

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ ОТКЛИКА НА
ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОЙ
МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА**

Студентка 231м группы
Савина К.Д.

Научный руководитель д.ф.-м.н. Елисеев А.В.

Содержание

1	Введение	2
2	Обзор литературы	7
3	Методы	14
4	Система "Растительность-почва"	16
4.1	Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва"	17
5	Система "Растительность-почва-гумус"	18
5.1	Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус"	22
6	Система "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"	23
6.1	Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"	28
7	Система "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-кли- мат"	31
7.1	Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"	36
8	Выводы	41
9	Список литературы	43

1 Введение

Изменение запаса углерода в резервуаре определяется как разница в сумме приходящих и уходящих потоков. За приход углерода в наземных экосистемах отвечает в основном фотосинтез, для океана это также прямое поглощение углекислого газа из атмосферы. Уходящие потоки обусловлены автотрофным и гетеротрофным дыханием, а также другими разнообразными процессами. Существуют и внутренние потоки между компонентами экосистем — например, между растительностью и почвой, почвой и гумусом.

Модели углеродного цикла постоянно развиваются, включая в себя новые процессы [1]. Это приводит к постепенному уточнению результатов численных экспериментов с ними.

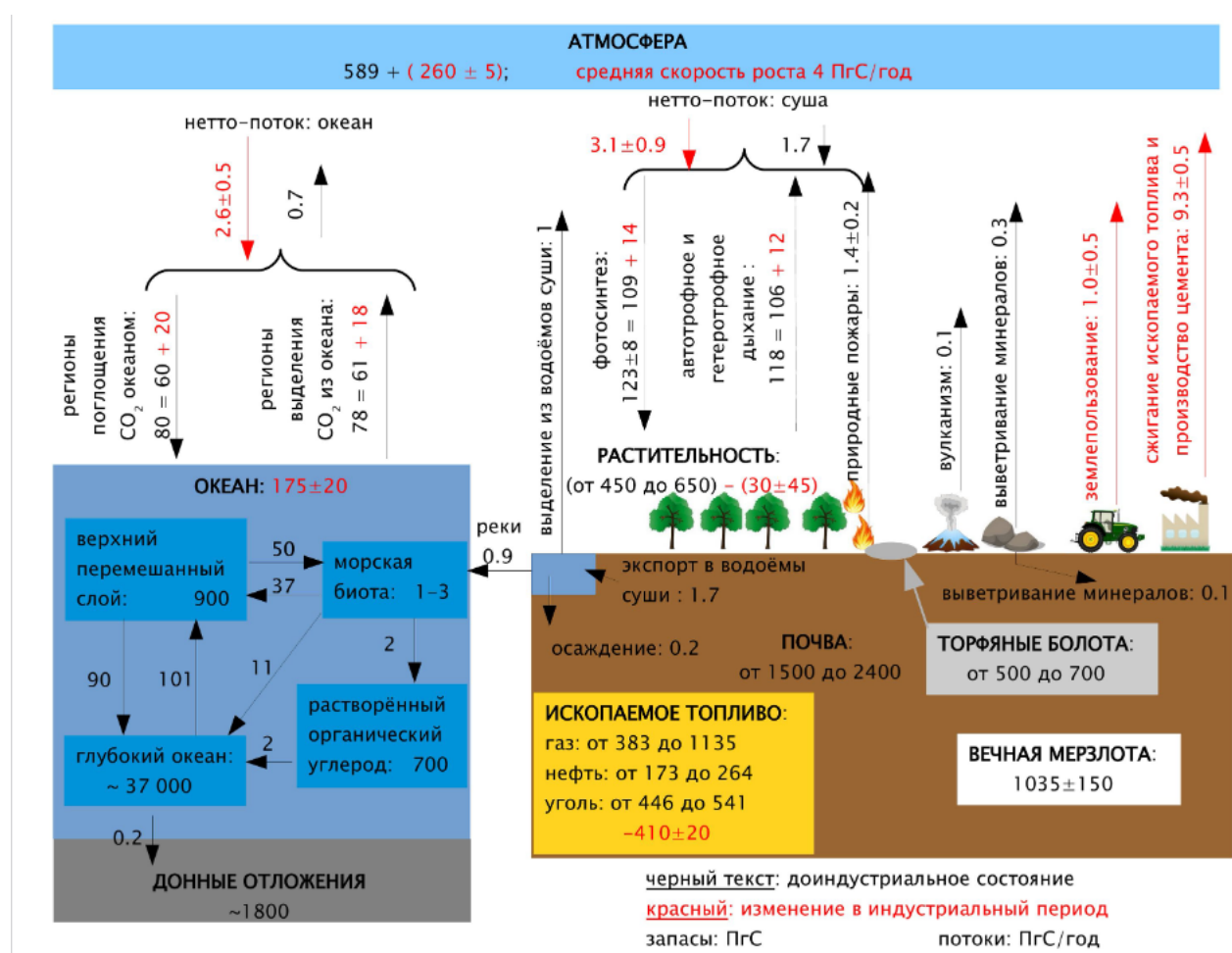


Рис. 1: Резервуарная модель с численными значениями потоков для полного углеродного цикла [2]

Временной масштаб отклика системы на внешнее воздействие играет фундаментальную роль в динамике этой системы. В частности, если временной масштаб отклика намного меньше временного масштаба изменения внешнего воздействия, то можно ожидать, что отклик системы близок к равновесию с внешним воздействием. В противном случае отклик системы существенно

отличается от равновесного.

Для Земной климатической системы (или просто Земной системы - ЗС) огромный интерес представляет динамика потепления климата, отмеченного в XX веке и в начале XXI века. В случае соответствующего увеличения антропогенной нагрузки его продолжения можно в целом ожидать и на протяжении XXI века, а, возможно, и в последующие несколько столетий. Современное потепление климата, по-видимому, заметно меньше климатического изменения, соответствующего равновесному отклику ЗС на современное внешнее воздействие на систему. Понимание этого привело к возникновению ряда метрик для количественной оценки такого различия. Наиболее часто используется отношение TCR/ECS, где TCR (transient temperature response) – изменение глобально осреднённой приземной температуры T_g в численном эксперименте с моделью ЗС (МЗС) при увеличении содержания CO_2 в атмосфере на 1%/год вплоть до удвоения, а ECS (equilibrium climate sensitivity) – соответствующее равновесное изменение при удвоении содержания CO_2 в атмосфере. Для современных моделей TCR/ECS близко к 0.7 [3]. Несмотря на очевидную неполноту этой характеристики (идеализированность изменения содержания CO_2 в атмосфере со временем, неучёт воздействий другой природы; неучёт вклада собственной изменчивости климата), она в целом позволяет охарактеризовать влияние временного масштаба отклика системы на его динамику при данном временном масштабе внешнего воздействия.

С другой стороны, в настоящее время, наряду со сценариями антропогенных воздействий на климат, приводящими к дальнейшему его потеплению, рассматриваются и сценарии, в которых антропогенная нагрузка на климат уменьшается после её увеличения. В последнем случае можно ожидать восстановления (хотя бы частичного) доиндустриального состояния различных характеристик состояния климата и экосистем.

Дополнительно следует иметь в виду возможную временную обратимость происходящих изменений. Соответствующее определение приведено в Оценочном отчёте Межправительственной группы экспертов по изменению климата "Глобальное потепление на 1,5°C": "Изменение считается необратимым, если оно приводит к состоянию системы, такому что временной масштаб восстановления из него за счёт естественных процессов существенно превышает временной масштаб, за который оно было достигнуто". Здесь следует иметь в виду что такая «неполная обратимость», будучи уже достаточно распространённым термином, в общем случае отлична от физического понятия необратимости и указывает, скорее, на запаздывание восстановления отдельных компонент ЗС относительно её основной характеристики - глобально осреднённой приземной температуры.

Различные компоненты Земной системы характеризуются широким спектром временных масштабов даже термодинамического отклика на внешнее воздействие - от недель для тропосферы до столетий для глубокого океана и даже тысячелетий для ледовых щитов. Этот спектр может становиться ещё

шире при учете других (не только термодинамических) процессов в Земной системе. Например, учёт отклика меридиональной океанической циркуляции на изменения климата увеличивает временной масштаб отклика от нескольких столетий до тысячелетий; для ледовых щитов время отклика существенно связано с реологическими особенностями этих щитов. Дополнительно значительные особенности инерционности климата могут проявляться на региональном уровне. Более того, даже компоненты ЗС с малым временем отклика из-за взаимодействия с другими компонентами могут характеризоваться заметно неравновесным откликом к изменению внешних условий. Примером может служить конвективная активность. Жизненный цикл конвективных облачных кластеров составляет несколько часов. Однако в численных экспериментах с моделями Земной системы с нарастанием и последующим уменьшением внешнего воздействия на климат при ряде условий медленный отклик глобальной циркуляции океана приводит к тому, что в начальном и конечном состояниях, близких между собой по значению глобальной температуры, интенсивность конвективных осадков в тропиках оказывается заметно различной. В свою очередь, принципиальная роль конвективной активности в формировании молниевой активности при этом способна привести к соответствующему неравновесному отклику и для характеристик молниевых ударов в атмосфере.

Более того, в случае временного масштаба отклика компонента системы, сравнимого с характерным временным масштабом воздействия на эту систему, связь между таким воздействием и состоянием системы может оказаться интуитивно неожиданной. В качестве примера можно привести запаздывание отклика термического состояния донных отложений на изменение температуры приземного воздуха и уровня моря при ледниковых циклах плейстоцена, которое оценено равным 5-15 тыс. лет, что может быть сравнимо с длительностью типичного межледникового [4-6]. При этом деградация вечной мерзлоты глубоких слоёв донных отложений может продолжаться и в начальный период развития оледенения. Подобное может быть справедливо и для регионов суши с толстым слоем многолетнемерзлых пород. Неучёт подобного запаздывания может привести к ошибочным выводам – в данном случае, о связи динамики вечной мерзлоты с более поздними по времени процессами изменения климата.

В свою очередь, запаздывание одной климатической переменной относительно другой часто служит основанием для выводов о тех или иных причинно-следственных связях в Земной системе. Наиболее известным примером этого является запаздывание при переходе "ледниковый период - межледниковье" для содержания углекислого газа в атмосфере q_{CO_2} (восстановленного по данным ледового бурения на ряде станций Антарктики) относительно температуры T (восстановленной по данным содержания $\delta^{18}O$ для этого же бурения) на несколько столетий, на основании чего делается вывод об отсутствии значимого парникового эффекта CO_2 в Земной системе. Последний вывод

ошибочен ввиду того, что временные запаздывания между двумя рядами данных в общем случае не характеризуют причинно-следственные связи между ними – это было показано в работах членов коллектива на примере взаимных временных сдвигов между T_g и q_{CO_2} [7-8]. Тем не менее, продолжение указанной дискуссии вплоть до настоящего времени, указывает на необходимость анализа временных масштабов отклика различных переменных, характеризующих состояние Земной системы в зависимости от временного масштаба внешнего воздействия на неё, в том числе с учётом особенностей взаимной динамики этих переменных.

Важность анализа времён отклика также объясняется тем, что процессы в Земной системе характеризуются некоторой инерцией, следовательно, ситуация, подобная представленной на графике (Рис.2), будет иметь место и для других её параметров, помимо отклонения среднеглобальной температуры. Данный пример, наиболее наглядно показывающий инерционность для Земной системы, характерен также для более новых моделей.

Итак, целью данной работы является анализ временных масштабов отклика для глобально-осреднённой модели углеродного цикла при его взаимодействии с климатом.

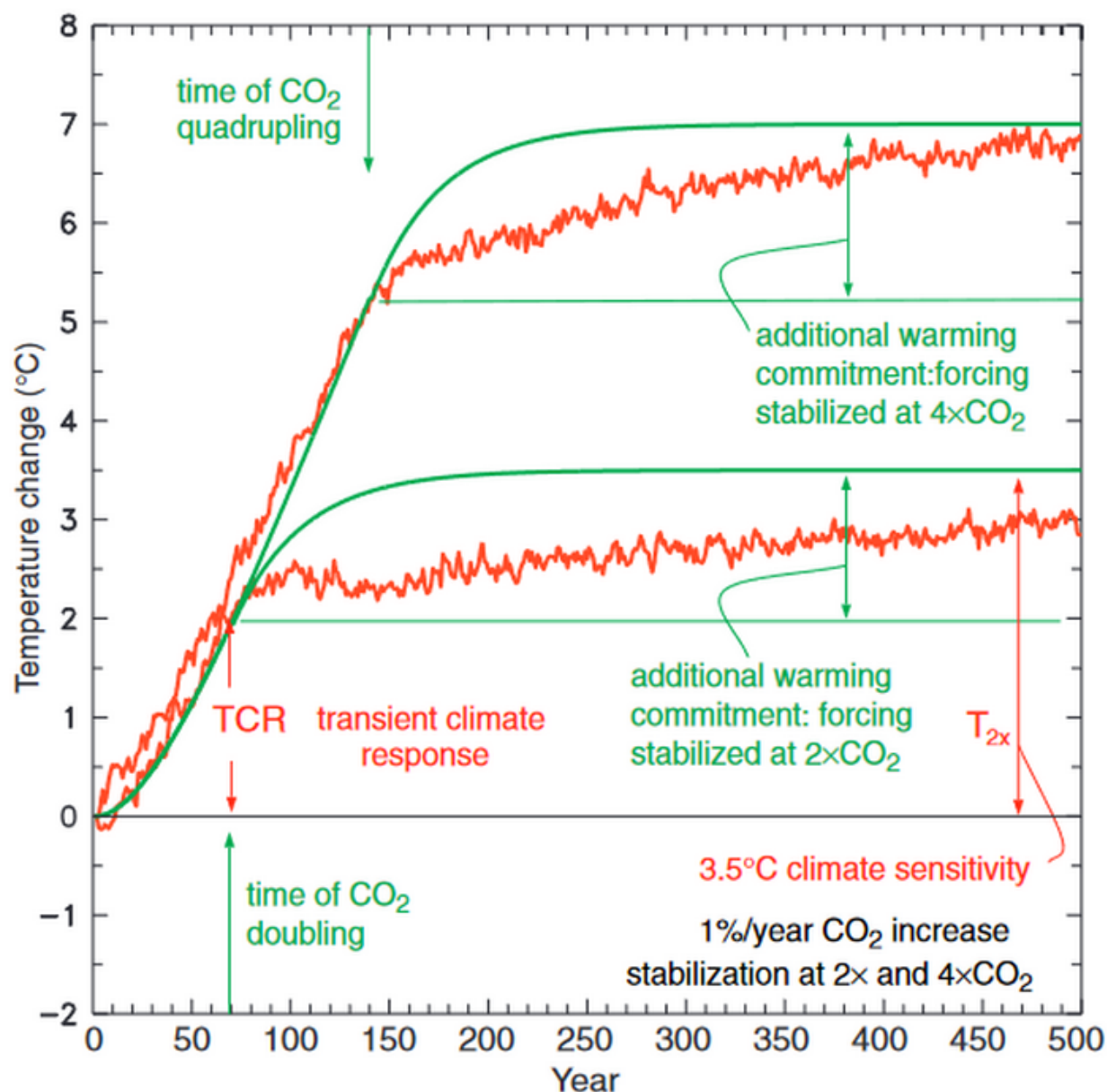


Рис. 2: Изменение среднеглобальной температуры при темпе роста CO_2 1% / год с последующей стабилизацией на уровне в 2 раза выше нынешнего либо в 4 раза выше [9]

2 Обзор литературы

В различных резервуарах углерод может находиться разное время, порядка 10^{-2} - 10^0 лет в листьях, 10^1 - 10^2 лет в древесине и 10^2 - 10^3 в почве, что затрудняет поиск характерных временных масштабов для общего углеродного цикла. В литературе имеется несколько терминов для характеристики способности системы запасать и преобразовывать соединения углерода — turnover time, residence time, transit time.

