

Член-корреспондент НАН Украины А. Б. Полонский

Изменчивость рН в водах Черного моря в XX столетии: увеличивается ли кислотность морской воды?

Проведена оценка скорости уменьшения значения рН в водах Черного моря в XX столетии (или предполагаемого увеличения кислотности вод, обусловленного ростом концентрации углекислого газа в атмосфере) с использованием данных наблюдений 1924–2000 гг. Показано, что уменьшение величины рН действительно наблюдалось на протяжении 1980–2000 гг., несмотря на высокий уровень шумов и межгодовых флуктуаций. Скорость уменьшения рН в верхнем слое черноморских вод в этот период составляла около 0,2/10 лет. Делается вывод, что такая высокая скорость увеличения кислотности вод явилась не только результатом роста концентрации углекислого газа в атмосфере, но и следствием интенсификации восходящих движений в подповерхностном слое, приводящей к подъему вод с более низкими значениями рН.

Одним из важнейших показателей химического состава морской воды, меняющегося с увеличением парциального давления углекислого газа в атмосфере, является величина рН (фактически — индекс кислотности). Из-за антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу должно происходить уменьшение рН в водах Мирового океана. Оно отражает увеличение кислотности морской воды вследствие поглощения ею части избыточного атмосферного CO_2 . Опубликованные оценки показывают, что около 30% углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу в результате хозяйственной деятельности, поглощается Мировым океаном, что и приводит к уменьшению величины рН верхнего (деятельного) слоя вод [1, 2]. В дальнейшем это уменьшение должно распространиться и на промежуточные, и на глубинные воды. По мнению ряда исследователей [3], скорость изменения рН в океане в современную эпоху беспрецедентна и в перспективе потенциально опасна для морской биоты. Вместе с тем были выявлены резкие межгодовые изменения рН в некоторых частях Мирового океана, сопровождающие, в частности, интенсивные события Эль-Ниньо и непосредственно не связанные с антропогенной деятельностью [4]. На геологических временных масштабах ($T \sim 10^4$ лет и более) относительно быстрые изменения содержания CO_2 в атмосфере и последующее уменьшение величины рН в океане (сравнимые с современными) наблюдались, например, около 40 млн лет тому назад — в период так называемого климатического оптимума миоцена. Уровень концентрации CO_2 в атмосфере тогда был на полпорядка-порядок выше, чем сейчас, величина рН была аномально низкой, а температура воды в Мировом океане аномально высокой (как минимум на 5°C больше, чем в настоящее время). Причиной таких изменений считается резкое усиление выбросов CO_2 в атмосферу из-за интенсификации вулканической активности в этот период [5]. Таким образом, актуален вопрос об относительной роли естественных и антропогенных изменений в химическом составе не только воздуха, но и морской воды для различных временных масштабов. Причем различные факторы могут быть более или менее значимыми в различных регионах Мирового океана. Поэтому необходимо решать поставленный выше вопрос не только для открытой части океана, но и для окраинных частей морях. Для Черного моря изменение величины рН по данным длительных наблюдений во всей толще вод не анализировалось.

