

УДК 550.42:551.14

DOI 10.31087/0016-7894-2020-3-71-77

Фотосинтез и оценки баланса углерода в глобальном цикле углерода

© 2020 г. | А.А. Ивлев

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева», Москва, Россия; aa.ivlev@list.ru

Поступила 26.04.2020 г.

Доработана 30.04.2020 г.

Принята к печати 06.05.2020 г.

Ключевые слова: фотосинтез; ассимиляция углекислого газа; фотодыхание; орогенические циклы; экологическая точка компенсации; литосферные плиты; зона субдукции; термохимическая сульфатредукция.

Аннотация: Ключевая роль и особенности глобального фотосинтеза как интегральной характеристики совокупности фотосинтезирующих организмов в глобальном цикле углерода рассмотрены в рамках предложенной новой модели цикла. Показано, что участие глобального фотосинтеза обеспечивает накопление осадочного органического вещества в земной коре и кислорода в атмосфере. Получено уравнение, описывающее фотосинтез в глобальном цикле углерода, которое применено для углеродного баланса цикла. На основе модели углеродного цикла сделана попытка оценить мировой начальный суммарный ресурс нефти. Результаты показывают, что оценки начальных суммарных ресурсов нефти хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью геологических моделей. Такая согласованность свидетельствует не только о разумности физической идеи, лежащей в основе модели, но и означает, что в рамках этой модели нет места для представления о неорганическом или каком-либо ином происхождении нефти.

Для цитирования: Ивлев А.А. Фотосинтез и оценки баланса углерода в глобальном цикле углерода // Геология нефти и газа. – 2020. – № 3. – С. 71–77. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-3-71-77.

Photosynthesis and carbon balance estimates in the global carbon cycle

© 2020 | A.A. Ivlev

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia; aa.ivlev@list.ru

Received 26.04.2020

Revised 30.04.2020

Accepted for publication 06.05.2020

Key words: photosynthesis; CO₂ assimilation; photorespiration; orogenic cycles; ecological compensation point; lithospheric plates; subduction zone; thermochemical sulfate reduction.

Abstract: The key role and features of global photosynthesis as an integral characteristic of an ensemble of photosynthetic organisms in the global carbon cycle are considered within the framework of the proposed new cycle model. It is shown that the participation of global photosynthesis ensures the accumulation of sedimentary organic matter in the earth's crust and oxygen in the atmosphere. An equation describing photosynthesis in the global carbon cycle is obtained and applied to the carbon balance of the cycle. Based on the carbon cycle model, an attempt is made to estimate the total global initial oil resources. The results show that estimates of the total initial oil resources are in good agreement with the results obtained using geological models. This consistency is not only indicative of the reasonableness of the physical idea underlying the model, but also means that there is no place for the idea of an inorganic or any other origin of oil within the framework of the model.

For citation: Ivlev A.A. Photosynthesis and carbon balance estimates in the global carbon cycle. *Geologiya nefi i gaza*. 2020;(3):71–77. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-3-71-77. In Russ.

Введение

Новая модель глобального цикла углерода, связывающая движение литосферных плит с процессами фотосинтеза в биосфере [1, 2], позволяет описать процессы накопления и преобразования ОВ в осадочных породах. Эти процессы рассматриваются как часть глобального цикла углерода, в котором фотосинтез играет ключевую роль. Это означает, что, являясь единственным источником прироста биомассы, фотосинтез обеспечивает накопление ОВ в земной коре и аккумуляцию кислорода в атмосфере. Чтобы показать эту связь и возможность ее исполь-

зования для объяснения накопления осадочного ОВ и его влияния на генезис нефти, необходимо обосновать применимость уравнения фотосинтеза к описанию этого процесса в глобальном углеродном цикле.