Turnover time, как правило, отношение запасов углерода в резервуаре к приходящим или уходящим потокам, $\tau = C_{total}/flux$. Обычно при таких расчётах считается, что экосистема находится в состоянии равновесия, поэтому возможно применение в формуле любого из данных потоков. Чаще всего используется уходящий поток. Transit time - разница в возрасте частиц, покидающих резервуар, и частиц, приходящих в него. Residence time, как правило, обозначает либо то же, что turnover time, либо то же, что transit time.

В других работах именно подобные времена рассчитывались как характеристика временных масштабов углеродного цикла, однако в данном подходе рассматривается статический случай, что противоречит динамической природе соответствующих уравнений баланса углерода (закону сохранения массы). Также в части работ, посвящённых характерным временным масштабам нахождения углерода в растительности, в качестве *flux* используется *GPP* (gross primary production - валовая первичная продукция), в другой части - *NPP* (net primary production - чистая первичная продукция), которые отличаются на величину автотрофного дыхания, что также приводит к неточностям.

В исследовании [10] анализировался отклик семи различных глобальных моделей растительности на будущие изменения климата, которые симулировались моделями общей циркуляции по четырём основным сценариям изменения концентрации CO_2 к 2100 г. В каждом случае наблюдается увеличение запасов углерода в растительности, также общая тенденция - рост запасов углерода в регионах тайги, центральной Африки, западной Амазонии, юго-восточной Азии и западного Китая. Тогда как в северо-западных регионах Северной Америки и центра Южной Америки, а также юга Средиземноморья и юго-запада Африки и Австралии запасы углерода, согласно данным моделирования, уменьшаются. Однако в результатах имеется большой разброс. Например, при увеличении температуры на 3,5-4,5 градуса, чему соответствует приземная концентрация углекислого газа 510-758 ppm, увеличение общего запаса углерода в растительности при среднем значении 224 Pg C колеблется для различных моделей от 52 до 477 Pg C, что соответствует разбросу порядка 100%.

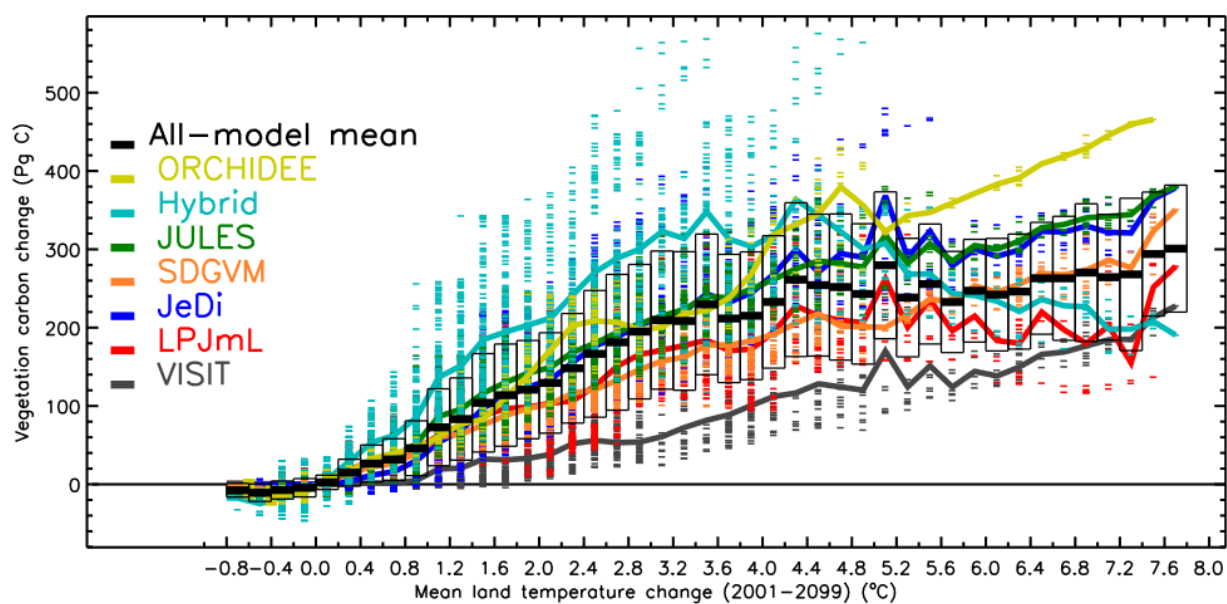


Рис. 3: Изменение глобальных запасов углерода в растительности в период 2001-2099 гг., согласно семи моделям, для возможных изменений температуры от $-0,8^{\circ}$ до $7,5^{\circ}$ к концу этого периода [10]

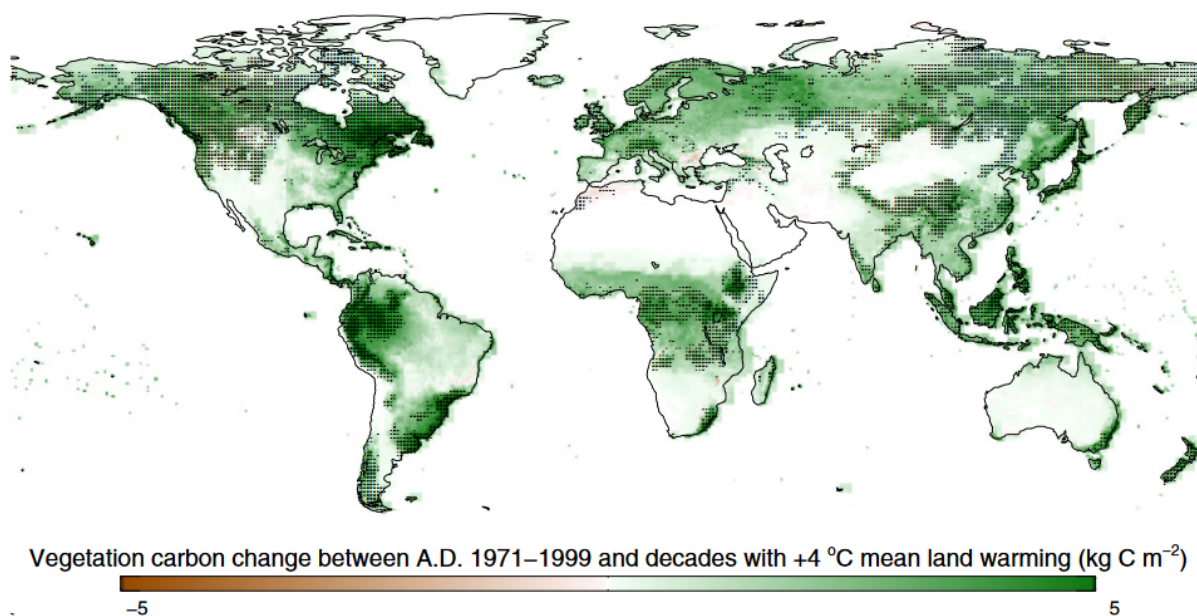


Рис. 4: Глобальное распределение изменения запасов углерода в растительности при росте приземной температуры на 4° [10]

При фиксации определённого сценария изменения концентрации CO_2 и определённой модели общей циркуляции получена оценка, что вариации запасов углерода в растительности объясняются на 30% больше неопределённостью изменения времён отклика углеродного цикла, чем изменениями в интенсивности фотосинтеза, вызванными эффектом фертилизации. Также обратной связи между углеродным циклом и изменениями климата посвящена статья [11], где авторы рассчитывают глобальное распределение времен пребывания углерода в наземных экосистемах, рассматривая их целиком. Получено среднеглобальное значение времени пребывания углерода, лежащее в пределах от 19 до 30 лет для доверительного интервала 95%.

Для тропических регионов вблизи экватора среднее время пребывания углерода τ составляет приблизительно 15 лет, тогда как для северных широт от 75% τ возрастает до 255 лет. Наибольший меридиональный градиент времени пребывания углерода наблюдается между субарктическими и умеренными широтами, а также между 20° и 40° северной широты.

Выявлена тесная связь между приземной температурой и временем пребывания углерода в наземных экосистемах, а также аналогично сильная корреляция между данным временем и количеством осадков. Авторы предполагают, что обратная связь между климатом и углеродным циклом может зависеть от гидрологического цикла более, чем сейчас учтено в моделях Земной системы. На рис. 5 видно, что наименьшие запасы углерода, в среднем, находятся в тундре и степях умеренных широт (порядка 100-150 лет), наибольшие - порядка 500-700 лет - в тропических лесах и тайге. Рассчитанные средние времена пребывания углерода минимальны, порядка 10 лет, в тропических лесах и саваннах, а максимальны для регионов тайги и тундры, где они составляют 50-65 лет. Пространственные корреляции τ и приземной температуры, а также τ и количества осадков имеют значительную изменчивость. Отрицательная корреляция между τ и температурой может наблюдаться из-за температурной зависимости процессов разложения. Значительная положительная корреляция наблюдалась для τ и осадков, как правило, в зонах перехода от преимущественно лесного типа растительности к травянистому, а также в тёплых засушливых регионах. В регионах тропических лесов явной зависимости не обнаружено, что объясняют большим влиянием иных факторов, чем температура и осадки.

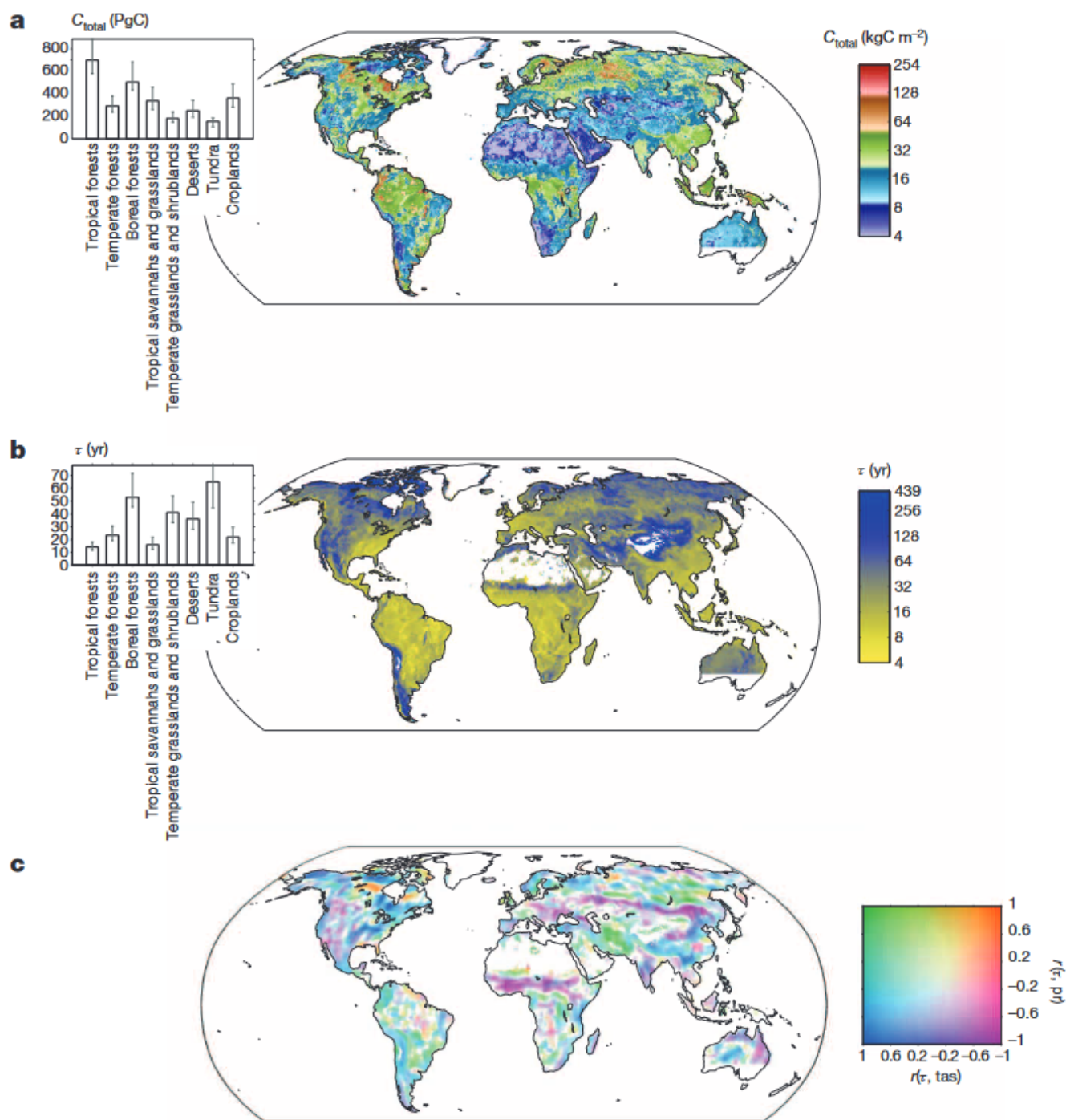


Рис. 5: Глобальные пространственные распределения а) полных запасов углерода в наземных экосистемах б) времени пребывания углерода в наземных экосистемах в) пространственная ковариация между временем пребывания углерода и температурой/осадками [11]

Существует ещё несколько значимых исследований, посвящённых расчёту характерных времён для углерода в различных резервуарах, основные приведены ниже.

В работе [12] изучается время пребывания углерода в растительности в области тайги и лесов умеренных широт в Северном полушарии. Авторы рассматривают отдельно древесную и листовенную части и рассчитывают для них время пребывания как отношение запаса углерода в соответствующем резервуаре к чистой первичной продукции, и затем итоговое время как их сумму с весовыми коэффициентами 0,3 для древесной части и 0,7 для листовенной, учитывающими распределение по данным двум резервуарам запасов углерода и время жизни листвы и древесной части растений. В результате получено время пребывания углерода в растительности, равное приблизительно 13 годам.

Авторы другой работы [13] используют модель CABLE с различными сценариями для исследования времён пребывания и прохождения углерода в наземных экосистемах и влияния изменения климата на них. Здесь, как и в остальных работах, рассматривается стационарный случай, и данные времена близки по значению. В числе результатов (рис. 6) можно отметить времена прохождения углерода большие 70 лет в северных областях России, Канады и Европы, а также в высокогорных регионах как Тибетское плато. Минимальные времена, до 30 лет, получены для тропических лесов Амазонки, Конго и Индонезии, а также для части степных зон Африки, Южной Америки, Великих Равнин США и австралийской саванны.

