

Г.М.Крученицкий, И.Л.Галкина, А.В.Белявский,
Т.В.Скоробогатый

О ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ В МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Сформулированы общие принципы моделирования атмосферных процессов, требования к соответствующим моделям и проанализирована степень соответствия существующих моделей глобальных атмосферных процессов этим принципам и требованиям. Показано, что имеющее место несоответствие существующих атмосферных моделей общепринятым в естествознании принципам моделирования приводит к ошибочным диагностике причин и прогнозу развития долговременных изменений в характере атмосферных процессов.

Моделирование физических процессов, как средства их изучения, должно соответствовать ряду общепринятых требований. Прежде всего, модель должна отражать **существенные** черты изучаемого процесса и игнорировать несущественные. Это разделение представляется несколько условным (в ходе совершенствования модели, как правило, в нее включают учет эффектов, ранее признававшихся несущественными), но его выполнение отражает саму суть процесса моделирования. Действительно, модель абсолютно адекватная моделируемому процессу, не нужна принципиально (независимо от реальных трудностей ее разработки), т.к. ее исследование ничуть не проще самого процесса. Хорошая модель должна допускать **качественный анализ** процесса, т.е. выявление его основных черт без детальных численных расчётов. И, разумеется, при моделировании должны чётко соблюдаться два основных принципа естественнонаучных исследований: **минимальность** заложенных **априорных предположений** (принцип Оккама) и **воспроизводимость** результатов. Классический пример удачного моделирования физического процесса - это описание движения небесного тела в поле тяготения звезды методом последовательных приближений в

небесной механике. Здесь налицо и удачное первоначальное отбрасывание малосущественных деталей (влияние других небесных тел), и возможность качественно классифицировать типы траекторий, исходя только из вида уравнений движения (не решая их), и чёткое установление погрешностей, и последовательный учёт ранее отброшенных деталей движения в рамках совершенствования модели. Априорные предположения, заложенные в модель (закон всемирного тяготения и II закон Ньютона), минимальны и надежно обоснованы, а воспроизводимость результатов бесспорна: результаты расчетов, выполненных различными исследователями, совпадут с точностью до вычислительного шума. И еще одна важная особенность хорошей модели – способность к **предсказаниям** (небесная механика не только объясняет ранее наблюдаемую эволюцию расположения небесных тел, но и предсказывает ее).

Эти общеизвестные принципы моделирования физических процессов мы вынуждены были еще раз напомнить потому, что в физике атмосферы в последние годы они практически преданы полному забвению. Разрабатываемые модели используют аналитические схемы, полностью исключая качественные оценки развития атмосферных процессов и допускающие только численное решение. Это обстоятельство сильно усугубляется включением в модели огромного количества плохо определенных констант и полным игнорированием необходимости исследования **качественной зависимости** характера эволюции моделируемых процессов от краевых и начальных условий, которые также известны с большими погрешностями. Сказанное легко пояснить примерами из числа наиболее популярных в последние десятилетия направлений моделирования.

Начнём с усиленно обсуждаемой в настоящее время проблемы глобального потепления. Утверждается, что рост энергопотребления, несомненно имеющий место в последние десятилетия, и обусловленное им повышение содержания CO_2 в атмосфере могут привести к повышению глобальной температуры, т.к. уменьшение растворимости CO_2 в Мировом океане с ростом температуры порождает положительную обратную связь между глобальной температурой и обусловленным наличием CO_2 в атмосфере парниковым эффектом. Модели, обосновывающие эту точку зрения, отличаются всеми отмеченными выше особенностями, поэтому их предсказания в корне противоречат

очевидным выводам, которые легко сделать исходя из качественных соображений. Очевидно, что производная глобальной температуры (T) по времени (t) пропорциональна разности приходящего и уходящего энергетических потоков:

$$\dot{T} \sim Q_{\downarrow} - Q_{\uparrow} . \quad (1)$$

Для лишённой атмосферы и океана планеты, вращающейся по круговой орбите, в соответствии с законом Стефана-Больцмана из (1) следует:

$$\dot{T} = A - BT^4 , \quad (1a)$$

где A и B константы, а точка $T_0 = \sqrt[4]{\frac{A}{B}}$ есть единственная точка равновесия. Ясно, что это равновесие является устойчивым (рис.1).