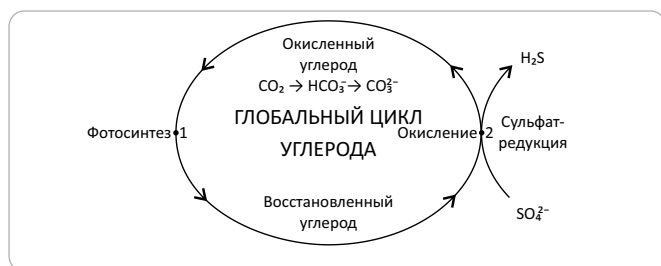
Модель глобального углеродного цикла. Основные положения

Модель основывается на известной геологической концепции — концепции мобилизма [3, 4]. Постулируется, что литосферные плиты непрерывно двигаются благодаря конвективным потокам в магме, по поверхности которой они перемещаются. Дви-



DISCUSSIONS

Рис. 1. Схема глобального редокс-цикла биосферного углерода
Fig. 1. Scheme of global redox-cycle of biosphere carbon



жение плит напоминает эскалатор. В одном месте Земли магма прорывается на поверхность, застывает и толкает соседние плиты, вызывая движение. В другом месте плиты сталкиваются, одна из них уходит вниз и поглощается магмой. Движение неравномерное, состоящее из короткой быстрой фазы и длительной медленной. Короткая быстрая фаза, называемая «орогенным периодом», приходится на столкновения плит в зоне субдукции, где одна из плит поглощается магмой, другая поднимется вверх, приводя к горообразованию, сопровождаемому интенсивными вулканизмом и магматизмом.

При столкновении плит выделяется большое количество энергии. Если одна из плит является континентальной и несет на себе осадочный материал, то ОВ в нем окисляется за счет энергии столкновения плит и участия сульфатов, превращаясь в CO_2 . Такой процесс описывается термохимической сульфатредукцией. Источником сульфатов является гипс, образовавшийся из морской воды. Термохимическая сульфатредукция — процесс, при котором происходит сопряжение упоминавшихся геологических процессов с циклом биосферного углерода. С него начинается круговорот углерода, который рассматривается как окислительно-восстановительный процесс (рис. 1). Углерод из окисленного состояния, в котором он находится в природной углекислотно-карбонатной системе, переходит в восстановленное состояние посредством фотосинтеза. Обратное в окисленное состояние углерод возвращается при процессах дыхания в биосфере, аэробных и анаэробных процессах окисления в земной коре. Завершается круговорот в упомянутой реакции термохимической сульфатредукции, происходящей в зоне субдукции.

Углекислый газ — продукт окисления органического углерода, образовавшийся в зоне субдукции — поднимается на поверхность, попадая в атмосферу и гидросферу. Солнечный свет, CO_2 и вода при наличии фотосинтезирующего аппарата, созданного в процессе эволюции, обеспечивают фотосинтез на Земле. Развитие фотосинтеза привело к климатическим, атмосферным изменениям и биотическому круговороту. Изменения заключались в следующем. Высокие концентрации CO_2 , благодаря парниковым свойствам, обеспечивали на Земле высокую температуру. Один из продуктов сульфатредукции, серо-

водород, и восстановленные изверженные породы, которые поднимались на поверхность Земли вместе с вулканическими газами и магмой, забирали из атмосферы почти весь кислород, делая ее анаэробной или низкокислородной.

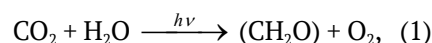
За орогенным периодом следовал длительный тектонически спокойный геосинклинальный период. В это время на Земле ключевую роль играл фотосинтез, который сопровождался снижением концентрации CO_2 и увеличением в атмосфере содержания кислорода. Этот тренд усиливался на протяжении всего геосинклинального периода, что приводило к постепенному похолоданию и появлению аэробных условий. К концу этого периода наступало оледенение и достигались самые высокие концентрации O_2 .

Описанные климатические изменения привели к биотическому круговороту, который заключался в том, что в орогенный период были распространены термофильные и анаэробные организмы, а в геосинклинальный период они замещались холодостойкими и аэробными организмами. Следует подчеркнуть, что орогенный и геосинклинальный периоды вместе составляли орогенический цикл.

При смене циклов из-за резких климатических изменений происходило массовое вымирание живых организмов. Это сопровождалось поступлением огромного количества биогенного материала в осадок, что в конечном счете приводило к накоплению толщ, богатых ОВ (черные сланцы, баженины, доманикоиды) [5]. Последние становились источником для образования крупных УВ-скоплений.