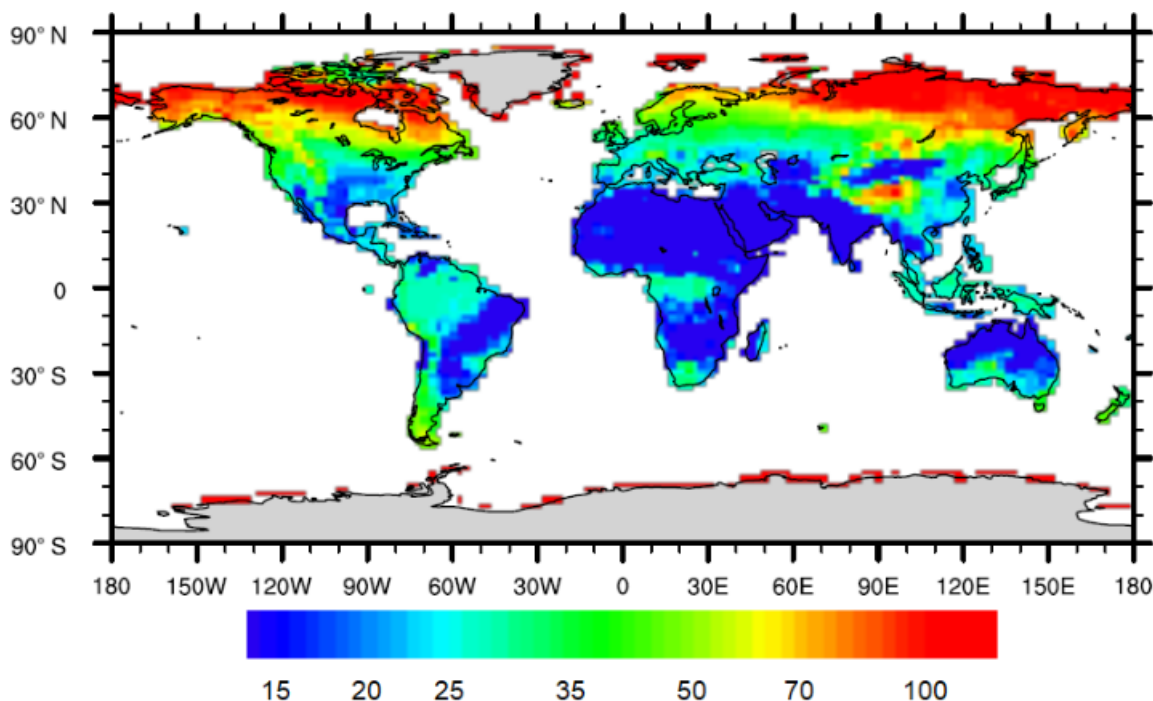


Рис. 6: Глобальное пространственное распределение времени прохождения углерода наземных экосистем, годы [13]

В работе [14] исследуется влияние различных факторов на времена пребывания углерода в почве и его запасы в зависимости от её типа и температуры, а также потенциальное воздействие на них изменения климата при помощи модели "Century включающей описание наземных биогеохимических циклов в зависимости от типа экосистемы. Основные результаты следующие: получено, что с увеличением доли глины в почвах растёт их возможность запасать углерод, если при потеплении климата происходит иссушение почв, они могут становиться значительными источниками углерода, в особенности торфяные. Времена пребывания углерода в почве, полученные в данной работе, составляют от приблизительно 15 лет в тропиках до 90 лет в северных высоких широтах.

Авторы работы [15] используют несколько моделей для исследования отклика углерода в наземных экосистемах на внешнее воздействие. Они разделяют углерод на "живой относящийся к растительности и микробиальной части почвы, и "неживой на который приходится остальная часть почвы и гумуса. Для первого получены времена пребывания от 0 до 25 лет, для второго - от 10 до 50 лет (рис. 7).

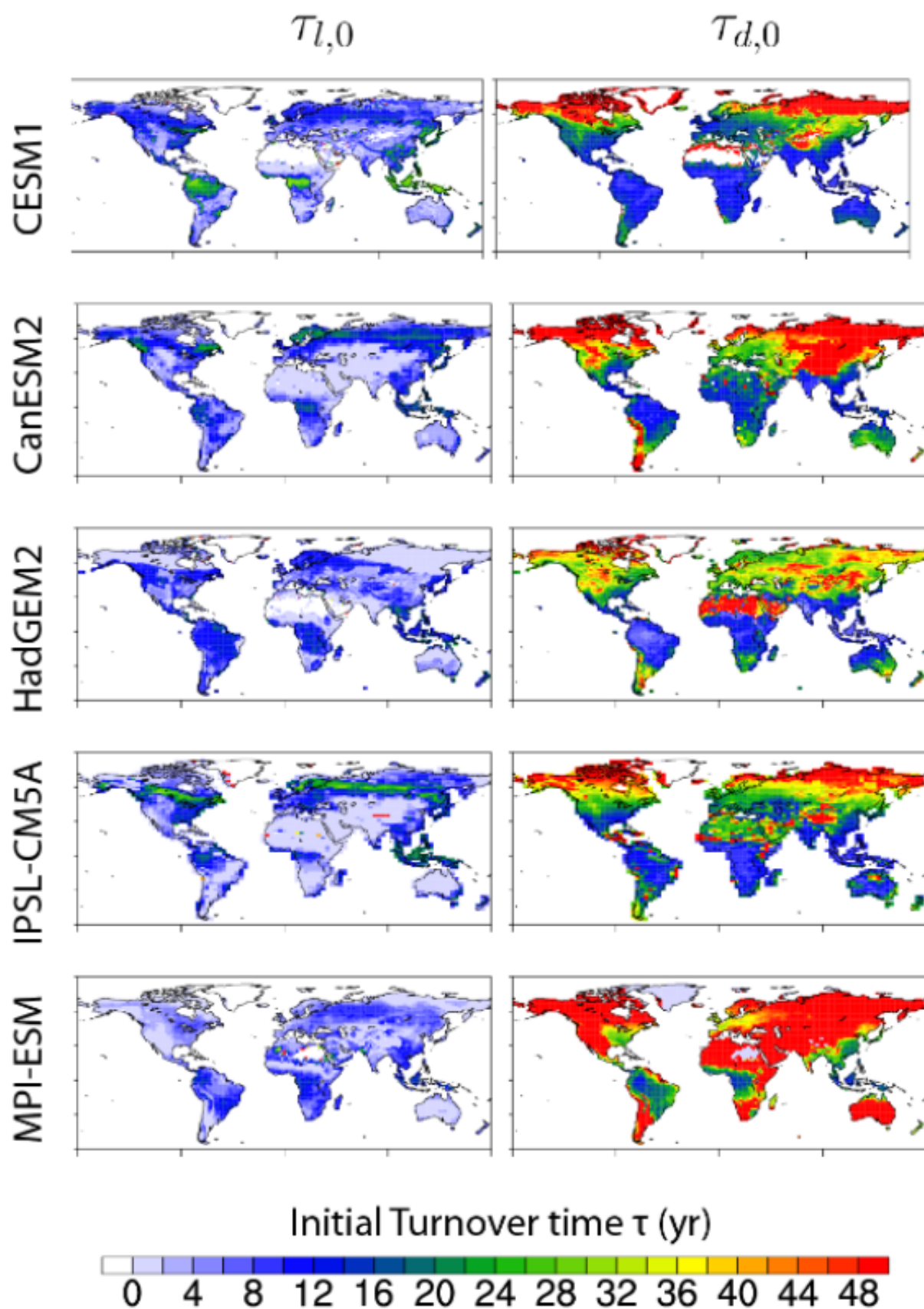


Рис. 7: Глобальное пространственное распределение времени прохождения углерода наземных экосистем с разделением на "живой"(слева) и "неживой"(справа) углерод для пяти различных моделей, годы [15]

3 Методы

В данной работе временные масштабы отклика рассчитываются как спектр собственных чисел динамической системы и сравниваются с характерными временными масштабами для статических систем. Рассматриваются динамические системы уравнений баланса углерода в резервуарах, которые в общем случае выглядят следующим образом:

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \mathcal{A}(\vec{U}) + \vec{G}(t), \quad (1)$$

где $\vec{U}$ - n -мерный вектор состояния, $\mathcal{A}$ — динамический оператор системы, $\vec{G}(t)$ — вектор внешних воздействий, t — время.

Задача Штурма–Лиувилля для линеаризованной системы (1) состоит в следующем [16]. На первом этапе из условия

$$\mathcal{A}(\vec{U}_\star) = 0 \quad (2)$$

находятся положения равновесия $\vec{U}_\star$. Затем решения представляются в виде

$$\vec{U} = \vec{U}_\star + \vec{u}. \quad (3)$$

В предположении $\|\vec{u}\| \ll \|\vec{U}_\star\|$ ($\|\cdot\|$ — норма вектора состояния в некотором пространстве) система (1) линеаризуется, превращаясь в систему

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \vec{u} + \vec{G}(t), \quad (4)$$

На втором этапе для автономного варианта системы (4) производится поиск векторов $\vec{u}^{(j)}$ и соответствующих им собственных чисел $\lambda^{(j)}$, таких что

$$\mathbf{A} \cdot \vec{u}^{(j)} = \lambda^{(j)} \vec{u}^{(j)}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что в невырожденном случае (т.е. если $\lambda^{(j_1)} \neq \lambda^{(j_2)}$ при всех $j_1 \neq j_2$) для таких решений справедливо

$$\vec{u}^{(j)}(t) = \vec{u}^{(j)}(0) \cdot \exp\left(\lambda^{(j)} t\right), \quad (6)$$

так что временной масштаб отклика для решения с собственным числом $\lambda^{(j)} < 0$ (решения с $\lambda^{(j)} > 0$ не представляют физического интереса, т.к. такие положения равновесия неустойчивы)

$$\tau^{(j)} = \frac{1}{|\lambda^{(j)}|}. \quad (7)$$

Справедливо, что n -мерная система имеет n собственных чисел (возможно, вырожденных) и n собственных векторов.

В свою очередь, собственный вектор $\vec{u}^{(j)}$ характеризует распределение отклика по переменным, описывающим состояние системы, на временном масштабе $\tau^{(j)}$. В невырожденном случае эти векторы находятся с точностью до условия нормировки, поэтому вместо них удобно использовать векторы $\vec{w}^{(j)} = \vec{u}^{(j)} / u_1^{(j)}$, где $u_1^{(j)}$ — первая компонента вектора $\vec{u}^{(j)}$. При этом переменная с индексом “1” становится выделенной, и отклик по остальным переменным может вычисляться по отношению к отклику по этой переменной.

В общем случае для системы вида (1) решение будет иметь вид

$$\vec{u}(t) = \vec{u}(0) + \int_0^t K(t - \tau) G(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где

$$K(t) = \sum_{(j)} a^{(j)} \vec{u}^{(j)}(0) \cdot \exp(\lambda^{(j)} t) \quad (9)$$

В невырожденном случае любое решение системы (4) может быть представлено в виде линейной комбинации собственных решений

$$\vec{u}(t) = \sum_{(j)} a^{(j)} \vec{u}^{(j)}(0) \cdot \exp(\lambda^{(j)} t) \quad (10)$$

с независимыми от времени коэффициентами $a^{(j)}$. В вырожденном случае решения становятся резонансными и имеют вековые слагаемые. Если в задаче интересно изменение на временном масштабе $\tilde{\tau}$, то в последнем соотношении достаточно ограничиться слагаемыми, соответствующими $\tau^{(j)}$, которые одного порядка с $\tilde{\tau}$ или большими.

Таким образом, предложенный метод позволяет анализировать особенности отклика системы на внешнее воздействие даже при отсутствии информации о деталях этого воздействия.

4 Система "Растительность-почва"

В данном приближении глобально-осреднённая модель наземного углеродного цикла имеет следующий вид [17-21]:

$$\begin{aligned}\frac{dC_v}{dt} &= F_p - F_{rv} - F_l - E_d, \\ \frac{dC_s}{dt} &= F_l - F_{rs},\end{aligned}\tag{11}$$

где C_v и C_s - запасы углерода в растительности и почве соответственно, F_p - интенсивность фотосинтеза наземной растительности, F_{rv} - интенсивность автотрофного дыхания, F_l - интенсивность опада/отпада, E_d - интенсивность эмиссий CO_2 в атмосферу из-за землепользования, F_{rs} - интенсивность разложения органики микробной биомассой почвы (гетеротрофное дыхание).

Потоки углерода в правой части системы зависят от C_v и C_s , а также от аномалии ΔT глобально-осреднённой среднегодовой приземной температуры от её равновесного значения следующим образом:

$$\begin{aligned}F_p &= A_p g_f Q_{10,p}^{\Delta T/\Delta T_0}, \\ F_{rv} &= A_{rv} C_v Q_{10,rv}^{\Delta T/\Delta T_0}, \\ F_l &= A_l C_v, \\ F_{rs} &= A_{rs} C_s Q_{10,rv}^{\Delta T/\Delta T_0}\end{aligned}$$

$A_p = 154 \text{ ПгС год}^{-1}$, $A_{rv} = 0,09 \text{ год}^{-1}$, $A_{rs} = A_{rv} \frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}$, $A_l = A_{rv}$, $q_{\text{CO}_2,1/2} = 150 \text{ млн}^{-1}$, $Q_{10,p} = 1.5$, $Q_{10,rv} = 2.15$, $Q_{10,rs} = 2.4$, $k_d = 0.27$; $C_{v,*} = 450 - 650 \text{ ПгС}$, $C_{s,*} = 1500 - 2400 \text{ ПгС}$ [2,19,21].

E_d и ΔT в данном приближении принимаем равным нулю.

При линеаризации системы получаем:

$$\begin{aligned}\frac{dC_v}{dt} &= -(A_{rv} + A_l)C_v, \\ \frac{dC_s}{dt} &= A_l C_v - A_{rv} \frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} C_s.\end{aligned}\tag{12}$$

Собственные числа данной системы уравнений $\lambda_1 = -(A_{rv} + A_l)$, $\lambda_2 = A_{rv} \frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} = A_{rs}$ соответственно, и, так как времена отклика $\tau^{(j)} = \frac{1}{|\lambda^{(j)}|}$, получим для них значения приблизительно $\tau^{(1)} = 5,6 \text{ лет}$ и $\tau^{(2)}$ от 25,6 до 59,3 лет (в зависимости от значения коэффициента гетеротрофного дыхания A_{rs}).

4.1 Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва"

Собственный вектор (СВ) $\vec{u}^{(j)}$, соответствующий $\tau^{(j)}$, характеризует распределение отклика по переменным, описывающим состояние системы, на временном масштабе $\tau^{(j)}$. В данной работе собственные вектора рассмотрены для каждой из систем от "растительность-почва" до "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат".

Рассчитывая собственные вектора для системы "растительность-почва" получаем для $\tau^{(1)}$ значение $\begin{pmatrix} C_v \\ C_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{A_l}{A_{rs}-A_{rv}-A_l} \end{pmatrix}$, где $\frac{A_l}{A_{rs}-A_{rv}-A_l}$ принимает значения от -0,64 до -0,55. Это значит, что в данном случае основной вклад во время отклика вносит растительность, а почва влияет на него, но в степени примерно в два раза меньшей.

Для второго времени отклика $\begin{pmatrix} C_v \\ C_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, и можно сделать вывод, что для $\tau^{(2)}$ определяющим фактором является резервуар почвы.

5 Система "Растительность-почва-гумус"

При рассмотрении почвы в виде слоя гумуса и слоя однородной почвы под ним модель углеродного цикла будет выглядеть следующим образом [22]:

$$\begin{aligned}\frac{dC_v}{dt} &= F_p - F_{rv} - F_l - E_d, \\ \frac{dC_s}{dt} &= F_l - F_{rs} - F_{hum}, \\ \frac{dC_h}{dt} &= F_{hum} - F_{rh},\end{aligned}\tag{13}$$

где C_v , C_s , C_h - запасы углерода в растительности, почве и гумусе соответственно,

F_p , F_{rv} , F_l , E_d , F_{rs} - те же, что в предыдущем приближении;

$$\begin{aligned}F_{hum} &= A_{hum}C_s, \\ F_{rh} &= A_{rh}C_hQ_{10,rh}^{\Delta T/\Delta T_0}\end{aligned}$$

- интенсивности гумификации почвы и разложения органики соответственно.

