

Е.П. Гордов, О.Б. Родимова, С.Д. Творогов, А.З. Фазлиев

КАЧЕСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ И СТАБИЛЬНОСТИ КИСЛОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА В РАМКАХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Приведены некоторые результаты качественного исследования поведения озонного цикла в рамках кислородной атмосферы и высотного поведения глобальной температуры в рамках малоразмерных моделей, ориентированных на рассмотрение радиационного баланса. Показано, что качественное исследование как самих моделей климата, так и их составляющих блоков позволяет обнаружить общие закономерности поведения стационарных состояний системы. Определены значения параметров, при которых качественный анализ выявил возможность изменения характера устойчивости стационарного состояния системы. Именно эти области представляют интерес для детального теоретического и экспериментального изучения.

1. Введение

Глобальные климатические изменения привлекают пристальное внимание исследователей. Представляющиеся глобальными явления, такие как потепление климата или истощение озонового слоя, настоятельно требуют ответа на вопрос о природе их возникновения и о возможной их эволюции. Изучение этих и других климатических проблем все более становится задачей физики, что предполагает возможность описания глобальных явлений с помощью малоразмерных моделей, которые учитывали бы основные физические процессы, действующие в масштабах рассматриваемого явления.

Модели малой размерности благодаря своей простоте позволяют четко идентифицировать процессы, определяющие вариации свойств системы и предоставляют широкие возможности для исследования изменений свойств системы качественно и в рамках численных экспериментов. На их основе могут также развиваться способы параметризации для более сложных моделей. Мы считаем, что малоразмерные модели, будучи предметом изучения в течение нескольких десятилетий, все еще не исчерпали своих возможностей для исследования глобальных изменений и более того, именно перечисленные выше качества таких моделей могут привести к новому пониманию природы и эволюции глобальных изменений, присущих сложной системе.

В данной статье обсуждаются некоторые аспекты, которые представляются общими для климатических моделей как таковых и для фотохимических блоков, являющихся необходимыми составными частями климатических моделей.

В фотохимических блоках климатических моделей наиболее значимым элементом выступает озон, который определяет высотный ход температуры в стратосфере. Являясь основным поглотителем солнечного УФ-излучения, озон во многом определяет приходящее солнечное излучение. Основной цикл реакций, обеспечивающий наличие озонового слоя в атмосфере, был сформулирован Чепменом еще в тридцатые годы. Для описания фотохимических процессов характерна тенденция, ориентированная на учет все большего числа реакций и соответствующих реагентов. Однако численное решение всегда проводится для конечных интервалов времени, для определенного набора веществ и, следовательно, дает лишь ограниченную информацию о процессе. Для выяснения последствий любого изменения условий расчет должен быть повторен. Но даже и в этом случае без ответа остаются следующие вопросы: сколько и каких имеется у системы стационарных состояний, каким образом меняется их число и характер при изменении параметров системы, какова долговременная эволюция системы и возможны ли в ней изменения, воспринимаемые как катастрофические. Не имея соответствующих ответов, нельзя в принципе говорить о решении проблемы озонового слоя.

Ситуация в проблеме глобальных климатических изменений, которые могут быть вызваны и антропогенными воздействиями на газовый состав атмосферы, по логике своего развития

во многом напоминает только что обрисованную. Эволюция описания климата следует по пути создания сложных моделей, все более детализирующих те или иные процессы, влияющие на климат. И здесь мы снова сталкиваемся с вопросами о наличии, характере и эволюции стационарных состояний. На такого сорта вопросы невозможно получить исчерпывающий ответ, опираясь только на численные исследования фотохимических и климатических процессов.

Ни в какой мере не умаляя значимости детального численного анализа поведения сложных атмосферно-оптических систем, мы считаем, что ему должен предшествовать качественный анализ рассматриваемых систем в рамках малоразмерных моделей методами нелинейной динамики. Качественный анализ – это специальный раздел математики (см., например, [1, 2]), который предназначен для исследования нелинейных систем, каковыми являются и климатические, и фотохимические системы, и ориентирован как раз на изучение вопросов о существовании, характере и эволюции стационарных состояний, которые перечислялись выше ([1, 2]).

Являясь этапом, предшествующим расчетам по сложным моделям, качественный анализ позволяет превратить во многом случайный поиск факторов, способных вызвать качественные изменения в исследуемых системах, в целенаправленный процесс, в котором численный анализ сложных систем проводится для тех значений параметров, при которых качественный анализ выявил возможность нетривиального поведения системы.

Отметим, что, хотя методы нелинейной динамики не являются необычными в исследованиях общей циркуляции (см., например, [3, 4]), однако как раз в фотохимических блоках они практически не применялись. В существующих же качественных исследованиях малоразмерных моделей климата основное внимание уделялось либо палеоклиматам, либо динамике ледяного покрова (см. [3–6]).

Далее мы представим некоторые результаты качественных исследований поведения озонного цикла в кислородной атмосфере и высотного поведения глобальной температуры в рамках малоразмерных моделей, ориентированных на рассмотрение радиационного баланса.

2. Кислородная атмосфера

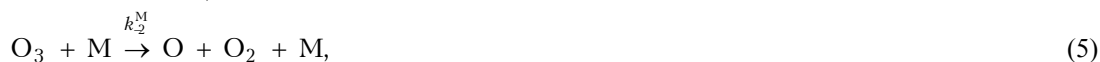
Основной вопрос, ответ на который хотелось бы иметь, следующий: являются ли наблюдаемые изменения концентрации озона естественным процессом или же они вызваны антропогенными воздействиями. Этот вопрос естественно редуцируется применительно к химической подсистеме атмосферы, а именно, может ли появление дополнительных веществ и соответствующих дополнительных реакций привести к качественным изменениям в поведении кислородных составляющих атмосферы. В результате такой редукации задача сводится к исследованию уравнений химической кинетики, то есть нелинейных уравнений для концентраций, параметрами которых являются константы скоростей химических реакций, зависящие от температуры, и исходные значения концентраций. Мы выбрали для анализа приближение, допускающее точное математическое решение проблемы, а именно модель чисто кислородной атмосферы, в которой реализуется минимальный цикл реакций Чепмена [7].

Разумеется, возникает вопрос, в какой мере результаты, полученные с помощью такой простой модели, будут приложимы к реальной атмосфере. Ответ на него со времен формулировки цикла Чепмена достаточно оптимистичен, так как этот простой цикл реакций позволяет воспроизвести характерный высотный ход концентрации озона. Количественные расхождения пока не играют роли для нашего анализа, так как его цель – это выявление тенденций эволюции.