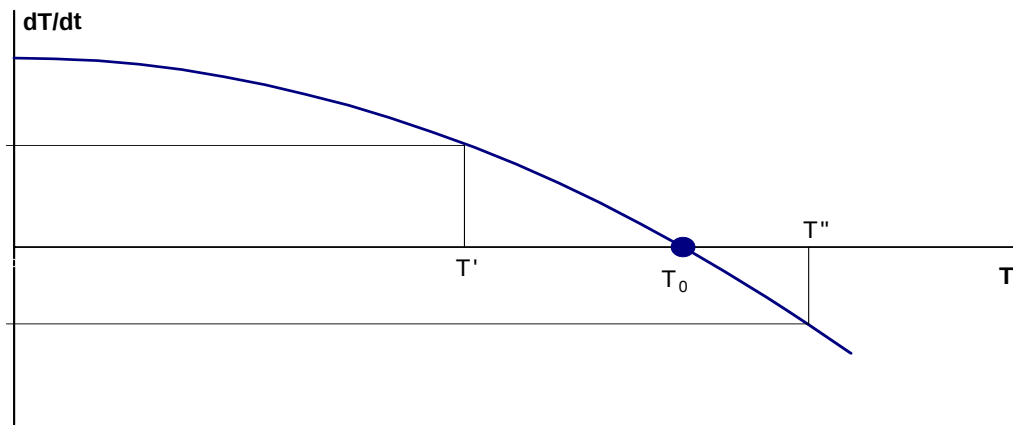


Рис.1. Фазовый портрет уравнения (1a): тёмный кружок – положение устойчивого равновесия

Из рисунка видно, что при любом выборе начального условия для температуры ($\dot{T}$ или $\ddot{T}$) знак производной совпадает со знаком разности между точкой равновесия и начальным значением. Следовательно, решение всегда стремится к значению T_0 . Наличие на планете атмосферы, содержащей углекислый газ (CO_2), поглощающий уходящее инфракрасное излучение, и океана, в котором растворён этот газ, приводит, в соответствии с законом Бугера, к уравнению:

$$\dot{T} = A - BT^4 \exp[-\sigma N(T)] , \quad (1b)$$

где σ - сечение поглощения инфракрасного излучения CO_2 ; N - полное количество CO_2 в атмосферном столбе единичного сечения.

Зависимость N от температуры имеет вид возрастающей функции с насыщением (рис.2), конкретный вид которой несущественен для дальнейших построений.

