

### ВЕРТИКАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОДЫ СРЕДНЕГО И ЮЖНОГО КАСПИЯ

Канд. геогр. наук Г. Н. ЗАЙЦЕВ и канд. хим. наук М. В. ФЕДОСОВ

#### РАСЧЕТ ВОЗМОЖНОГО ОСОЛОНЕНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В СВЯЗИ С ПАДЕНИЕМ УРОВНЯ МОРЯ

По расчету С. В. Бруевича среднюю соленость Каспийского моря можно принять равной 12,78‰, исходя из средней глубины моря 180 м. Следовательно, падение уровня моря на 1 м должно вызвать осолонение на  $12,78 : 180 = 0,071$ ‰.

Принимая средний многолетний уровень Каспийского моря за исходную величину, можем принять падение уровня моря к 1953 г. равным (с округлением) 2 м. Отсюда ожидаемое осолонение должно составлять  $0,071 \cdot 2 = 0,14$ ‰ и, следовательно, средняя соленость Каспийского моря к 1953 г. должна быть равной  $12,78 + 0,14 = 12,92$ ‰.

К. И. Иванов считает среднюю соленость Каспийского моря равной 12,75‰; прогноз будущего увеличения солености, вызванного падением уровня моря, по К. И. Иванову, выражается следующей формулой:

$$\frac{(\text{соленость исходная}) \times (\text{первоначальный объем})}{(\text{будущий объем})}$$

Для 1953 г. это составит  $12,75 \cdot 76,10 : 75,24 = 12,90$ ‰. Прирост солености в этом случае практически равен вычисленному нами ранее по методу С. В. Бруевича. Таковы величины осолонения, вызванного падением уровня моря, вычисленные на основании теоретических предположений. Фактическое же распределение солености за рассматриваемый период представляет собой следующую картину.

#### Соленость (в ‰) над впадиной на глубине 100 м

Средний Каспий	30 сентября 1934 г. . . . .	12,64
	1 сентября 1952 „ . . . . .	12,83
Прирост солености . . .		0,19
Южный Каспий	8 сентября 1934 г. . . . .	12,73
	14 сентября 1952 „ . . . . .	12,85
Прирост солености . . .		0,12

Таким образом, среднее осолонение для всего моря может быть принято равным 0,15—0,16‰ (примерно равное полученному нами на основании теоретических подсчетов). Правда, если все расчеты вести применительно к объему только верхних 100 м, то путем прямого расчета теоретическое увеличение солености получается в 3,5 раза больше

вышеприведенного (весь объем Среднего и Южного Каспия равен  $75360 \text{ км}^3$  и объем верхнего слоя в  $100 \text{ м}$  равен  $21330 \text{ км}^3$ ).

Осолонение, имевшее место за последнее время, должно было бы сказаться на процессах вертикальной циркуляции в сторону увеличения толщины слоя, захватываемого этой циркуляцией. Плотность верхнего осолоненного слоя должна была бы соответственно увеличиться, и при последующем охлаждении эти водные массы должны были бы опуститься до более глубоких горизонтов, нежели это имело место раньше.

Анализ имеющихся материалов и подсчет по ним удельных объемов в пределах верхних  $500 \text{ м}$  в центральных частях Среднего и Южного Каспия не подтвердил этого предположения. Причиной послужила недостаточная полнота материалов и в отдельных случаях малая их точность. Однако, обобщая материал за весь рассматриваемый период (1934—1952 гг.), удалось подметить некоторые особенности и различие в вертикальной циркуляции Среднего и Южного Каспия.

Распределение удельных объемов по вертикали в Среднем Каспии таково, что зимой от поверхности до  $500 \text{ м}$  на каждые  $50 \text{ м}$  глубины условный удельный объем изменяется не более чем на  $0,02$ . Это означает, что градиенты плотности невелики и при вертикальном перемешивании вполне преодолимы. Таким образом, вертикальная циркуляция в Среднем Каспии может достигать больших глубин, исчисляемых сотнями метров. Весной в связи с началом прогрева верхних слоев градиенты плотности в первых  $50 \text{ м}$  увеличиваются и циркуляция становится затрудненной, но в следующих горизонтах обмен остается по-прежнему возможным. Только летом, благодаря сильному прогреву, верхний слой в  $100 \text{ м}$  имеет большие градиенты плотности, препятствующие обмену этого слоя со слоями, лежащими на большей глубине. К осени эти градиенты уменьшаются и к зиме устанавливается описанная выше картина. Таким образом, в Среднем Каспии вертикальный водообмен возможен на протяжении почти полных двух сезонов — зимы и весны.

