

# ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ГЛОБАЛЬНОГО БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА

## OPTIMIZATION OF THE GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CARBON CYCLE MODEL

**I. Timofeeva  
M. Kustikova**

*Summary.* The article considers possible anthropogenic carbon sources and migration ways that were not previously included in the global biogeochemical cycle. Complementing the carbon cycle model is important for clarifying the scenarios awaiting the Earth.

*Keywords:* carbon cycle, anthropogenic factor, plastic, plastic cycle.

**Тимофеева Ирина Валерьевна**

Преподаватель, ФГФОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»  
ivtimofeeva@itmo.ru

**Кустикова Марина Александровна**

К.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»  
marinakustikova@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрены возможные антропогенные источники углерода и пути их миграции ранее не включенные в глобальный биогеохимический цикл. Дополнение модели цикла углерода важно для уточнения сценариев ожидающих Землю.

*Ключевые слова:* круговорот углерода, антропогенный фактор, пластик, круговорот пластика.

## Введение

**В**се органические соединения включают углерод в свой состав, поэтому с уверенностью можно сказать «Жизнь на Земле основана на углероде». Атомы углерода постоянно мигрируют в биосфере, а глобальный биогеохимический цикл углерода является жизнеобеспечивающим.

Основные запасы углерода на Земле представлены диоксидом углерода и находятся в газообразном и в растворенном виде в Мировом океане. Однако при формировании сбалансированной схемы потоков оказывается, что примерно 27% стока углерода из атмосферы остаются неопределенными. При этом замкнутость, например, круговорота углерода по стокам и источникам составила 80–85%. [2] Это означает, что неопределенность сбалансированности глобального цикла углерода составляет 15–20%.

В трудах академика В.И. Вернадского сформулировано представление о человечестве как о глобальной геологической силе. Он полагал, что антропогенное усиление миграции веществ в биосфере является закономерным процессом и находится в полном соответствии с установленными биогеохимическими принципами. [3] В исследованиях А.А. Баренбаума, К.Я. Кондратьева и В.Ф. Крапивина указано на необходимость уточне-

ния биогеохимической модели круговорота углерода в окружающей среде. [1, 2, 6–8]

С середины XX века было произведено более 8,3 миллиарда тонн пластиков, которые разрушаясь превращаются в микро- и наночастицы, что может стать одним из резервуаров углерода на планете. Глобальный биогеохимический цикл углерода является объектом исследования в международных и национальных научных программах и определяется как жизнеобеспечивающий.

В современных сбалансированных моделях цикла углерода учитываются антропогенные выбросы углеродсодержащих веществ, однако остаются без внимания поступления в компоненты окружающей среды пластиков. Реализуемая в рамках глобального углеродного проекта GCP (Global Carbon Project) программа контроля потоков углерода в условиях развития современной цивилизации учитывает антропогенную эмиссию CO<sup>2</sup> и эквивалентов, но пренебрегает углеродом, содержащимся в пластике, основой производства которых является нефть. [8] Доля стока углерода в имеющихся моделях остается необъяснимой, что в значительной мере снижает доверие к существующим сценариям ожидающих Землю.

Актуализация модели круговорота углерода с учетом пластиковых полимеров позволит повысить точность

