

*К 80-летию Ивлева Александра Андреевича*

ЖИЗНЕННЫЙ ПУТЬ В НАУКЕ  
ПРОФЕССОРА КАФЕДРЫ ХИМИИ РГАУ-МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА  
АЛЕКСАНДРА АНДРЕЕВИЧА ИВЛЕВА

С.Л. БЕЛОПУХОВ

(ФГБОУ Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт агробиотехнологий)

А.А. Ивлев родился в Москве 13 марта 1941 г. – за три месяца до начала Великой Отечественной войны.

Отец был на фронте, и, как многие дети того времени, Александр вместе с матерью пережил и голод, и эвакуацию в г. Уфу. В 1944 г. они вернулись в Москву. В 1958 г. А. Ивлев окончил среднюю школу и поступил в Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева на физико-химический факультет, готовивший специалистов для развивающейся атомной промышленности страны. В 1964 г. он окончил институт с красным дипломом по специальности «Технология разделения и применение изотопов» и был рекомендован для поступления в аспирантуру.

В аспирантуре А.А. Ивлев под руководством молодого кандидата химических наук доцента Д.А. Князева исследовал разделение изотопов элементов средних и тяжелых масс методом химического изотопного обмена. В 1968 г. он успешно защитил диссертацию, которую оппонировал один из выдающихся в то время специалистов атомной отрасли – профессор А.М. Розен, высоко оценивший полученные результаты и рекомендовавший продолжить исследования. Однако жизнь распорядилась иначе.

В 1969 г. А.А. Ивлев предпринял поездку в г. Лейпциг (ГДР) с докладами на Международной конференции по стабильным изотопам, где познакомился с молодым амбициозным ученым-геологом Э.М. Галимовым, также занимавшимся изотопными эффектами, но в природных объектах. Э.М. Галимов пригласил А.А. Ивлева в свою лабораторию в Московском институте нефтехимической и газовой промышленности им. И.М. Губкина, где проводились исследования естественных изотопных эффектов углерода в органическом веществе, в нефти и газе.

В лаборатории Э.М. Галимова Ивлев проработал недолго – с 1969 по 1971 гг., но эти три года оказали влияние на всю его последующую научную деятельность. В соавторстве с Э.М. Галимовым были опубликованы несколько статей, на которые обратил внимание академик А.П. Виноградов, директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, возглавлявший советскую геохимическую науку. В статьях обосновывалась роль изотопных методов исследования в геологии, которые только начинали развиваться в стране. Идеологию работ определял Галимов, а Ивлев, как предполагалось, должен был подкреплять идеи теоретическими расчетами изотопных эффектов. Но чем больше он вникал в суть выдвигаемых Галимовым идей, тем больше возникало несогласие с ними и все больше укреплялась альтернативная точка зрения.

Суть возникших разногласий заключалась в следующем. Наблюдаемые изотопные различия углерода в компонентах нефти, ее изотопную гетерогенность Э.М. Галимов объяснял равновесным распределением<sup>13</sup>С в различных положениях атомов углерода в молекулах, которую они унаследовали от биогенных предшественников. По мнению А.А. Ивлева, равновесного распределения изотопов в биогенных структурах быть не должно, поскольку живые организмы – неравновесные системы. Распределение изотопов в них должно определяться кинетическими факторами, зависящими от пути и механизма метаболических реакций. Утверждения Э.М. Галимова основывались на случайных совпадениях измеряемых изотопных различий компонентов нефти с предсказываемыми им равновесными распределениями, подтвердить которые расчетами и должен был А.А. Ивлев. Поскольку степень изученности вопроса была еще недостаточной, каждый из оппонентов оставался при своих убеждениях.

В 1971 г. А.А. Ивлев перешел на работу во Всесоюзный научно-исследовательский нефтяной институт (ВНИГНИ), где продолжил исследования, начатые в период работы с Э.М. Галимовым. Этому способствовало и полученное предложение участвовать в написании коллективной монографии «Изотопные эффекты биогенных элементов в нефти» (М.: Недра, 1974) под руководством профессора С.П. Максимова, директора ВНИГНИ, и профессора Н.А. Еременко, директора Института геологии и разведки горючих ископаемых (ИГР и ГИ АН СССР).