Отметим, что в последнее время начали появляться статьи [8–11], где обсуждаются вопросы о множественности стационарных состояний в атмосферной фотохимии, но они относятся к другим циклам реакций. Качественному же анализу чисто кислородного озонного цикла как такового в химии атмосферы посвящены, в сущности, только три работы [12–14], уже довольно давние, в которых рассмотрены некоторые частные случаи, где авторы не обнаружили каких-либо качественных особенностей. Однако полный фазовый портрет даже для простейшей системы так и не был получен. В то же время знание качественного поведения концентраций кислородных составляющих в чисто кислородном озонном цикле, как в основной составной части всех более сложных систем реакций, представляется совершенно необходимым.

А. Озонный цикл Чепмена

Выпишем реакции, входящие в озонный цикл.



в предположении, что третья частица не является кислородной, $\text{M} \neq \text{O}, \text{O}_2, \text{O}_3$. Мы предприняли подробное качественное исследование этой системы реакций [15–19], начиная с простейших случаев, чтобы выяснить, какими реакциями обусловлены те или иные черты в фазовом портрете, и возможны ли в этой системе ситуации, когда изменение параметров системы может привести к изменению характера устойчивости стационарного состояния или к его исчезновению.

Анализ показал, что динамика концентраций кислородных составляющих достаточно многообразна. Остановимся на простейшей системе, в которой еще происходит образование озона – озонный цикл без излучения, чтобы проиллюстрировать характер получаемых результатов.

Рис. 1, а относится к двум реакциям – образованию озона в трехчастичном столкновении и его ухода в столкновении с атомом О. На рисунке изображено фазовое пространство концентраций кислородных составляющих. Состояние системы в данный момент времени представляется точкой в этом фазовом пространстве. Эволюция системы со временем изображается фазовой траекторией. Из-за закона сохранения числа атомов реагирующих веществ доступной для изменения концентраций областью является так называемый треугольник реакций. Совокупность стационарных точек и фазовых траекторий называется фазовым портретом системы. В данном случае (две реакции, рис. 1, а) у системы есть особая точка – седло, где концентрация O_3 равна нулю, и особая прямая – ось O_3 – то есть прямая, каждая точка которой является особой. Седловая точка неустойчива. Траектория, даже очень близко подходящая к ней, со временем от нее уходит. Точки особой прямой являются устойчивыми, то есть фазовая точка, достигнув их, там и остается. Мы видим, что фазовые траектории, где бы они ни начались, идут к оси O_3 . Мы можем также сказать, как будут меняться концентрации O_3 при приближении к стационарному состоянию – уменьшаться или возрастать в зависимости от начальных условий. Видно также, что треугольник реакций разделен на две части сепаратрисой седла и траектории не могут переходить из одной части в другую. Этот фазовый портрет предоставляет всю возможную качественную информацию о системе. Любое численное решение дает каждый раз лишь определенный отрезок определенной траектории, задаваемый начальными условиями.

Остальные случаи (рис. 1) представляют изменения в фазовом портрете, вызванные включением реакций (5), (6) дополнительно к упомянутым двум. В результате в треугольнике реакций остается одна особая точка, устойчивый узел с нулевыми концентрациями О и O_3 , недоступная в масштабах применимости модели из-за большого времени релаксации.

Во всех до сих пор рассмотренных случаях, относящихся к озонному циклу без излучения, стационарная точка находится на границе треугольника реакций, то есть в стационарном состоянии концентрация по крайней мере одной из кислородных компонент равна нулю. Простейшим случаем, когда стационарная точка находится внутри треугольника реакций, то есть имеет концентрации всех трех кислородных компонентов отличными от нуля, являются три реакции, две уже рассмотренные – (3), (4) – и реакция фотодиссоциации молекулярного кислорода (1). В такой системе есть два параметра A и M , являющиеся комбинациями скоростей реакций и исходных концентраций. Фазовые портреты системы для различных соотношений между параметрами радикально отличаются один от другого, см. рис. 2. В случае $AM > 1$ внутри треугольника реакций имеется устойчивый узел с ненулевыми концентрациями всех кислородных составляющих, в случае $AM < 1$ стационарным является состояние на границе треугольника реакций с единственной ненулевой концентрацией атомарного кислорода. Таким

образом, кривая $AM = 1$ в пространстве параметров разграничивает области, в которых имеется либо отсутствует стационарное состояние системы с ненулевыми концентрациями кислородных составляющих. Добавление реакции фотодиссоциации озона ничего принципиально не меняет, приводя лишь к наличию еще одного параметра C_2 и к количественному изменению разграничивающей линии, которая теперь описывается уравнением $A^2M - A - C_2 = 0$. Области существования состояний с ненулевыми концентрациями кислородных составляющих для различных наборов реакций приведены на рис. 3.