Поиск собственных чисел для данной системы даёт

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -(A_{rv} + A_l), \\ \lambda_2 &= -\frac{A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} + A_{rh}}{2} - \sqrt{\left(\frac{A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} + A_{rh}}{2}\right)^2 - A_{hum}^2 - A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}A_{rh}}, \\ \lambda_3 &= -\frac{A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} + A_{rh}}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}} + A_{rh}}{2}\right)^2 - A_{hum}^2 - A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}A_{rh}}.\end{aligned}$$

Таким образом, полученные времена отклика системы $\tau^{(j)} = \frac{1}{|\lambda^{(j)}|}$ составляют приблизительно 5,6 лет и (для значений $C_{s,*} = 1500$ ПгС, $C_{v,*} = 550$ ПгС) 44,3 и 87,5 лет.

Рассмотрим зависимость 2-го и 3-го времён отклика от значений A_{hum} в интервале от $0,005$ год⁻¹ до $0,03$ год⁻¹ и от значений A_{rh} в интервале от $0,0005$ год⁻¹ до $0,0002$ год⁻¹ (1-е время отклика от данных коэффициентов не зависит). Также имеется зависимость времён отклика от значений $C_{s,*}$ и $C_{v,*}$: $A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}$ может принимать значения от приблизительно 0,017 до 0,039. Графики данных зависимостей отдельно для значений $A_{rs} = A_{rv}\frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}$ от 0,017 год⁻¹ до 0,039 год⁻¹ с шагом 0,002 год⁻¹ (для A_{hum} , A_{rh} в указанных выше

интервалах с шагом $0,001 \text{ год}^{-1}$ и $0,0001 \text{ год}^{-1}$ соответственно) представлены на рис. 7,8.

Можно заметить, что для $\tau^{(2)}$ (Рис. 7) хорошо прослеживается закономерность - увеличение при росте интенсивности гумификации, а от интенсивности разложения органики почвы зависимость (причём достаточно сильную) наблюдаем только при комбинациях параметров, близких к тем, что приводят к некорректному вычислению $\tau^{(i)}$. Следовательно, считать это значимой закономерностью не стоит. За исключением граничных областей, где рассчитанное время отклика доходит до значений 60-110 лет, оно лежит в интервале приблизительно 25-50 лет. В данном случае нас интересует скорее порядок величины различных времён отклика, поэтому подобная точность допустима.

Для появляющегося в связи с добавлением компоненты гумуса $\tau^{(3)}$ существует зависимость исключительно от коэффициента разложения гумуса A_{rh} (рис. 8), причём сильная. Максимум $\tau^{(3)}$ имеет при его наименьших значениях, он составляет 2000 лет, а минимальная величина $\tau^{(3)}$, равная 50 годам, достигается при наибольшем значении A_{rh} .

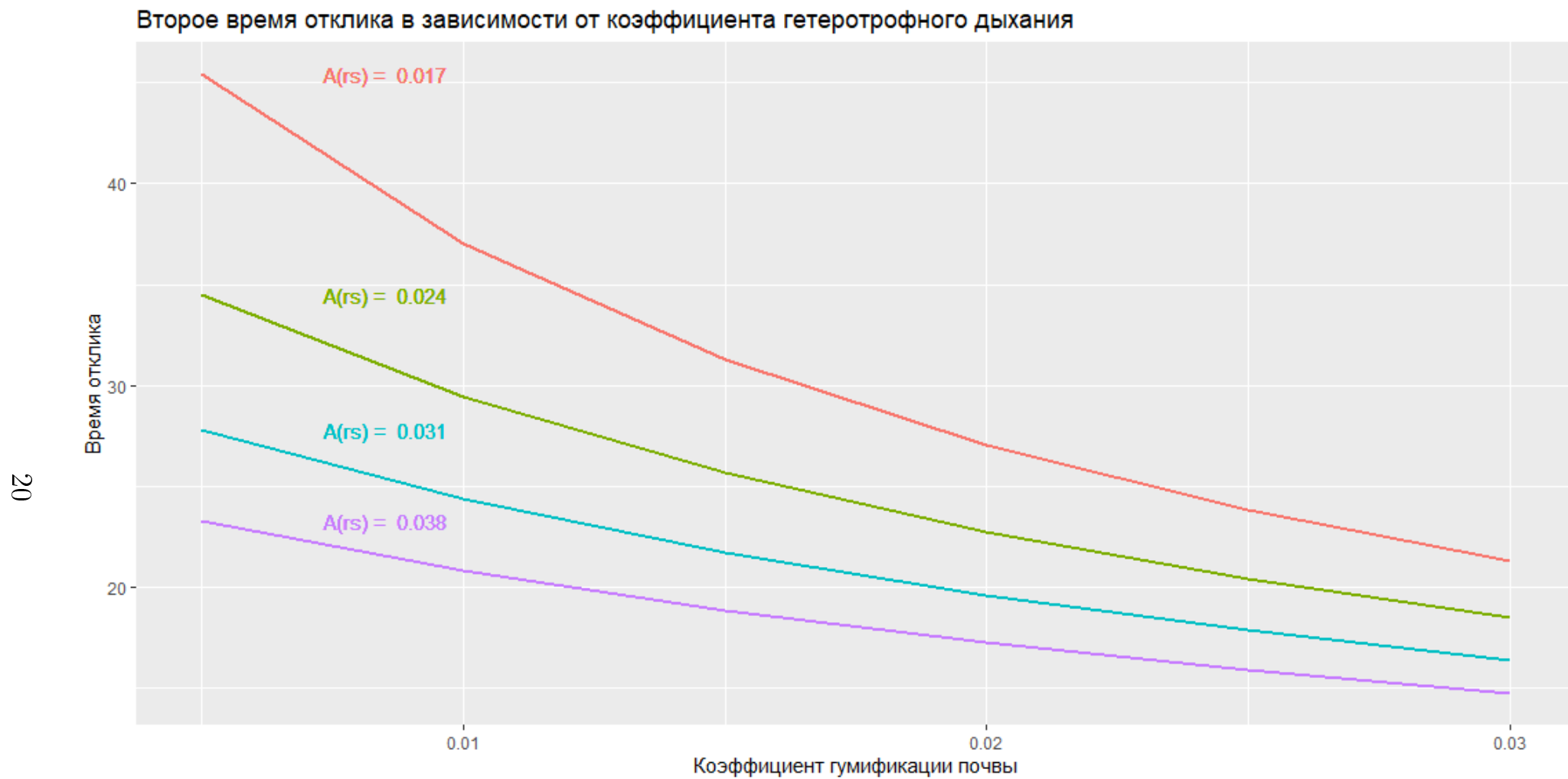


Рис. 8: Зависимость $\tau^{(2)}$ [годы] от A_{hum} и A_{rh} для различных значений $A_{rv} \frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}$ в модели "растительность-почва-гумус"

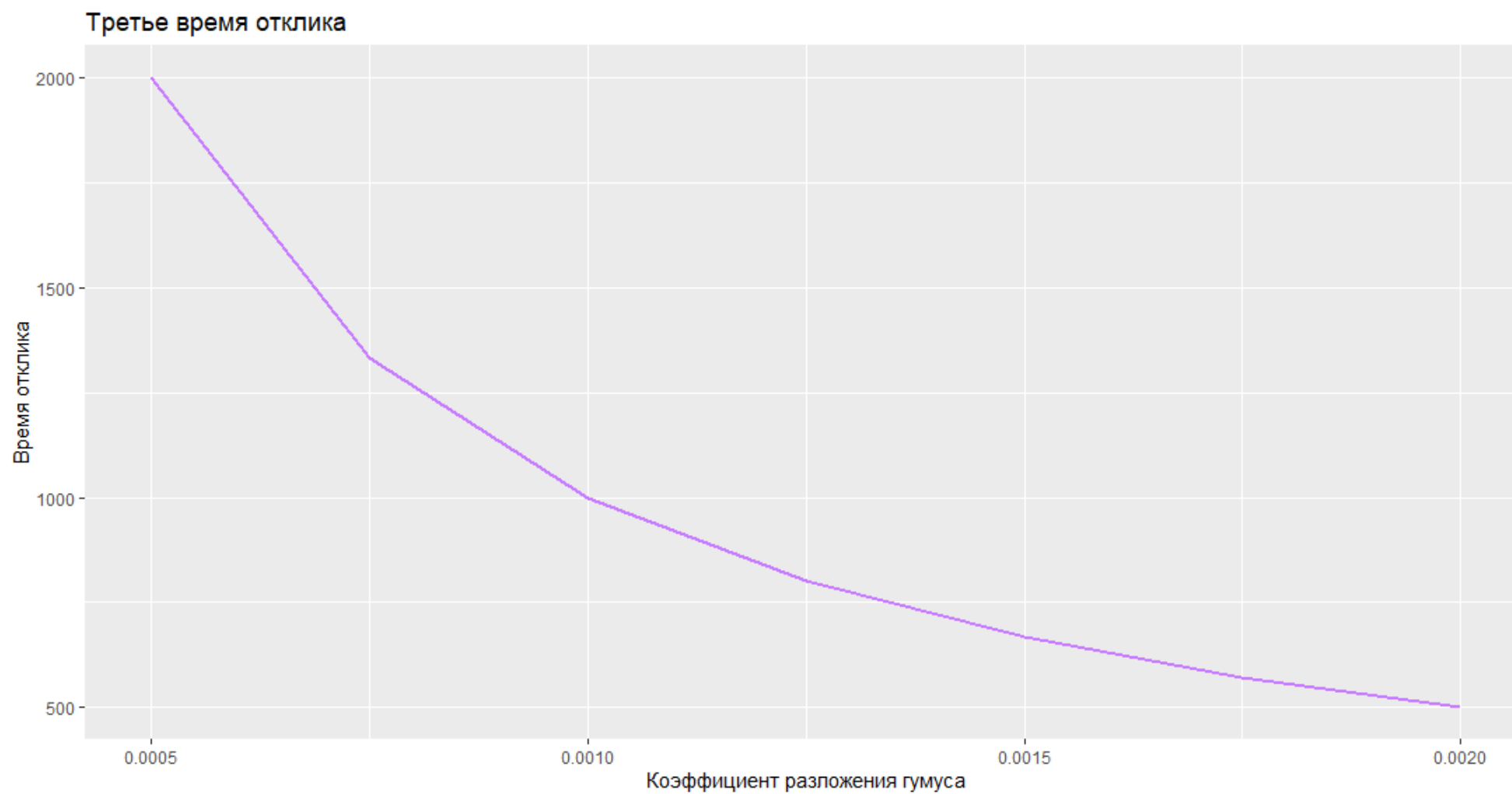


Рис. 9: Зависимость $\tau^{(3)}$ [годы] от A_{hum} и A_{rh} для различных значений $A_{rv} \frac{C_{v,*}}{C_{s,*}}$ в модели "растительность-почва-гумус"

5.1 Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус"

В данном случае рассматриваем собственные вектора, соответствующие временам отклика $\tau^{(1)}$, $\tau^{(2)}$ и $\tau^{(3)}$, полученным выше.

$$\text{Для первого времени отклика } \begin{pmatrix} C_v \\ C_s \\ C_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{A_l}{A_{rs}+A_{hum}-A_{rv}-A_l} \\ \frac{A_l*A_{hum}}{(A_{rs}+A_{hum}-A_{rv}-A_l)(-A_{rv}-A_l+A_{rh})} \end{pmatrix} =$$

Здесь $\frac{A_l}{A_{rs}+A_{hum}-A_{rv}-A_l}$ принимает значения от -2,9 (при минимальных A_{rs} и A_{hum}) и до -0,81 при максимальных значениях этих коэффициентов.

$\frac{A_l*A_{hum}}{(A_{rs}+A_{hum}-A_{rv}-A_l)(-A_{rv}-A_l+A_{rh})}$ уже требует численных расчётов, в результате которых минимум этого выражения определён как 0,016, а максимум - 0,137.

Это означает, что в данной системе на первое время отклика продолжает влиять в основном растительность, однако, при небольших A_{rs} и A_{hum} , значительное воздействие может оказывать и почва.

$$\text{Для } \tau^{(2)} \text{ собственный вектор } \begin{pmatrix} C_v \\ C_s \\ C_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{A_{hum}}{-A_{rs}-A_{hum}+A_{rh}} \end{pmatrix}, \text{ причём нижнее}$$

выражение может принимать значения от -0,23 до -0,11. Отсюда понимаем, что к данному времени отклика относится преимущественно резервуар почвы, а также небольшую роль играет гумус.

$$\text{Собственный вектор для } \tau^{(3)} \text{ будет иметь следующий вид: } \begin{pmatrix} C_v \\ C_s \\ C_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Это указывает на то, что на данном временном масштабе на время отклика влияет исключительно гумус.

6 Система "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

Добавим к системе, рассмотренной в предыдущем параграфе, уравнения, замыкающие баланс углекислого газа в природе: линейное приближение уравнения для поглощения углекислого газа океаном

$$F_{ocn} = B_{ocn}\Delta q_{CO_2} - \Gamma_{ocn}\Delta T,$$

где $\Delta q_{CO_2} = q_{CO_2} - q_{CO_2,0}$,

и уравнение баланса массы CO_2 в атмосфере

$$c_0 \frac{dq_{CO_2}}{dt} = E_{CO_2} - F_{ocn} - F_{lnd}.$$

Полученный набор уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dC_v}{dt} &= F_p - F_{rv} - F_l - E_d, \\ \frac{dC_s}{dt} &= F_l - F_{rs} - F_{hum}, \\ \frac{dC_h}{dt} &= F_{hum} - F_{rh}, \\ c_0 \frac{dq_{CO_2}}{dt} &= E_{CO_2} - B_{ocn}(q_{CO_2} - q_{CO_2,0}) + \Gamma_{ocn}\Delta T - F_{lnd}, \end{aligned} \quad (14)$$

с переменными C_v , C_s , C_h (запасы углерода в растительности, почве и гумусе соответственно) и q_{CO_2} (среднеглобальная приземная концентрация углекислого газа).

На графиках (Рис. 9, 10, 11) представлена зависимость полученных четырёх времён отклика от основных параметров модели. В том числе, от коэффициентов гетеротрофного дыхания A_{rs} , гумификации почвы A_{hum} , разложения гумуса A_{rh} и океанического коэффициента модели B_{ocn} для четырёх значений приземной концентрации углекислого газа: доиндустриального (280 ppm), нынешнего (400 ppm) и достигаемых к 2100 г. по сценариям SSP2-4.5 (600 ppm) и SSP2-8.5 (1200 ppm) [ССЫЛКА Mainshausen]. В каждом случае были рассчитаны наиболее значимые для данного времени отклика параметры, и зависимость от второстепенных представлена семейством линий и пунктиров одного цвета.

$\tau^{(1)}$ в зависимости от значений данных коэффициентов меняется незначительно, на несколько процентов, и так как данное изменение меньше масштаба погрешности, не будем считать его значимым для общей картины.

На рис. 9 видно, что второе время отклика составляет 10-40 лет, причём от коэффициентов гумификации почвы и гетеротрофного дыхания зависит

обратным образом весьма значительно. Отметим также его рост при увеличении концентрации углекислого газа в атмосфере: для доиндустриальных значений (280 ppm) $\tau^{(2)}$ составляет 10-20 лет, тогда как современные значения (при 400 ppm) примерно на 25% выше, а для сценария SSP2-8.5 (1200 ppm) данное время может принимать значения до 40 лет.

