0,847$
r_2	$-0,479$	$-0,717$	$-0,742$	$-0,810$	$-0,840$	$-0,843$
r_3	$-0,640$	$-0,768$	$-0,852$	$-0,864$	$-0,834$	$-0,742$

* Данные о ветре взяты из «Метеорологических ежемесячников».

Приведенные результаты расчетов показывают, что наилучшим образом среднегодовая соленость восточной части Северного Каспия определяется суммарным стоком Волги за 4 и 5 лет (у Пахомовой и Затучиной, 1966, за 3 года). Отсюда можно также заключить, что волжская вода, попавшая в восточную часть Северного Каспия в данном году, будет оставаться там (соответственно уменьшаясь в объеме), по крайней мере, в течение 4—5 лет.

Довольно значительные величины коэффициентов корреляции полученные при сопоставлении солености и стока Урала, еще не могут свидетельствовать о значительном прямом воздействии вод Урала на среднегодовую соленость всей восточной части Северного Каспия и объясняются тем, что сток Урала и Волги зависит от одних общих причин и изменяется в значительной мере одинаково. По этой причине, в частности, трудно количественно разделить влияние этих рек на соленость восточной части Северного Каспия.

Руководствуясь величинами полученных коэффициентов корреляции, мы составили уравнения регрессии для расчета среднегодовой солености восточной части Северного Каспия (y) по стоку Волги за 4 (x_4) и 5 (x_5) лет:

$$y = -0,015x_4 + 22,07; \quad (1)$$

$$y = -0,013x_5 + 23,31. \quad (2)$$

Надежность уравнений — 98%, квадратическое отклонение — 0,92.

Понятно, что если мы имеем величину прогнозируемого стока, предлагаемые уравнения становятся прогностическими. Имеющиеся в настоящее время методы прогноза годового стока Волги (можно пользоваться, в частности, данными ГМЦ или полученными по методу Г. К. Ижевского; 1961, 1964) позволяют прогнозировать величину этого стока в конце зимы — начале весны. После прохождения паводка эта величина может быть уточнена. Следовательно, в январе — марте (с уточнением в июне — июле) по предложенным уравнениям можно считать среднегодовую соленость восточной части Северного Каспия на данный год.

Кроме того, тот факт, что величина солености определяется суммарным стоком за несколько лет, позволяет увеличить заблаговременность прогноза еще на год. Было сделано предположение, что использование в качестве прогнозируемой величины стока за последний год четырех- или пятилетия средней многолетней не нарушит значительно полученные выше связи. Были выполнены расчеты, аналогичные приведенным выше, с заменой фактической величины стока последнего года четырех или пятилетий средней многолетней (для используемого ряда — 234 км³). Как и следовало ожидать, коэффициенты корреляции в этом случае уменьшились, но остались достаточно большими, прогностическими (—0,83 и —0,82, вместо 0,88). Надежность уравнений в этом варианте уменьшилась до 90%, а квадратическое отклонение увеличилось до 0,97 (рис. 1, а).

Для характеристики связи солености с ветром были вычислены коэффициенты корреляции между соленостью и повторяемостью ветра различных направлений*. Приводим результаты расчетов.

Направление ветра . . .	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	З (4 г)	ЮВ (4 г)
.....	0,05	—0,03	0	0,46	0,33	0,30	—0,60	—0,44	—0,79	0,59

* Повторяемость в данном случае и в последующих расчетах находили путем суммирования месячных повторяемостей за март — октябрь, когда море полностью свободно от льда.