Со временем дискуссия между этими двумя исследователями, Галимовым и Ивлевым, вылилась на страницы научных журналов «Биофизика» и «Геохимия» и был озвучен на Всесоюзной конференции по стабильным изотопам в ГЕОХИ в 1973 г. Журнал «Биофизика» даже посвятил этой дискуссии, в которую включились и зарубежные научные журналы (Hayes, Yapp, *Geochim et Cosm Acta*, 1982), несколько номеров.

Во ВНИГНИ, помимо исследований, посвященных использованию изотопных эффектов углерода при поиске и разведке нефтяных месторождений, А.А. Ивлев занимался вопросами генезиса нефти, а в связи с этим – и вопросами распределения изотопов углерода в компонентах клетки «живых» организмов.

Ощущая недостаточность своих познаний в области биогенеза природных соединений, биохимии и биофизики клеточных процессов, А.А. Ивлев стал изучать учебную и научную литературу, искать специалистов в этой области. Поиски привели его на кафедру биофизики физического факультета МГУ, где он познакомился с замечательным ученым-энциклопедистом профессором С.Э. Шнолем, одним из основателей кафедры, автором крупных трудов по биохимии и биофизики, в том числе по фракционированию изотопов в биологических процессах (Рогинский С.З., Шноль С.Э., 1963). Встреча с С.Э. Шнолем и последующее общение с ним оказали на А.А. Ивлева и его последующую научную деятельность не меньшее влияние, чем когда-то встреча с Э.М. Галимовым. Несмотря на разницу в возрасте (10 лет), Симон Эльевич стал для Ивлева по-настоящему другом и учителем.

С.Э. Шноль был не только блестящим лектором, но и популяризатором науки. Его лекции приезжали слушать студенты и аспиранты из других институтов страны. Он не читал предмет, а рассказывал о том, как возникали открытия, в каких условиях работали ученые, об их судьбах. Позднее эти рассказы были положены в основу книг по истории российской биологической школы. Особый интерес обуславливался тем, что С.Э. Шноль был сам непосредственным участником тех драматических событий в нашей науке, о которых он рассказывал (например, сессия ВАСХНИЛ 1948 г.). Общение со Шнолем пробудило у Ивлева глубокий неподдельный интерес к предмету.

В течение трех лет А.А. Ивлев слушал курс лекций по биохимии профессора С.Э. Шноля и параллельно – курс лекций другого замечательного преподавателя

кафедры биофизики МГУ, удивительного ученого, друга и ученика Шноля доктора физико-математических наук, профессора Ф.И. Атауллуханова, который читал лекции по биофизике, причем не только на физфаке, но и в МФТИ.

Вооруженный полученными знаниями, А.А. Ивлев продолжал исследования распределения изотопов углерода в клетках живых организмов, связывая их с механизмами клеточных процессов. В результате появилась диссертация «Закономерности фракционирования изотопов углерода в биологических системах». Защита докторской диссертации состоялась в 1986 г. в Институте химической физики АН СССР. К тому времени его оппонент Э.М. Галимов сделал впечатляющую научную карьеру, став директором Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского и академиком РАН. Достигнув такого высокого уровня, Галимов не преминул воспользоваться своим положением. Разумеется, защита Ивлева, как и все предшествующие защите выступления, не была обделена вниманием Э.М. Галимова и его сторонников и одновременно сотрудников. Не обошлось и без попыток сорвать защиту: за несколько дней до нее кто-то вынес диссертацию из библиотеки института, и тут же она срочно потребовалась. Все это было зафиксировано и представлено как нарушение инструкций ВАКа. Потом диссертация так же неожиданно появилась, но защиту пришлось перенести на несколько месяцев. Случались и другие попытки сорвать защиту и помешать оппоненту, профессору Н.Ф. Мясоєдову (ныне академик РАН), предложив помощь в написании отзыва. И все же защита диссертации состоялась. Выступления ученых из института Вернадского и приглашенных из других институтов возглавил сам академик Галимов. Нельзя говорить о том, что не было сторонников точки зрения диссертанта. Достаточно сказать, что в защиту выступили один из самых авторитетных биофизиков страны и оппонент профессор Л.А. Блюменфельд, профессор А.Б. Рубин с биологического факультета МГУ, ученые с кафедры биофизики МГУ, профессор Отауллуханов, профессор Д.А. Князев из МСХА и др. Защита длилась 8 часов с перерывом на один час, и большинством голосов А.А. Ивлеву была присуждена степень доктора биологических наук по специальности «Биофизика».