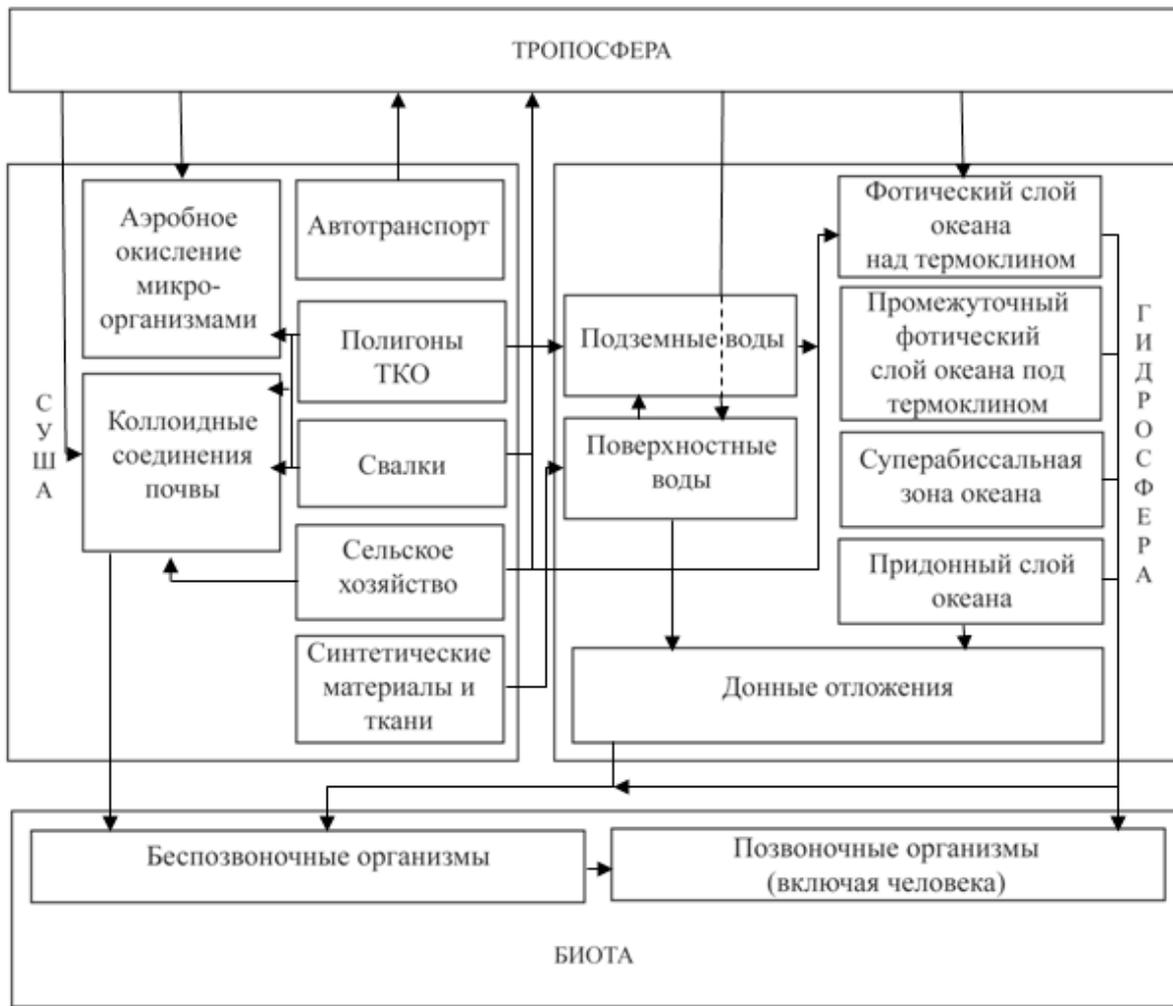


Рис. 1. Глобальный цикл пластиковых углеводов в системе атмосфера-гидросфера-суша-биота.

прогнозов протекания биогеохимических процессов на планете.

### Основная часть

Описание антропогенных модификаций всех биогеохимических циклов осуществляется по одной схеме. Первично количественно оцениваются формы антропогенной деятельности, которые способны активировать миграцию соединений ключевого элемента цикла, в данном случае — углерода, а также описываются изменения некоторых резервуаров и стоков. Следующим шагом является построение балансовой схемы, основными связями которой являются входящие и исходящие потоки элемента в модели суша-атмосфера-океан.

