ОТЗЫВ

официального оппонента доктора биологических наук,
Максимова Трофима Христофоровича
на диссертацию Тимохиной Анастасии Владимировны
«Динамика концентрации атмосферного диоксида углерода над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири
(по данным измерений на обсерватории "ZOTTO")»
по специальности 03.02.08 – Экология на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Актуальность рецензируемой работы определяется существующей проблемой потепления климата, которая в основном связывается с увеличением концентрации углекислоты и вызывает огромный интерес ученых и политиков разных стран в связи с верификацией бюджета углерода для углеродного рынка. На территории России в рамках ряда международных научных проектов в течение 25-30 лет работают свыше 10 научных станций по изучению углерода в репрезентативных биомах на региональном, континентальном и глобальном уровнях с использованием вышек, радиозондов, аэростатов и самолетов. Причем, основная часть станций расположена на северо-востоке России и по инструментальному обеспечению и количеству изучаемых параметров намного опережает многие регионы России.

Диссертация А.В. Тимохиной посвящена изучению особенностей изменчивости концентрации атмосферного CO_2 над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири на обсерватории "ZOTTO". Эти исследования очень важны для повышения точности математических расчетов в стоке атмосферного CO_2 и его изменчивости.

Впервые А.В. Тимохиной получена детальная количественная характеристика концентраций атмосферного CO_2 на разных временных масштабах: от суточного до многолетнего, с использованием непрерывных систематических инструментальных измерений высокого разрешения и точности вдоль вертикального градиента приземной атмосферы с применением высотной мачты. Установлено, что скорость

роста концентрации атмосферного CO_2 в Сибири характеризуется высокой межгодовой изменчивостью.

Весьма важным вкладом соискателя в науку следует считать полученные ею результаты на основе непрерывных многолетних мониторинговых измерений концентрации CO_2, проводимые на 301 м. высотной мачте и их экстраполяция на огромную территорию (около 7 млн. $км^2$ в дневной период летнего сезона), что имеет важное значение для Российской Федерации, где государственная система мониторинга атмосферы не развита в достаточной мере.

Автор в течение 6 лет регулярно (несколько раз в год) посещала обсерваторию "ZOTTO" с целью технического контроля приборной базы, хорошо знакома с особенностями её работы и процедурой получения данных по содержанию атмосферного CO_2. Все исследования по теме диссертации осуществлялись автором лично, в том числе статистический анализ, расчеты, интерпретация результатов и публикация полученных материалов.

Основные положения диссертации прошли апробацию на 16 научных конференциях, и опубликованы в 20 работах, в том числе в 6 статьях журналов, рекомендованных ВАК.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и перечня сокращений. Текст работы изложен на 165 страницах, иллюстрирован 15 таблицами и 45 рисунками. Список использованной литературы содержит 196 источников, из которых 141 работа на английском языке.

Во введении соискатель сделала небольшой обзор мировых исследований по изучению концентрации CO_2 с использованием высотных вышек, хорошо обосновала цель, задачи, научную и практическую значимость своих исследований, высветила защищаемые положения.

Небольшое замечание касается научной новизны работы автора, но на это не стоит сильно акцентировать внимание. Автором впервые показано, что скорость роста концентрации атмосферного CO_2 в Сибири характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, однако это общеизвестная истина. Далее, почему приоритетность Правительственных задач исследований в этом научном направлении ограничивается одним 2017 годом?

Я полностью не согласен с утверждением автора, что в последние 20 лет было

реализовано несколько исследовательских программ в рамках различных научных проектов, направленных на изучение углеродного бюджета наземных биогеоценозов Сибири и мониторинг концентрации CO_2 в атмосфере (Лесные экосистемы ..., 2002; Lloyd et al., 2002; Аршинов и др., 2009; Sasakawa et al., 2013). Нигде в работе не упоминаются ранние исследования российских, американских и японских ученых, проведенные на северо-востоке Сибири. Исследования, проводимые на мониторинговой станции "ZOTTO" были заложены позже и на базе расширения ранних исследований проводимых с помощью самолетных и высотных микрометеорологических вышек наблюдений на северо-востоке России (научные станции Спасская падь и Черский).