Глобальный фотосинтез и его роль в крупных природных системах

Фотосинтез любого фотосинтезирующего организма обычно описывается выражением, которое формально изображает процесс в виде реакции



где субстраты CO_2 и H_2O берутся из окружающей среды; (CH_2O) формально обозначает продукт фотосинтеза, биомассу, образующуюся в эквимольном соотношении с другим продуктом реакции — кислородом. Возникает вопрос, можно ли таким простым образом описать глобальный фотосинтез для таких крупных систем, как биосфера или глобальный цикл углерода.

Из определения фотосинтеза понятно, что левая часть уравнения (1) во всех случаях всегда одна и та же. Это CO_2 и H_2O , которые берутся из окружающей среды, а из них с помощью солнечного света образуются продукты реакции. Остается понять, что в этом случае представляют продукты фотосинтеза в больших системах.

Уравнение глобального фотосинтеза в биосфере

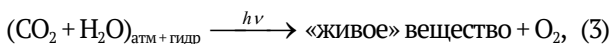
В.И. Вернадский, рассматривая биосферу и ее взаимодействие с земной корой, ввел представление

о «живом» веществе [6]. Под ним он понимал общую биомассу живых организмов на Земле. Но на Земле обитают как автотрофные, так и гетеротрофные организмы. Автотрофные организмы делятся на хемосинтезирующие и фотосинтезирующие. Автор статьи здесь и в дальнейшем биомассу нефотосинтезирующих организмов принимает ничтожной по сравнению с биомассой фотосинтезирующих, тогда без ее учета:

«живое» вещество = биомасса фотосинтезирующая + биомасса гетеротрофная. (2)

Покажем, что «живое» вещество в целом можно считать продуктом фотосинтеза, потому что гетеротрофную часть биомассы тоже можно относить к фотосинтетическим продуктам. Действительно, гетеротрофная биомасса образуется за счет фотосинтезирующей биомассы или за счет другой гетеротрофной биомассы, которая образовалась через потребление фотосинтезирующей, т. е. в конечном счете источником энергии и углерода при образовании любой гетеротрофной биомассы является фотосинтезирующая биомасса. При этом кислород, который всегда сопровождает образование биомассы при фотосинтезе, в том числе на стадии предшествующей гетеротрофной ассимиляции, никуда не исчезает, а сохраняется в атмосфере. Другими словами, гетеротрофную биомассу можно считать продуктом фотосинтеза, но в этом случае биомасса и образуемый параллельно ей кислород на догетеротрофной стадии оказываются разделенными процессами в пищевых цепочках. Поэтому фотосинтезирующую биомассу автор статьи назвал «продуктом фотосинтеза I рода», а гетеротрофную биомассу — «продуктом фотосинтеза II рода».

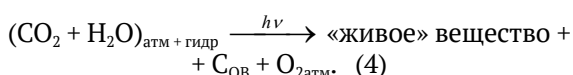
В этом случае уравнение глобального фотосинтеза для биосферы можно представить как



где в правой части уравнения в качестве аналога фотосинтезируемой биомассы выступает «живое» вещество, которое включает фотосинтезирующую и гетеротрофную биомассу, а эквивалентное количество кислорода поступает в атмосферу.

Уравнение глобального фотосинтеза в глобальном цикле углерода

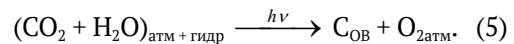
Фотосинтез в углеродном цикле можно описать уравнением



Левая часть уравнения аналогична уравнению (3). В правой части два первых слагаемых являются аналогом биомассы. Второе слагаемое учитывает преобразованную биомассу организмов, обитавших в прошлом. Последний член соответствует кислороду атмосферы, накопленному как за счет организмов, существующих в данный момент, так и за счет орга-

низмов, обитавших в прошлом от начала происхождения фотосинтеза до данного момента.

Если предположить, что масса «живого» вещества, существующего в данный момент, значительно меньше массы ОВ, накопленного в осадочных породах за все время геологической истории вплоть до данного момента, то выражение (4) можно упростить, представив его в виде [7]



При анализе традиционного фотосинтеза (1), рассматривая его как химическую реакцию I порядка, динамику характеризовали два признака:

- противофазное изменение концентрации субстрата CO_2 и ее продукта (O_2 или биомассы);
- синфазное изменение концентраций обоих продуктов — O_2 и биомассы.