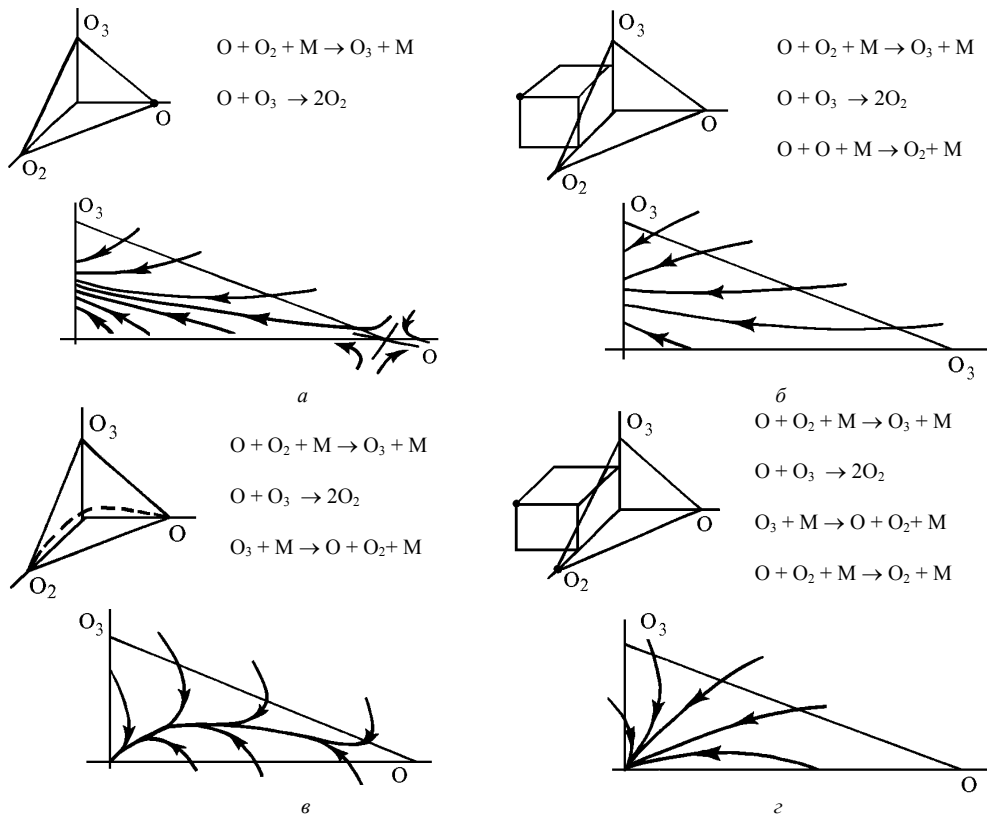


Рис. 1. Трехмерные фазовые портреты и их проекции на плоскость (O, O_3) для наборов реакций озонного цикла без излучения

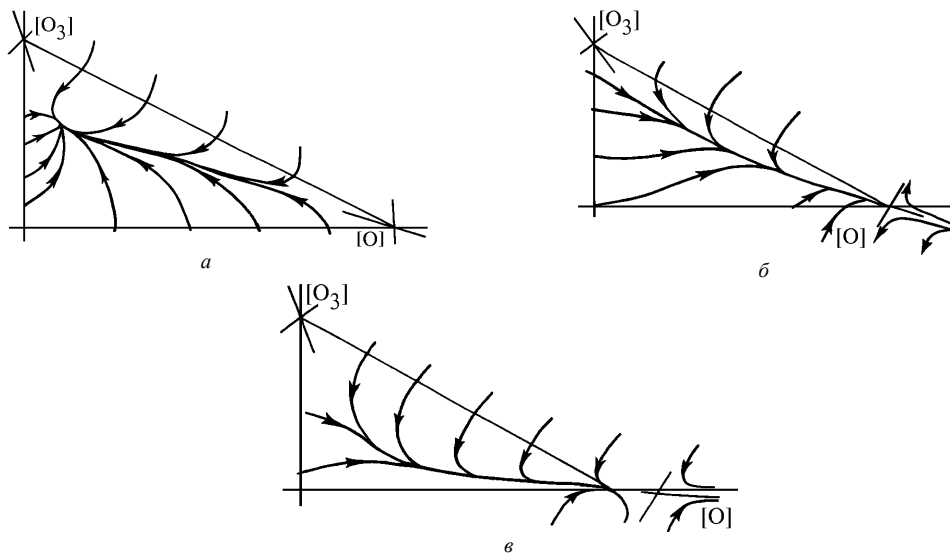


Рис. 2. Фазовые портреты системы реакций (1, 3, 4) для различных соотношений между параметрами: $AM > 1$ (*a*), $AM = 1$ (*б*) и $AM < 1$ (*в*)

Реакция (5) рекомбинации атомов O, как оказалось, играет решающую роль в стабилизации озонного цикла. Ее учет «возвращает» стационарное состояние в пределы треугольника реакций, то есть приводит к существованию стационарного состояния с ненулевыми концентрациями кислородных компонентов, см. рис. 3, в.

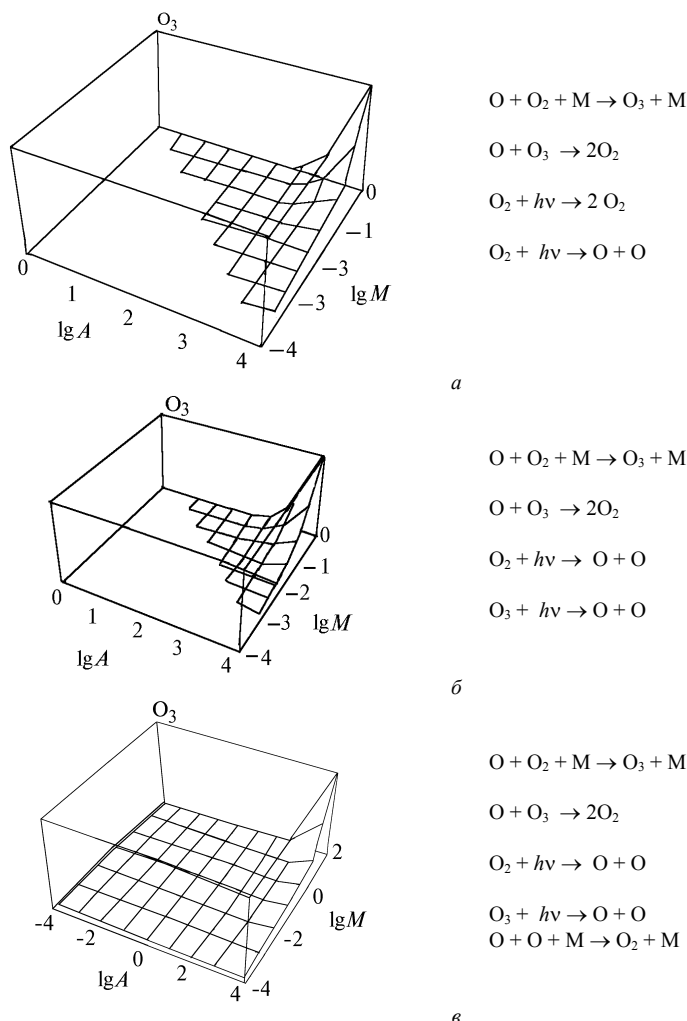


Рис. 3. Концентрации O_3 в стационарных состояниях в зависимости от параметров A , M для различных наборов реакций: (1), (3), (4) – (а); (1)–(4) – (б); (1)–(5) – (в)

Так как реакция рекомбинации (5), в сущности, означает наличие стока O и источника O_2 , можно было ожидать, что введение в уравнения для концентраций источников и стоков кислородных компонентов приведет к «возвращению неустойчивости». Действительно, оказалось, что при наличии линейного стока атомов кислорода, независимо от величин постоянных источников O, O_2 и O_3 , устойчивые стационарные состояния с ненулевыми концентрациями кислородных компонентов присутствуют лишь в ограниченной области значений величин источников и стоков, см. рис. 4. В случае наличия линейных стоков иных, чем O, кислородных компонентов у системы реакций (1)–(6) всегда есть стационарное состояние с ненулевыми концентрациями кислородных компонентов.