Глава 1 посвящена степени исследованности состояния концентрации диоксида углерода, рассмотрены причины роста концентрации CO_2 в атмосфере, роль бореальных лесов в динамике концентрации CO_2 на высотных мачтах за рубежом и в России.

Здесь мало уделено внимания доминантным мерзлотным лесным экосистемам Сибири. Некорректно упомянута ссылка на имя известного японского исследователя, зачинателя многолетних самолетных наблюдений в России доктора T. Machida (на стр.23, Mochida) и на стр. 19 нет разъяснения первого упоминания термина ПСА.

На рис 1.3 нет пояснения к рисунку. Что означают красные и синие точки? Не указаны российские научные станции и обсерватория "ZOTTO".

Во второй главе автор довольно хорошо описала район, климат и методику исследований. Соискатель использовала в своей работе два известных метода - газометрический и масс-спектрометрию с отбором воздушных проб с помощью стеклянных емкостей. Вполне понятна постоянная ссылка автора на метод стеклянных емкостей, поскольку лабораторный анализ воздушных проб с помощью масс-спектрометрии проводился за рубежом в рамках совместных проектов. К тому же, как таковой методики стеклянных емкостей не существует.

В этой главе автор упоминает 251 научные станции в 51 странах мира, что дает широкие просторы соискателю для сравнительного анализа.

Глава 3 посвящена выявлении площади подстилающей поверхности (футпринта), оказывающей влияние на концентрацию CO_2, измеряемую на высотной мачте обсерватории "ZOTTO". Эта очень интересная и значимая глава в диссертации

включает вклад разных типов растительности - лесов, лугов и прибрежной растительности на территории, охватывающей около 7 млн.кв.км. Этот футпринт был вычислен с помощью стохастической транспортной модели Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT), размещенной на сервере Института биогеохимии им. Макса Планка, Германия.

Рассмотрены вопросы конвективных и турбулентных потоков на данной территории и влияния розы ветров. Уникальное местоположение обсерватории "ZOTTO" на восточной окраине Западно-Сибирской равнины, вблизи ее границы со Среднесибирским плоскогорьем, обуславливает большое разнообразие растительного покрова. Наибольший вероятный вклад в формирование концентрации атмосферного CO_2 вносят болота, смешанные леса и сосняки, распространенные в западной части футпринта, а также темнохвойные леса, произрастающие в непосредственной близости к обсерватории с восточной стороны.

Разумеется, представленные автором результаты исследований на высотной мачте обсерватории "ZOTTO" в дальнейшем послужат основой для выявления количественного вклада каждого класса земной поверхности в измеряемые концентрации CO_2. Исследования в будущем будут выполнены путем объединения футпринта с оценками чистого экосистемного CO_2-газообмена, рассчитанных с помощью вегетационной модели фотосинтеза и дыхания (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model, VPRM). Глава завершается заключением и рекомендациями к дальнейшим исследованиям.

Автор делает вывод о том, что площадь зоны влияния для измерений концентрации CO_2 на высотной мачте обсерватории "ZOTTO" достигает 6.9×10^6 км^2, при этом за исследуемые 4 года (2008, 2009, 2010 и 2012) площадь 75%-го футпринта изменялась от 1.9 до 2.3×10^6 км^2. Наибольший вероятный вклад в формирование концентрации CO_2 вносят болота, смешанные и темнохвойные леса, и сосняки.

Вывод о футпринте, как мне кажется, требует дальнейших исследований и верификации, футпринт довольно большой и, возможно, несколько завышенный. Получается, чтобы покрыть всю территорию России, имеющую площадь 17,1 млн.кв.км. нам достаточно трех 300-ти метровых вышек и все! Вопрос этот очень дискуссионный, я не хочу сильно заострять внимание на этом и оставляю это на совести немецких и российских исследователей, в том числе и соискателя.