Далее борьба все меньше напоминала научный спор. В ВАК были отправлены две стенограммы, одна из которых была составлена в ГЕОХИ. Все подробности по утверждению присвоенной степени в ВАКе можно опустить, заметив при этом, что только через год ВАК утвердил докторскую степень.

А.А. Ивлеву предстояло работать дальше в новой реальности. Это означало, что часть академических журналов в области его научных интересов оказалась закрытой, как и возможность получения грантов Академии наук, которые всегда заканчивались коротким «Не поддержан», и таких попыток было девять. По этой же причине, несмотря на языковые трудности, значительная часть результатов исследований Ивлева была опубликована в зарубежной печати. Правда, публикации за границей имели и свои положительные моменты. Его узнали, и у него появились последователи. В новой реальности Ивлеву пришлось следовать мудрому совету Шноля: «Не тратьте силы и нервы на бесполезную борьбу, занимайтесь наукой».

В 1992 г. по приглашению своего бывшего научного руководителя профессора Д.А. Князева, который к тому времени возглавил кафедру неорганической и аналитической химии Тимирязевской академии, А.А. Ивлев стал читать лекции, а с 1994 г. перешел на постоянную работу в академию в качестве профессора.

Рассмотрим итоги научной деятельности профессора А.А. Ивлева за прошедшие после защиты годы, то есть за 25 лет, которые связаны с работой в Тимирязевке.

Научную биографию профессора А.А. Ивлева можно условно разделить на несколько этапов, каждый из которых завершался открытием, становившимся трамплином к новым исследованиям.

Первое открытие, зарегистрированное в 1986 г. в РАЕН, относится к установлению закономерной связи распределения  $^{13}\text{C}$  в метаболитах с последовательностью протекания в клетках метаболических процессов – другими словами, с временной организацией клеточных процессов (1986), с чем связан цикл работ по медицинской тематике. Исследовались диагностические возможности использования изотопного состава углерода выдыхаемого  $\text{CO}_2$  и углерода мочевины мочи больных с эндокринными заболеваниями. Цель исследований – установить связь изотопных характеристик с типом болезни и со степенью тяжести ее протекания. Исследования проводились на базе 1-го Медицинского института им. И.М. Сеченова в сотрудничестве с профессором Д.А. Князевым. Куратором работ был главный детский эндокринолог России – кандидат медицинских наук М.Ф. Логачев. Параллельно проводились исследования по изучению изотопного состава углерода плазмы крови у больных с эндокринными заболеваниями в сотрудничестве с профессором Н.П. Гончаровым (ФГБУ НМИЦ Эндокринологии Минздрава России), с той же целью – разработка диагностических изотопных критериев эндокринных заболеваний. К сожалению, эти перспективные разработки в области медицины ввиду прекращения финансирования в 90-е гг. пришлось завершить.

Итогом исследований стала серия статей, опубликованных в научных и медицинских журналах («Проблемы эндокринологии», 1993; «Биофизика», 1994, 1996). Неожиданный интерес к этой проблематике проявила Украина. По их предложению в 2009 г. в РФФИ был подан совместный международный российско-украинский проект «Исследование естественного фракционирования стабильных изотопов в организме человека для доклинической диагностики», направленный на разработку изотопных диагностических критериев в медицине.