Большое внимание в настоящее время уделяется расчетам антропогенной эмиссии CO<sup>2</sup> и эквивалентов. Однако поступление пластиковых частиц в атмосферу,

почву и океан может представлять серьезную проблему для биосферы, а также оказать неблагоприятное воздействие на экономические процессы. [4]

Объемы производства пластика увеличиваются пропорционально добыче нефти и сокращения его производства не предвидится. Из общего количества 8,3 млрд. т, более половины было произведено за последние 10 лет. Основные оценочные данные по влиянию микро- и нанопластиков на компоненты окружающей среды приведены в многочисленных статьях и объединены в отчет группы экспертов GESAMP Международной морской организации (ИМО). [15, 5, 13]

Накопленные данные и количественные характеристики позволяют провести анализ и дополнить базовую модель. Между атмосферой, педосферой и гидросферой происходит постоянный интенсивный обмен углеродом, носящий самоорганизующийся характер. Согласно

принципу Ле Шателье, содержание подвижного углерода в системе стремится к устойчивому соотношению между отношением общего количества подвижного углерода в резервуаре к среднему времени пребывания в системе с константой, характеризующей скорость круговорота углерода. Если условие выполняется, то выход углерода из резервуара системы компенсируется его поступлением из других резервуаров. Если условие не выполняется, то в системе возникают нескомпенсированные перетоки.

Для расчета всех потоков углерода необходимо учитывать пространственные и временные характеристики. Современный уровень знаний позволяет решить задачу лишь частично, но благодаря высокоточным методам идентификации веществ в компонентах окружающей среды, модель может уточняться, тем самым позволяя уменьшить интервал неопределенности в прогностических моделях будущего Земли.

Среди всех факторов, влияющих на перераспределение углерода на планете, наиболее важную роль отводят переносу углерода метеогенными водами и хозяйственной деятельностью человека. Благодаря первому фактору избыточный углерод на континентах поступает с метеогенными водами под земную поверхность. [2]

Образование крупных осадочных бассейнов происходит чаще в разломах земной коры. Наличие разломов, с одной стороны, облегчает проникновение метеогенных вод под поверхность Земли, а с другой — способствует разгрузке этих вод от транспортируемого ими углерода. [1] Данный факт свидетельствует о том, что круговорот углерода нельзя изучать изолированно от круговорота воды.

С учетом высказанных выше предположений, для оптимизации потоков углерода и снижения неопределенности сбалансированности глобального цикла за основу может быть взята общая схема круговорота углерода [4]

### Базовая модель

Схема глобального цикла пластиковых углеводородов в системе атмосфера–гидросфера–суша–биота (рис. 1) отражает обмены углеродом на границах атмосферы с земными покровами, акваториями и биотой.

Потоки пластиковых углеводородов  $C_i$  являются функциями температуры, географических координат и других характеристик окружающей среды.

Основными источниками пластика в окружающей среде являются потребительские товары с коротким сроком службы, синтетические ткани, агрокультурная

мульчирующая пленка, шлам, резиновая крошка от стирания автомобильных шин.

Микрочастицы пластика, поступающие в атмосферу, могут выступать в качестве ядер конденсации. Конденсация на ядрах с радиусами порядка  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  м происходит без существенного перенасыщения. Частицы пластика представляют собой устойчивые соединения, которые длительное время могут находиться в составе аэрозолей, переноситься воздушными потоками на дальние расстояния, а также с осадками поступать в почву и водные объекты. Также пластиковые частицы из приземного слоя атмосферы могут подвергаться аэробному окислению микроорганизмами.

В почвах частицы размером  $10^{-9}$ – $10^{-7}$  м включены в коллоидные системы. Коллоидные примеси из атмосферных осадков представляют собой очень мелкие агрегаты, благодаря большой удельной поверхности они обладают значительной поверхностной энергией и высокой адсорбционной емкостью. Микропластиковые частицы способны адсорбировать на своей поверхности многие загрязняющие вещества, таким образом, аккумулируя их. Данный факт негативно сказывается как на росте и развитии растительности, так и на педофауне. [14, 12] Почвообразование без живых организмов, особенно мезофауны, которая выполняет очень важную функцию по измельчению органической массы и её превращению в гумус, не возможна. В случае сокращения численности дождевых червей, например, почва постепенно разрушится, потеряет гумус, снизится урожайность.

Из почвы микропластик поступает в подземные и поверхностные воды. Маргинальные фильтры в зонах смешения речных и морских вод в устьях рек флокулируют и коагулируют значительную часть растворенных (коллоидных) и взвешенных веществ. Кроме седиментации и сорбции происходит биоассимиляция и биофильтрация. Благодаря маргинальному фильтру в этой зоне откладывается до 95% взвешенных и около 40% коллоидных веществ речного стока, включая микропластик. [11] В океанах пластики концентрируются в фотическом слое над термоклинном, постепенно деградируют и, мигрируя через глубокие слои, достигает придонного слоя, накапливаясь в донных отложениях.