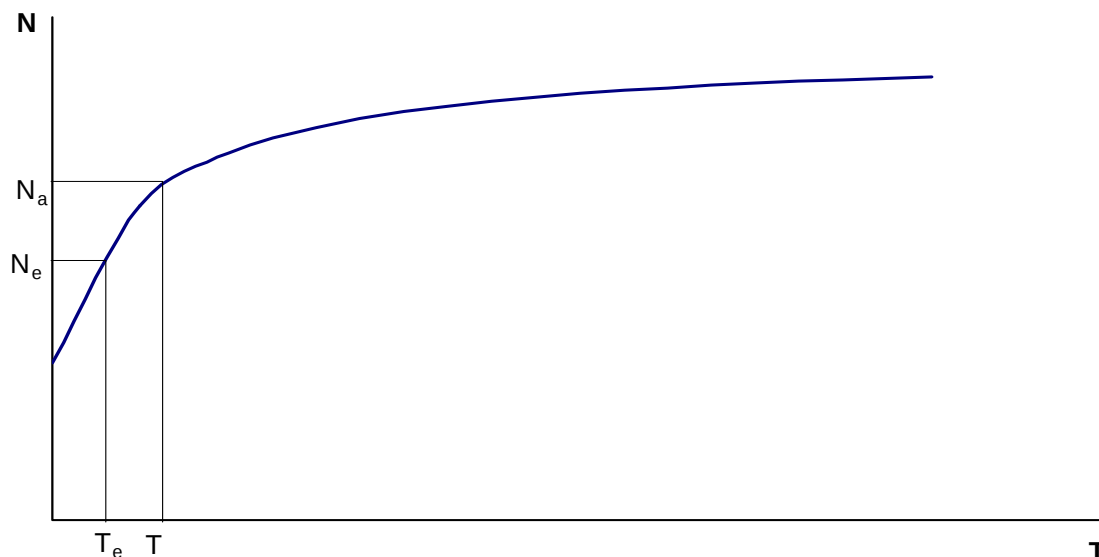


Рис.2. Зависимость содержания CO_2 в атмосфере от температуры

Насыщение обусловлено ограниченностью полного количества CO_2 в атмосфере и океане (или, если угодно, ограниченностью запасов углерода и кислорода на планете). Такой характер зависимости N от T порождает фазовый портрет уравнения (1b), изображенный на рис.3. Из рисунка видно, что система теперь имеет три точки равновесия: две устойчивые (T_0 и T_2) и одну неустойчивую (T_1). Выбор в качестве начального условия величины $T' > T_1$ приведёт решение в точку T_2 , а величины $T' < T_1$ в точку T_0 . Пунктирная вертикаль, проходящая через точку T_1 , является **непроницаемой** перегородкой для фазовых траекторий. Поскольку введение явной зависимости величины N от времени (антропогенный выброс CO_2 , соответствующий переходу от N_e к N_a на рис.2) эквивалентно заданию нового начального условия (T_a вместо T_e), то ясно, что оно не может сказаться на положении точек равновесия системы и их устойчивости. А т.к. изменения величины N происходят непрерывным образом, то фазовая траектория системы не сможет проникнуть сквозь непроницаемую перегородку и **равновесное значение глобальной температуры останется неизменным.**

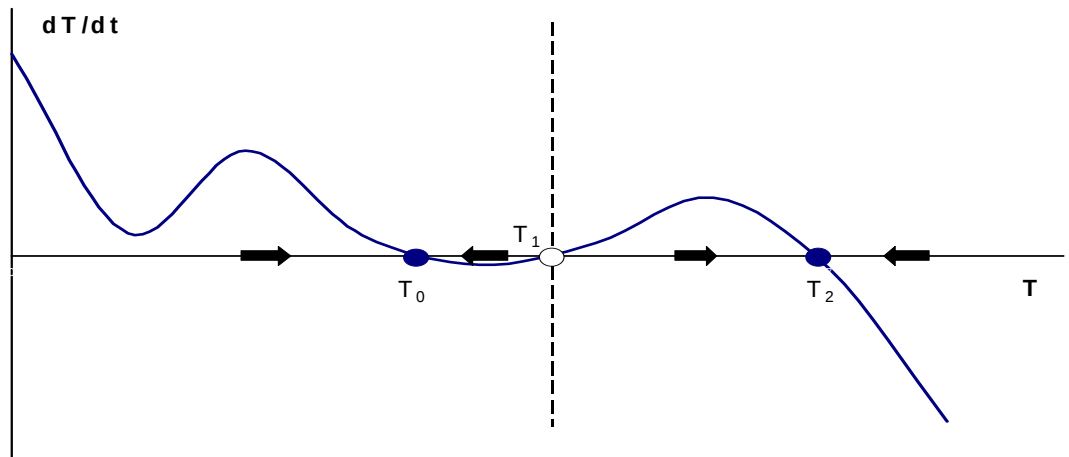


Рис.3. Фазовый портрет уравнения (1b): темные кружки – положение устойчивого равновесия, светлый – неустойчивого

Очевидно, что на окончательный вывод не повлияет учёт отброшенных в уравнении (1b) деталей, таких как:

- отличие орбиты планеты от круговой (это приведёт лишь к осцилляциям фазового портрета системы вдоль оси абсцисс с частотой обращения);
- наличие других газов, поглощающих тепловое излучение планеты (т.е. переход от σN в показателе экспоненты к $\sum \sigma_i N_i$);
- зависимость уходящего потока от площади полярных шапок и ледников (т.е. переход от A к $A(1 - \varepsilon T)$) и пр.

