ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2011, том 438, № 6, с. 803–805

ГЕОХИМИЯ

УДК 550.46

О НЕПРЯМОМ ПОГЛОЩЕНИИ ОКЕАНОМ АТМОСФЕРНОГО CO_2

© 2011 г. В. С. Савенко

Представлено академиком А.П. Лисицыным 11.05.2010 г.

Поступило 02.02.2011 г.

На протяжении нескольких последних десятилетий активно обсуждаются причины современного глобального потепления климата, которое многими связывается с усилением парникового эффекта вследствие поступления в атмосферу CO_2, образующегося при сжигании ископаемого топлива. В конце XX – начале XXI вв. мощность антропогенных выбросов CO_2 достигла 7 млрд т С/год, что соответствует 1% общего содержания CO_2 в земной атмосфере. Наблюдения показывают меньшую скорость увеличения концентрации CO_2 в атмосфере, и считается, что океаном связывается от 30 до 50% антропогенных выбросов углекислого газа [8, 9]. Наряду с этим имеются аргументы в пользу противоположной точки зрения, согласно которой океан не поглощает, а, наоборот, выделяет CO_2 в атмосферу [2, 7]. Разрешение данного противоречия связано с определением направления и интенсивности обмена CO_2 между атмосферой и океаном, что также имеет прямое отношение к одной из фундаментальных проблем геохимии, связанной с изучением геохимического цикла углерода в биосфере.

Об обмене CO_2 между океаном и атмосферой судят, как правило, по результатам измерений и расчетов потоков на границе раздела вода–воздух, не учитывая при этом еще одну одностороннюю связь, состоящую в переносе атмосферного CO_2 в океан через цепочку процессов, протекающих на суше и называемых в совокупности материковым стоком в широком смысле этого термина. В настоящей работе сделана попытка рассмотрения геохимического механизма данного процесса и его количественной характеристики.

Основой для представленных ниже оценок послужили расчеты геохимического баланса углерода в океане [2], косвенно подтвержденные в [3]. Хотя характер имеющейся геохимической информации не позволяет использовать методы математической статистики для определения точности оценок потоков углерода, некоторое представление об их достоверности можно получить из сравнения результатов разных работ. Расчеты потоков углерода [2], наиболее полно учитывающие терригенные источники углерода, согласуются, как правило, с оценками величин потоков другими авторами [10] в пределах 30–50%, что, вероятно, можно рассматривать как их точность.

Материковый сток растворенных и твердых веществ является одной из основных приходных статей геохимического баланса углерода в океане, причем разные формы углерода имеют различный генезис.

Растворенный органический углерод и большая часть взвешенного органического углерода представляют собой в той или иной степени трансформированные продукты фотосинтеза наземных растений, использующих атмосферный CO_2:

$$CO_2 + H_2O = CH_2O + O_2. \quad (1)$$

Сток растворенного органического углерода, согласно [2, 3], составляет 225 млн т С/год. Долю атмосферного CO_2 во взвешенном органическом углероде можно определить, зная содержание $C_{орг}$ в речных взвесях и оценив содержание устойчивого $C_{орг}$, первоначально входившего в состав подвергшихся выветриванию горных пород. Будем считать, что твердые вещества в материковом стоке представлены на 80% продуктами выветривания осадочных пород и на 20% – кристаллических пород в соответствии с относительной площадью их выходов на поверхности суши [4]. При содержании $C_{орг}$ в осадочных и кристаллических породах соответственно 0.48 и 0.05% [1] вклад литогенного $C_{орг}$ составляет ~0.39%. В речных взвесях содержится 2% $C_{орг}$ [6], откуда следует, что ~80% органического углерода в материковом стоке твердых веществ синтезировано за счет атмосферного CO_2. Следовательно, из общего стока взвешенного органического углерода, равного 645 млн т С/год [3], примерно 516 млн т С/год заимствовано из атмосферы.

Значительная часть растворенного неорганического углерода в материковом стоке, который практически полностью представлен гидрокарбонат-ионами (HCO_3^-) и свободной углекислотой

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Таблица 1. Вынос растворимых продуктов выветривания с разными генетическими составляющими материкового стока, млн т/год [5]

Компонент	Растворение эвапоритов	Окисление сульфидов	Растворение карбонатов	Выветривание силикатов	Всего
Na^+	80	–	–	101	181
K^+	–	–	–	60	60
Mg^{2+}	–	13	52	102	167
Ca^{2+}	18	146	404	83	651
Cl^-	117	–	–	–	117
$S{-}SO_4^{2-}$	14	135	–	–	149
$C{-}HCO_3^-$	–	–	289 (293)	218 (222)	507 (515)

Примечания. Расчетные величины потоков неорганического углерода, полученные исходя из стехиометрии реакций растворения карбонатных пород и выветривания силикатов, приведены в скобках. При этом расхождение с фактической величиной суммарного потока неорганического углерода составляет 8 млн т С/год, или 1.6%. Принятые значения (цифры без скобок) определены из фактической величины суммарного стока неорганического углерода (507 млн т С/год) и расчетных долей потоков растворения карбонатов (57%) и силикатов (43%).

(растворенным диоксидом углерода), также имеет атмосферное происхождение.