Иначе дело обстоит в Южном Каспии. На протяжении круглого года верхний слой в  $100 \text{ м}$  представляет собой воды с большими градиентами условного удельного объема (а следовательно, и плотности). Наименьшие перепады условного удельного объема в этом слое в  $10$  раз выше, чем в Среднем Каспии, и составляют в Южном Каспии  $0,17—0,20$  на  $50 \text{ м}$  против  $0,015—0,02$  в Среднем Каспии. Только в зимнее время верхний слой в  $50 \text{ м}$  южнокаспийских вод охлаждается настолько, что градиенты плотности в этом слое становятся сравнительно небольшими. Однако выравнивание градиентов плотности захватывает только верхние  $50 \text{ м}$ , последующие же  $50 \text{ м}$  сохраняют сравнительно высокие градиенты плотности, достаточные для того, чтобы препятствовать вертикальному водообмену. Благодаря такому распределению плотности в Южном Каспии на протяжении всего года устойчиво держится разделение водных масс на две части: верхний слой толщиной  $100—150 \text{ м}$  и глубинные воды от  $150 \text{ м}$  и глубже. Благодаря высоким градиентам плотности в верхних горизонтах обмен вод между этими двумя частями затруднен. Перемешивание происходит в зимнее время в пределах верхних  $50 \text{ м}$  и в течение всего года в глубоких слоях, начиная со  $100—150 \text{ м}$ . Описанное выше распределение плотностей в Среднем и Южном Каспии может быть иллюстрировано табл. 1.

Расчеты показывают, что понижение средних зимних температур Среднего и Южного Каспия на  $1—1,5^\circ$  (при абсолютных значениях их в пределах  $4—7^\circ$  для Среднего и  $10—13^\circ$  для Южного Каспия) должно повлечь за собой изменение вертикальной циркуляции, аналогичное изменению, вызванному увеличением солености на  $0,15\text{‰}$ , происшедшим в течение последних 18 лет. С этим явлением также связана атмосферная аэрация глубинных вод.

Таблица 1

## Изменение условного удельного объема на каждые 50 м по вертикали в течение года

Район моря	Время года	Слой в м					
		0-50	50-100	100-150 150-200	200-250 250-300	300-350 350-400	400-450 450-500
Средний Каспий	Зима	0,02	0,01	0,015	0,03	0,01	0,01
	Весна	0,30	0,04	0,015	0,015	0,02	0,01
	Лето	2,9-3,0	0,1-0,15	0,04	0,01	0,01	0,01
	Осень	0,35-0,4	0,12	0,03	0,015	0,02	0,01
Южный Каспий	Зима	0,04	0,17	0,06	0,02	0,005	0,01
	Весна	0,60	0,20	0,07	0,01	0,015	0,00
	Лето	3,3-3,4	0,40	0,05	0,00	0,01	0,01
	Осень	0,50	0,40	0,05	0,015	0,015	0,01

Наряду с вертикальной циркуляцией, вызываемой изменением плотности верхнего слоя вследствие осолонения или охлаждения, подобную же циркуляцию может вызвать также и ветровая деятельность. При этом механизм вертикальной циркуляции в обоих случаях различный. В первом случае, благодаря охлаждению или осолонению за счет испарения увеличивается плотность поверхностного слоя. Поверхностные воды при этом становятся тяжелее нижележащих и поэтому погружаются вниз. Во втором случае ветер, дующий по направлению от берега, вызывает сгон поверхностных вод в открытое море. На место этих вод снизу поднимаются глубинные воды, отличные по своей характеристике от ушедших поверхностных вод. Обычно эти воды имеют более низкую температуру. Произведенный нами анализ гидрологических данных и подсчеты показали, что этим способом могут быть подняты воды с глубины не более 50 м.

Вышеизложенные положения были проверены нами на фактическом материале другим способом, основанным на следующих рассуждениях.

В результате зимнего охлаждения некоторого верхнего слоя воды происходит постепенное перемешивание этого слоя с нижележащими слоями. В конечном счете, вследствие зимнего охлаждения должно произойти полное (или почти полное) перемешивание всей затронутой перемешиванием толщи воды от поверхности до некоторой глубины, сопровождающееся наступлением в пределах этой толщи гомотермии и гомогалинности. Подобный момент на практике установить очень трудно, однако имеющиеся материалы зимних наблюдений свидетельствуют о наличии в большинстве случаев очень малых вертикальных градиентов удельного объема, что свидетельствует о хорошем и достаточно полном перемешивании водных масс.