Ясно, что приведенный выше вывод самоочевиден: повышение глобальной температуры планеты приведёт к росту излучаемого ею тепла, а это, в свою очередь вернёт температуру к равновесному значению. Мы провели выше несколько более детальное рассмотрение с тем, чтобы подчеркнуть, что многопараметрическая модель с недостаточно точно определёнными параметрами, может неверно определить знак производной температуры в окрестности точки T_1 , что приведёт (даже при небольшой абсолютной погрешности) к принципиальной ошибке в асимптотическом поведении решения: неверному определению равновесного значения глобальной температуры.

Заканчивая рассмотрение этого примера, ответим на возникающий естественный вопрос: чем объяснить, несомненно, имевшие место в прошлом резкие изменения глобальной температуры, обусловившие, например, вымирание ящеров или мамонтов? Смещение точек равновесия

может быть обусловлено лишь **скачкообразным** изменением величин A и B , например:

- изменениями орбиты планеты в результате столкновения с достаточно массивным небесным телом;
- резким изменением аэрозольной загрузки атмосферы (массовые вулканические извержения, «ядерная зима») и т.п.

Ещё один вопрос связан с утверждением о том, что на протяжении последних десятилетий экспериментально наблюдается **глобальное потепление**. В экспертном докладе [2] утверждается, что за последние 140 лет средняя глобальная приземная температура (СГПТ) возросла на $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Чтобы диагностировать такие изменения необходимо знать СГПТ на концах анализируемого интервала (т.е. для 1860 и 2000 г.) с точностью $\sim 0.1^\circ\text{C}$. Пусть мы абсолютно точно знаем значения средней приземной температуры за конкретный год в N равномерно расположенных по земному шару точках. Тогда из-за наличия естественного среднеквадратического отклонения температуры по поверхности Земли – (σ_T) мы сможем вычислить выборочное среднее с погрешностью $\sim \sigma_T/\sqrt{N}$. Полагая (весьма либерально) $\sigma_T \sim 10^\circ\text{C}$, приходим к оценке $N \sim 10000$. Это совершенно нереальное число для 1860 г., не говоря уже о фантастичности предположения о равномерности расположения наблюдательных пунктов по поверхности Земли не только для этого года, но и для наших дней. На этом, по нашему мнению, обсуждение утверждения о **наблюдаемости глобального потепления** можно прекратить. Разумеется, всё сказанное не исключает возможности изменения распределения температуры по поверхности Земли при сохранении её среднего значения, но этот вопрос следует обсуждать вне очевидных спекуляций по поводу антропогенного стимулирования парникового эффекта (см. выше).

В качестве другой иллюстрации тезиса о принципиальной порочности большинства подходов, используемых при построении современных моделей атмосферных процессов, рассмотрим фотохимическое моделирование, применяемое, в частности, для описания эволюции состояния озонового слоя. Все модели такого рода, начиная от чепменовской [5] и заканчивая т.н. одномерными моделями антропогенного воздействия на озоновый слой, сводились к решению систем дифференциальных уравнений вида:

$$\dot{n}_i(h,t) = \sum_{j,k=1}^N B_{kj} n_k(h,t) n_j(h,t) + \sum_{k,l,j=1}^N T_{ljk} n_l(h,t) n_j(h,t) n_k(h,t) + \sum_{k=1}^N R_k(h,t) n_k(h,t), \quad (2)$$

где n_i - концентрация i -го газа; h - высота; t - время; B_{kj} и T_{ljk} - константы двойных и (соответственно) тройных реакций; N - число газовых компонентов; R_k - радиационные члены, описывающие поток химически активной радиации Солнца в различных частях спектрального диапазона.