В главе 4 представлены результаты исследований суточной динамики концентрации атмосферного CO_2 и их вертикального распределения. Непрерывные наблюдения вдоль высотного профиля (до 301 м) свидетельствуют о том, что суточные различия в содержании атмосферного CO_2 максимальны вблизи подстилающей поверхности (4 м) и практически отсутствуют на верхней точке наблюдения (301 м). Вместе с тем, суточная амплитуда концентрации CO_2 формируется только в теплое время года (апрель-октябрь), что объясняется биологической активностью растительности и динамикой наблюдаемой высоты пограничного слоя атмосферы.

Хотелось бы получить исчерпывающий ответ о причинах нивелирования концентраций CO_2 по всему профилю с 12 до 20 часов с начала мая по сентябрь.

На рис.4.2 нужны пояснения – различия ночи и дня.

По данным автора, запоздалые максимальные показатели фотосинтеза наблюдаются (рис. 4.3) в полуденное время суток. С чем это связано?

Учитывалось ли влияние отсутствия растительности, которое очень сильно отражается на высоте 4 м, футпринт снижается. В связи с этим крайне необходимо учитывать также влияние антропогенных факторов на обширную территорию при большом футпринте - лесопользования, пожаров, поселений и.т.д..

Далее, в этой главе автор дает оценку суммарной эмиссии CO_2 из наземных экосистем. Для определения обменных потоков CO_2 соискатель применила расчетный метод, разработанный J. Winderlich и др., (2014), в котором были использованы градиентные измерения концентрации CO_2, температуры воздуха и атмосферного давления на высотах 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м. Теоретической основой используемого метода являлась теория турбулентности, применяемая к прямым оценкам энерго- и массобмена между экосистемой и атмосферой (метод пульсационных наблюдений) (Baldocchi et al., 1988).

Непонятно, почему выбраны именно эти высоты - 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м? Объяснения связанные с особенностями конструкции вышки не вполне оправдывают такой выбор высот, тем более, что автор большой упор в своем исследовании делает на ПСА. Имеется ли какая-то другая связь с восходящими и нисходящими потока воздуха?

А.В. Тимохиной показано, что максимальные среднемесячные значения ночной

эмиссии CO_2 наблюдались в июле, хотя, в отдельные годы пик может сдвигаться на август (2013 г.). С чем это связано?

За исследуемый период наиболее высокая интенсивность выделения CO_2 в ночное время отмечалась в июле 2012 г. (4,28±0,47 мкмоль/м^2/сек). Однако, этот год характеризовался крупными лесными пожарами в непосредственной близости к обсерватории "ZOTTO", что могло привести к завышению полученной величины за счет дополнительного поступления CO_2 при горении.

Ремарка касательно названия рис. 4.7 в этой главе: это данные по суточному потоку CO_2, включая поглощение и выделение экосистемы, а не ночная эмиссия.

Измерения концентрации CO_2 и метеорологических параметров (атмосферное давление и температура воздуха) по профилю высотной мачты позволили соискателю рассчитать эмиссионные потоки CO_2 из наземных экосистем, расположенных в зоне исследования обсерватории "ZOTTO". В течение исследуемых пяти лет (2009-2013 гг.) годовое выделение CO_2 составило в среднем 464±28,5 г С/м^2 за год (366,7±12,8 г С/м^2 за вегетационный сезон). Сравнение интенсивности эмиссии CO_2, полученной градиентным методом, и респираторных потоков CO_2 в основных типах биогеоценозов на территории зоны влияния обсерватории "ZOTTO" в радиусе 100 км показало, что применяемый автором метод определения годовой эмиссии CO_2 адекватно характеризует исследуемую территорию и позволяет получить интегральный показатель интенсивности его выделения. Представленные в главе 5 «Годовая динамика концентрации атмосферного CO_2» оценки основаны на использовании только дневных измерений, когда вертикальный градиент концентрации CO_2 близок к нулю. В результате расчетов установлено, что с 13:00 до 17:00 ч. местного времени содержание диоксида углерода вертикально однородно и стабильно на протяжении практически всего года.