Для третьего времени отклика (45-220 лет) также наблюдаем интересные закономерности (рис. 10): при значениях океанического коэффициента B , меньших 0,2-0,3, в целом большее содержание CO_2 в атмосфере приводит к большим временам отклика с различием до двух раз для q_{CO_2} 280 и 1200 ppm. Затем, при $B_{ocn} > 0,3$, зависимость от концентрации углекислого газа становится обратной. Также стоит отметить значительную общую обратную зависимость $\tau^{(3)}$ от B_{ocn} . Для его значений 0,1 и 0,5 может наблюдаться разница до 150 лет, или уменьшение времени отклика в три раза. Также присутствует небольшая обратная зависимость от коэффициента гумификации почвы.

$\tau^{(4)}$, как видно по рис.11, принимает значения в основном от 800 лет и до 5000 лет, доходя до 10^4 лет в отдельных случаях. Здесь мы наблюдаем существенную обратную зависимость от концентрации CO_2 в атмосфере, а также от океанического коэффициента B модели, однако, наименее чувствительны к нему наибольшие концентрации углекислого газа. Отметим, что при его увеличении также уменьшается разброс линий, то есть, зависимость от остальных параметров, не представленных на данном графике. Зависимость от коэффициента разложения гумуса также обратная - разность во времени отклика для его минимального и максимального значения может составлять в среднем около 2000 лет.

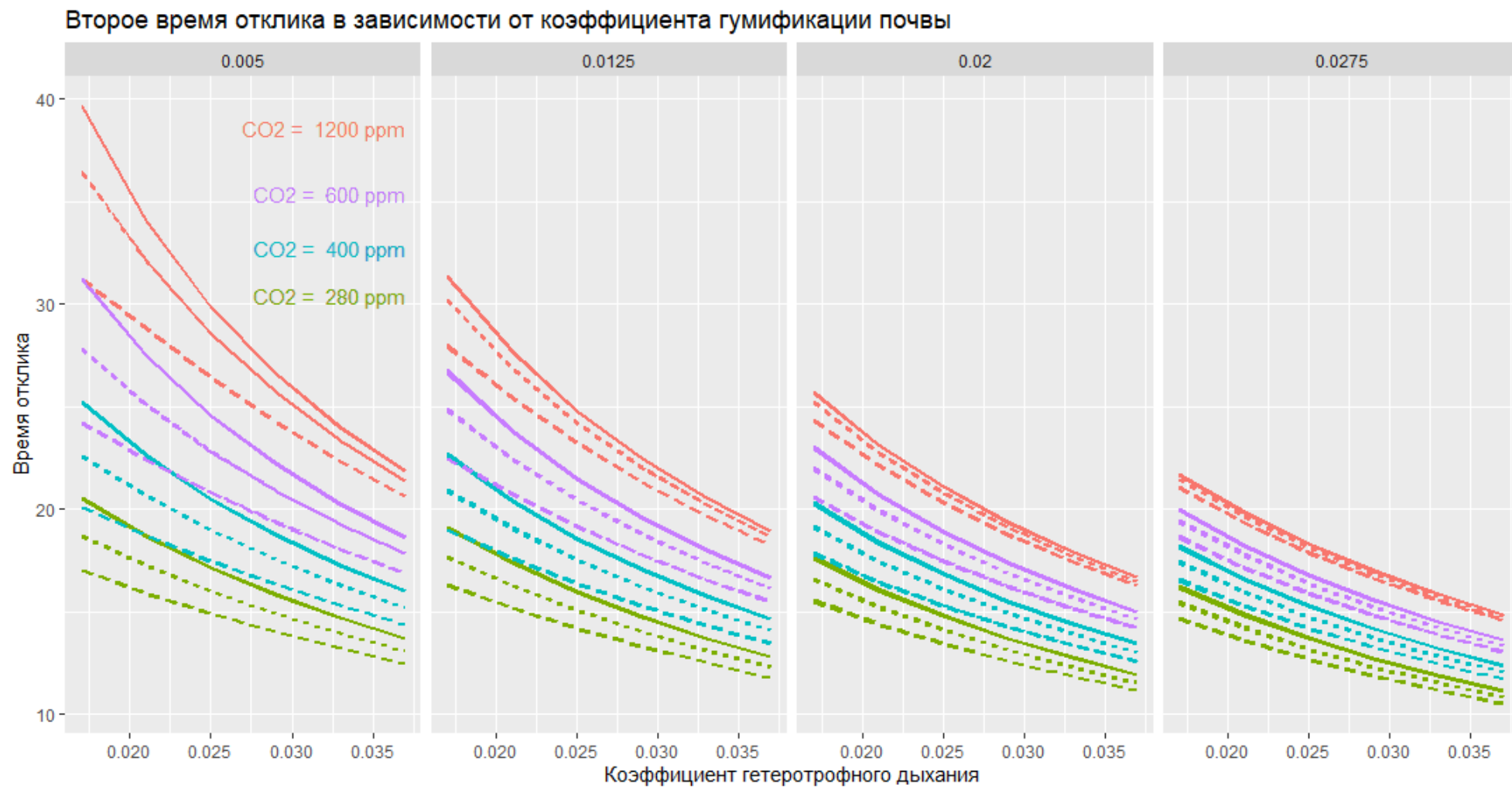


Рис. 10: Зависимость $\tau^{(2)}$ [годы] от A_{hum} и B_{ocn} для значений q_{CO_2} 280, 400, 600 и 1200 ppm в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

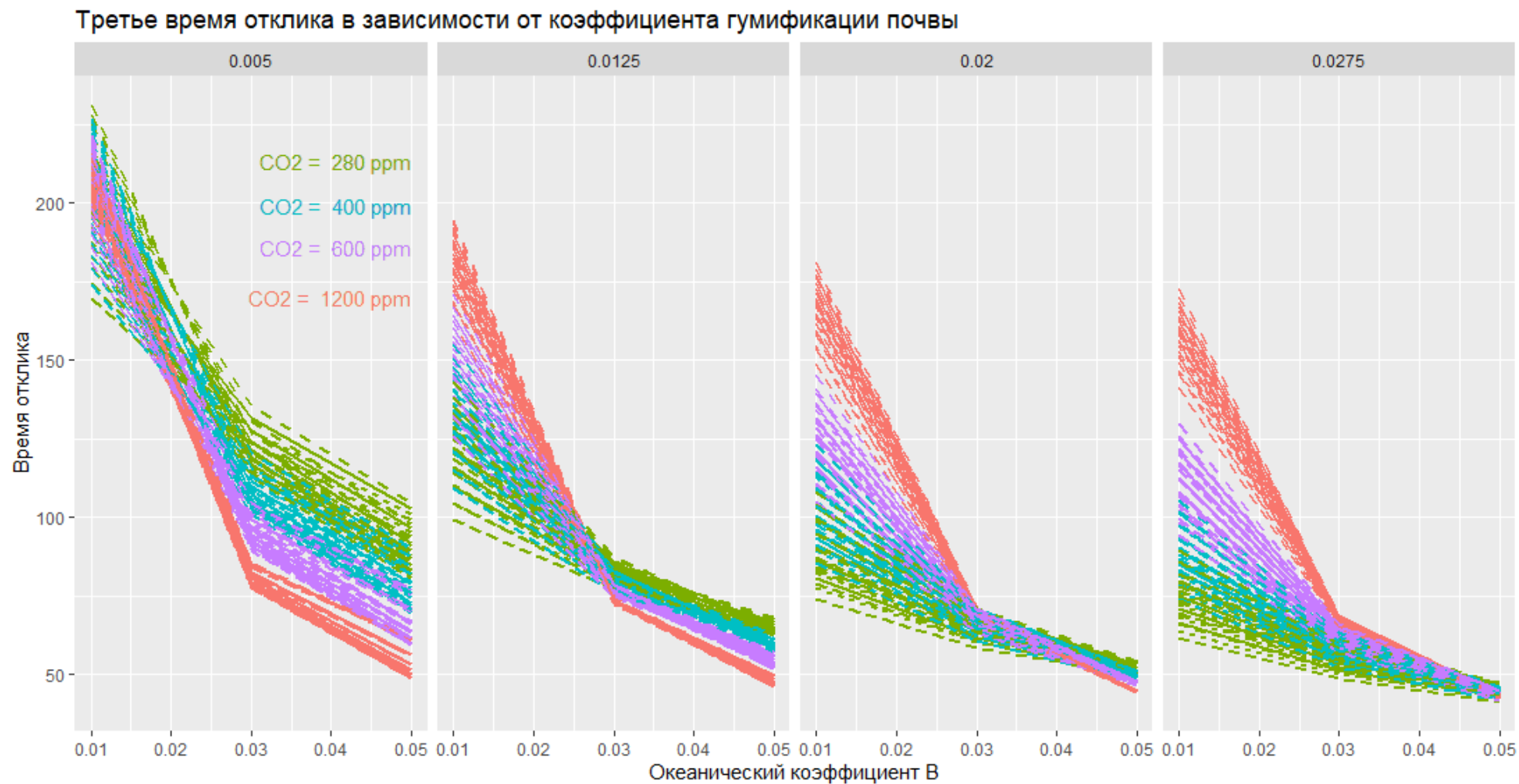


Рис. 11: Зависимость $\tau^{(3)}$ [годы] от A_{hum} и B_{ocn} для значений q_{CO_2} 280, 400, 600 и 1200 ppm в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

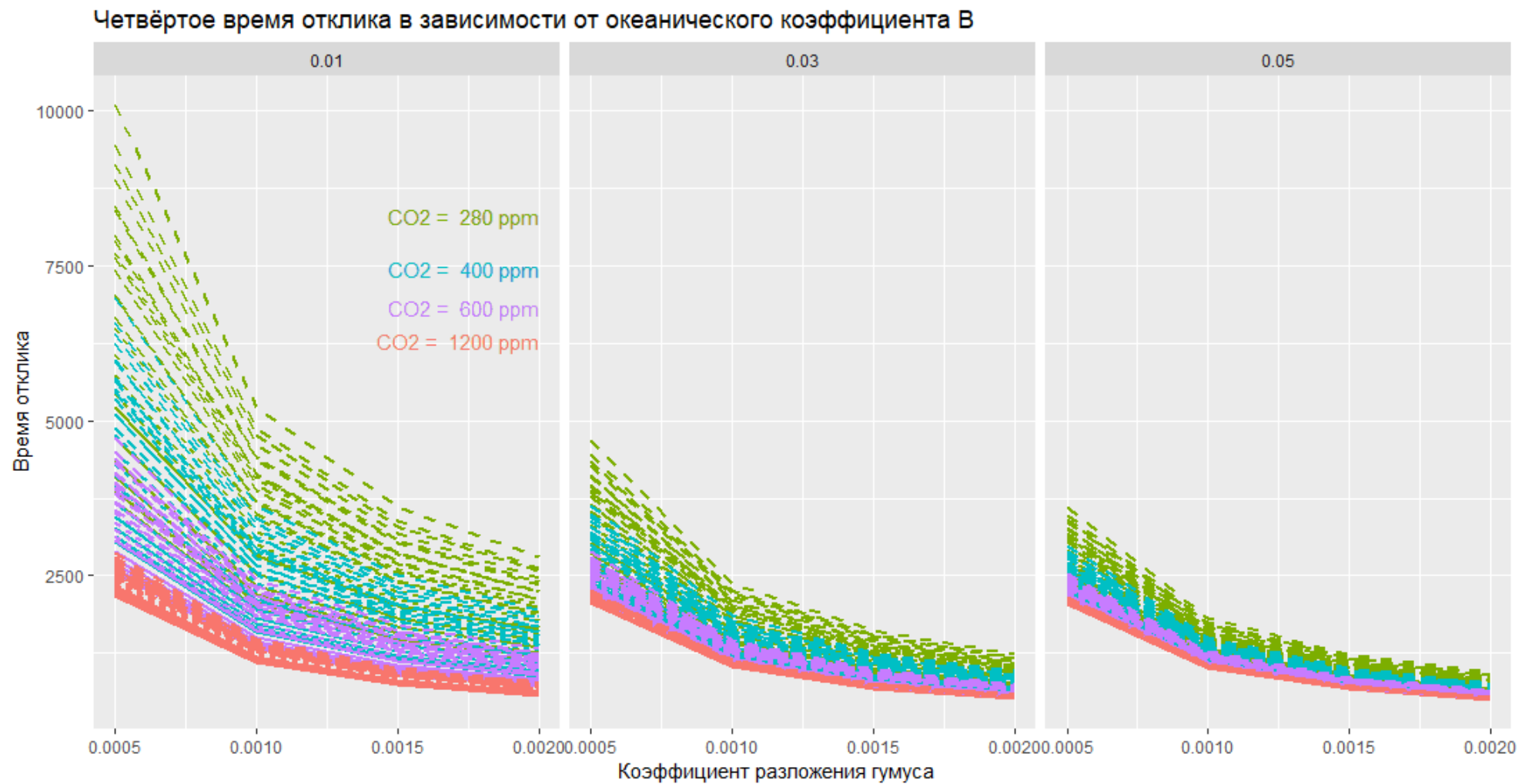


Рис. 12: Зависимость $\tau^{(4)}$ [годы] от A_{hum} и B_{ocn} для значений q_{CO_2} 280, 400, 600 и 1200 ppm в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

6.1 Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

Для анализа величины вкладов резервуаров на различных временных масштабах в данной системе будем рассматривать отклик компонент собственных векторов относительно выбранной в каждом случае выделенной компоненты.

Для первого времени отклика в качестве выделенной переменной оптимально выбрать переменную запаса углерода в растительности C_v . Отклик остальных компонент относительно неё мал, следовательно, на данное время отклика влияет в основном резервуар растительности.

Для $\tau^{(2)}$ при рассмотрении отклика относительно компоненты атмосферы можно видеть (рис. 13), что здесь в первую очередь вносит вклад растительность, приблизительно в два раза меньше влияние почвы и ещё в несколько раз меньше вклад гумуса. Итак, на данном временном масштабе (10-40 лет) основную роль играет растительность, в меньшей мере - почва, а также гумус, но весьма незначительно.

Для третьего времени отклика при выборе выделенной переменной C_s можно видеть (рис. 14), что относительный отклик остальных переменных мал, следовательно, масштаб времени порядка 50-200 лет относится преимущественно к почве с небольшой долей вклада от резервуара гумуса.

На масштабах тысячелетий (четвёртое время отклика) при выделенной переменной C_h получаем, что относительные отклики других переменных ничтожно малы, значит, на данный масштаб времени влияет только резервуар гумуса.