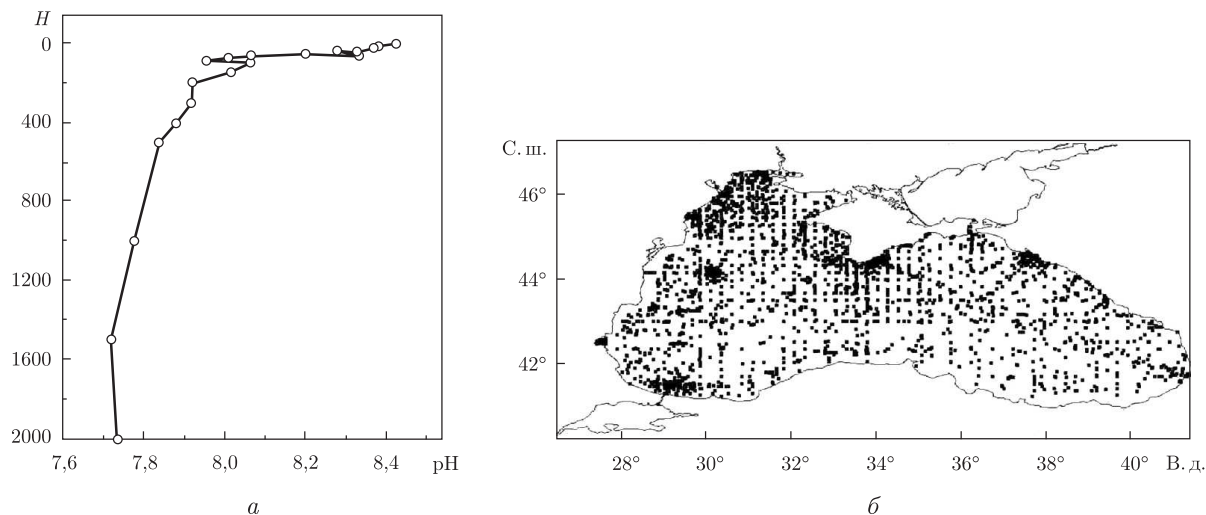


Рис. 1. Вертикальный профиль рН в Черном море (а), осредненный для каждого стандартного горизонта по всем данным. Пространственное распределение станций (б), на которых в 1924–2000 гг. проводилось определение рН

Такой анализ по данным, полученным в XX веке (начиная с 1924 г.), и составляет главную цель исследований автора настоящего сообщения.

Для анализа были использованы данные океанографического банка Морского гидрофизического института НАН Украины [6] с 1924–2000-е годы. Всего за этот период было отобрано 44 635 проб морской воды, по которым определялась величина рН от приповерхностных и до придонных горизонтов по всей акватории Черного моря (рис. 1, б). Осредненный по всему массиву данных профиль рН иллюстрирует рис. 1 а, из которого видно, что рН в верхнем слое быстро уменьшается с глубиной. Между приповерхностными горизонтами и ядром холодного промежуточного слоя (ХПС), т. е. в деятельном слое, это уменьшение достигает 0,5 (приблизительно от 8,4 до 7,9). Такая вертикальная структура вод и приводит к уменьшению рН в центрах циклонических круговоротов. Они расположены в мористой части акватории, оконтурены Основным Черноморским течением и характеризуются подъемом вод с более низкими величинами рН.

В результате сезонной и межгодовой изменчивости циркуляции и структуры вод Черного моря, а также наличия интенсивных мезомасштабных процессов наблюдается значительная изменчивость величины рН на всех горизонтах. При этом значимый линейный тренд по всему ряду данных не выделяется ни на одном горизонте (рис. 2). Частично это может быть связано с недостаточным количеством данных наблюдений при наличии пространственно-временной изменчивости рН значительной амплитуды в широком диапазоне масштабов. Это, в частности, проявляется в повышенных коэффициентах вариации величины рН в деятельном слое. Даже сезонный цикл не выделяется с достаточной точностью на всей акватории Черного моря, что приводит к значительным погрешностям при определении среднегодовой величины рН, поскольку сезонная изменчивость величины рН в поверхностном слое достигает 0,15 (в среднем по всему Черному морю) (см. рис. 3).

Основные особенности годового хода рН в деятельном и промежуточном слоях определяются сезонной изменчивостью циркуляции и структуры вод. В результате зимней интенсификации циркуляции вод Черного моря пикноклин в центральной части моря поднимает-