С началом весеннего прогрева начинает возникать различие между гидрологическими характеристиками поверхностного слоя и слоя воды, лежащего глубже. Прогрев по мере усиления проникает все глубже и летом глубина его проникновения достигает максимума по вертикали. Поэтому можно предположить, что если зимой некоторый слой охладился до полного перемешивания, то удельный объем этого слоя стал одинаковым от поверхности и до глубины, равной толщине охладившегося слоя. К концу летнего прогрева останется неизменным только удельный объем на глубине  $P$ , куда не достиг летний прогрев, а все удельные объемы вышележащих слоев изменятся. Отсюда, если мы определим

удельный объем поверхностного слоя зимой в момент, близкий к наступлению полного перемешивания, а затем проследим, на какой глубине будут залегать водные массы с такой же характеристикой следующим летом, то эта глубина может быть принята за предельную глубину, до которой истекшей зимой дошло вертикальное перемешивание. Обработав таким способом данные по распределению удельных объемов за ряд лет, мы получили следующие величины.

Таблица 2

Глубина проникновения зимнего перемешивания водных масс в Южном и Среднем Каспии

Дата	Глубина в м	Условный удельный объем	$P$ м
Ю ж н ы й К а с п и й			
19/II	0	90,52	48
8/IX 1934	50	90,36	
27/II	0	90,45	46
5/VIII 1937	50	90,27	
9/IV	0	90,38	85
11/VIII 1938	100	90,25	
17/III	0	90,34	50
18/V 1939	50	90,33	
24/II	0	90,44	50
—VIII 1941	50	90,43	
С р е д н и й К а с п и й			
1/III	0	90,10	107
30/IX 1934	100	90,11	
10/III	0	90,21	35
16/VIII 1937	50	90,10	
18/IV	0	90,14	50
20/VIII 1938	50	90,13	
30/IV	0	90,16	77
26/IX 1940	100	90,11	
14/II	0	90,08	98
30/IX 1941	100	90,04	

Полученные данные, на наш взгляд, неплохо согласуются с изложенными выше выводами о средней глубине проникновения вертикальной циркуляции в различных частях Каспийского моря, особенно, если учесть, что примененная при расчетах методика полностью справедлива только в случае использования данных наблюдений, достаточно близко приуроченных к моментам полного зимнего охлаждения и максимального летнего прогрева. Отступления от этих двух дат при определении глубины проникновения вертикальной циркуляции влекут за собой ошибку в сторону снижения величины вычисленной циркуляции. Это обстоятельство особенно важно для Среднего Каспия, где ожидаемая глубина проникновения вертикальной циркуляции достаточно велика. Все же полученные результаты показывают, что вертикальная циркуляция в Южном Каспии охватывает меньшую толщину воды, чем в Среднем.



## АТМОСФЕРНАЯ АЭРАЦИЯ И ВЕРТИКАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ВОДНЫХ СЛОЕВ

Несмотря на то что вследствие зимней вертикальной циркуляции в Среднем Каспии перемешивается основная масса поверхностных вод не более чем до глубины 500 м, а в Южном Каспии только до 50 м, формирование солёности в глубоководных частях Каспийского моря идет при постоянном и полном перемешивании водных масс моря. Такое перемешивание водных масс в Каспии происходит в результате турбулентных и конвективных процессов. Если бы увеличение солёности, вызванное уменьшением речного стока, затрагивало только толщу воды в пределах верхних 500 м (т. е. до нижнего горизонта непосредственного проникновения зимней циркуляции), то изменение средней величины солёности в глубоководном Каспии было бы в 3—4 раза больше наблюдаемого в действительности. При дальнейшем падении уровня моря нарастание средней величины солёности в глубоководной части моря будет идти такими же темпами, как и теперь. В мелководных прибрежных районах процесс осолонения идет более интенсивно.

Дальнейшая обработка и анализ гидрохимических материалов, собранных и систематизированных сотрудником Азербайджанской рыбохозяйственной станции ВНИРО Б. Н. Абрамовым, и материалов Океанографической съемки Каспийского моря в 1934 г. приводят к следующим выводам.

Зимняя вертикальная циркуляция в Среднем Каспии достигает глубины 150—300 м. Весной вертикальное перемешивание в Среднем Каспии продолжается на больших глубинах и, по данным наблюдений, доходит до 500 м. Таким путем происходит аэрация глубинных слоев Среднего Каспия. В северной области этой части моря зимний процесс перемешивания идет более интенсивно. Это объясняется тем, что хорошо аэрированные поверхностные воды сползают вниз по северному склону среднекаспийской впадины.

В Южном Каспии вертикальная зимняя циркуляция достигает глубины лишь 50 м. В Южном Каспии на протяжении всего года устойчиво держится разделение водных масс на две части: верхний слой толщиной 100—150 м и глубинные воды от 150 м и глубже.