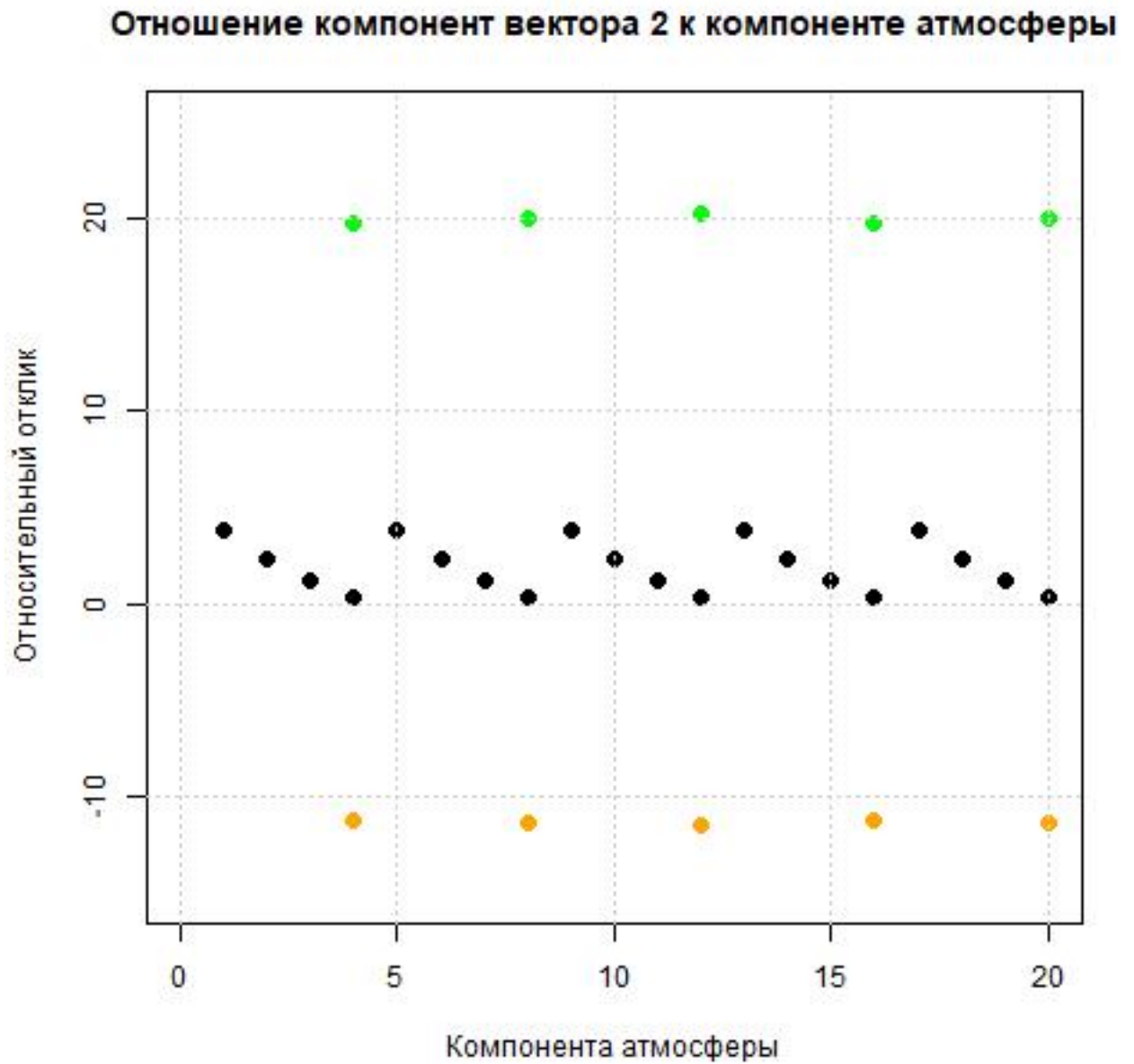


Рис. 13: Отношение значений компонент C_v (зелёный), C_s (жёлтый), C_{hum} (чёрный) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(2)}$, к выделенной компоненте q_{CO_2} в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

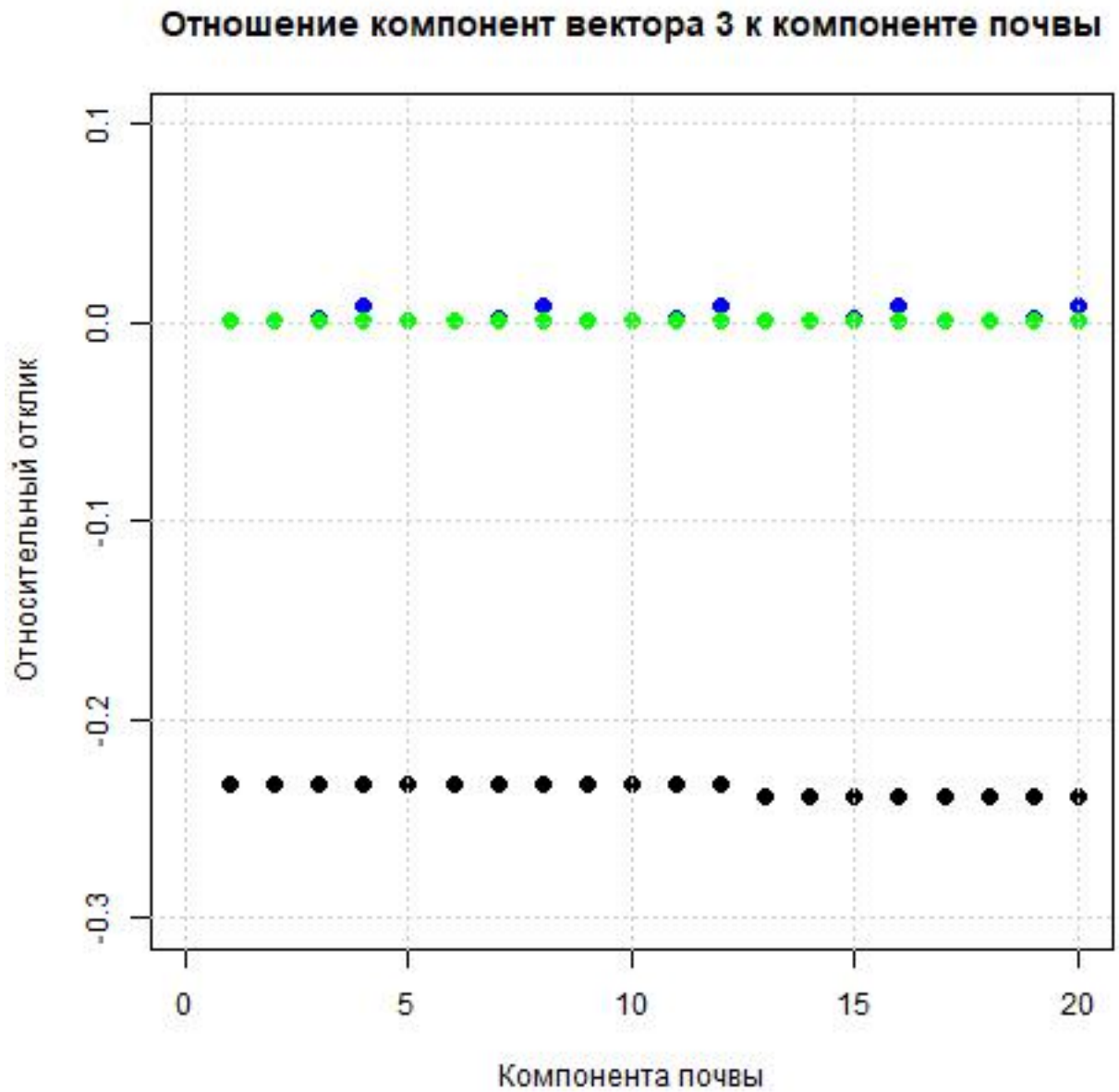


Рис. 14: Отношение значений компонент C_v (зелёный), q_{CO_2} (синий), C_h (чёрный) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(3)}$, к выделенной компоненте C_s в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера"

7 Система "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

Для рассмотрения наиболее полной системы введём уравнение для изменения глобальной приземной температуры, связанное с климатом [21]:

$$C \frac{\Delta T}{dt} = R - \lambda \Delta T$$

Где

$C = 1 \text{ ГДж м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ - эффективная теплоёмкость системы,

$\lambda = 0.6 - 1.6 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ - параметр климатической чувствительности,

$$R \equiv R_{\text{CO}_2} = R_{\text{CO}_2,0} \times \ln \frac{q_{\text{CO}_2}}{q_{\text{CO}_2,0}} \quad (15)$$

- радиационное возмущающее воздействие, с $R_{\text{CO}_2,0} = 5.3 \text{ Вт м}^{-2}$ [23].

Итак, преобразовав систему для удобства, получаем её в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dC_v}{dt} &= F_p - F_{rv} - F_l - E_d, \\ \frac{dC_s}{dt} &= F_l - F_{rs} - F_{hum}, \\ \frac{dC_h}{dt} &= F_{hum} - F_{rh}, \\ \frac{dq_{\text{CO}_2}}{dt} &= (E_{\text{CO}_2} - B_{ocn}(q_{\text{CO}_2} - q_{\text{CO}_2,0}) + \Gamma_{ocn}\Delta T / - F_{lnd})/c_0, \\ \frac{\Delta T}{dt} &= (R_{\text{CO}_2,0} \times \ln \frac{q_{\text{CO}_2}}{q_{\text{CO}_2,0}} - \lambda \Delta T)/C, \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь добавляется пятая переменная ΔT - аномалия глобально осреднённой среднегодовой приземной температуры от её равновесного значения.

Линеаризуя систему, приводим её к виду, пригодному для расчёта собственных значений. Ввиду значительных размеров матрицы и большого числа параметров, влияющих на значение получаемых в итоге времён отклика, аналитический метод решения здесь не применим.

Численные расчёты показывают, что значение первого времени отклика равно приблизительно 4,19 лет, но так как нас интересует точность до лет и большая является уже недостоверной, будем считать, что оно равно 4 годам. Данное время отклика зависит от A_{rs} , B_{ocn} и $q_{\text{CO}_2,0}$, однако, весьма незначительно.

Второе время отклика лежит в пределах 25-100 лет и зависит от A_{rs} , A_{hum} и B_{ocn} , причём по графику (Рис. 16) видно, что $\tau^{(2)}$ уменьшается при возрастании A_{rs} и A_{hum} , а также B_{ocn} - но при значении A_{hum} в меньшей половине его возможного интервала.

Третье время отклика находится в пределах от 50 до 220 лет, однако, по графику (рис. 17) видно, что в основном его значения лежат в интервале 220-240 лет. На его величину влияют параметры A_{rs} , A_{hum} , $q_{CO_2,0}$ и B_{ocn} (пунктирные линии). При увеличении B_{ocn} значение $\tau^{(3)}$ резко уменьшается с порядка двухсот лет до 50-100 лет. от него. Зависимость от $q_{CO_2,0}$ обратная, но слабая и не слишком существенная на таких временных масштабах.

Четвёртое время отклика принимает значения в интервале 800-3500 лет. Зависимость, причём сильная обратная, наблюдается лишь от параметра интенсивности разложения гумуса - при его минимальном значении 0,0005 $\tau^{(4)}$ порядка 3000 лет, при максимальном 0,0020 $\tau^{(4)}$ уменьшается до 800-1000 лет (Рис. 18).

Величину пятого времени отклика (порядка 10^7 - 10^{10} лет) вряд ли можно считать достоверной: такое значение, по-видимому, следствие получения близкого к нулю собственного числа в численных расчётах. Поэтому в настоящий момент мы вынуждены оставить его, а также соответствующий ему собственный вектор, без внимания.

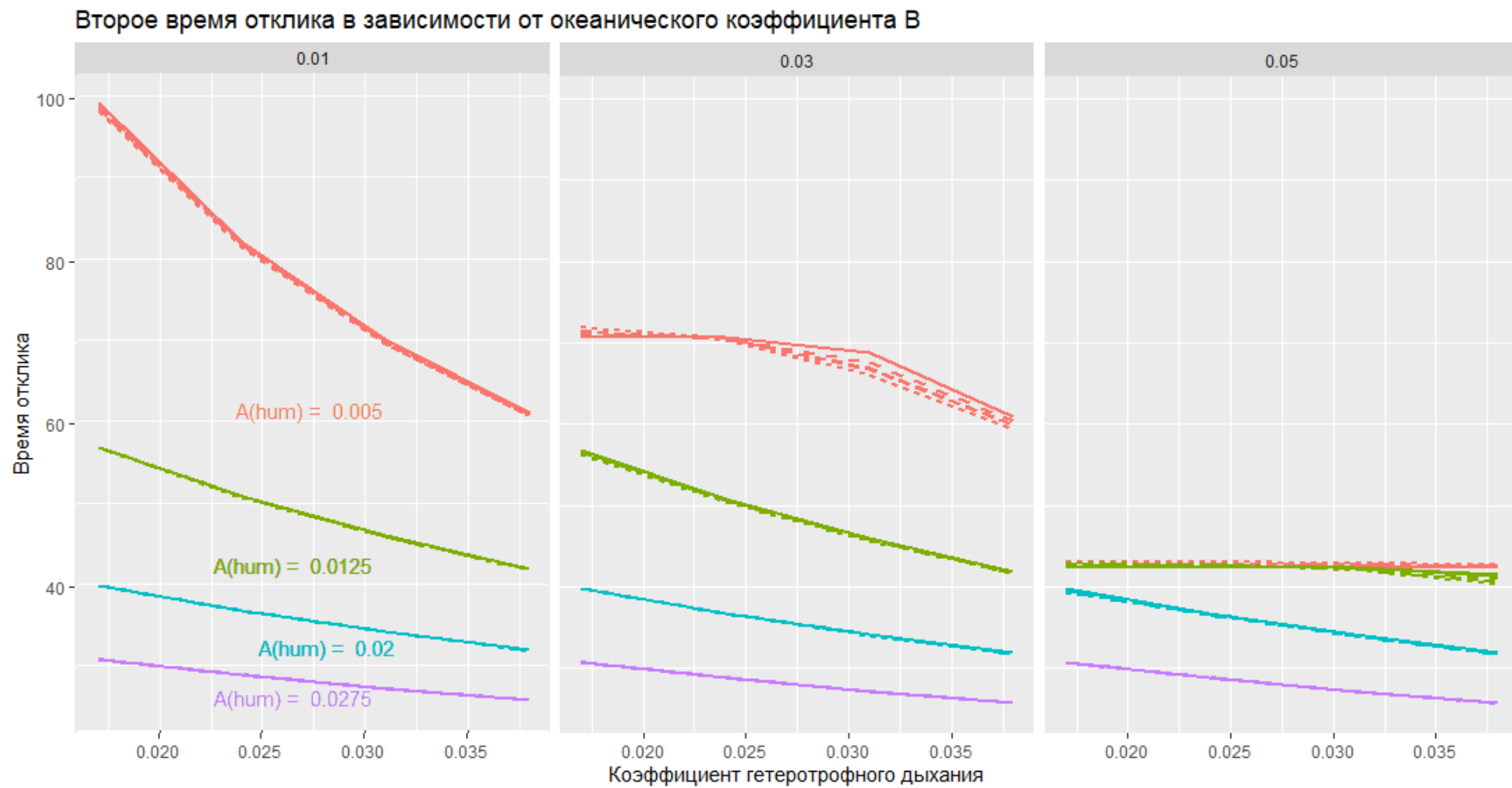


Рис. 15: Зависимость $\tau^{(2)}$ [годы] от A_{rs} , A_{hum} и B_{ocn} в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