Сам Чепмен и его ближайшие последователи решали систему (2) в стационарном приближении при малом числе реакций (исключительно двойных) с хорошо определенными константами и начальными условиями. С одной стороны, это позволило получить зависимость концентрации озона от высоты, качественно сходную с профилями, наблюдаемыми в эксперименте, что, несомненно, было выдающимся достижением для 30-х годов. С другой – были показаны ограниченные возможности подхода: свойства вертикального распределения озона (в частности, наличие максимума) получались исключительно как результаты численных расчетов, а сама по себе система (2) качественного анализа не допускала. К сожалению, в дальнейшем без всяких на то оснований многими исследователями был сделан вывод о том, что, опираясь на неизмеримо возросшие возможности вычислительной техники, число уравнений в системе можно наращивать неограниченно, а перенос ошибок¹ либо игнорировать вообще, либо оценивать по методу Монте-Карло. Общее число уравнений вида (2), использовавшихся в моделях 1970 – 1980 гг., доходило до нескольких сотен (в настоящее время в фотохимических блоках двумерных и трёхмерных моделей оно сокращено до нескольких десятков, но не из-за осознания изъянов подхода, а из-за ограничений, обусловленных необходимостью включения в вычислительную схему атмосферно-динамических процессов). Кардинальный недостаток такого подхода состоит в том, что константы большинства двойных, и в особенности тройных реакций, измерены (по вполне объективным причинам, за описанием которых мы отсылаем читателя к специальной литературе) со значительной погрешностью (~10÷100%). Поэтому даже если ограничиться поиском равновесных значений концентраций (т.е. приравнять правые части уравнений системы (2) к нулю) и считать, что радиационные члены

¹ Зависимость погрешности решения системы от погрешностей ее параметров.

известны с высокой точностью², то погрешность решения полученной алгебраической системы³ не позволит получить даже самых приблизительных представлений об истинном характере моделируемого процесса. Для иллюстрации сказанного рассмотрим простейшую реализацию системы типа (2), когда $N=1$, а зависимость от высоты концентраций, констант реакций и уровня фотохимической радиации отсутствует:

$$\dot{n} = an^3 + bn^2 + cn. \quad (2a)$$

Разумеется, уравнение (2a) не может интерпретироваться как модель фотохимической эволюции какого-либо газа, но его анализ наглядно демонстрирует некоторые из особенностей, с которыми необходимо считаться при численном интегрировании системы типа (2). Укажем эти особенности, ограничившись исключительно неотрицательными решениями уравнения (2a). Легко убедиться, что в случае невырожденной кубической формы в правой части уравнения (2a), оно в зависимости от знака старшего коэффициента a , расположения действительных корней квадратичной формы $an^2 + bn + c$ относительно нуля и значения её дискриминанта $D = b^2 - 4ac$, может иметь 12 принципиально различных фазовых портретов. Остановимся подробнее на тех трёх из них, при реализации которых, сколь угодно малая ошибка в задании начального условия приведёт к принципиальным ошибкам в результате численного интегрирования уравнения. Эти фазовые портреты приведены на рис. 4. Все они соответствуют положительному значению величины D . Случай 4a реализуется при $a > 0$ и разных знаках корней квадратичной формы. Случай 4b соответствует $a > 0$ и положительным корням формы, а 4c отличается от него знаком коэффициента a . Видно, что для фазового портрета 4a в области неотрицательных решений есть два положения равновесия: устойчивое $n = 0$ и неустойчивое $n = n_1$. При выборе начального условия $n_0 < n_1$ (в том числе, как угодно близко к n_1) решение стремится к нулю, а при выборе $n_0 > n_1$ (в том числе, как угодно близко к n_1) неограниченно возрастает. Аналогично для фазового портрета 4b

² Вычисление радиационных потоков составляет предмет теории переноса излучения в атмосфере, где в избытке имеются собственные и весьма серьезные методические проблемы, в частности, острый дефицит информации о микроструктурных параметрах аэрозоля, его глобальном и локальном распределении, спектральном ходе действительной и мнимой частей показателя преломления и т.д.

³ Погрешность существенно возрастает с ростом числа уравнений.

выбор начального условия по разные стороны от n_2 приводит к смене асимптотического стремления решения к конечному значению n_1 неограниченным возрастанием. И, наконец, в случае 4с, располагая начальное условие по разные стороны от положения неустойчивого равновесия n_1 , мы совершаем выбор между асимптотическим стремлением решения к одному из двух положений устойчивого равновесия 0 и n_2 . Легко проверить, что положения неустойчивого равновесия существуют на положительной полуоси и при вырожденности кубической формы в правой части уравнения (2а), т.е. в случае $a = 0$. Более детально мы рассмотрим этот вопрос ниже. Из сказанного следует, что системы типа (2), успешно работающие для моделирования процессов в химических реакторах, где начальные условия закладываются «своими руками», совершенно непригодны для моделирования химических процессов в атмосфере и останутся таковыми, пока сведения о концентрациях большинства малых газовых составляющих будут иметь, как сегодня, отрывочный и непредставительный характер.