Кроме зимнего перемешивания водных масс, более или менее продолжительные и сильные сгонные ветры поднимают нижние слои у соответствующего берега как в Среднем, так и Южном Каспии. Независимо от места и сезона подъем вод происходит с глубины примерно 40—50 м. Более интенсивное зимнее охлаждение (на 1—1,5°) поверхностных слоев в отдельные годы, как показывают расчеты, вызывает усиление аэрации глубинных слоев Каспия. В этом случае увеличение интенсивности аэрации нижних слоев равнозначно увеличению аэрации, вызванному увеличением солёности вследствие уменьшения речного стока за последние два десятилетия.

Как показал Б. Н. Абрамов, амплитуда колебаний относительного содержания кислорода (процент насыщения) в нижних слоях моря весьма значительна и для слоя воды от 100 до 400 м выражается величинами от 21 до 46%. Это еще раз указывает на то, что для вертикального перемешивания в Среднем Каспии имеют значение изменения в степени зимнего охлаждения от года к году, и на роль, которую при этом играет интенсивность ветровой деятельности. Однако, несмотря на значительную величину аэрации подповерхностных и глубинных слоев глубоководного Каспия, стратификация кислорода в этих водах проявляется очень резко—от величины более 100% насыщения в верхних слоях до почти полного (иногда) исчезновения кислорода у дна<sup>1</sup>. Это обусловлено тем, что пополнение глубинных слоев водной толщ атмос-

<sup>1</sup> В последние годы содержание кислорода у дна увеличилось.

ферным кислородом идет не только весьма медленно вообще, но и медленнее, чем его потребление на окисление органического вещества морских вод. Наравне с проникновением поверхностных хорошо аэрированных водных масс в глубинные слои за счет турбулентного и конвективного перемешивания происходит постоянное потребление кислорода на окисление органического вещества. Скорость этого потребления больше, чем скорость проникновения вод из верхних слоев в глубину.

Количество органического вещества, поступающего в толщу морских вод, в основном зависит от интенсивности его создания в процессе фотосинтеза в поверхностном слое моря. Основой для синтеза растительного органического вещества в глубоководной части Каспия служат не только биогенные вещества речного стока, но и подъем глубинных вод, обогащенных биогенными элементами. Мощность и интенсивность этих процессов влияют на величину образования растительного органического вещества в Каспийском море.

#### ОБОГАЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АКТИВНОГО ФОТОСИНТЕЗА БИОГЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Исходя из величин отдельных составляющих водного баланса и баланса биогенных веществ Среднего и Южного Каспия и учитывая полученные данные о перемещении водных масс в глубоководных частях моря, можно наметить основные черты формирования химической основы кормности верхних слоев Каспийского моря.

В Среднем Каспии количество биогенных элементов, поступающих непосредственно с речным стоком, почти на 30% меньше, чем в Южном Каспии. В таком же соотношении находится и поступление с атмосферными осадками азотистых соединений в эти части моря. В то же время непосредственно в Средний Каспий поступают воды из северной части моря, обогащенные биогенными элементами волжского стока. Роль речного стока в обогащении биогенными элементами местных предустьевых районов в Среднем и Южном Каспии весьма существенна. Но дальнейшее большое разбавление речного стока в водных массах глубоководного Каспия сильно снижает значение местного речного стока в обеспечении фотосинтеза биогенными элементами. В рыбохозяйственных целях целесообразно путем проведения мелиоративных мероприятий использовать речной сток в Кировском и Аграханском заливах, направив туда речные воды, втекающие в настоящее время в открытое море. Избыточный приток биогенных элементов (азотистых соединений) из Северного Каспия в Средний почти равнозначен притоку биогенных элементов из рек, впадающих непосредственно в среднюю часть моря. Поступление биогенных элементов (фосфора и азота) в Средний и Южный Каспий с местным речным стоком и атмосферными осадками составляет 1—2% от количества биогенных элементов, находящихся в верхнем слое моря — слое продуктивного фотосинтеза.

Ниже приведены элементы баланса фосфора и азота в Среднем и Южном Каспии (в т).

Приход с атмосферными осадками	2,7·10 <sup>4</sup>
Сток с суши . . . . .	6,4·10 <sup>4</sup>
Приток из Северного Каспия . . . . .	3,1·10 <sup>5</sup>
Отток в Северный Каспий . . . . .	2,9·10 <sup>5</sup>
Ежегодный приход в море . . . . .	1,1·10 <sup>5</sup>

Из Северного Каспия поступает еще 3—4% избыточного количества биогенных элементов. В то же время в подстилающем зону фотосинтеза слое их содержится не менее 100% от величины биогенных элементов, содержащихся в зоне активного фотосинтеза.