Выветривание карбонатных пород сопровождается поглощением из атмосферы эквимолярных количеств CO_2, в результате чего образуются растворимые гидрокарбонаты, половина которых является продуктом растворения твердой фазы, а другая половина поглощается из атмосферы:

$$Ca_{1-x}Mg_xCO_3 + H_2O + CO_2 \downarrow = \\ = (1-x)Ca^{2+} + xMg^{2+} + 2HCO_3^-. \quad (2)$$

При выветривании силикатов переход в растворенное состояние щелочных и щелочноземельных элементов также сопровождается образованием гидрокарбонат-ионов, углерод которых полностью заимствован из атмосферы:

$$2Na_{1-x}Ca_xAl_{1+x}Si_{3-x}O_8 + \\ + 2(1+x)CO_2 \downarrow + 3(1+x)H_2O = \\ = (1+x)Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2xCa^{2+} + 2(1-x)Na^+ + \\ + 2(1+x)HCO_3^- + 4(1-x)SiO_2. \quad (3)$$

Исходя из расчетов выноса растворимых продуктов выветривания с разными генетическими составляющими материкового стока (табл. 1) можно заключить, что из 507 млн т С/год всех гидрокарбонатов атмосферное происхождение имеют 145 и 218 млн т С/год, образующихся соответственно при выветривании карбонатных и силикатных пород, что в сумме дает 363 млн т С/год, или 71.6%. Кроме того, атмосферный генезис имеет растворенная углекислота, поступающая в океан с материковым стоком в количестве 86 млн т С/год [2]. Отсюда следует, что из 507 + 86 = 593 млн т С/год стока растворенного неорганического углерода 363 + 86 = 449 млн т С/год (75.7%) обеспечивается атмосферным CO_2.

Поступление карбонатного углерода в океан (142 млн т С/год [3]) осуществляется также в составе твердых веществ материкового стока, в которых, несомненно, присутствует некоторое количество автохтонного $CaCO_3$ – производного атмосферного CO_2. Оценить это количество довольно сложно из-за недостатка информации, однако, по-видимому, оно незначительно, поскольку наиболее благоприятные условия для автохтонного карбонатонакопления создаются в областях аридного и семиаридного климата, роль которых в формировании материкового стока невелика. Исходя из этого, карбонатный углерод в стоке твердых веществ не следует связывать с атмосферным CO_2 и скорее можно рассматривать как остатки нерастворившихся карбонатных пород, подвергшихся выветриванию. Не связан с атмосферным источником и поток CO_2, обусловленный дегазацией базальтовых магм (54 млн т С/год [3]).

Результаты приведенного выше анализа генетической структуры материкового стока углерода интересно сопоставить с расчетами геохимического баланса углерода в океане (табл. 2). Оказывается, что опосредованное поступление в океан атмосферного CO_2 в составе растворенных и твердых продуктов материкового стока (1190 млн т С/год) в 2 раза превышает суммарный вынос углерода через границу океан–атмосфера (610 млн т С/год) в форме CO_2 (584 млн т С/год) и органических веществ (26 млн т С/год).

Таким образом, на основании изложенного выше можно утверждать, что атмосферный CO_2 связан с карбонатной системой океана не только процессами газообмена на границе раздела вода–воздух, поскольку поступление CO_2 в океан происходит также опосредованным путем через цепочку сопряженных геохимических процессов на суше в составе материкового стока растворенных

Таблица 2. Баланс углерода в современном океане, млн т С/год

Статья баланса	$C_{неорг}$	$C_{орг}$	ΣC
	Поступление		
Материковый сток растворенных веществ	593 (449)	225 (225)	818 (674)
Материковый сток твердых веществ	142 (0)	645 (516)	787 (516)
Дегазация базальтовых магм	54 (0)	–	54 (0)
ИТОГО	789 (449)	870 (741)	1659 (1190)
	Выведение		
Осадкообразование	883	166	1049
Вынос в атмосферу	584*	26	610
ИТОГО	1467	192	1659

Примечание. Потоки углерода приведены согласно [3]; в скобках даны оценки непрямого поступления атмосферного CO_2, сделанные в настоящей работе. * – оценено по разности приходных и расходных статей геохимического баланса углерода в современном океане [3].

и твердых веществ. В материковом стоке доля “атмосферного углерода” достигает 70% его общего потока и составляет около 1190 млн т С/год. Учет непрямого поглощения океаном атмосферного CO_2 снимает отмечавшееся в [2] противоречие между данными о распределении антропогенных выбросов CO_2 в системе океан–атмосфера и расчетами геохимического баланса углерода в океане.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11–05–00866).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.* Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 181 с.
2. *Савенко В.С.* // Геохимия. 1995. № 11. С. 1634–1642.
3. *Савенко В.С.* // Геохимия. 2000. № 3. С. 350–352.
4. *Савенко В.С.* Глобальные изменения природной среды-2001. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 274–287.
5. *Савенко В.С.* // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2005. № 5. С. 5–11.
6. *Савенко В.С.* Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: Геос, 2006. 175 с.
7. Oceans Can’t Absorb Carbon Dioxide // Geotimes. 1992. V. 37. № 9. P. 6–7.
8. Quantifying the Uptake of Fossil Fuel Carbon Dioxide by the Oceans, 40 Years of Research 1964–2004 // Ann. Rept. Roy. Neth. Inst. Sea Res. 2004. P. 91–95.
9. *Quay P.D., Tilbrook B., Wong C.S.* // Science. 1992. V. 256. № 5053. P. 74–79.
10. Treatise on Geochemistry. V. 9. Biogeochemistry / W.H. Schlesinger. Ed. L.: Elsevier, 2003. 682 p.