В 1993 г. был открыт ранее неизвестный изотопный эффект фотодыхания («Физиология растений», 1993). До 1993 г. в научной литературе был известен только один изотопный эффект – эффект фотосинтеза. Им считался изотопный эффект ассимиляции  $\text{CO}_2$  растениями. Ему приписывалось наблюдаемое обогащение биомассы растения изотопом  $^{12}\text{C}$  относительно ассимилируемого  $\text{CO}_2$ . Этот эффект был известен с 40-х гг. прошлого столетия. Но оказалось, что наряду с ассимиляцией на свету происходит процесс фотодыхания, который также сопровождается изотопным эффектом, противоположным по знаку эффекту ассимиляции. Этот эффект долго не замечали, потому что он маскировался эффектом ассимиляции. Ивлев обратил внимание на условия процесса, усиливающие или ослабляющие фотодыхание, когда углерод биомассы обогащается или обедняется изотопом  $^{13}\text{C}$ . На основании этого был сделан вывод о существовании изотопного эффекта фотодыхания со знаком, противоположным знаку эффекта ассимиляции.

В сотрудничестве с профессором А.У. Игамбердиевым, Н.Г. Быковой (кафедра физиологии и биохимии растений ВГУ) и американским исследователем Ч. Трелкелдом (Денвер, США) были проведены физиологические опыты, которые косвенно подтвердили полученный ранее результат (FEBS Letters, 1996; «Физиология растений», 1996). Предположение об изотопном эффекте фотодыхания объяснило ранее непонятные факты: обнаружение в природе аномально «тяжелого» осадочного органического вещества (оксалатов), обогащенность метаболитов, связанных с фотодыханием «тяжелым» изотопом, и др.

Окончательная точка в подтверждении гипотезы А.А. Ивлева была поставлена в экспериментах, проведенных с помощью геной инженерии. К ее проверке подключились исследователи разных стран. Используя методы геной инженерии, удалось модифицируя фермент, ответственный за фотодыхание, наблюдать *in vivo* ожидаемое изменение изотопного состава углерода биомассы изучаемых растений (Igamberdiev et al., Photosynthesis Research, 2001; Igamberdiev et al., Photosynthesis Research, 2004).

Открытие изотопного эффекта фотодыхания позволило А.А. Ивлеву выдвинуть гипотезу об осцилляционном характере фотосинтеза. Гипотеза утверждала, что ключевой фермент фотосинтеза Рубиско работает как «пинг-понг», переключая фермент с ассимиляции на фотодыхание, и обратно, по принципу отрицательной обратной связи. Эту идею он изложил в своей лекции в Международной школе молодых ученых в Греции в 2003 г. и в обзоре (*Separation Science and Technology*, 2001). Было дано теоретическое обоснование возможности осцилляций (*Biophysics*, 2004).

Проведенные теоретические расчеты с использованием реальных клеточных параметров также подтвердили обоснованность предположения об осцилляционном характере фотосинтеза («Биофизика», 2010; *BioSystems*, 2011). Оценка колебаний с помощью взятых из литературы реальных клеточных параметров позволила определить, что период колебаний составляет от 1 до 3 сек. В это время А.А. Ивлеву предложили участвовать в международном экологическом проекте с участием Института физиологии и биохимии растений СО РАН и UFZ, Helmholtz Centre for environmental Research (Germany) в качестве научного консультанта. Проект был направлен на изучение внутрисезонной динамики метаболических процессов в хвойных деревьях с помощью изотопных характеристик углерода и кислорода. С основой на разработанной ранее концепции осцилляторной модели фотосинтеза Ивлеву удалось объяснить сезонные колебания изотопного состава углерода и кислорода хвои и ветвей хвойных деревьев. Результаты были опубликованы в престижном европейском журнале *Plant Biology* (2012).

Примерно в это же время А.А. Ивлева пригласили в качестве научного руководителя в другой международный проект, в котором приняли участие два академических института от России: Институт молекулярной физики Курчатовского научного центра и Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Был получен грант (2011–2012) на разработку инструментального контроля углеродного баланса лесных экосистем. Со стороны западных партнеров выступал Институт Макса Планка (Германия). Итогом работы стало обоснование Парижского соглашения по климату и Киотского протокола. К сожалению, в связи с изменением политической конъюнктуры продолжение финансирования проекта завершилось досрочно.

С 2012 г. А.А. Ивлев решил начать новый проект, не требующий больших финансовых затрат. Проект назывался «Глобальный углеродный цикл и его эволюция. Роль глобального фотосинтеза и взаимодействие геологических и биосферных процессов». В научной литературе имелся огромный массив экспериментальных данных, мало связанных и не имевших адекватного объяснения.