Использование сумм повторяемости ветра по четырехлетиям, как видим, значительно увеличило коэффициенты. Различные комбинации с суммированием повторяемости ветров различных направлений не улучшило значительно полученные связи. Поэтому в дальнейших расчетах коэффициентов множественной корреляции принимались во внимание только ветры западного и юго-восточного направлений. Были подсчитаны 4 варианта множественной корреляции (сток и ветер брались по четырехлетиям):

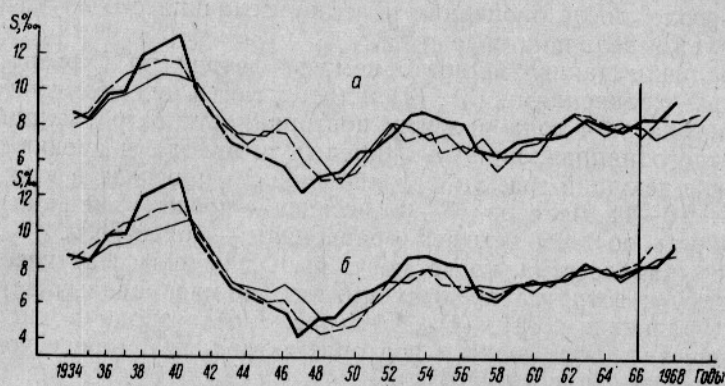


Рис. 1. Межгодовые изменения солёности:

фактической (сплошная жирная линия), рассчитанной: *a* — по уравнению (1), *b* — по уравнению (5), а также по фактическим данным (пунктирная линия) и в прогностическом варианте (сплошная тонкая линия).

- 1) солёность — сток Волги — повторяемость ветра западного направления (z_1);
- 2) солёность — сток Волги — повторяемость ветра юго-восточного направления (z_2);
- 3) солёность — сток Волги — разность повторяемости ветра западного и юго-восточного направлений;
- 4) солёность — сток Волги — повторяемость ветра западного направления — повторяемость ветра юго-восточного направления.

Полученные коэффициенты корреляции оказались соответственно равны 0,91, 0,92, 0,94, 0,94.

Для первых трех вариантов были составлены уравнения регрессии:

$$y = -0,0111x - 0,0063z_1 + 21,00; \quad (3)$$

$$y = -0,0132x + 0,0094z_2 + 15,77; \quad (4)$$

$$y = -0,0094x - 0,0064(z_1 - z_2) + 16,68. \quad (5)$$

Надежность уравнений — 100%. Квадратические отклонения соответственно равны 0,81, 0,77, 0,67.

Чтобы иметь возможность использовать полученные уравнения как прогностические, мы вынуждены были снова обратиться к средним многолетним величинам, теперь уже по повторяемости ветра. Для западного ветра эта величина составляет 128, для юго-восточного — 122. Расчет коэффициентов корреляции с введением средних многолетних величин стока и повторяемости ветра показал, что связь солёности со стоком и ветром остается достаточно тесной (0,87, 0,87, 0,87). Характеризуя уравнения (3), (4) и (5), следует подчеркнуть, что с введением в уравнение (1) третьей переменной — повторяемости ветра — показатель связи увеличивается, однако заблаговременность прогноза в этом

случае не может быть больше года, поскольку мы не можем прогнозировать повторяемость ветра.

Методически прогнозирование предлагается осуществлять следующим образом. В начале текущего года по любой из имеющихся методик прогноза стока (метод Ижевского, в частности, позволяет это сделать в январе — марте) прогнозируется величина стока Волги на текущий год. Суммируя эту величину с величиной стока за предыдущие 3 или 4 года, вводим полученные результаты в уравнения (1) или (2). В июне — июле, после окончания паводка, величина стока уточняется и корректируется величина солености.

При наличии данных о повторяемости ветра (по Гурьеву) можно пользоваться уравнениями (3), (4) и (5), вводя в них полученную выше величину стока за 4 года и сумму повторяемости ветра западного или юго-восточного направлений за 3 предыдущих года и среднюю многолетнюю — за текущий год. Заблаговременность прогноза в этих случаях составляет 10—11 месяцев (5—6 месяцев — после уточнения), а его обеспеченность по всем четырем уравнениям — более 90%.

В самом начале года, когда могут быть получены фактические данные по стоку и ветру за предыдущий год, можно предвычислить соленость по уравнениям (3), (4), (5) (рис. 1, б), вводя в них средние многолетние величины стока и повторяемости ветра (обеспеченность — 90%, заблаговременность — год).