Семилетние наблюдения за концентрацией атмосферной CO_2 на обсерватории "ZOTTO" показали, что она имеет ярко выраженную годовую периодичность с ежегодными минимумами и максимумами в летний и зимний периоды, соответственно.

Рассматриваемая глава диссертации включает также годовые тренды изменения концентрации CO_2 в связи с глобальными и континентальными атмосферными циркуляционными процессами. У нас в России мало специалистов в

этой области. Соискатель попыталась закрыть эту существенную брешь в знании о углекислом газе - попыталась увязать собственные данные с глобальными процессами, связанными с изменениями климата, с приземно – атмосферными процессами и антропогенными факторами.

В результате измерений на обсерватории "ZOTTO" установлено, что концентрация атмосферного CO_2 имеет отчетливо выраженный годовой ход. Ее ежегодное снижение начинает фиксироваться с конца апреля, достигает своего годового минимума в конце июля - начале августа, а с середины августа наблюдается ее постепенное повышение до ежегодного максимума в декабре – январе.

На основе семилетних наблюдений (май 2009 – январь 2016 гг.) определена годовая амплитуда концентраций диоксида углерода в рассматриваемом районе Сибири – она составила 26,4±0,8 млн$^{-1}$, при этом тенденции к ее возрастанию, которая отмечается в Северном полушарии, за исследуемый период не выявлена. Полученная автором величина близка к таковым показанным для территории Западной Сибири (от 24 до 30 млн$^{-1}$), но больше (в среднем на 3,8 млн$^{-1}$), чем в бореальном поясе Северной Америки. Далее автор пишет, что …фаза сезонности концентрации CO_2 косвенно свидетельствует о продолжительности вегетационного сезона, в районе обсерватории "ZOTTO" короче, кроме того нами зафиксировано ее увеличение со скоростью 1,6 дней в год (стр. 121). Это вообще непонятный контекст.

Данный показатель (1,6 дней в год) - это довольно интересная и большая величина. За семь лет наблюдений автора вегетационный сезон увеличился почти на 11 дней. Возможно ли это? Подтверждены ли эти данные косвенно данными системы едди-ковариации?

Главными факторами, определяющими особенности годовой динамики атмосферного CO_2 в районе обсерватории "ZOTTO" по сравнению с бореальным поясом Северной Америки, являются: 1) положение обсерватории в глубине континента вне значимого влияния морского климата и, как следствие, большее изъятие атмосферного CO_2 в процессе фотосинтеза при переносе воздушных масс или, наоборот, его поступление из антропогенных источников в зимний период; и 2) высокая поглотительная способность растительных экосистем, которые на 90% составляют сезонный футпринт обсерватории "ZOTTO". Значительный вклад внутриконтинентальных наземных экосистем в процессы годовой динамики

концентрации атмосферного CO_2 отчетливо проявился при сравнении ее годового хода в районе обсерватории "ZOTTO" и станции "Shetlands" (Шетландские острова), расположенных на одной географической широте (60° с.ш.).

Средняя тенденция увеличения концентрации CO_2 в районе обсерватории "ZOTTO" за последние 10 лет (2,04±0,4 млн$^{-1}$в год) была незначительно выше показанной на основе модельных расчетов для всего Северного полушария (1,96±0.05 млн$^{-1}$ в год) и практически не отличается от ее показателя на мировом уровне (2,28 млн$^{-1}$ в год) (Schneising et al., 2014; NOAA. National Center for Environmental Information).

Данные, представленные в этой главе, вполне согласуются с данными, ранее полученными российскими и зарубежными учеными (Исаев и др., 1995; Dolman et al., 2004, 2012; Максимов и др., 2005, Максимов, 2007).

Глава 6 посвящена росту концентрации атмосферного CO_2 над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири и включает среднемноголетнюю тенденцию увеличения концентрации CO_2 и межгодовую вариабельность скорости роста концентрации CO_2.