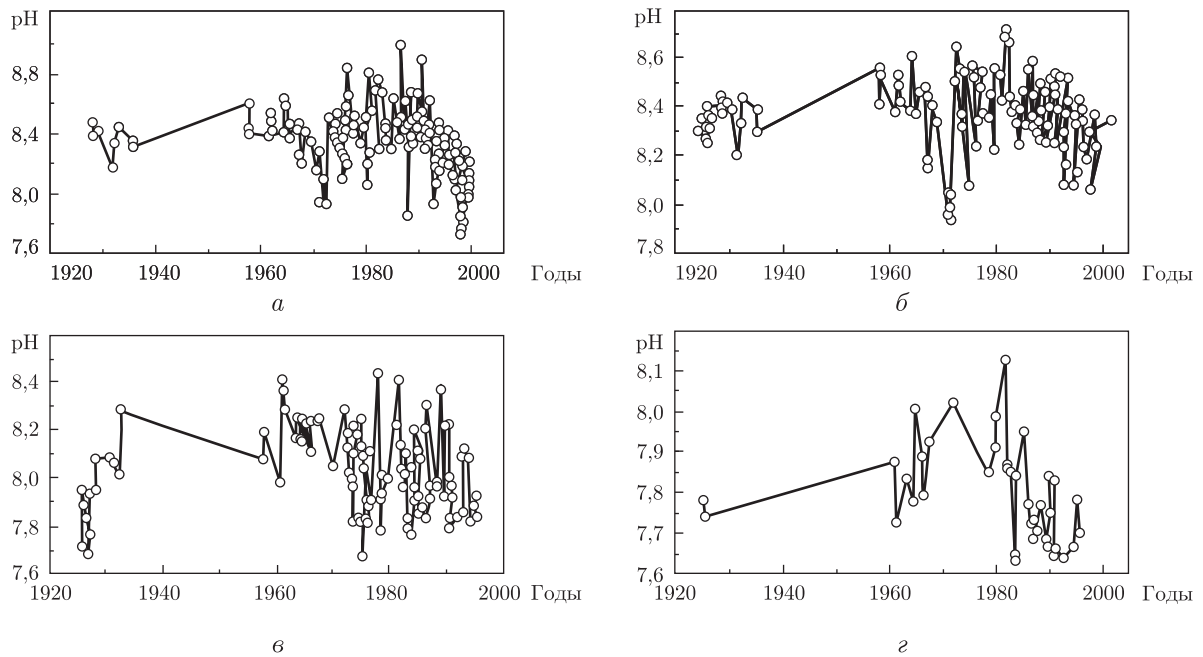


Рис. 2. Временной ход среднегодовых значений рН, осредненных по всему морю на горизонтах 0 м (а), 10 м (б), 100 м (в) и 1000 м (з)

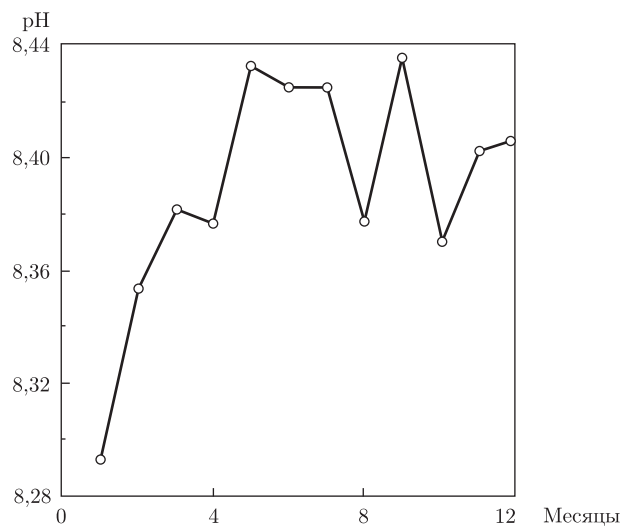


Рис. 3. Сезонный ход среднемесячных значений рН на поверхности, осредненных по всему Черному морю

ся ближе к поверхности, в основном это приводит к понижению величины рН во внутренних частях моря от лета к зиме. Причем такая закономерность наблюдается не только в деятельном слое (рис. 3), но и в промежуточных водах под ХПС (рис. 4).

Конечно, в промежуточном слое (в том числе и на горизонте 100 м) данных наблюдений существенно меньше, чем в поверхностном, сезонный сигнал слабее, а уровень мезомасштабных шумов выше. Тем не менее, сравнивая пространственное распределение рН на горизонте 100 м для зимы и лета (см. рис. 4, а и б), можно констатировать понижение величины рН в промежуточных водах внутренних частей моря в зимние месяцы.