Если необходимо увеличить заблаговременность прогноза, применяются только уравнения (1) или (2). При этом используются прогнозируемая величина стока на текущий год и средняя многолетняя — на будущий. Заблаговременность прогноза при этом составит около 2 лет, а обеспеченность — несколько ниже 90%.

Испарение при рассмотрении межгодовых изменений солености не учитывалось, поскольку влияние его на соленость в межгодовом плане сказывается значительно слабее (межгодовые различия за рассматриваемый ряд лет не превышали 5 км^3), чем воздействие стока и ветровой деятельности.

РАСЧЕТ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ СОЛЕННОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Предварительный анализ показал, что для выяснения численной характеристики связи внутригодовых изменений солености с определяющими их факторами абсолютными значениями среднемесячной солености пользоваться нельзя, поскольку эти изменения происходят на фоне межгодовых и многолетних изменений солености (рис. 2). Чтобы исключить их влияние, были вычислены среднемесячные значения солености в отклонениях от средних годовых за каждый конкретный год (рис. 3, а). Полученный ряд значений уже можно было использовать непосредственно для решения поставленной задачи. Такие же операции были выполнены и с данными по стоку, ветру и испарению.

В работе были использованы данные за июнь — октябрь по солености, ветру и испарению (за другие месяцы наблюдения над соленостью велись нерегулярно или полностью отсутствовали) и за апрель — август по стоку (с учетом двухмесячного срока переноса от пункта наблюдения до восточной части Северного Каспия).

Результаты простой корреляции среднемесячных значений солености с другими характеристиками (в отклонениях) следующие:

Волга	Урал	Волга+Урал	В+ЮВ	З+СЗ	Испарение
-0,63	-0,52	-0,64	0,56	-0,36	-0,45

Отрицательный коэффициент корреляции, полученный при сопоставлении солёности и испарения*, показывает, что в данном случае влияние волжских вод на солёность настолько преобладает над испарением, что положительная физическая связь солёности с испарением формально становится отрицательной.

При рассмотрении множественной связи возникли некоторые технические затруднения, вызванные тем, что вспомогательные коэффициенты

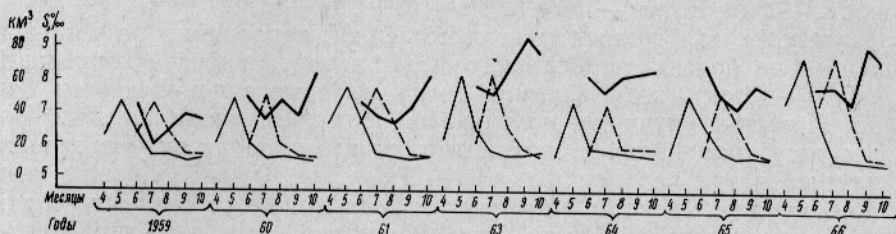


Рис. 2. Внутригодовые изменения солёности (сплошная жирная линия), стока Волги фактического (сплошная тонкая линия) и сдвинутого на два месяца (пунктирная линия).

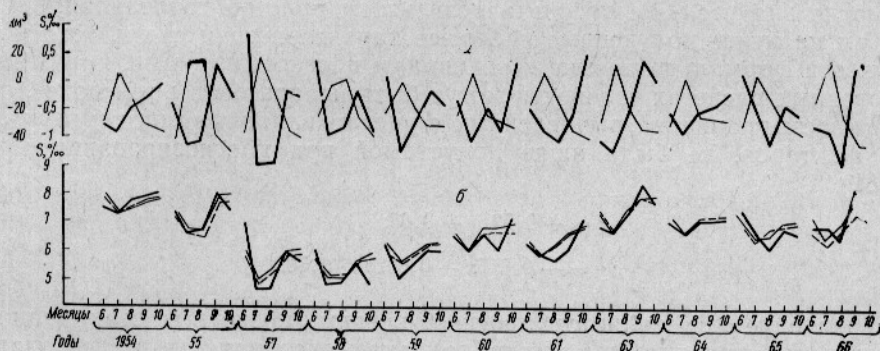


Рис. 3. Внутригодовые изменения:

а — солёности (сплошная жирная линия) и стока Волги (сплошная тонкая линия) в отклонениях от среднемесячных; б — фактической солёности (сплошная жирная линия), рассчитанной по уравнению (6) (сплошная тонкая линия) и по уравнению (7) (пунктирная линия).