Противофазные вариации концентраций CO_2 и O_2 в атмосфере неопротерозоя и фанерозоя наблюдаются при изучении их изменений с помощью геологических моделей (рис. 2). Синфазные изменения были установлены для скорости накопления кислорода в атмосфере и скорости захоронения ОВ в осадке, также полученных с помощью геологических моделей (рис. 3). Упомянутые величины можно считать аналогами продуктов глобального фотосинтеза.

Следовательно, представленные корреляции можно рассматривать как аргумент в пользу применимости уравнения глобального фотосинтеза (5) к анализу глобального цикла углерода.

Глобальный фотосинтез и самопроизвольное стремление углеродного цикла к достижению стационарного состояния с ростом концентрации O_2 в атмосфере. Экологическая точка компенсации

Можно сделать вывод, что глобальный фотосинтез, участвуя в углеродном цикле, отражает интегральный эффект всех живущих и живших фотосинтезирующих организмов на Земле. Из изложенного также следует, что в ходе эволюции глобальный фотосинтез развивался в режиме пульсаций, т. е. в каждом орогеническом цикле он вначале усиливался, а затем ослабевал. Поэтому, чтобы описать накопление ОВ в осадке с помощью уравнения фотосинтеза, необходимо рассмотреть как будут меняться его характеристики, усредненные по орогеническим циклам. Усредняя характеристики, мы получаем непрерывное увеличение концентрации кислорода во времени и можем проследить его влияние на фотосинтез, на эволюцию цикла и на то, как менялась сама атмосфера в ходе геологического времени.

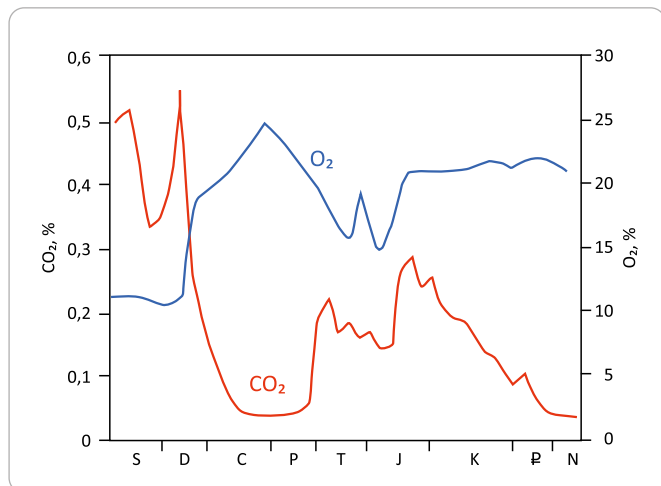
Основываясь на аналогии свойств традиционного фотосинтеза индивидуального организма и глобального фотосинтеза, можно утверждать, что глобальный фотосинтез обладает двумя реципрокными



DISCUSSIONS

Рис. 2. Противофазные изменения усредненных по времени концентраций CO_2 и O_2 в системе атмосфера – гидросфера [8]

Fig. 2. Counter-phase variations of time-averaged CO_2 and O_2 concentrations in atmosphere – hydrosphere system [8]