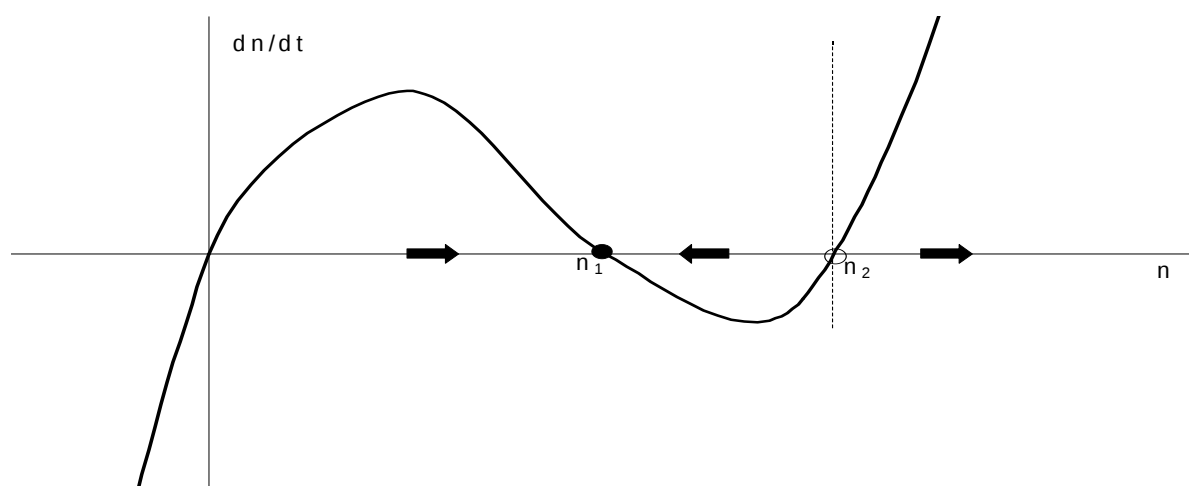


Рис. 4а. Фазовый портрет уравнения (2а): $a > 0$ и разные знаки корней квадратичной формы

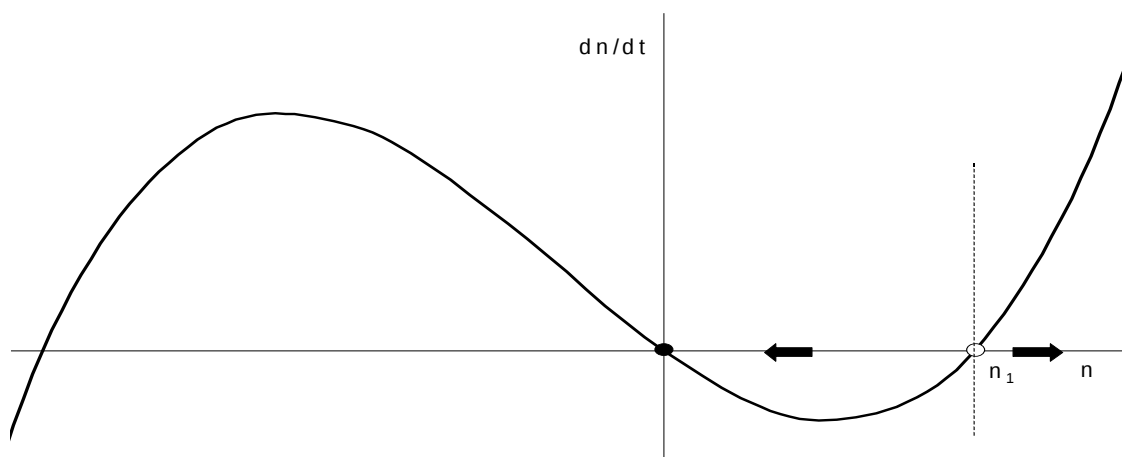


Рис. 4b. Фазовый портрет уравнения (2a): $a > 0$ и положительные значения корней квадратичной формы