Ивлев предложил принципиально новую физико-химическую модель круговорота углерода, в основе которой были данные по изотопному составу углерода органического вещества осадочных пород и карбонатов, а также сопутствующие данные по геологии, палеонтологии, климатологии и других смежных наук, которые можно было почерпнуть из литературы. Множество, казалось бы, не связанных между собой величин и параметров из разных областей знаний, рассмотренное в рамках модели, превратилось в логическую цепь взаимосвязанных явлений и событий, составивших глобальный цикл углерода.

В отличие от других моделей круговорот углерода рассматривался не как простое перемещение углеродных форм через атмосферу, биосферу и геосферы, а как движение по окислительно-восстановительной петле. Согласно модели, углекислый газ атмосферы через фотосинтез (редокс-процесс, начало петли) превращается в «живое вещество», которое, двигаясь по петле и превращаясь в разные по степени окисленности углерода формы, попадает в осадок. Органическое вещество осадка, продолжая окисляться в земной коре, достигает зоны (субдукции), где литосферные плиты, покрывающие поверхность Земли и несущие на себе осадочные породы, сталкиваются.

За счет энергии столкновения плит органическое вещество осадочных пород окончательно окисляется в термохимической реакции сульфатредукции (завершение окислительно-восстановительной петли), и продукт окисления  $\text{CO}_2$  выносится на поверхность земли в атмосферу. Далее углекислый газ вновь вовлекается в процесс фотосинтеза. Разумеется, описать в деталях движение углерода по петле, неравномерность этого движения и его причину в нескольких строках невозможно. Можно лишь отметить, что представления А.А. Ивлева прекрасно сочетаются с концепцией В.И. Вернадского о биосфере с его представлениями о «живом» веществе и о взаимодействии биосферных процессов с геологическими. По существу модель, предложенная Ивлевым, является в значительной степени развитием идей Вернадского. Она смогла описать многие события, происходившие на земле в ходе эволюции биосферы, и ее направленность.

Модель объяснила происходившее на земле чередование оледенений и «парниковых» периодов, климатические циклы, периоды смены биоразнообразия и периодов вымирания, объяснила циклы образования толщ богатых органическим веществом и циклы нефтеобразования, последовательный и в то же время ступенчатый характер смены окисленности среды и эволюцию биосферы от низших форм к высшим, а также многие другие события на земле.

Модель вызвала неожиданно большой интерес ученых из разных стран и разных областей знания. А.А. Ивлеву стали поступать предложения из зарубежных журналов по геологии, океанологии, климатологии, экологии эволюции, физиологии растений и животных, микробиологии, агро- и аквакультурам, лесоведению и прочих смежным отраслям. Так, индийское издательство Transworld Research Network (Kerala, India) в 2013 г. выпустило небольшую монографию А.А. Ивлева «Chemical Evolution vs Biological Evolution: Coupling Effect and Consequences». Но самый значительный отклик был получен после публикации большого обзора в 2015 г. в престижном журнале Bio-Systems (Q2): «Global redox cycle of biospheric carbon: Interaction of photosynthesis and Earth crust processes». В 2015 г. вышла книга на русском языке в немецком издательстве LAP Lambert Academic Publishing «Глобальный редокс цикл биосферного углерода». Еще несколько издательств предлагали свои услуги, но предложения были отклонены по финансовым соображениям. В последнее время ряд статей по глобальному циклу опубликовали российские журналы («Геология нефти и газа», 2019, 2020; «Океанологические исследования», 2020; «Журнал общей биологии», 2020).

В 2017 г. Издательство Кембриджского университета обратилось к А.А. Ивлеву с предложением написать книгу по глобальному циклу углерода. В 2019 г. эта книга была издана под названием «Global Carbon Cycle and Evolution of Photosynthesis Cambridge. Scholar Publishers».