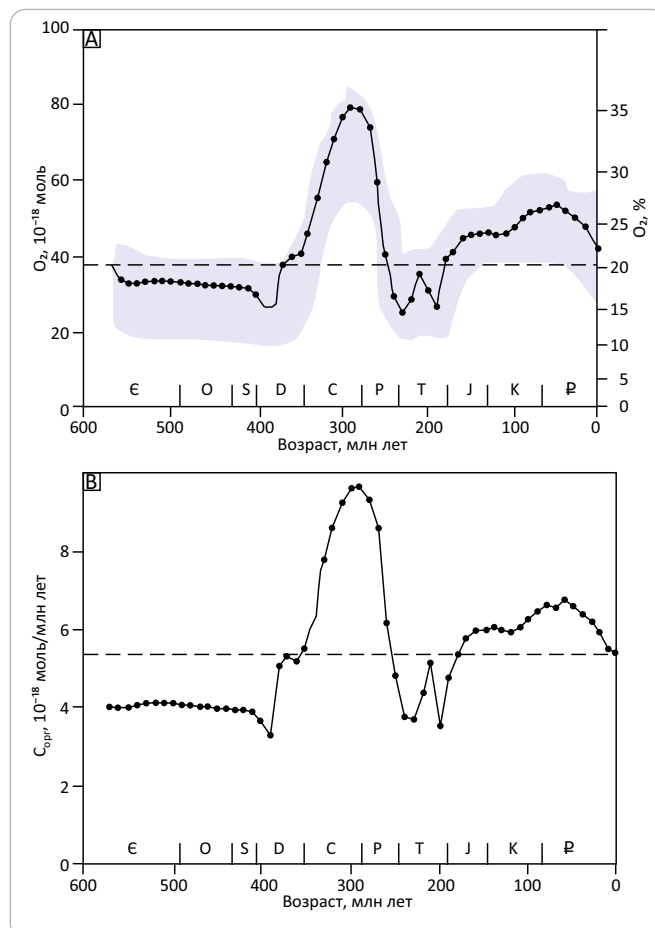


процессами: ассимиляцией CO_2 и фотодыханием. Один приводит к росту биомассы, другой — к ее убыли. Глобальный фотосинтез обладает свойством менять соотношение вкладов процессов ассимиляции CO_2 и фотодыхания в синтез биомассы в зависимости от концентраций CO_2 и O_2 в среде, т. е. от отношения CO_2/O_2 . Это свойство важно учитывать при рассмотрении эволюции фотосинтеза внутри орогенических циклов, в которых отношение CO_2/O_2 падает от начала цикла к концу. Однако при изучении накопления O_2 в осадке не менее важно учитывать как будет меняться отношение концентраций CO_2/O_2 от цикла к циклу. Поскольку известно, что по мере эволюции фотосинтеза концентрация кислорода в атмосфере растет, это означает, что фотодыхание будет расти, в то время как ассимиляция CO_2 будет постоянно падать, что обязательно вызовет постепенное снижение накопления O_2 в осадочных породах.

Чтобы посмотреть, к чему это в конце концов приведет, обратимся к фотосинтезу индивидуального организма. Каждый фотосинтезирующий организм типа С-3 (вначале все организмы были такого типа) обладает так называемой точкой компенсации. Она соответствует моменту, когда количество ассимилируемого углерода в ответ на изменение среды окажется равным количеству выдыхаемого CO_2 . Рост биомассы организма при этом прекращается, поэтому эта точка определяет пределы выживаемости организмов. В природе, в отличие от фотосинтезирующего организма, помимо дыхания, существует множество других окислительных процессов, в которых расходуется первоначально образованное при фотосинтезе O_2 (биомасса). Поэтому в глобальном цикле углерода существует так называемая точка экологической компенсации. Ее достижение означает, что глобальный цикл углерода перешел в стационарное состояние, т. е. сколько восстановленно-

Рис. 3. Синфазные изменения усредненной концентрации O_2 (А) и скорости накопления осадочного $\text{C}_{\text{орг}}$ (В), рассчитанные по геологической модели Geocarb III [9]

Fig. 3. In-phase variations of averaged O_2 concentration (А) and rate of sedimentary $\text{C}_{\text{орг}}$ accumulation (В) calculated in Geocarb III geological model [9]



го углерода образовалось при фотосинтезе, столько и окислилось во всех вышеупомянутых процессах окисления в биосфере и земной коре.

Рассмотрим подробнее углеродный баланс в глобальном цикле. Для этого проследим, как расходуется восстановленный при фотосинтезе углерод. Сразу же после образования биомассы при фотосинтезе уже в живых организмах («живом» веществе) восстановленный углерод окисляется при дыхательных процессах. После отмирания и захоронения организмов восстановленный углерод расходуется в разнообразных процессах аэробного и анаэробного окисления вплоть до попадания в зону субдукции. В ней оставшийся восстановленный углерод полностью окисляется. В восстановленном виде углерод сохраняется только в породах, пока не достигнет зоны субдукции. Соответственно, в атмосфере остается эквивалентное восстановленному углероду количество кислорода. Следуя этой логике, очевидно, что накопление $\text{C}_{\text{орг}}$ происходит только до достижения циклом точки экологической компенсации. По мере приближения к этой точке накопление уменьшается, пока не сойдет на нет.