Известно, что стационарная концентрация озона в атмосфере, рассчитанная в рамках цикла Чепмена, имеет завышенную величину. Существует два подхода к уточнению концентрации озона: выйти за рамки кислородной атмосферы и дополнить систему кинетических уравнений (1)–(6) реакциями водородной, азотной, хлорфторуглеродной группы или в рамках модели кислородной атмосферы использовать стоки и источники кислородных компонентов как возможный способ учета дополнительных реакций. Поэтому исследование ситуации с источниками и стоками кислородных компонентов получило дальнейшее развитие.

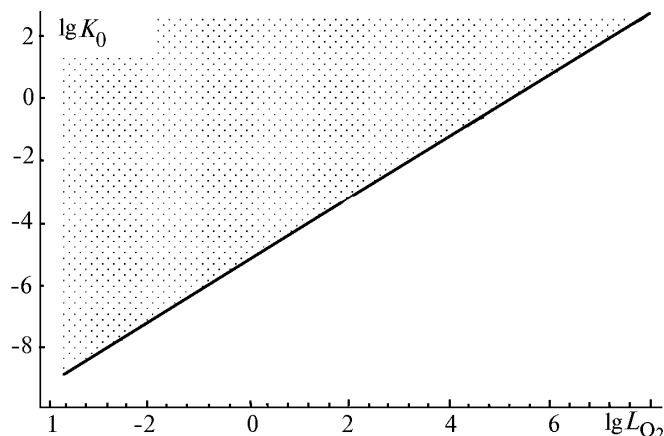


Рис. 4. Область существования устойчивых стационарных состояний с ненулевыми концентрациями кислородных компонентов (заштриховано) в пространстве параметров L_{O_2} (источник O_2) и K_O (сток O).
 $[L] = \text{мол/см}^3 \cdot \text{с}$, $[K] = 1/\text{с}$

Б. Роль источников и стоков в окрестности стационарного состояния

До сих пор рассматривалась система реакций (1)–(6) с $M \neq O, O_2, O_3$. Дальнейший анализ проводился с ориентацией на условия, существующие в атмосферном озоновом слое [20, 21]. В стратосфере существует иерархия концентраций кислородных компонентов: концентрация молекулярного кислорода на четыре порядка превосходит концентрацию озона, которая, в свою очередь, превосходит на пять порядков концентрацию атомарного кислорода. Такой системе соответствуют два характерных времени релаксации: одно порядка долей секунды, с которым связывают время релаксации к стационарному значению концентрации атомарного кислорода, а второе, порядка нескольких месяцев, связывают с релаксацией озона. Учет иерархии концентраций кислородных составляющих и иерархии времен релаксации, существующих в окрестности стационарного состояния, привел к выделению набора реакций, существенных для описания химических процессов в этой окрестности. В этот набор входят реакции (1)–(4) с $M \neq O, O_2, O_3$ и две реакции типа (3) с $M = O_2, O_3$.

Концентрации кислородных компонентов, полученные как решения соответствующих кинетических уравнений, будем называть эталонными. Далее к рассматриваемой системе добавлялись источники и стоки кислородных компонентов, и задача состояла в нахождении стационарных концентраций кислородных компонентов, в определении значений источников и стоков, при которых существуют устойчивые состояния, и определении времен релаксации в кислородной атмосфере с одним стоком и источником.

Символы K и L определяют сток и источник соответственно. Все расчеты, приведенные ниже, выполнены для коэффициентов скоростей реакций, взятых при условиях, соответствующих высоте 30 км.

В силу условности рассматриваемой задачи, связанной с отсутствием на настоящий момент количественных данных о стоках и источниках кислорода в атмосфере и их классификации, предположим, что скорости стоков не превышают величины $k_2^{N_2} NA$, где $k_2^{N_2}$ – скорость реакции (3) с $M = N_2$, а значения источников не превышают величины $k_2^{N_2} NA^2$, где N – концентрация азота, A – концентрация молекулярного кислорода в стратосфере на высоте 30 км. Ниже рассмотрены источники и стоки, нормированные на эти максимальные величины, они изменяются в пределах от 10^{-13} до 1.

Было показано, что в системах со стоком молекулярного кислорода устойчивые состояния существуют в широкой области значений этого стока и источников, причем концентрация озона падает при $K_{O_2} > L_i$ ($i = O_2, O, O_3$) и возрастает при $K_{O_2} < L_i$. При равенстве нормированных стока и источника стационарные состояния устойчивы, причем концентрация озона близка к эталонной, во всех трех случаях концентрация молекулярного кислорода равна $L_i/(2K_{O_2})$. В системах со стоком озона устойчивые состояния существуют в небольшой облас-

ти значений стока и источников, концентрация озона равна $L_i/(3K_{O_3})$, а концентрация молекулярного кислорода почти всегда меньше эталонной.

Остановимся на описании результатов, получающихся при качественном анализе модели с источником и стоком молекулярного кислорода.

На рис. 5 по координатным осям отложены логарифмы безразмерных концентраций кислородных компонентов, координаты точки соответствуют стационарным концентрациям этих компонентов. При $K_{O_2} > L_{O_2}$ концентрации O_2 и O_3 уменьшаются, при обратном неравенстве концентрации O_2 и O_3 увеличиваются. При равенстве нормированных значений стока и источника концентрации этих компонентов остаются неизменными и близкими к эталонным, отмеченным на рисунке точкой *A*.

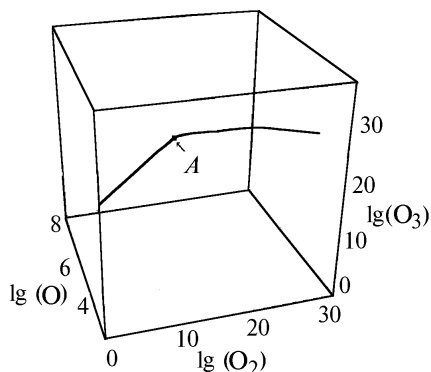


Рис. 5. Изменение концентраций O , O_2 и O_3 при вариациях значений стока K_{O_2} и источника L_{O_2} молекулярного кислорода

На рис. 6 показаны сечения поверхностей $O_2(K_{O_2}, L_{O_2})$ и $O_3(K_{O_2}, L_{O_2})$, соответствующих концентрациям O_2 и O_3 , горизонтальными плоскостями через интервал, отвечающий в реальном масштабе концентраций двум порядкам по величине. Стрелки на рисунке связаны с кривыми, на которых концентрация совпадает с эталонной, и показывают направление убывания концентраций.