корреляции оказались близки по величине к основным или даже превышали их (в случае сопоставления солёности, стока и испарения). В связи с этим была сделана попытка исключить влияние испарения на солёность путем учета ежемесячного ее увеличения вследствие испарения**. Затем полученный ряд (в отклонениях от средних годовых) снова сопоставляли с рядами данных по другим характеристикам. Приводим полученные данные:

Волга	Урал	Волга+Урал	В+ЮВ	З+СЗ
-0,70	-0,62	-0,70	0,58	0,36

* Здесь и дальше испарение дается с учетом осадков.

$$**S = \frac{VS_{\text{набл}}}{V + V_{\text{исп}}}$$

где S — солёность, исправленная на испарение;
 $S_{\text{набл}}$ — солёность, наблюдаемая в данном месяце;
 V — объём воды в восточной части Северного Каспия в данном месяце;
 $V_{\text{исп}}$ — объём воды, испарившейся в восточной части Северного Каспия за данный месяц.

В этом случае полученные простые коэффициенты характеризуют уже связь трех переменных.

Попытка численно охарактеризовать связь при увеличении количества факторов, действующих на соленость, дала следующие результаты:

$$\text{соленость — сток Волги} — V + ЮВ — 0,73,$$

$$\text{соленость — сток Волги} — [(V + ЮВ) — (З + СЗ)] — 0,74,$$

$$\text{соленость — сток Волги} — (V + ЮВ) — (З + СЗ) — 0,73.$$

Полученные коэффициенты множественной корреляции по величине незначительно больше наибольшего коэффициента простой корреляции (соленость — сток), хотя влияние ветра на изменение солености бесспорно. Попытка улучшить полученные результаты при помощи различного комбинирования с исходными данными по ветру (осреднение показателей ветра по трем пунктам — Тюлений, Кулалы, Гурьев; сглаживание по двум месяцам и пр.) не привела к положительному результату. Объяснить это в данном случае можно лишь тем, что между самими факторами, действующими на соленость, прослеживается довольно четкая связь (вспомогательные коэффициенты близки к основным). При таком положении применение множественной корреляции не могло значительно улучшить результаты простой корреляции.

Тем не менее полученные числовые характеристики связи, хотя и не являются формально по своим величинам прогностическими, при ориентировочных расчетах солености могут быть использованы тем более, что надежность уравнений, вычисленных с учетом влияния одного и нескольких факторов, не была ниже допустимой при прогнозировании (0,80 и 0,82)

$$y = -0,021x + 0,08; \quad (6)$$

$$y = -0,015x + 0,002z + 0,38. \quad (7)$$

Уравнение (6) является прогностическим, поскольку сток данного месяца (наблюдения у Волгограда) оказывает влияние на соленость восточной части Северного Каспия через 2 месяца. Заблаговременность прогноза составляет соответственно 2 месяца (рис. 3, б).

Уравнение (7) может быть использовано как расчетное; z в этом уравнении обозначает деятельность ветра восточного и юго-восточного направлений, получается путем перемножения среднемесячной скорости ветра на повторяемость и тем самым характеризует деятельность ветра более полно, чем просто повторяемость (рис. 3, б).

При пользовании полученными уравнениями следует помнить, что приведенные в них величины представляют собой отклонения от средних за данный год. В связи с этим возникает задача предвычисления этих средних. Решена она может быть следующим образом. Поскольку найденные зависимости распространяются только на летние месяцы, то в январе — марте мы уже имеем возможность предвычислить величину годового стока Волги и подсчитать его среднемесячное значение. Среднегодовую величину солености на данный год находим при помощи одного из указанных выше способов.