Вероятная количественная оценка баланса углерода в глобальном цикле после достижения им стационарного состояния

Настоящая оценка характеристик баланса углерода в глобальном углеродном цикле не является строгой и количественной, поскольку для расчета используются приближенные выражения, а данные для расчета, хотя и взяты из общедоступных источников, например из Интернета, но их точность не приводится. Цель расчета — показать принципиальную возможность количественного подхода к рассмотрению баланса в глобальном цикле углерода на основе предложенной модели фотосинтеза и оценить разумность полученных таким способом значений.

Одно из приближений заключается в следующем. В природе осадочное ОВ представлено двумя формами: рассеянной и концентрированной. Источником первой является высшая наземная растительность, второй — планктон, другая водная и низшая наземная растительность.

Высшая наземная растительность появилась на Земле более чем на 2 млрд лет позднее возникновения фотосинтеза, а следовательно, и ее вклад в общую массу осадочного ОВ на Земле существенно меньше [10]. Поэтому без большой погрешности, которая могла бы исказить порядок конечного значения, концентрированной формой ОВ в осадках можно пренебречь.

Сделав эти необходимые замечания, перейдем к расчету, основываясь на полученном уравнении фотосинтеза (5).

С помощью данных [11] рассчитаем количество молей кислорода, накопившегося в атмосфере. Масса сухого атмосферного воздуха равна $(5,1-5,3) \cdot 10^{18}$ кг. Массовый процент кислорода в воздухе составляет 23,1 %. Перемножив эти значения, получим, что масса кислорода в воздушном слое равна $1,2 \cdot 10^{18}$ кг. Разделив это значение на молярную массу кислорода $M = 32$, получаем количество молей $n_{O_2} = 3,75 \cdot 10^{16}$. Благодаря стехиометрическому соотношению продуктов реакции фотосинтеза, равному 1 : 1, $n_{O_2} = n_{ОВ} = 3,75 \cdot 10^{16}$ моль.

Под УВ далее понимаются любые жидкие продукты преобразования ОВ, которые эмигрируют из очагов генерации в главной зоне нефтеобразования.

Если обозначить долю, которую составляют эмигрирующие УВ от общей массы ОВ, генерирующего в главной зоне нефтеобразования, как k_1 , тогда произведение трех сомножителей в правой части выражения (6) будет выражать максимальное количество нефтяных эмигрирующих УВ:

$$R = n_{ОВ} \cdot k_1 \cdot M_{нефти} \quad (6)$$

Произведение первых двух сомножителей в выражении (6) соответствует количеству молей эмигрировавших жидких УВ. Умножение на $M_{нефти}$ позволяет

перевести количество молей нефти в массу. В качестве $M_{нефти}$ автор статьи выбрал УВ $C_{10}H_{22}$, аппроксимирующий нефть. Из балансовых расчетов известно [12], что доля эмигрирующих УВ от общей массы ОВ зависит от типа вещества (гумусового, сапропелевого или смешанных разностей) и от диапазона его преобразования, но обычно не превышает 10 %. Из опыта предыдущих балансовых расчетов [13] и учитывая невысокие требования к точности получаемого результата, автор статьи усреднил значение k_1 , приняв его равным 5 %, т. е. одинаковым для любого типа ОВ и для диапазона катагенеза, охватывающего всю главную зону нефтеобразования. С учетом сказанного, имеем $R = 2,68 \cdot 10^{15}$ кг.

Значение R по смыслу должно быть близким к мировым начальным суммарным ресурсам нефти, которые включают в себя как перспективные и прогнозные ресурсы, так и разведанные запасы. Согласно общедоступным данным [14, 15], мировые разведанные запасы нефти составляют $2,34 \cdot 10^{14}$ кг. По сравнению со значением R , рассчитанным по модели, разведанные запасы оказались, как и следовало ожидать, на порядок меньше. Перспективные и прогнозные ресурсы по отдельным нефтеносным регионам в 2–3 раза превышают разведанные запасы. Если принять, что такое же соотношение характерно и для мира, то можно считать, что, с учетом точности проведенного расчета и приблизительности оценки перспективных и прогнозных ресурсов, расчет по предложенной модели, действительно, соответствует величине мировых начальных суммарных ресурсов.