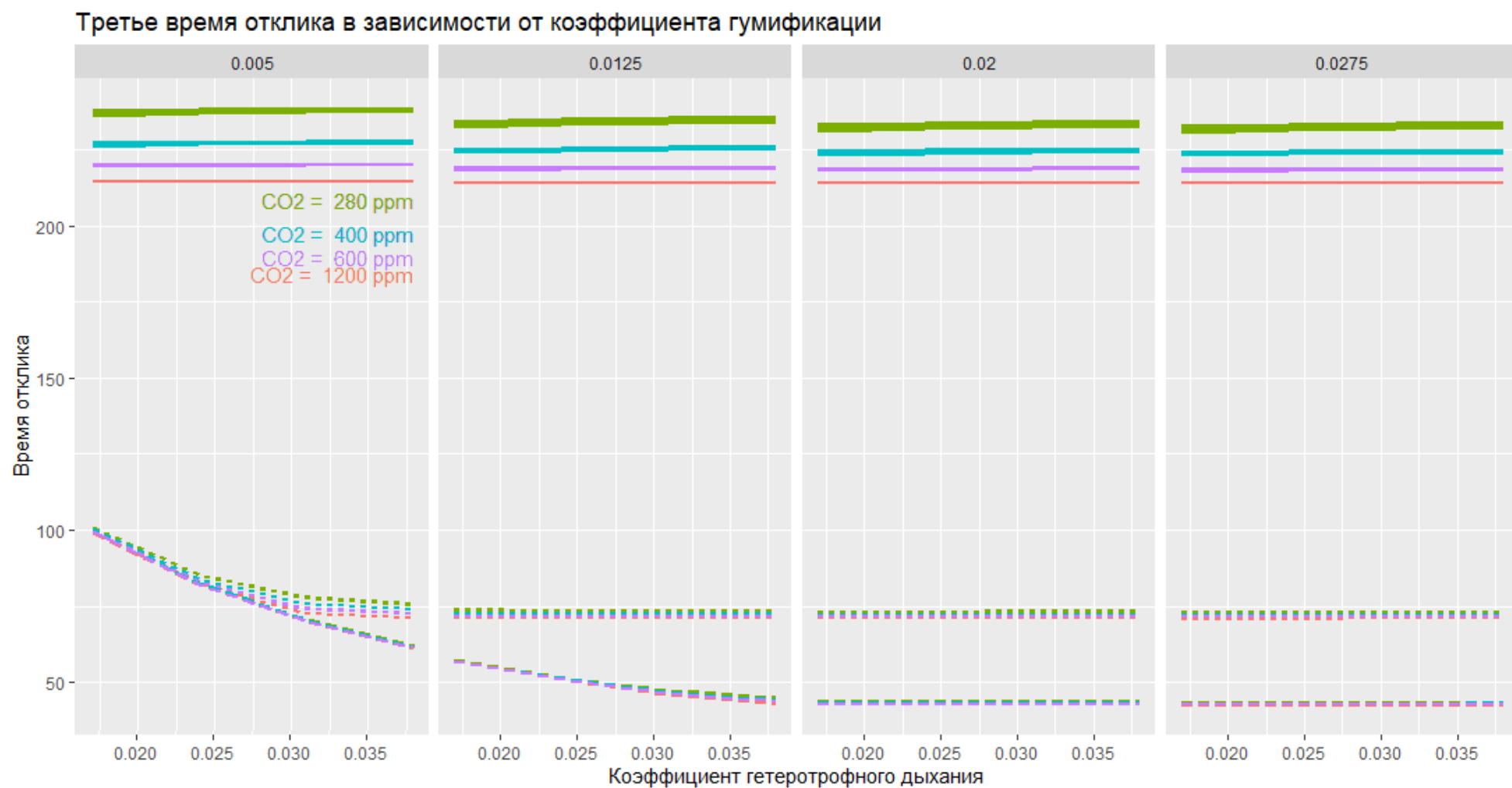


Рис. 16: Зависимость $\tau^{(3)}$ [годы] от A_{hum} , B_{ocn} и $q_{CO_2,0}$ в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

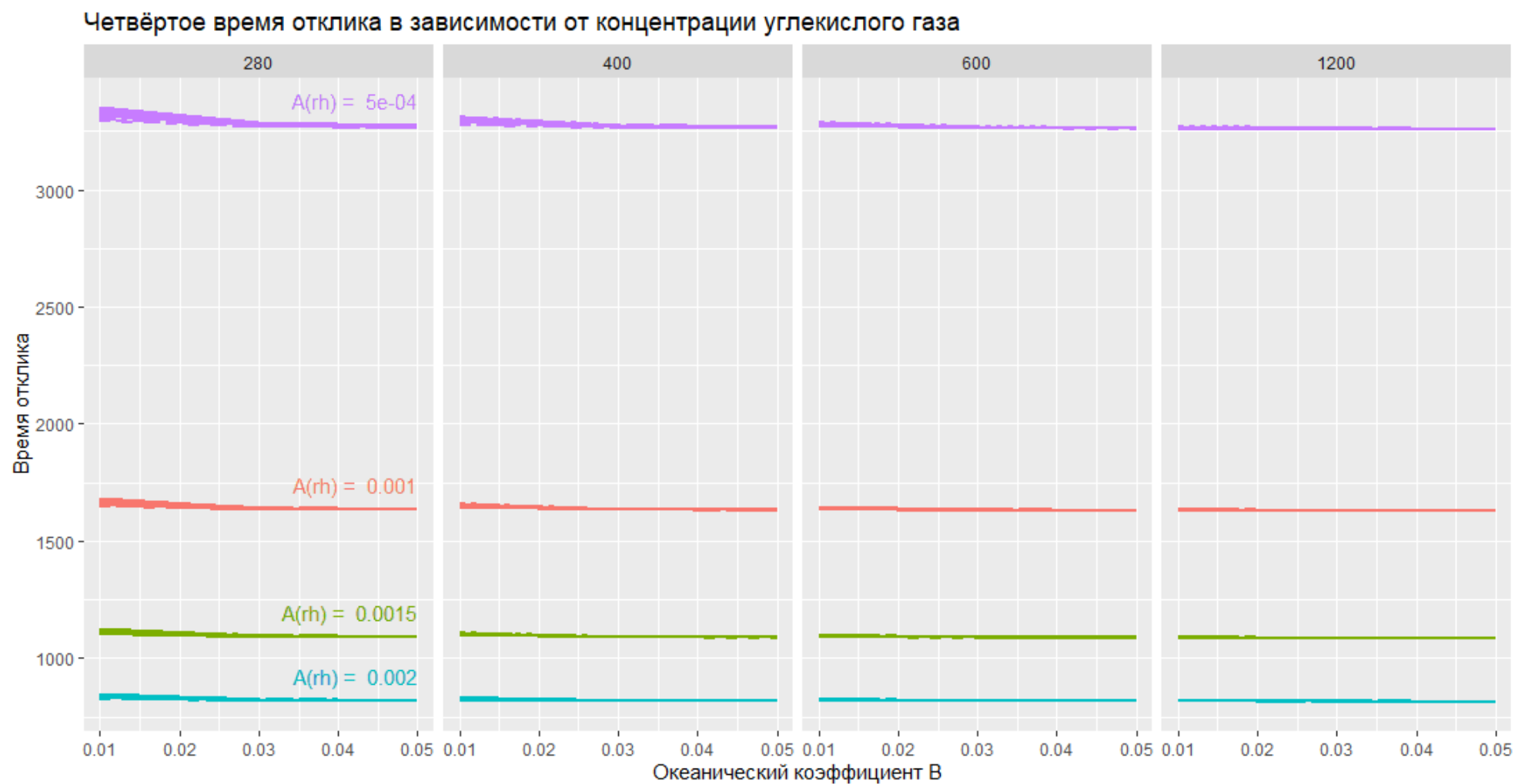


Рис. 17: Зависимость $\tau^{(4)}$ [годы] от A_{hum} и A_{rh} в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

7.1 Вклад различных резервуаров во времена отклика в системе "Растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

Расчёты показывают, что для $\tau^{(1)}$ (порядка 4 лет) основной отклик приходится на растительность. Также имеет значимый вклад почва с относительным откликом по модулю равным 0,4 (рис. 18). Относительный отклик q_{CO_2} составляет 0,1, а резервуары, которым отвечают C_h и ΔT здесь не играют роли, так как их относительный отклик близок к нулю. Итак, на масштабе времени порядка 10^0 лет в первую очередь вклад вносит растительность, но также влияет и почва (в два-три раза меньше).

Для второго времени отклика ($\tau^{(2)}$, 25-100 лет) наибольшие значения отклика относительно переменной q_{CO_2} имеют C_s и C_h . На рис. 19 видно, что вклад резервуара почвы здесь примерно в два с половиной раза больше вклада по q_{CO_2} , а для гумуса это значение составляет приблизительно 1,2. Влиянием климата и растительности здесь можно пренебречь, так как их относительные отклики очень близки к нулю. То есть, на данном временном масштабе основную роль играет отклик почвы в первую очередь, а также гумуса и атмосферы, но приблизительно в два раза меньшей степени.

На графике (рис. 20) видно, что при выделенной переменной q_{CO_2} вклад остальных компонент системы крайне мал, следовательно, третье время отклика (50-220 лет) относится преимущественно к резервуару атмосферы, которому соответствует данная переменная.

В четвёртом времени отклика роль играет исключительно гумус (рис. 21) - относительные значения остальных переменных составляют не более 0,001. Таким образом, можно сделать вывод, что временной отклик порядка тысячи или нескольких тысяч лет относится полностью к резервуару гумуса.

Также была исследована чувствительность вкладов в отклик различных резервуаров от шести параметров модели (A_{rs} , A_{rv} , A_{rh} , A_{hum} , q_{CO_2} , B_{ocn}) методом поочерёдного увеличения каждого из них в два раза. Данный метод позволяет наглядно отобразить на графиках соответствующие изменения. Было получено, что для первого собственного вектора зависимость, причём прямая, наблюдалась лишь для вклада гумуса от коэффициента гумификации почвы A_{hum} . Во втором случае существенных зависимостей выявлено не было. В отклике, относящемся к третьему времени, происходят значительные изменения при увеличении интенсивности гетеротрофного дыхания A_{rs} . При этом основной эффект - снижение приблизительно в пять раз влияния гумуса, появление точки, где значение почвенной компоненты доходит до 0,8, в остальном - увеличение доли влияния q_{CO_2} .

Для четвёртого собственного вектора увеличение коэффициента гумификации почвы A_{hum} либо гетеротрофного дыхания A_{rs} в два раза даёт уменьшение приблизительно в два раза вклада всех компонент, кроме компоненты гумуса. Подобное изменение параметра разложения гумуса приводит к уве-

личению вкладов тех же компонент приблизительно в два раза, а параметров океана и концентрации углекислого газа - к снижению данных вкладов примерно в три раза.

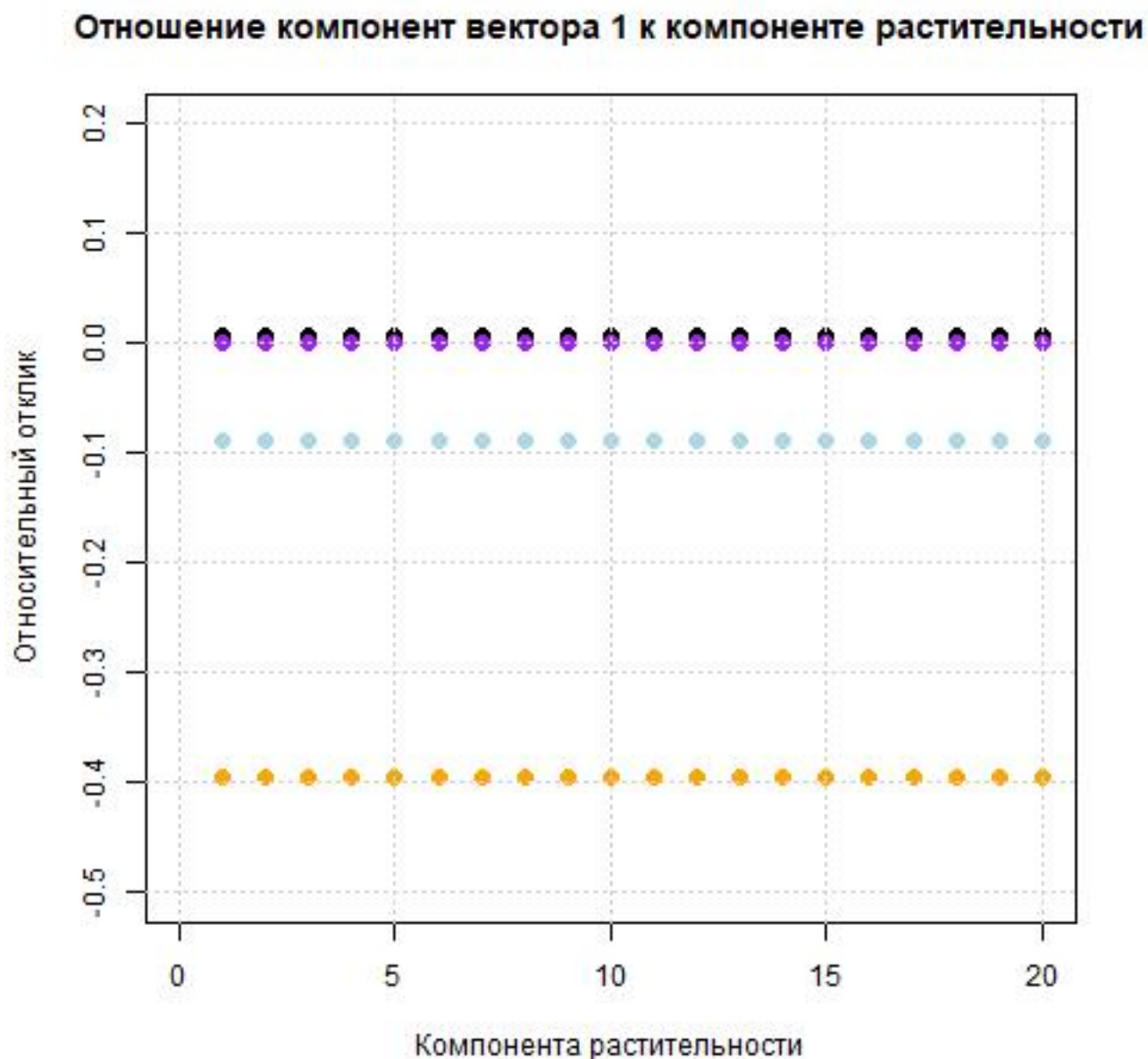


Рис. 18: Отношение значений компонент q_{CO_2} (голубой), C_s (жёлтый), C_{hum} (чёрный), ΔT (фиолетовый) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(1)}$, к выделенной компоненте C_v в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

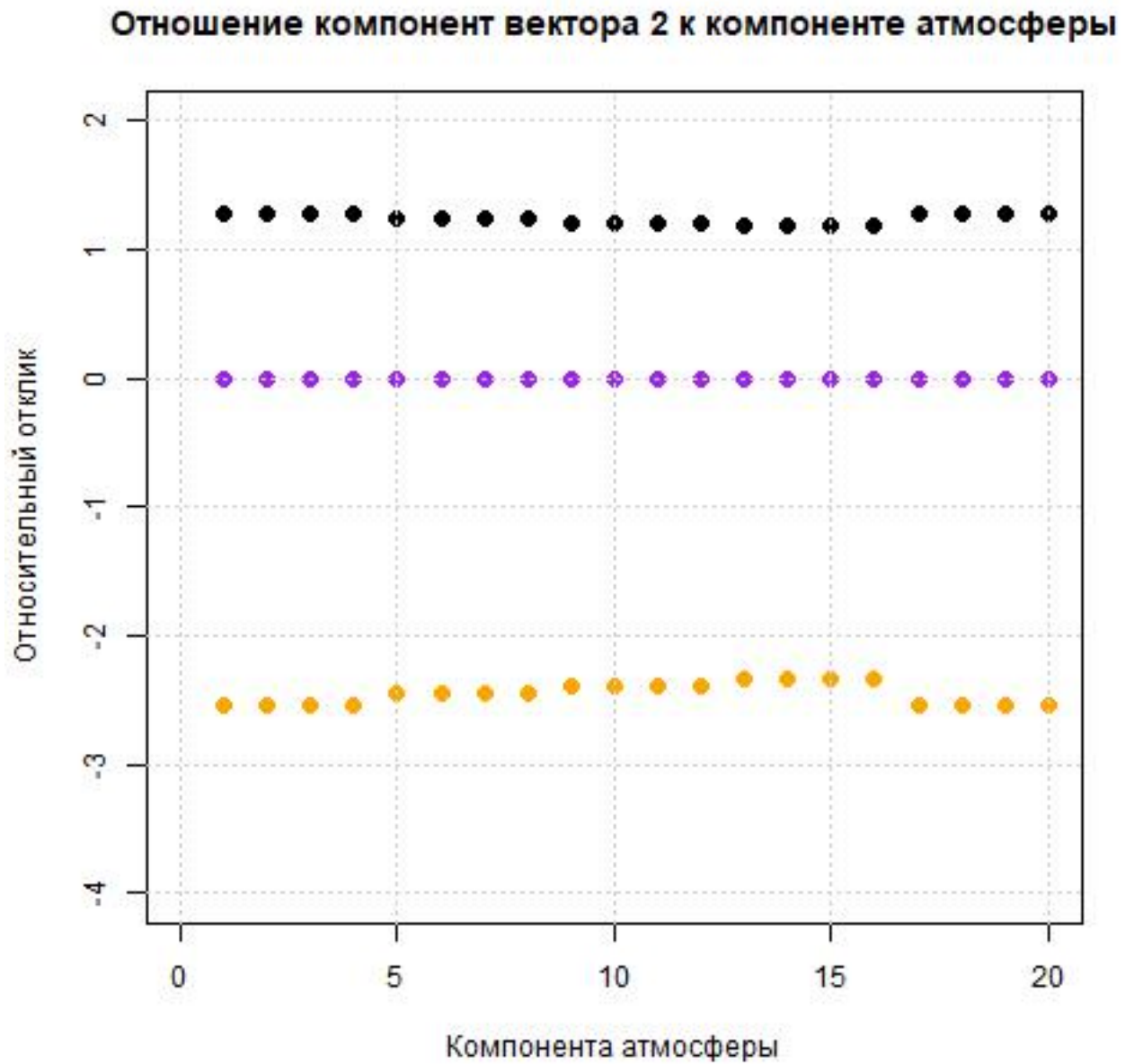


Рис. 19: Отношение значений компонент C_v (зелёный), C_s (жёлтый), C_h (чёрный), ΔT (фиолетовый) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(2)}$, к выделенной компоненте q_{CO_2} в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