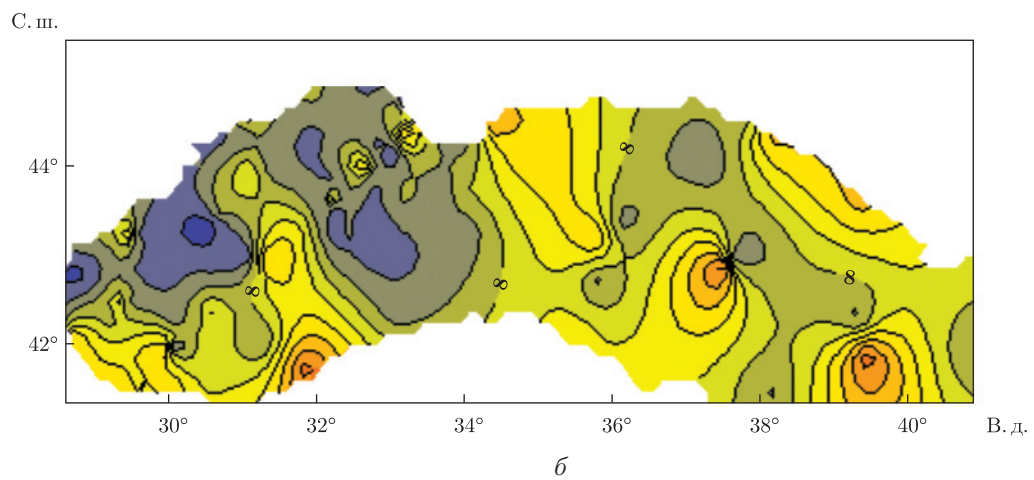
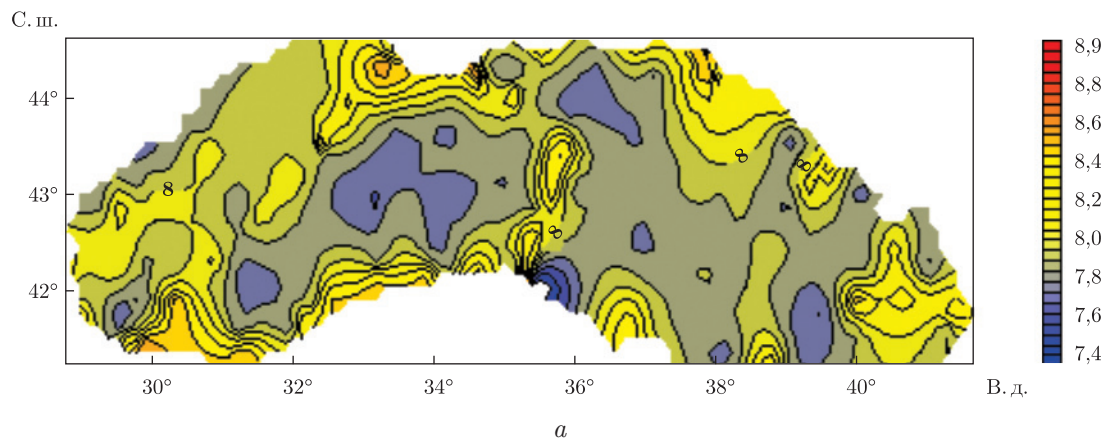


Рис. 4. Пространственное распределение рН на горизонте 100 м для февраля–марта (*a*) и августа–сентября (*b*)

Таким образом, плохое разрешение сезонного хода и высокий уровень мезомасштабных шумов могут приводить к существенным погрешностям при определении среднегодовых величин рН. Однако недостаточно хорошее разрешение годового хода рН в некоторые из анализируемых периодов XX столетия и мезомасштабные шумы не являются главными причинами невозможности выделения значимого тренда. Не менее важно наличие интенсивной межгодовой и десятилетней изменчивости рН.

Известно [7, 8], что основной причиной зимней интенсификации циркуляции вод Черного моря является осенне-зимнее усиление циклонической завихренности поля ветра в регионе, достигающей максимума в январе. Циркуляция вод наиболее интенсивна в марте-апреле, т. е. она запаздывает относительно вынуждающего действия ветра на 2–3 мес. Аналогичная закономерность (но с существенно большим временным запаздыванием) наблюдается и на десятилетнем масштабе. Завихренность в поле ветра, осредненная по десятилетиям, обнаруживает квазипериодический характер. В 1950–1960-е гг. она была минимальна, а в 1970–1980-е гг. — максимальна. В 1990-е гг. завихренность снова уменьшилась, причем амплитуда колебаний вертикальной компоненты скорости, обусловленная обсуждаемыми изменениями завихренности поля ветра, составляет порядка 10^{-6} см/с [8, 9]. С типичным запаздыванием около 5 лет рН в деятельном слое реагирует на изменчивость поля ветра. В 1990-е гг. величина рН в приповерхностном слое уменьшилась на 0,2. Таким образом, амплитуда десятилетних колебаний рН близка к амплитуде сезонной изменчивости.

Если считать, что наблюдаемые изменения рН обусловлены вариациями вертикальной компоненты вектора скорости течений, то эти изменения (десятилетнего масштаба) можно оценить в 2 м/год (или около $2 \cdot 10^{-6}$ см/с), принимая во внимание тот факт, что типичный вертикальный градиент величины рН в верхнем слое составляет 0,1/10 м (см. рис. 1). Эта оценка совпадает с оценкой десятилетней изменчивости вертикальной скорости в промежуточном слое Черного моря, выполненной в работах [8, 9] на основе совместного анализа завихренности поля ветра и термических изменений на горизонте 100 м. Для сезонного масштаба соответствующая оценка дает на порядок большую величину изменчивости вертикальной скорости (т. е. $2 \cdot 10^{-5}$ см/с), что соответствует общепринятым представлениям [7].