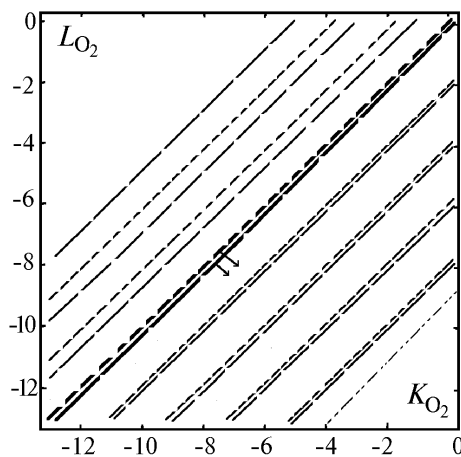


Рис. 6. Совмещенные контурные графики стационарных концентраций O_2 и O_3 при вариациях стока и источника молекулярного кислорода ----- O_3 , -.-.-.- O_2

Введение стока и источника в модель кислородной атмосферы делает все три кислородные компоненты независимыми, что приводит к появлению третьего, наибольшего по величине, времени релаксации молекулярного кислорода. На рис. 7 даны зависимости времен релаксации от величины источника и стока молекулярного кислорода. Стрелки на рисунке показывают направление уменьшения времени релаксации, цифра обозначает порядок его величины. Переход от одной изолинии к другой соответствует изменению времени релаксации на поряд-

док. Из рис. 7 следует, что при всех рассмотренных изменениях величин стока и источника иерархия времен релаксации не изменяется. Время релаксации атомарного кислорода с ростом величины стока и источника растет вплоть до величины порядка нескольких дней, тогда как время релаксации O_2 и O_3 уменьшается до недели для озона и столетий – для молекулярного кислорода. На сплошной прямой, соответствующей равенству $K_{O_2} = L_{O_2}$ стационарные концентрации кислородных компонентов близки к эталонным, тогда как времена релаксации O , O_2 , O_3 могут существенно различаться.

Таким образом, качественный анализ показывает, что для некоторых вариантов систем уравнений, описывающих эволюцию концентраций кислородных составляющих в кислородной атмосфере, могут существовать такие области значений параметров (констант скоростей, начальных концентраций, величин источников и стоков), в которых отсутствует физически допустимое стационарное состояние с ненулевыми концентрациями кислородных составляющих. Иными словами, в ряде случаев равновесие в озонном цикле существует лишь при исчезновении какого-либо из кислородных компонентов, причем причиной этого необязательно является антропогенное воздействие.

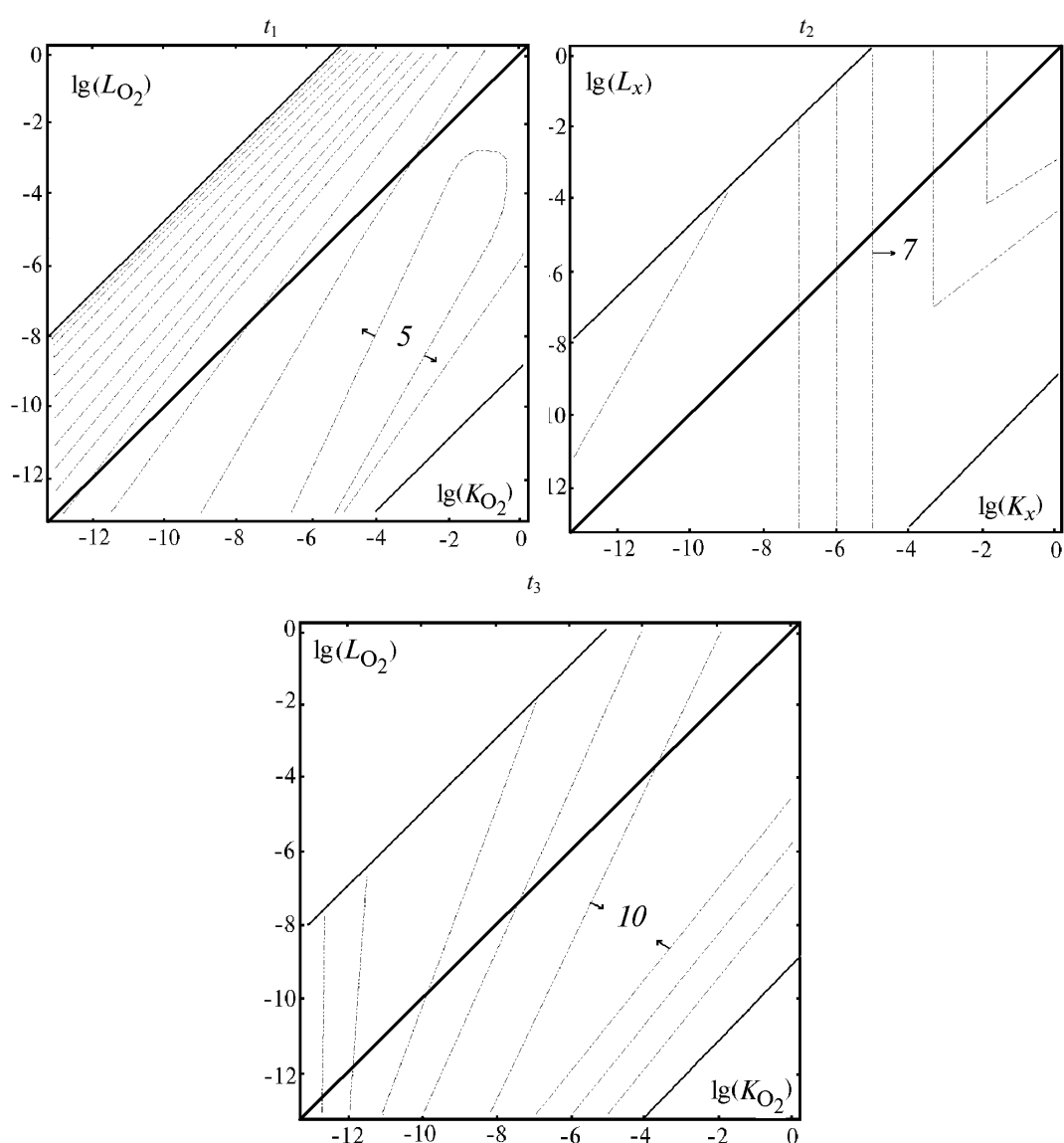


Рис. 7. Зависимость времен релаксации от величины стока и источника молекулярного кислорода