Такое соответствие свидетельствует о разумности физической идеи, положенной в основу модели, в том числе идеи о том, что фотосинтез играет определяющую роль в накоплении осадочного ОВ в земной коре и кислорода в атмосфере. В этой связи заметим, что выводы, полученные в рамках модели автора статьи, находятся в полном противоречии с гипотезой о неорганическом происхождении нефти.

Выводы

1. Модель глобального цикла углерода не только описывает сам процесс накопления ОВ в земной коре и кислорода в атмосфере, но и доказывает определяющую роль фотосинтеза в круговороте углерода.

2. Доказана применимость традиционного уравнения фотосинтеза для описания этого процесса в крупных природных системах, таких как биосфера и глобальный цикл углерода.

3. Показано, что накопление осадочного ОВ в земной коре и кислорода в атмосфере — два сопряженных процесса, которые продолжались до тех пор, пока цикл не достиг экологической точки компенсации и все процессы в нем не перешли в стационарное состояние, т. е. количество восстановленного углерода, образуемого при фотосинтезе, стало равно количеству восстановленного углерода, окисляемо-

DISCUSSIONS

го в разнообразных процессах в биосфере и земной коре.

4. Модель использована для оценки начальных суммарных ресурсов нефти. Полученные результаты близки к оценкам другими методами, основанными

на традиционных балансовых расчетах с помощью геологических моделей. Это подтверждает разумность заложенных в модель аппроксимаций и приближений и открывает новый подход к изучению механизма преобразования ОВ и нефти.

Литература

1. Ivlev A.A. The Global Carbon Cycle and the Evolution of photosynthesis. – Cambridge : Cambridge Scholars Publishing, 2019. – 160 с.
2. Ivlev A.A. Global redox cycle of biospheric carbon: interaction of photosynthesis and earth crust processes // *BioSystems*. – 2015. – № 137. – С. 1–11. DOI: 10.1016/j.biosystems.2015.10.001.
3. Иогансон Л.И. Ротационные факторы тектогенеза — история вопроса и современное состояние // Ротационные процессы в геологии и физики. – М. : КомКнига, 2007. – С. 505–522.
4. Монин А.С. История Земли. – Л. : Наука, 1977. – 228 с.
5. Ивлев А.А. Образование толщ, богатых органическим веществом, в свете новой модели глобального цикла углерода // *Геология нефти и газа*. – 2019. – № 5. – С. 21–28. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-5-13.
6. Вернадский В.И. Изотопы и живое вещество // *Доклады АН СССР*. – 1926. – С. 215–220.
7. Ivlev A.A. Global Photosynthesis is an Instrument in Large Natural Systems Studies // *Geology, Earth & Marine Science*. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 1–4. – Режим доступа: <https://researchopenworld.com/global-photosynthesis-is-an-instrument-in-large-natural-systems-studies/> (дата обращения: 10.02.2020).
8. Igamberdiev A.U., Lea P.J. Land plants equilibrate O₂ and CO₂ concentrations in the atmosphere // *Photosynthesis research*. – 2006. – № 87. – С. 177–194. DOI: 10.1007/s11120-005-8388-2.
9. Berner R.A., Canfield D.E. A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time // *American Journal of Science*. – 1989. – Т. 289. – № 4. – С. 333–361. DOI: 10.2475/ajs.289.4.333/.
10. Успенский В.А. Введение в геохимию нефти. – Л. : Недра, 1970. – 389 с.
11. *Российская геологическая энциклопедия* : в 3-х т. Т. 1–3 / Под ред. Е.А. Козловского, А.А. Ледовских. – Л. : ВСЕГЕИ, 2010. – 1885 с.
12. Рогозина Е.А. О балансовой стороне процесса углефикации рассеянного органического вещества пород // *Труды ВНИГРИ*. – 1969. – Вып. 279. – С. 3–19.
13. Ивлев А.А., Четверикова О.П. Модифицированный балансовый метод расчета с целью отдельного учета газообразных и жидких продуктов эмиграции при катагенезе рассеянного органического вещества // *Геология нефти и газа*. – 1983. – № 3. – С. 28–34.
14. Когда закончится нефть: самые крупные разведанные запасы нефти в России и мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dividendoff.net/makroekonomika/zapasy-nefti.html> (дата обращения: 10.02.2020).
15. Разведанные запасы нефти в странах мира [Электронный ресурс] // *Источники энергии: интернет-журнал про энергию*. Режим доступа: <https://beelead.com/zapasy-nefti/> (дата обращения: 10.02.2020).