Микрочастицы пластика имеют широкий спектр размерных групп и низкую плотность, в результате чего многие активно питающиеся живые организмы воспринимают их как источник пищи, а организмы с пассивным типом питания, например, фильтраторы, вынуждены поглощать пластик из среды. Поскольку пластик не расщепляется их ферментативной системой, само по себе проглатывание пластика представляет угрозу для них и может вызывать летальный исход. Особое опасение

вызывает адсорбционная способность пластиков и поступление с частицами в организм высоких доз загрязнителей. В исследованиях также отмечается высокая вероятность ассимиляции и миграции микропластиков по трофическим цепям, включая человека. [9, 10]

## Выводы

В заключение следует отметить, что замыкание потоков углерода в окружающей среде должно учитывать

потоки обусловленные миграцией частиц пластиков. Их не всегда можно спрогнозировать, но с помощью модельных экспериментов открывается возможность для дальнейших целенаправленных исследований биогеохимического цикла углерода с учетом влияния поступления пластиковых частиц в атмосферу, почву, океан и биоту. Разработка структуры модели, учитывающий дополнительный антропогенный источник углерода, позволит точнее характеризовать потоки углерода между резервуарами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баренбаум, А. А. Механизмы самоорганизации при глобальном геохимическом круговороте вещества на Земле // Синергетика. — М.: МГУ. — 2000. — № 3. — С. 275–295.
2. Бурков Д.В., Крапивин В. Ф., Шалаев В. С. Сбалансированная модель глобального биогеохимического круговорота углерода // Лесной вестник. — 2012. — № 9. — С. 86–94.
3. Вернадский В. И. Научная мысль как планетное явление / А. Л. Яншин. — М.: Наука. — 1991.
4. Дегерменджи, А.Г., Барцев С. И. Глобальные малоразмерные модели динамики и устойчивости биосферы // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. — 2003. — № 7. — С. 32–49.
5. Козловский Н.В., Блиновская Я. Ю. Микропластик — макропроблема Мирового океана // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2015. — № 10–1. — С. 159–162.
6. Кондратьев К.Я., Крапивин В. Ф. Глобальный круговорот углерода и климат // Исследование Земли из космоса. — 2003. — № 1. — С. 3–15.
7. Кондратьев, К. Я. Моделирование глобального круговорота углерода / К. Я. Кондратьев, В. Ф. Крапивин. — М.: Физматлит. — 2004. — 336 с.
8. Крапивин В.Ф., Шалаев В. С., Бурков Д. В. Моделирование глобальных циклов углерода и метана // Лесной вестник. — 2015. — № 1. — С. 170–178.
9. Саванина Я.В., Барский Е. Л., Фомина И. А., Лобакова Е.С Загрязнение водной среды микропластиком: воздействие на биологические объекты, очистка // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2019. — № 2. — С. 54–57.
10. Browne M.A., Niven S. J., Galloway T. S., Rowland S. J., Thompson, R. C. Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity // Current Biology. — 2013. — V. 23 (23). — P. 2388–2392.
11. Browne M.A., Crump P., Niven S. J. et al. Accumulations of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // Environ. Sci. Technol. — 2011. — V. 45. — P. 9175–9179.
12. Defu He, Yongming Luo, Shibo Lu Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks// TrAC Trends in Analytical Chemistry. — 2018. — V.109. — P. 163–172.
13. Ivar do Sul J. A., Costa M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment // Environmental Pollution. — 2014. — V. 185. — P. 352–364.
14. Rilling M. C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? // Environ. Sci. Technol. — 2012. — V. 46. — P. 6453–6454.
15. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. GESAMP (Kershaw, P. J., ed.). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP. V. 90. 2015. 96 p.

© Тимофеева Ирина Валерьевна ( ivtimofeeva@itmo.ru ), Кустикова Марина Александровна ( marinakustikova@mail.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»