3. Малоразмерные климатические модели

Расчеты, выясняющие влияние вариаций малых газовых составляющих в атмосфере на изменение климата, ведутся, в основном, в рамках одномерных радиационно-конвективных моделей (см., например, [22–25]). Как уже отмечено выше, наша позиция заключается в том, что детальным расчетам по большим моделям должен предшествовать качественный анализ простых климатических систем на основе методов нелинейной динамики. Мы обратились к одномерным балансным и радиационным моделям климата, неоднократно ранее рассмотренным другими авторами и с других позиций (см., например, [26–29]), прежде всего потому, что по самому своему смыслу глобальные изменения должны обнаруживаться в простых моделях. Возникает вопрос, насколько вообще простые модели могут быть чувствительны к изменению радиационных характеристик, например, к изменению пропускания солнечного излучения, вызываемого изменением концентрации озона в стратосфере, либо к изменению пропускания теплового излучения, являющегося результатом увеличения в тропосфере концентраций «парниковых» газов. Подчеркнем, что здесь снова речь идет о чувствительности не как о количественном изменении исследуемых характеристик, а как о возникновении качественных особенностей, как-то – появлении или исчезновении стационарных состояний, изменении характера их устойчивости или, по крайней мере, смене знака той или иной зависимости. Иллюстрацией на эту тему является рис. 8, где изображена простейшая двухслойная модель «суша + атмосфера», в которой температура поверхности T_s и температура верхней границы атмосферы T_a являются искомыми переменными, удовлетворяющими уравнениям

$$\begin{aligned}\dot{T}_s &= \sigma T_a^4 (1 - D_t) - \sigma T_s^4 + F^\downarrow D_s; \\ \dot{T}_a &= \sigma T_s^4 (1 - D_t) - 2\sigma T_a^4 (1 - D_t) + F^\downarrow (1 - D_s).\end{aligned}\quad (7)$$

В качестве параметров система (7) содержит величины F^\downarrow (солнечная энергия на верхней границе атмосферы), D_t (функция пропускания атмосферой теплового излучения) и D_s (функция пропускания атмосферой солнечного излучения). Модель такого сорта входит в качестве составного блока в более детально разработанные по высоте модели. На рис. 8, б приведен фазовый портрет такой системы, имеющей единственное стационарное состояние в физической части плоскости – устойчивый узел. Известно, что уходящее излучение часто аппроксимируется линейной функцией температуры. На рис. 8, в, г показаны фазовые портреты системы (7) при различных параметризациях уходящего излучения [30]. Если в случае, показанном на рис. 8, в, стационарное состояние сохраняет характер устойчивости, то в случае рис. 8, г стационарное состояние в физической части плоскости отсутствует. Этот факт заставляет с осторожностью относиться к различным параметризациям в климатических моделях, особенно к тем, которые меняют характер нелинейности, и дает утвердительный ответ на вопрос, могут ли простые модели быть чувствительными к деталям пропускания излучения.

На рис. 9 представлено поведение независимых переменных T_s и T_a системы (7) при вариациях параметров системы в отсутствие (рис. 9, а) и при использовании параметризации уходящего излучения (рис. 9, б). Наиболее характерной чертой этой модели является наличие инверсии температур, которая наступает при определенных соотношениях между параметрами системы. Наличие или отсутствие инверсии, то есть появление или исчезновение парникового эффекта атмосферы, снова существенно зависит от выбора способа параметризации уходящего излучения, см. рис. 9, б.

Далее рассмотрена более сложная модель, относящаяся к типу радиационных, когда равновесный профиль температуры полностью определяется балансом излучений, не принимая во внимание конвективное приспособление. Она содержит по высоте 4 слоя по 10 км каждый. Функции пропускания теплового и солнечного излучения задаются послойно. Температуры слоев выступают как искомые координаты стационарного состояния. Ход температуры с высотой в такой простой модели сохраняет особенности, присущие радиационным моделям (см., например, [22]), то есть обнаруживает минимум примерно на высоте 10 км и дальнейший медленный рост с увеличением высоты. Не ожидая от такой модели численного согласия с наблюдаемыми температурами, мы полагаем, что на высотах 30–40 км характер высотного хода температуры должен передаваться удовлетворительно. Вопрос, на который сейчас хотелось

бы получить ответ, следующий: могут ли, в принципе, вариации функций пропускания вызвать появление каких-либо особенностей в ходе температуры на этих высотах.

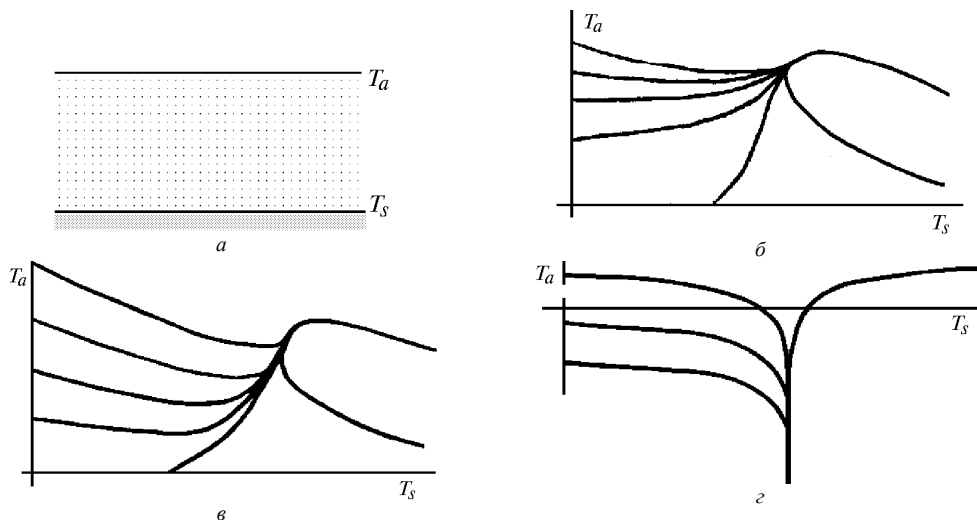


Рис. 8. Простейшая климатическая модель (а), описываемая уравнениями (7), и ее фазовый портрет (б). Фазовые портреты модели при различных параметризациях уходящего излучения: $\sigma T_a^4(1-D_i) = \epsilon T_a$ (в); $\sigma T_s^4 D_i + \sigma T_a^4(1-D_i) = A + BT_s$ (г)