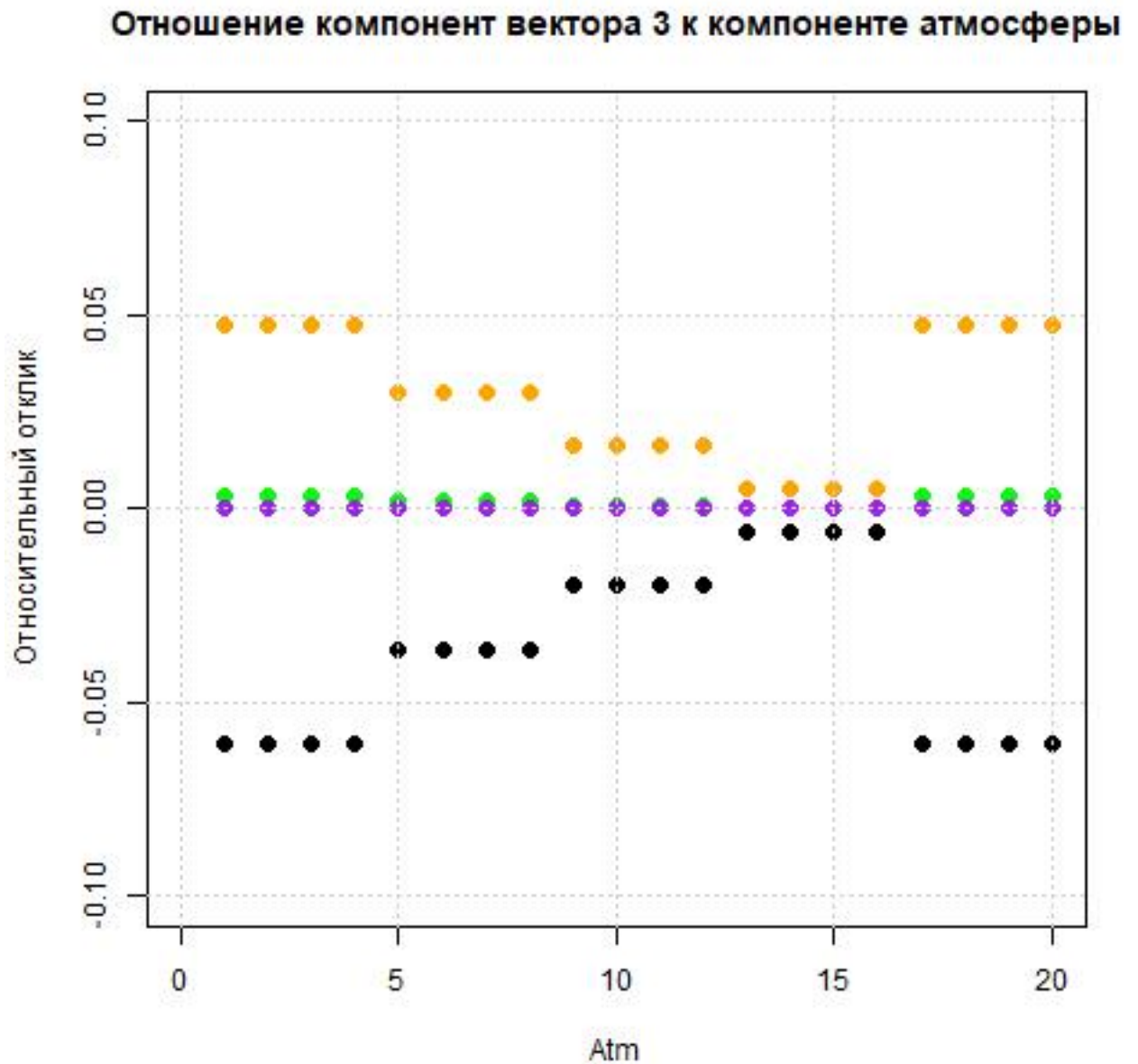


Рис. 20: Отношение значений компонент C_v (зелёный), C_s (жёлтый), C_h (чёрный), ΔT (фиолетовый) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(3)}$, к выделенной компоненте q_{CO_2} в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

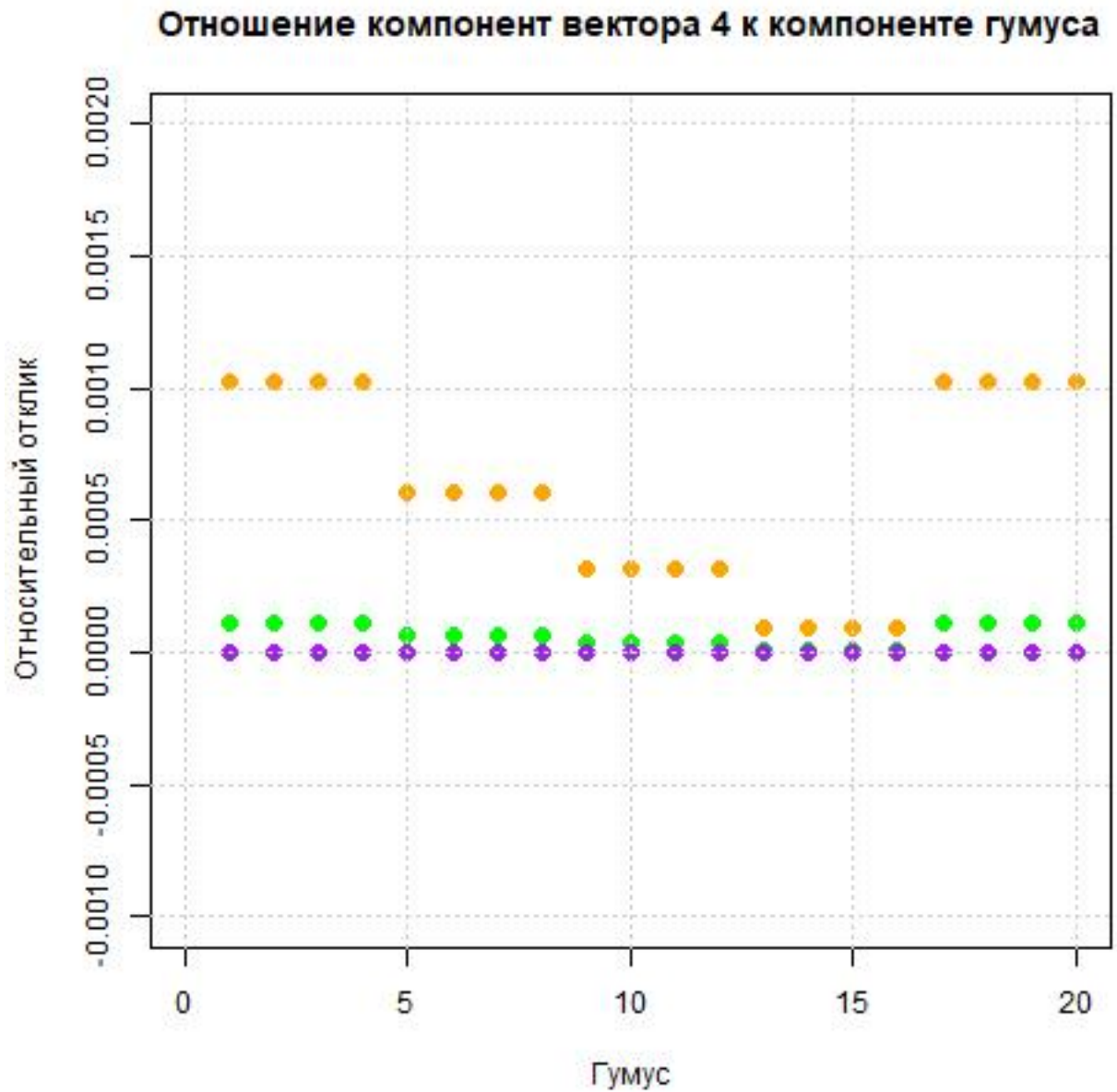


Рис. 21: Отношение значений компонент C_v (зелёный), C_s (жёлтый), q_{CO_2} (голубой), ΔT (фиолетовый) собственного вектора, отвечающего $\tau^{(4)}$, к выделенной компоненте C_h в модели "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

8 Выводы

1. Проведён расчёт собственных чисел и времён отклика для глобально-осреднённой модели наземного углеродного цикла различных уровней сложности; проведён анализ зависимости полученных времён отклика от значений коэффициентов модели. Также был проведён анализ собственных векторов рассматриваемых систем для полученных времён отклика с целью выявить определяющие резервуары углерода для каждого из них.
2. Выделяются следующие времена отклика:
 - Время порядка 4-6 лет, связанное с динамикой запаса углерода в растительности и устойчиво проявляющееся во всех рассмотренных вариантах модели углеродного цикла.
 - Время порядка 20-100 лет связано с динамикой запаса углерода относительно быстроо резервуара почвы.
 - При выделении гумуса дополнительно выделяется временной масштаб порядка 500-5000 лет, связанный с динамикой запаса углерода в гумусе.
3. Также отметим, что данный метод является достаточно универсальным и может быть использован при анализе любой физической системы.

Времена отклика	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4
τ_1	5,5	5,5	5,5-6	4
τ_2	25-60	15-45	10-40	20-100
τ_3	—	500-2000	40-220	45-250
τ_4	—	—	800-5000	700-3300

Таблица 1: Сравнение полученных в данной работе времён отклика для систем различной сложности [годы]. Система 1 - "растительность-почва 2 - "растительность-почва-гумус 3 - "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера 4 - "растительность-почва-гумус-океан-атмосфера-климат"

Сравнение с данными, полученными в исследованиях [12], [13], [11], [14], [15], рассчитывавшими значения времён пребывания и прохождения углерода для наземных экосистем или их частей (например, только растительности или почвы) представлено в таблице 2.

Осн. резервуар	Данная работа	[12]	[13]	[11]	[14]	[15]
Растительность	4 (τ_1)	13	—	от 4	—	0-25
Почва	20-100 (τ_2)	—	15-100	12-90	0-90	10-50
Гумус + почва	45-250 (τ_3)	—	—	до 440	—	—

Таблица 2: Сравнение полученных в данной работе времён отклика [годы] с соответствующими временами пребывания или прохождения углерода в других исследованиях

9 Список литературы

1. Canadell J.G., Monteiro P.M., Costa M.H. et al. 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, P. 673–816.
2. Eliseev A.A. The global CO_2 cycle: main processes and interaction with climate // Fundamental and Applied Climatology. 2017. 4. P. 9-31.
3. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press
4. Romanovskii N.N., Eliseeva A.A., Gavrilov A.V. et al. The long-term dynamics of the permafrost and gas hydrate stability zone on rifts of the east Siberian arctic shelf (Report 1) // Earth's Cryosphere. 2005. 9. P. 42-53.
5. Malakhova V., Eliseev A. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // Global and Planetary Change. 2017. 157. 10.1016/j.gloplacha.2017.08.007.
6. Malakhova V., Eliseev A. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // Global and Planetary Change. 2020. 192. 103249. 10.1016/j.gloplacha.2020.103249.
7. Muryshev K., Eliseev A., Mokhov I., Timazhev A. A lag between temperature and atmospheric CO_2 concentration based on a simple coupled model of climate and the carbon cycle // Doklady Earth Sciences. 2015. 463. P. 863-867.
8. Muryshev K., Timazhev A., Dembitskaya M.A. Time lag between changes in global temperature and atmospheric content of carbon dioxide under non-greenhouse external forcing of the climate system // Fundamental and Applied Climatology. 2017. 3. P. 84-102.
9. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
10. Friend A., Lucht W., Rademacher T. et al. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO_2 // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. V. 111. N. 9. P. 3280-3285.
11. Carvalhais N., Forkel M., Khomik M. et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems // Nature. 2014. V. 514. N. 7521 P.213-217.
12. Thurner M., Beer C., Carvalhais N. et al. Large-scale variation in boreal and temperate forest carbon turnover rate related to climate // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. N. 9. P. 4567-4585.

13. Lu X., Wang Y.-P., Luo Y., Jiang L. Ecosystem carbon transit versus turnover times in response to climate warming and rising atmospheric CO₂ concentration // Biogeosciences. 2018. V. 15, P. 6559–6572.
14. Schimel D., Braswell B., Holland E. et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils// Global Biogeochemical Cycles. 1994. V. 8. P. 279-294.
15. Koven C. D., Chambers J. Q., Georgiou K. et al. Controls on terrestrial carbon feedbacks by productivity versus turnover in the CMIP5 Earth System Models // Biogeosciences. 2015. V. 12, P. 5211–5228.
16. Prather M. J. Lifetimes and time scales in atmospheric chemistry// Phil. Trans. R. Soc. 2007. ser. A. V. 365. N. 1856. P. 1705–1726.
17. Svirezhev Y.U., Krapivin V.F., Tarko A.M. Modeling of the main biosphere cycles // Global Change / Cambridge University Press. 1985. P. 298-313.
18. Kwon O., Schnoor J.L. Simple global carbon model: The atmosphere-terrestrial biosphere-ocean interaction // Glob. Biogeochem. Cycles. 1994. V.8. N3. P. 295-305.
19. Lenton T.M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model // Tellus B. 2000. V. 52. N5. P. 1159-1188.
20. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Carbon cycle-climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // Theor. Appl. Climatol. 2007. V. 89. N 1-2. P. 9-24.
21. Muryshev K.E., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Timazhev A.V. Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing // Glob. Planet. Change. 2017. V. 148. P. 29-41.
22. Sitch S., Smith B., Prentice I.C. et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // Glob. Change Biol. 2003. V. 9. N 2. P. 161-185.
23. Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P., Stordal F. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases // Geophys. Res. Lett. 1998. V 25. N 14. P. 2715-2718.