Исследования автора показали, что средняя скорость роста концентрации атмосферного CO_2 над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири практически в два раза ниже, чем в экономически развитых районах Китая, однако, она не отличается от таковой, показанной для фоновых условий Евроазиатского континента.

Согласно наблюдениям, на обсерватории "ZOTTO" регистрируется неуклонный рост концентрации CO_2. Среднегодовая концентрация CO_2 над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири возросла с 391,9±9.2 (2010 г.) до 403,1±9,5 (2015 г.) млн$^{-1}$. Временной тренд роста концентрации атмосферного CO_2 (на основе линейной функции) в центральной части Сибири с ноября 2005 по январь 2016 гг. (2,04±0,01 млн$^{-1}$в год), оказался больше, чем за период с мая 2009 по январь 2016 гг. (2,34 млн$^{-1}$). Показанная закономерность свидетельствует о необходимости длительных наблюдений за концентрацией CO_2.

По данным измерений на обсерватории "ZOTTO", обнаружена высокая межгодовая вариабельность скорости роста концентрации CO_2 (от 0,3 до 4,1 млн$^{-1}$),

что для территории Сибири показано впервые. Максимальные темпы роста концентрации CO_2, около 4 млн$^{-1}$, совпадают с периодами крупных природных пожаров в Европейской части России в 2010 г. и на территории Сибири в 2012 г. Выявлено, что скорость роста концентрации атмосферного CO_2 над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири проявляет схожую тенденцию при сравнении ее с глобальной скоростью роста CO_2 (на примере станции "Mauna Loa") за одинаковый промежуток времени, и мало отличается от таковой характерной для бореального пояса Северной Америки, где произрастают аналогичные наземные экосистемы.

Несколько замечаний редакционного плана. В диссертации местами имеются грамматические ошибки, местами пропущены буквы, но все эти ошибки исправлены в автореферате. Согласно правилам, принятым в русскоязычной научной литературе целые числа должны отделяться от десятичных запятыми, а не точками, как принято в англоязычной. Частое употребление вольных физико-механических терминов «запуск и изъятие» фотосинтеза не совсем уместно.

Несмотря на отмеченные мелкие недостатки, по теоретической и практической значимости и актуальности исследования, по новизне, содержанию и объему, а также по глубине проработки и осмысления исследованного и собранного материала, представленная работа целом производит благоприятное впечатление. Представленный научный материал отличает высокое качество, квалифицированный уровень обработки и осмысления, в связи с чем результаты и сформулированные выводы весьма доказательны и не вызывают сомнений. На большом фактическом материале автором убедительно обоснованы вынесенные на защиту положения. Работу отличает хороший научный язык, грамотное использование математического аппарата.

Структура и наполнение диссертационной работы полностью соответствуют требованиям ВАК, основные защищаемые положения четко раскрыты в тексте диссертации, выводы в диссертации полно отражают решение поставленных диссертантом задач. Текст автореферата соответствует основному содержанию диссертации. В целом, диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой постановка проблемы, методы ее решения, интерпретация

полученных данных и их обсуждение свидетельствует о высоком научном уровне выполненных исследований.

Представленная диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским (докторским) диссертациям и соответствует специальности 03.02.08 – Экология, а ее автор Анастасия Владимировна Тимохина заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата биологических наук.

Заведующий лабораторией
биогеохимических циклов мерзлотных экосистем
Института биологических проблем
криолитозоны СО РАН
д-р биол.наук
по специальности 03.00.16 «экология» Максимов Трофим Христофорович

16 августа 2017 года

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИБПК СО РАН)

677980, г. Якутск, пр. Ленина, д. 41,
Тел.: 8 (4112) 233 58 97
E-mail: tcmax@mail.ru

Подпись Максимова Трофима Христофоровича заверяю,
инспектор отдела кадров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук _____ С.В. Янкова
16 августа 2017 г.