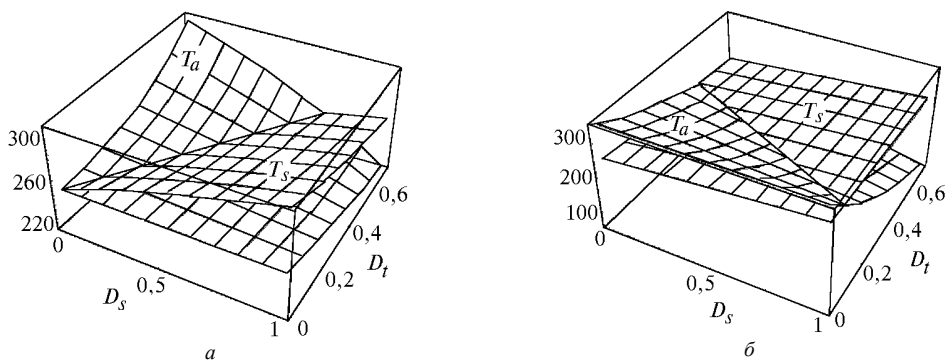


Рис. 9. Поведение температур T_s и T_a в двухслойной климатической модели, описываемой уравнениями (7) – (а) и уравнениями (7) с параметризацией $\sigma T_a^4(1-D_i) = \epsilon T_a$ – (б) в зависимости от параметров системы D_s и D_t

Рис. 10 представляет поведение температур 3-го и 4-го слоев в зависимости от некоторых вариаций функций пропускания, обозначенных на рисунке. Видно, что расположение кривой, обозначающей границу температурной инверсии, существенно зависит от характера вариаций функций пропускания. Стационарное состояние при этом остается устойчивым узлом. Качественные изменения могут оказаться и более существенными. На рис. 11 изображена ситуация, когда стационарное состояние перестает быть устойчивым узлом и становится устойчивым фокусом. Рис. 11, а дает поведение одного из характеристических чисел λ , определяющих характер устойчивости состояния для вариаций пропускания теплового излучения 1-го и 2-го слоев. Вещественные отрицательные значения λ отвечают устойчивому узлу. Для устойчивого фокуса λ комплексны и потому не изображаются на рисунке. На рис. 11, б показано также поведение температуры и функции пропускания теплового излучения в зависимости от высоты для точки со значениями D_{t1} и D_{t2} , попадающими в область устойчивого фокуса. Наличие фокуса означает, что при приближении к стационарному состоянию температура может обнаруживать периодические колебания с амплитудой, зависящей от начальных условий.

Таким образом, показана принципиальная возможность достаточно разнообразного качественного поведения температуры с ростом высоты в простых моделях. Более подробный анализ вариаций функций пропускания, приводящих к качественным изменениям, будет сделан в дальнейшем.

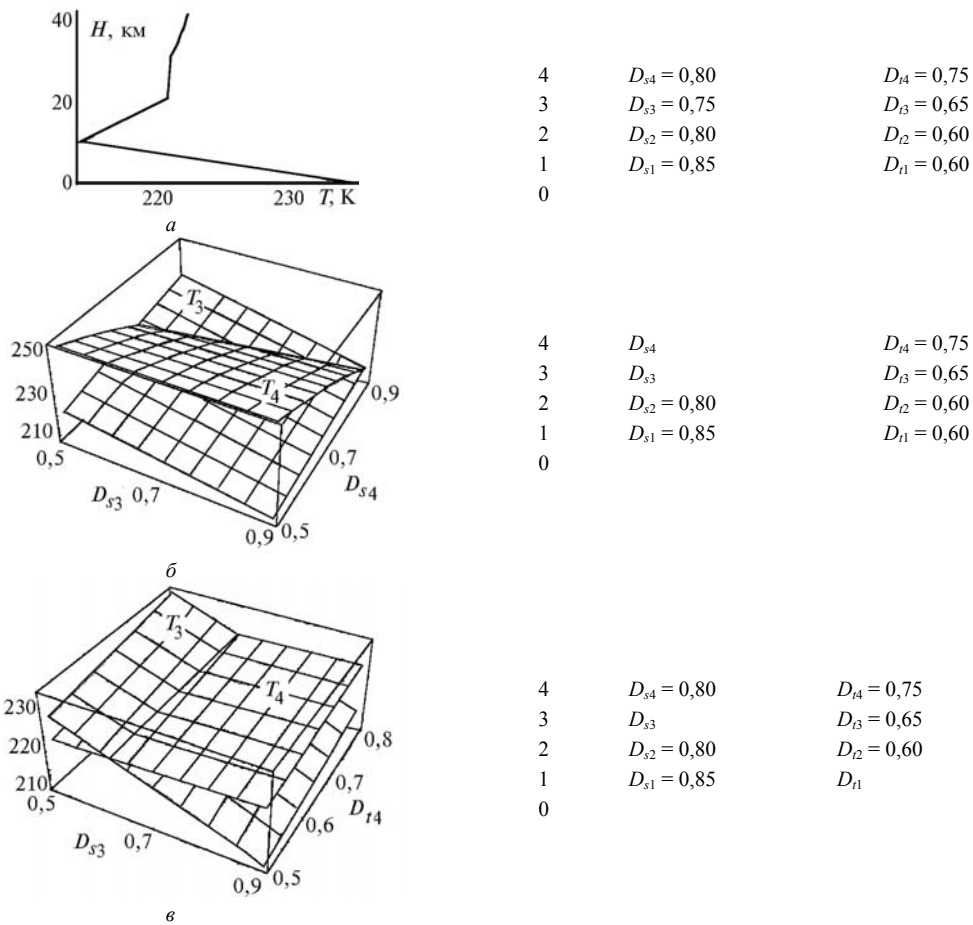


Рис. 10. Изменение температуры в стратосфере с изменением функций пропускания слоев в радиационной модели, содержащей 4 слоя до высоты 40 км. D_{si} – функция пропускания солнечного излучения i -го слоя, D_{ti} – функция пропускания теплового излучения i -го слоя. Изменение температуры с ростом высоты (а), изменение температур 3-го и 4-го слоев в зависимости от вариаций функций пропускания солнечного излучения в 3-м и 4-м слоях (б) и солнечного в 3-м и теплового в 1-м слоях (в)