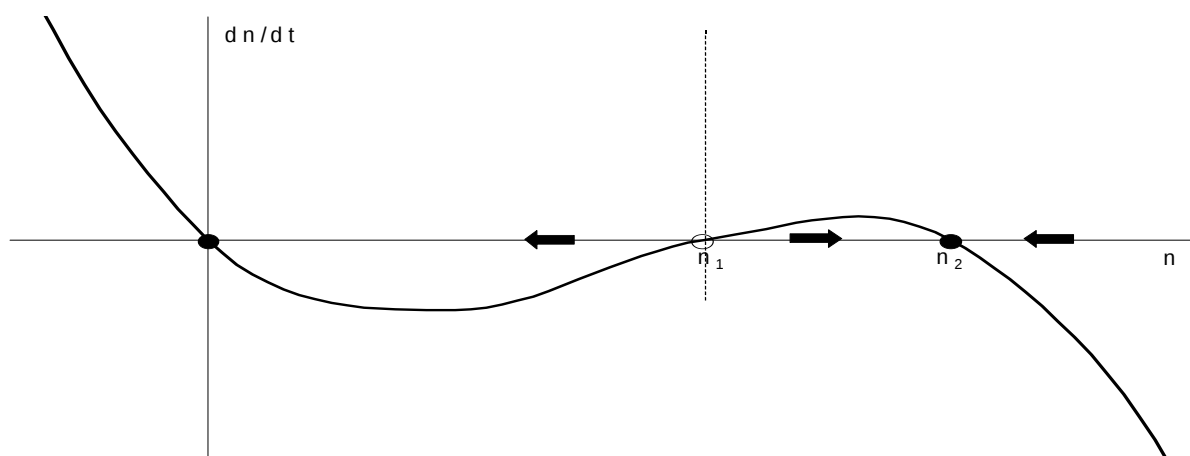


Рис. 4с. Фазовый портрет уравнения (2a): $a < 0$ и положительные значения корней квадратичной формы

В заключение отметим ещё одно немаловажное обстоятельство. Начальные условия для систем типа (2) определяют не только положение и тип точек равновесия, к которым система асимптотически стремится, но и скорость с которой это происходит. Это обстоятельство особенно важно, когда речь идёт не об одномерных фотохимических моделях, а о фотохимических блоках двумерных и трёхмерных моделей, где важно определить адекватное реальной ситуации соотношение временных шагов динамического и фотохимического блоков. Это видно на примере двойной реакции, описывающей сток оксида хлора в резервуар

хлористого нитразида, которая, по мнению сторонников фреоновой версии «истощения озонового слоя», блокирует распространение явления «антарктической озоновой дыры» на умеренные широты [4].



Последовательно обозначая количества реагентов (3) через x, y и z приходим к системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -Kxy \\ \dot{y} &= -Kxy \\ \dot{z} &= Kxy , \end{aligned} \quad (3a)$$

с начальными условиями:

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 \\ y(0) &= y_0 \\ z(0) &= z_0 , \end{aligned} \quad (3b)$$

где K - константа реакции (3) (разумеется, $K > 0$).

С учётом очевидных первых интегралов:

$$\begin{aligned} x - y &= x_0 - y_0 \\ x + z &= x_0 + z_0 \end{aligned}$$

система (3a) приводит к уравнению:

$$\dot{x} = -Kx(x - x_0 + y_0) . \quad (3c)$$

Уравнение (3c), благодаря разделению переменных, сводится к квадратуре:

$$\int \frac{dx}{x(x - x_0 + y_0)} = -K + Const , \quad (3d)$$

которая, в свою очередь, легко вычисляется в элементарных функциях.