В этом случае, прогнозируя отклонение солености, можем перейти к ее абсолютному значению. Поправка величины солености на испарение исключается по предложенной выше формуле (как правило, она не превышает 0,4‰).

На рис. 3 представлены кривые солености, рассчитанные по уравнениям (6) и (7). Надежность уравнений, как уже говорилось, составляет 80 и 82%. Квадратические отклонения соответственно равны 0,39 и 0,37.

Заключение

Соленость восточной части Северного Каспия является показательной характеристикой с двух точек зрения. С одной стороны, в настоящее время признан бесспорным тот факт, что воспроизводство и распределение водных организмов прямо или косвенно связаны с изменением солености. Возможность прогнозирования как внутригодового, так и межгодового изменения солености, по-видимому, может быть полезна биологам. С другой стороны, соленость служит отличным индикатором динамики вод восточной части Северного Каспия. По изменению солености можно судить о количестве волжских вод, поступающих в восточную часть Северного Каспия.

Хорошо выраженная реакция солености на изменения различных гидрометеорологических характеристик и позволила в настоящей работе предложить один из возможных вариантов предвычисления среднемесячной и среднегодовой солености восточной части Северного Каспия.

Числовые характеристики связей, полученные методом эмпирических сопоставлений, надо полагать, являются реальными, поскольку в основу анализа были положены физически обоснованные зависимости.

Невысокие показатели связи внутригодовых изменений солености с выделяющими их факторами следует, очевидно, объяснить не вполне репрезентативным материалом по среднемесячной солености. Дело, видимо, заключается в том, что и метод вычисления средней (Винецкая, 1959) и временная неоднородность сбора материала приводят к тому, что используемый ряд среднемесячных величин солености не вполне объективно отражает реальную картину солености. Тем не менее полученные показатели связи достаточно велики, чтобы считать возможным практическое использование полученных уравнений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Винецкая Н. И. Соленость вод Северного Каспия. Труды ВНИРО. Т. 38, 1959.
Винецкая Н. И. Многолетние и сезонные изменения гидрохимического режима Северного Каспия до зарегулирования стока Волги. Труды КаспНИРО. Т. 18, 1962.
Зайцев Г. Н. Возможные изменения гидрологического режима северной части Каспийского моря в связи с падением уровня моря. Труды ГОИН. Вып. 12, 1953.
Зайцев Г. Н. Некоторые закономерности многолетних изменений уровня и солености северной части Каспийского моря. «Океанология», № 2, 1965.
Иванов К. И. Расчет изменения солености Каспийского моря в связи с изъятием части речного стока. Труды ГОИН. Вып. 20, 1955.
Ижевский Г. К. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. Пищепромиздат, 1961.
Ижевский Г. К. Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб. Изд. ВНИРО. М., 1964.
Катунин Д. Н. Режим солености северной части Каспийского моря в современных условиях. Труды КаспНИИРХ. Т. 23, 1967.
Норина А. М. О солености вод северной части Каспийского моря за период с 1935 по 1951 г. Труды ГОИН. Вып. 21, 1955.
Пахомова А. С., Затучная Б. М. Гидрохимия Каспийского моря. Гидрометеоздат, 1966.
Скриптунов Н. А. Гидрология предустьевого взморья Волги. Гидрометеоздат, 1958.
Фокин М. И. Речной сток Каспийского моря. Труды ВНИРО. Т. 38, 1959.

SUMMARY

Numerical characteristics are presented of the relationship between throughout the year and year-to-year variations in the mean salinity of the Eastern North Caspian Sea and the main factors governing them: river drainage, wind activity, evaporation and precipitation.

On the basis of the characteristics obtained, equations have been suggested to estimate and forecast the annual and monthly mean salinity values in the Eastern North Caspian. Predictions are made two years and two months ahead, respectively.