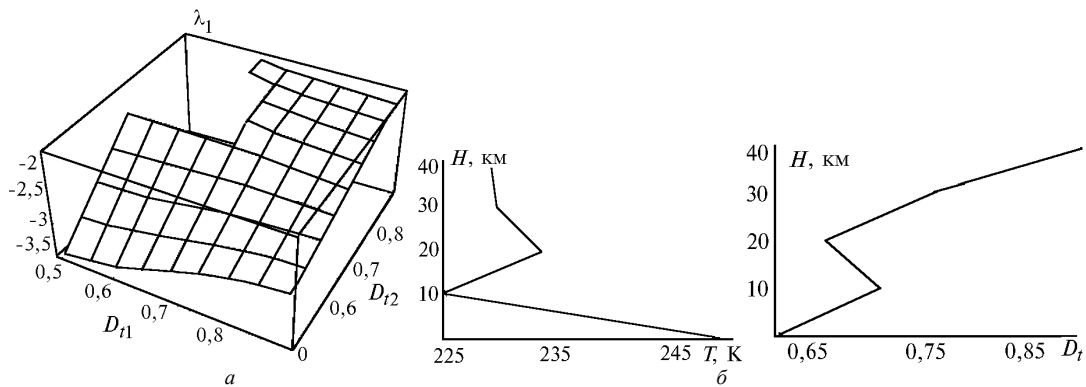


Рис. 11. Изменение характера устойчивого стационарного состояния устойчивый узел – устойчивый фокус в 4-слойной радиационной модели климата, описанной в тексте. Характеристическое число λ в зависимости от вариаций теплового излучения 1-го и 2-го слоев (а), высотный ход температуры и функции пропускания теплового излучения для значений D_{11}, D_{12} , отвечающих устойчивому фокусу (б)

4. Заключение

Приведенные примеры качественного исследования реакций озонного цикла и высотного хода температуры в простых радиационных моделях климата свидетельствуют о том, что ка-

качественное исследование как самих моделей климата, так и их составляющих блоков позволяет обнаружить общие закономерности поведения стационарных состояний системы.

Качественный анализ малоразмерных моделей, предваряющий полное численное исследование поведения сложных атмосферно-оптических систем, в частности при моделировании атмосферной фотохимии и исследовании глобальных климатических изменений, является необходимым этапом, определяющим примерные границы вариаций параметров, которые могут вызвать радикальные изменения в системе. Детальный численный анализ, должен проводиться для тех значений параметров, при которых качественный анализ выявил возможность нетривиального поведения системы. Именно такие области и должны быть подвергнуты тщательному теоретическому и экспериментальному исследованию.

Работа по исследованию озонового цикла выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 93-05-9026).

1. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. М.:Наука, 1966. 568 с.
2. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного анализа динамических систем на плоскости. М.:Наука, 1976. 494 с.
3. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.:Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
4. Сеидов Д.Г. Синергетика океанских процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 287 с.
5. Будыко М.И. // Tellus. 1969. V. 21. N 5. P. 611–619.
6. Lorenz E.N. // Irreversible Phenomena and Dynamical Systems Analysis in Geophysics C.Nicols and G.Nicols eds. D.Reidel Publ. Co. 1987. P. 557–567.
7. Chapman S. // Phil. Mag. 1930. Ser. 7. V. 10. N 64. P. 369–383.
8. Fichtelmann B., Sonnenmann G. // Ann. Geophys. 1992. V. 10. N 10. P. 719–728.
9. White W.H., Dietz D. // Nature. 1984. V. 309. N 5965. P. 242–244.
10. Fox J.L., Wofsy S.C., McElroy M.B., Prather M.J. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. N C13. P. 11126–11132.
11. Yang P., Brasseur G. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N D10. P. 20955–20965.
12. Karol I.L. // Pure and Appl. Geophys. 1980. V. 118. N 3. P. 695–705.
13. Шабалова М.В. // Труды ГГО. 1985. Вып. 494. С. 77–82.
14. Kozak J.J., Nicolis G., Kress J.W., Sanglier M. // J. Non-Equilibrium Thermodyn. 1979. V. 4. N 2. P. 67–74.
15. Гордов Е.П., Родимова О.Б., Смирнов Ю.Е. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 7. С. 56–63.
16. Моношкина В.Г., Родимова О.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 2. С. 146–154.
17. Гордов Е.П., Родимова О.Б., Сенников В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 6. С. 452–457.
18. Гордов Е.П., Родимова О.Б., Сенников В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 7. С. 909–913.
19. Гордов Е.П., Рыжов Е.Н. // Известия вузов, Физика. 1994. N 10. С. 117–118.
20. Гордов Е.П., Родимова О.Б., Сенников В.А., Фазлиев А.З. Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 9. С. 1288–1296.
21. Гордов Е.П., Фазлиев А.З. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 9. С. 1383–1393.
22. Manabe S., Strickler R.F. // J. Atmos. Sci. 1964. V. 21. N 4. P. 361–387.
23. Ramanathan V., Coakley J.A. // Rev. Geophys. Space Physics. 1987. V. 16. N 4. P. 465–489.
24. Кароль И.Л., Розанов Е.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. N 11. С. 1179–1191.
25. Кароль И.Л., Фролькис В.А. // Метеорология и гидрология. 1984. N 8. С. 59–68.
26. Гинзбург А.С. // ДАН СССР. 1973. Т. 208. N 2. С. 295–298.
27. Голицын Г.С., Мохов И.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 4. С. 378–387.
28. Lorenz E.N. // In: Nicolis C. and Nicolis G. (Eds.) Irreversible Phenomena and Dynamical System Analysis in Geoscience/ D.Reidel Publ. Comp. 1987. P. 557–567.
29. Кислов А.В. Теория климата. М.: Изд. МГУ. 1989. 148 с.
30. Родимова О.Б. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 11. С. 1231–1232.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
18 апреля 1996 г.

E.P. Gordov, O.B. Rodimova, S.D. Tvorogov, A.Z. Fazliev. **Qualitative Investigations of Evolution and Stability of the Oxygen Atmosphere in the Context of Low-order Models.**

The values of parameters are determined at which the qualitative analysis found a possibility of changing the stability character of the steady state. It is these regions which are of specific interest for detailed theoretical and experimental study.