Интерес к данной тематике не угасает по сей день. Так, Международное научное издательство Book Publisher International (Индия) готовит к публикации научную монографию «Актуальные вопросы науки о Земле и окружающей среде (Challenging Issues on Environment and Earth Science)» с главой «Глобальный фотосинтез и его регуляторная роль в круговороте углерода», написанной А.А. Ивлевым. Престижный Канадский журнал «Arctic» публикует большой обзор (2021) «Основные черты глобального фотосинтеза и его эволюция в глобальном цикле углерода». Поступает много предложений от оргкомитетов разных конференций, происходящих мире по климату, экологии, по наукам о земле и смежным областям принять участие и сделать пленарный или основной доклад на соответствующей секции (keynote speaker).

В 2019 г. кафедра физиологии растений во главе с профессором И.Г. Таракановым, объединившись с кафедрой химии и масс-спектрометрической лабораторией Центрального института агрохимического обслуживания сельского хозяйства (ЦИНАО), выиграла грант РНФ на финансирование научного проекта «Фоторегуляция

морфогенеза и продукционного процесса растений в условиях интенсивного культивирования». В рамках этого проекта удалось продолжить изучение изотопных эффектов углерода при выращивании растений в условиях равных спектральных диапазонов фотосинтетически активной радиации. Такая кооперация позволила объединить специалистов из разных областей и сделала возможной работу над подобным проектом.

В ходе исследований было открыто неизвестное ранее явление, заключавшееся в том, что при освещении растений светом разного диапазона длин волн происходит изменение изотопного состава углерода биомассы растений, причем в разных направлениях. Объяснение противоположного характера изотопных смещений дала разработанная ранее осцилляционная модель фотосинтеза (Ivlev, 2012 in: InTech Publisher), согласно которой фотосинтезирующая клетка непрерывно осциллирует между двумя состояниями: ассимиляцией CO<sub>2</sub> и фотодыханием. Каждое из них сопровождается фракционированием изотопов углерода, приводящим к двум изотопно различающимся углеродным потокам, возникновение <sup>12</sup>C ассимиляционному потоку и к обогащенному <sup>13</sup>C фотодыхательному потоку: первый ответственен за продуктивность растений, второй – за стрессоустойчивость.

Свет, оказывающий влияние на фермент, контролирующий переключения состояний, вызывает изотопные смещения биомассы в противоположные стороны. Не вдаваясь в подробности, которые еще ожидают своего более глубокого осмысления, можно утверждать, что полученные результаты имеют общебиологический смысл, и, возможно, предстоит еще много интересных открытий.

Оглядываясь назад и анализируя научный жизненный путь профессора А.А. Ивлева, можно сказать, что это нелегкий, и непростой путь, на котором встречались и друзья, и оппоненты, и просто попутчики. Первые делятся знаниями, подставляют плечо в трудную минуту, и на них можно положиться. Вторые сильно затрудняют жизнь, но и они нужны, заставляя строго относиться к своим результатам, выверять все, что говоришь, и держать руку на пульсе развития своей области знания.

Исследования А.А. Ивлева показали также огромные потенциальные возможности метода метаболических изотопных эффектов биогенных элементов во многих областях, касающихся науки о жизни (Life Sciences), наук о земле и окружающей нас среде (Earth & Environmental Sciences), и эти возможности еще далеко не исчерпаны. Несмотря на разнообразие этих наук, кажущуюся их обособленность, на самом деле они взаимообусловлены и взаимопроникающи, а изотопные методы – инструмент их познания, который сочетает в себе как понимание природы изотопных эффектов, так и методы их определения. Эти составляющие изотопного метода неразделимы, и А.А. Ивлев с группой учеников и последователей продолжает свои научные исследования.

*To the 80th anniversary of Aleksandr A. Ivlev*

LIFE PATH IN SCIENCE OF ALEKSANDR A. IVLEV,  
PROFESSOR OF THE DEPARTMENT OF CHEMISTRY,  
RUSSIAN STATE AGRARIAN UNIVERSITY – TIMIRYAZEV MOSCOW  
AGRICULTURAL ACADEMY

**Белопухов Сергей Леонидович**, профессор кафедры химии ФГБОУ «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; директор Института агробиотехнологий.

**Sergey L. Belopukhov**, DSc (Ag), Professor of the Department of Chemistry, Director of the Institute of Agrobiotechnology.