Приведем элементы водного баланса глубоководного Каспия, участвующие в формировании гидрохимического режима верхнего слоя.

Верхний слой активного фотосинтеза . . . . .	7%	от объема глубоководного Каспия
Нижний слой еще возможного фотосинтеза . . . . .	16%	то же
Атмосферные осадки . . . . .	0,2%	от объема слоя фотосинтеза
Условный расчетный приток из Северного Каспия . . . . .	2,2%	то же
Условный расчетный отток в Северный Каспий . . . . .	1,6%	то же

Таким образом, основную роль в обогащении биогенными элементами верхнего слоя зоны фотосинтеза играет не только интенсивность зимнего перемешивания, но и сгонные ветры, которые поднимают водные массы с глубины до 50 м. Такое перемешивание создает благоприятные условия для более интенсивного турбулентного перемещения вверх биогенных элементов, содержащихся в морской воде нижних слоев, лежащих ниже зоны фотосинтеза. Предпосылки для перемешивания всего слоя фотосинтеза в Среднем Каспии имели место во все годы последних двух десятилетий.

Так, по гидрологическим материалам 1934 г. распределение условного удельного объема по вертикали зимой и летом в Среднем Каспии носит тот же характер, что и для средней величины всего периода наблюдений за последние 18 лет и за годы наибольшей интенсивности падения уровня моря, что видно из табл. 3.

Таблица 3

Условный удельный объем вод Среднего Каспия

Слой в м	За 1934 г.		За период 1935—1952 гг.		Годы наибольшего падения уровня (1935—1940)	
	зима	лето	зима	лето	зима	лето
0—50	0,06	1,95	0,02	2,9—3,0	0,07	2,60
50—100	0,02	0,02	0,01	0,1—0,15	0,017	0,12
100—150 } 150—200 }	0,01	0,14	0,015	0,04	0,02	0,045
200—250 } 250—300 }	0,025	0,01	0,08	0,01	0,023	0,02
300—350 } 350—400 }	—	—	0,01	0,01	0,013	—

### ВЫВОДЫ

1. В период наиболее интенсивного падения уровня Каспийского моря (1935—1940 гг.) в Среднем Каспии наблюдалось некоторое увеличение толщины слоя, захватываемого вертикальным перемешиванием, что косвенно подтверждается увеличением солености верхнего слоя воды за 1937—1940 гг.

2. Соленость поверхностного слоя воды за период с 1937 по 1940 г. увеличилась в среднем на такую же величину, как и за весь 18-летний период (1934—1952 гг.), т. е. приблизительно на 0,15‰.

3. Усиление атмосферной аэрации глубинных слоев и увеличение подъема биогенных элементов из нижних слоев могло быть только в период интенсивного снижения уровня моря. При уменьшении скорости снижения уровня начинает вновь проявляться в полной мере влияние метеорологических факторов.

4. Сезонные изменения температурного и ветрового режимов Каспийского моря имеют первостепенное значение для его вертикального водообмена.

5. Поступление питательных солей (биогенных элементов) с суши, из атмосферы и из Северного Каспия в глубоководную часть моря примерно одинаково. Однако обмен этими элементами между глубоководной и северной мелководной частями Каспия в несколько (до 10) раз больше их условного внешнего баланса.

6. Количество биогенных элементов в слоях, подстилающих зону фотосинтеза, в несколько десятков раз превышает поступление этих элементов с суши и из атмосферы.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бруевич С. В., Гидрохимия Среднего и Южного Каспия, АН СССР, 1937.
2. Бруевич С. В., Гидрохимический облик Южного Каспия, Известия Государственного географического общества, т. 68, АН СССР, 1936.
3. Будянская М., Миграция фосфора в донных отложениях Каспийского моря, Труды ГОИН, вып. 9 (17), Гидрометиздат, 1948.
4. Бруевич С. В. и Аничкова Н. И., Элементы химического баланса Каспийского моря, Труды комиссии по комплексному изучению Каспийского моря, вып. XIV, АН СССР, 1941.
5. Иванов К. И., Расчет изменений средней солености Каспийского моря в связи с изъятием части речного стока, Труды ГОИН, вып. 12, Гидрометиздат, 1953.
6. Леднев В. А., Изменение гидрологического режима южных морей при уменьшении стока рек, «Метеорология и гидрология», 1955, № 4.
7. Федосов М. В., Гидрохимия заливов Комсомолец и Кайдак, Известия АН СССР, 1940, № 5.