References

1. Ivlev A.A. The Global Carbon Cycle and the Evolution of photosynthesis. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing; 2019. 160 p.
2. Ivlev A.A. Global redox cycle of biospheric carbon: interaction of photosynthesis and earth crust process. *BioSystems*. 2015;(137):1–11. DOI: 10.1016/j.biosystems.2015.10.001.
3. Ioganson L.I. Rotational factors of tectogenesis. History of the question and its modern condition. In: *Rotational processes in Geology and physics*. M. : Komkniga; 2007. pp. 505–522. In Russ.
4. Monin A.S. Istoriya Zemli [History of the Earth]. Leningrad: Science; 1977. 228 p. In Russ.
5. Ivlev A.A. Formation of sequences rich in organic matter in the light of a new model of the global carbon cycle. *Geologiya nefi i gaza*. 2019;(5):21–28. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-5-13.
6. Vernadsky V.I. Izotopy i zhivoe veshchestvo [Isotopes and living matter]. *Doklady AN USSR*. 1926:215–220. In Russ.
7. Ivlev A.A. Global Photosynthesis is an Instrument in Large Natural Systems Studies. *Geology, Earth & Marine Science*. 2020;(1):1–4. Available at: <https://researchopenworld.com/global-photosynthesis-is-an-instrument-in-large-natural-systems-studies/> (accessed 10.02.2020).
8. Igamberdiev A.U., Lea P.J. Land plants equilibrate O₂ and CO₂ concentrations in the atmosphere. *Photosynthesis research*. 2006(87):177–194. DOI: 10.1007/s11120-005-8388-2.
9. Berner R.A., Canfield D.E. A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *American Journal of Science*. 1989;289(4):333–361. DOI: 10.2475/ajs.289.4.333.
10. Uspenskiy V.A. Vvedenie v geokhimiyu nefi [Introduction to the Geochemistry of oil]. Leningrad: Nedra; 1970. 389 p. In Russ.
11. Kozlovskiy E.A., Ledovskikh A.A., eds. Rossiiskaya geologicheskaya entsiklopediya [Russian Geological Encyclopedia]. V. 1–3. Leningrad: VSEGEI; 2010. 1885 p. In Russ.
12. Ragozina E.A. O balansovoi storone protsessu uglefikatsii rasseyanogo organicheskogo veshchestva porod [On the balance side of the process of coalification of dispersed organic matter of rocks]. *Trudy VNIIGRI*. 1969;(279):3–19. In Russ.

13. Ivlev A.A., Chetverikova O.P. Modifitsirovannyi balansovyi metod rascheta s tsel'yu razdel'nogo ucheta gazoobraznykh i zhidkikh produktov emigratsii pri katageneze rasseyannogo organicheskogo veshchestva [Separate accounting of gaseous and liquid products of expulsion in catagenesis of particulate organic matter: modified balancing method of calculations]. *Geologiya nefti i gaza*. 1983;(3):28–34. In Russ.
14. *Kogda zakonchitsya neft'*: samye krupnye razvedannye zapasy nefti v Rossii i mire [When oil runs out: largest proven oil reserves in Russia and the world]. Available at: <https://dividendoff.net/makroekonomika/zapasy-nefti.html> (accessed 10.02.2020).
15. *Razvedannye zapasy nefti v stranakh mira* [Proven oil reserves in the world]. In: *Istochniki energii: internet-zhurnal pro energiyu*. Available at: <https://beelead.com/zapasy-nefti/> (accessed on 10.02.2020).

Информация об авторе

Ивлев Александр Андреевич

Доктор биологических наук,
профессор

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет — МСХА имени К.А. Тимирязева»,

127550 Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

e-mail: aa.ivlev@list.ru

ORCID ID: 0000-0001-7966-2266

Information about author

Alexander A. Ivlev

Doctor of Biological Sciences,
Professor

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev
Agricultural Academy,

49, ul. Timiryazevskaya, Moscow, 127550, Russia

e-mail: aa.ivlev@list.ru

ORCID ID: 0000-0001-7966-2266