При $x_0 \neq y_0$ имеем:

$$x = \frac{x_0(x_0 - y_0)}{x_0 - y_0 \exp[Kt(y_0 - x_0)]} , \quad (3e)$$

а при $x_0 = y_0$:

$$x = \frac{x_0}{1 + Kx_0 t} . \quad (3f)$$

Легко увидеть, что асимптотическое поведение концентрации x (стремление к 0 или к $x_0 - y_0$) определяется знаком величины $x_0 - y_0$. Это очевидно из физических соображений, и, кроме того, подтверждает отмеченный выше факт, что даже вырождение кубической формы в

правой части уравнения в квадратичную не отменяет жестких требований к качеству задания начальных условий. Кроме того, сравнивая решения (3f) и (3e) мы видим, что скорость приближения концентрации к равновесному значению сильно зависит от граничных условий: в одном случае, приближение происходит по экспоненциальному закону, а в другом - по степенному.

Мы совершенно не касаемся вопроса о численном интегрировании уравнений общей циркуляции. Это сделано сознательно, т.к. применительно к уравнениям гидромеханики не только не существует сколько-нибудь эффективных методов качественного анализа, но даже не доказана теорема единственности. Это означает, что даже точное задание начальных и граничных условий не гарантирует устойчивых результатов при численном решении названных уравнений. Если к этому добавить то обстоятельство, что ныне существующая глобальная система наблюдений за состоянием атмосферы не позволяет задать, например, граничные условия, не прибегая к интерполяции, то становится ясным, что вопрос о надёжности численных моделей, опирающихся на уравнение общей циркуляции, бессмысленно даже обсуждать. То количество степеней свободы, которое в современных условиях находится в распоряжении разработчиков моделей такого рода, существенно превышает число параметров измеряемых в ходе тестирования модели. Это означает практически неограниченные возможности для подгонки, наряду с полным отсутствием каких-либо возможностей для серьёзного анализа и прогноза. Более детальное рассмотрение этого вопроса можно найти в незаслуженно забытой монографии [1].

Естественно, возникает вопрос об альтернативе традиционным подходам к моделированию атмосферных процессов. К сожалению, выбор здесь пока небогатый. По нашему мнению единственным выходом на сегодняшний день является использование средств вычислительной техники по прямому назначению, т.е. для решения следующих задач:

- создания обширных и удобных в использовании баз данных;
- повышения соотношения сигнал/шум в рядах геофизических наблюдений;
- автоматизации рутинных вычислительных и информационно-поисковых операций;
- привлечения обширных (по возможности исчерпывающих) данных измерений к тестированию аналитических результатов или

результатов, полученных на небольшом экспериментальном материале.

Сохраняя и приумножая усилия по построению глобальных статистических моделей геофизических полей, по-видимому, следует пока совершенно отказаться от попыток глобального динамического моделирования и сосредоточить усилия на получении аналитических результатов пусть более частных, но базирующихся на фундаментальных физических принципах: законах сохранения, вариационном принципе и т.д. Пример реализации такого подхода приведен в работе [3].

* *

Сформульовані загальні принципи моделювання атмосферних процесів, вимоги до відповідних моделей. Зроблений аналіз на відповідність цим принципам та вимогам існуючих моделей глобальних атмосферних процесів. Показано, що невідповідність існуючих атмосферних моделей загальноприйнятим в природознавстві принципам моделювання приводить до помилкової діагностики причин та прогнозу розвитку довгострокових змін в характері атмосферних процесів.

* *

1. *Белинский В.А.* Динамическая метеорология. - М.-Л.: ОГИЗ, 1948.- С. 266 - 268.

2. Изменение климата 2001 г.: Научные аспекты. Резюме для лиц, определяющих политику, и техническое резюме доклада рабочей группы I Межправительственной группы экспертов ВМО и ЮНЕП по изменению климата. - 2002. - С. 26.

3. *Чуйко А.А., Крученицкий Г.М., Покровский В.А., Скоробогатый Т.В.* // Доповіді Національної академії наук України.- 2002. - №3.- С. 146 - 151.

4. *Anderson J.G., Brune W.H., Lloyd S.A. et al* // J. Geophys. Res. – 1989. - V.94. - 11480 p.

5. *Chapman S. Phil.* //Mag. , Ser.7. – 1930. - № 64. - P. 369 - 385.