Таким образом, можно констатировать, что величина рН в Черном море подвержена значительным изменениям на различных пространственно-временных масштабах. На фоне этих изменений антропогенно обусловленный рост рН с временными масштабами 50–100 лет в XX веке не выделяется. Вместе с тем в последнее десятилетие прошлого столетия выделялось значительное (более чем на 0,2) уменьшение величины рН в поверхностном слое, вызванное главным образом предшествующим усилением циклонической завихренности в поле ветра и усилением восходящих движений во внутренних частях Черного моря.

Необходимо отметить, что полученный результат не доказывает отсутствие антропогенно обусловленного увеличения кислотности деятельного слоя морской воды. Сравнивая временной ход рН на поверхности и на горизонте 10 м, можно отметить, что уменьшение величины рН на поверхности в последнее десятилетие XX столетия существенно больше, чем в подповерхностном слое. Это означает, что поглощение избыточного углекислого газа водами Черного моря вносит некоторый вклад в уменьшение величины рН на десятилетнем масштабе. С увеличением концентрации CO_2 в атмосфере этот вклад может возрасти. Однако в прошлом столетии естественная изменчивость рН морской воды в регионе преобладала.

Автор выражает признательность научному сотруднику Морского гидрофизического института НАН Украины И. Г. Шокуровой за помощь в подготовке материала.

1. *IPCC4 Assessment (Topics 1, 2)*. 2007. – P. 1–14.
2. *Fierer N., Colman B. J., Schimel J. P., Jackson R. B.* Predicting the temperature dependence of microbial respiration in soil: a continental-scale analysis // *Global Biogeochem. Cycles*. – 2006. – **20**. – GB3026.
3. *Kerr R.* Ocean Acidification Unprecedented, Unsettling / *Science*. – 2010. – **328**. – P. 1500–1501.
4. *Normille D.* Hard Summer for Corals Kindles Fears for Survival of Reefs // *Ibid.* – 2010. – **329**. – P. 1001.
5. *Pearson P. N.* Increased CO₂ during Middle Miocene // *Ibid.* – 2010. – **330**. – P. 763–764.
6. *Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет* / Под общ. ред. В. Н. Еремеева. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2004. – 704 с.
7. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 4. Черное море, вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. И. Альтмана. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – 430 с.
8. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Десятилетняя изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 4. – С. 75–92.
9. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и начале XXI столетия // *Доп. НАН України*. – 2011. – № 9. – С. 103–110.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 21.06.2011

Член-корреспондент НАН України **О. Б. Полонський**

Мінливість рН у водах Чорного моря в XX столітті: чи збільшується кислотність морської води?

Проведено оцінку швидкості зменшення величини рН у водах Чорного моря в XX столітті (або передбачуваного збільшення кислотності вод, обумовленого зростанням концентрації вуглекислого газу в атмосфері) з використанням даних спостережень за період 1924–2000 рр. Показано, що зменшення величини рН дійсно спостерігалось впродовж 1980–2000 рр., незважаючи на високий рівень шумів і міжрічних флуктуацій. Швидкість зменшення рН у верхньому шарі чорноморських вод у цей період дорівнювала близько 0,2/10 років. Робиться висновок, що така висока швидкість збільшення кислотності вод стала результатом не тільки зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері, а й наслідком інтенсифікації висхідних рухів у підповерхневу шарі, яка призводить до підйому вод з більш низькими значеннями рН.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky**

Variability of pH in Black sea waters in the XX century: does the sea water acidity increase?

The goal of the paper is to assess the rate of pH decreasing for the XX century (or the expected increase of acidity due to rising the concentration of atmospheric carbon dioxide) using data of 1924–2000. It is shown that the pH decreasing really has been observed during 1980–2000 in spite of a high level of interannual fluctuations. Rate of pH decreasing in the upper layer of Black sea waters was about 0.2 per 10 yrs for this period. This is concluded that such high rate of increasing the water acidity was not only a result of rising the concentration of atmospheric carbon dioxide, but also a consequence of the intensification of upward motion in the subsurface layer leading to the rising of waters with lower pH.