

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П. П. ШИРШОВА

На правах рукописи

СТЕПАНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

УДК 551.583.7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
С ЦЕЛЮ ИЗУЧЕНИЯ РОЛИ ОКЕАНА В ДОЛГОПЕРИОДНЫХ  
КОЛЕБАНИЯХ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ)

Специальность II.00.08 - океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

М О С К В А - 1 9 8 9

Работа выполнена в Лаборатории моделирования климата океана Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Д. Г. Сеидов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Ю. А. Иванов  
кандидат физико-математических наук С. К. Гулев

Ведущая организация:

Институт географу

Защита состоит  
в 14 час. 0  
совета К. 002.  
АН СССР по адр

С диссертацие  
Института оке

Автореферат г

Ученый секре:  
Специализиро  
кандидат гео

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Непреднамеренные изменения, которые произошли под влиянием человека на Земле и в атмосфере, настолько велики, что уже сейчас их необходимо учитывать в любом уравнении глобального "баланса природы" (Kellog, Schnider, 1974). Трудности оценки влияния человечества на настоящий и будущий климат обуславливается чрезвычайной сложностью климатической системы, состоящей из взаимодействующих между собой атмосферы, океана и суши (Монин, 1982).

Возможно предсказание будущего изменения климата, обусловленного антропогенной деятельностью человека, на основе численных моделей климата (Моисеев, Александров, Тарко, 1985). Но достоверность прогноза климатических изменений может быть подтверждена, как известно, только путем сравнения результатов моделирования с натурными данными. В качестве таких данных могут выступать как современные наблюдения, так и палеогеографические реконструкции.

История климата свидетельствует, что последние почти 2 млн. лет климат Земли существенно менялся и состоял из периодов наступления на юг ледяного покрова на значительных территориях в Северной Америке, в Европе и относительно теплых межстадиалов. Иначе говоря, имела место значительная изменчивость климата нашей планеты, происходившая без какого-либо влияния антропогенной деятельности человека, в виде собственных колебаний климатической системы океан-атмосфера-льды. Умея объяснить с помощью какой-либо климатической модели причины таких долгопериодных колебаний климата в прошлом, можно с большей уверенностью говорить о способности этой модели прогнозировать будущие изменения климата и о достоверности результатов, получаемых с ее помощью. Диссертационная работа

ВНИРО  
№ 23  
Библиотека

посвящена попытке рассмотреть основные механизмы взаимодействий в климатической системе, которые приводят к долгопериодным изменениям климата и роли океана в этих взаимодействиях.

**Цель работы.** За последнее время были построены математические модели климата, с помощью которых удалось получить автоколебательный режим в климатической системе (В.Я. и С.Я. Сергины, 1978; Вербицкий и Чаликов, 1986; Birchfield, Weertman, Lunde, 1981; Ghil, 1981, Oerlemans, 1980; 1982; Peltier, 1982, Pollard, 1982, Saltzman, Sutera, 1984 и др.). Во многих работах самым инерционным звеном обычно считают континентальный лед, но иногда эту роль выполняет еще более инерционное звено - астеносфера Земли (Вербицкий, Чаликов, 1986). В то же время, роль такого важного инерционного звена как океан рассмотрена далеко не полностью. Цель настоящей работы и состояла в разработке математических моделей, описывающих механизмы взаимодействия составных частей климатической системы с этой точки зрения.

#### Основные этапы исследования.

1. Исследование изменчивости крупномасштабной циркуляции океана в зависимости от условий на его поверхности. Численные эксперименты по воспроизведению циркуляции в современный период и в максимуме последнего плейстоценового оледенения (18000 лет назад).

2. Рассмотрение основных механизмов эволюции континентальных ледниковых покровов. Численные эксперименты с радиально-симметричной моделью ледниковых щитов для выяснения ответственной роли различных факторов их эволюции.

3. Построение усовершенствованной зональной модели ат-

мосферы, учитывающей положение субполярного фронта. Изучение с ее помощью изменчивости режима атмосферы в зависимости от граничных условий на ее верхней и нижней границах. Проведение численных экспериментов по взаимодействию атмосферы и криосферы при фиксированной температуре поверхности океана, соответствующей различным ледниковым эпохам.

4. Построение сосредоточенной малопараметрической модели системы океан-атмосфера-льды (ОАЛ). Моделирование автоколебательного режима в климатической системе и исследование свойств этой системы под действием детерминистских и стохастических сил.

**Научная новизна исследования.** Впервые проведено численное исследование изменений структуры крупномасштабной океанской циркуляции в зависимости от условий на поверхности океана, соответствующих ледниковому периоду. Расчеты показали, что циркуляция Атлантического и Тихого океанов по разному реагирует на похолодание. Циркуляция Северной Атлантики при понижении температуры атмосферы изменяется весьма существенным образом, причем, она проявляет бифуркационное поведение - при понижении температуры поверхности океана постепенное сжатие в меридиональном направлении антициклональной ячейки горизонтальной крупномасштабной циркуляции (примерно до 40° с.ш. в вюрме) сменяется фазой растяжения этой ячейки, проникающей далеко на север и достигающей почти современного положения. Тихий океан слабо реагирует на такие изменения.

На основе гидродинамической модели континентальных покровов и результатов, полученных при моделировании палеоциркуляции океана, показано, что основным фактором, влияющим на способность континентальных ледниковых щитов распространяться

в низкие широты, являются условия на поверхности океана, определяющих баланс массы (приход льда должен преобладать над его расходом).

Эксперименты, проведенные с помощью усовершенствованной автором зональной модели атмосферы Вербицкого-Чаликова, подтвердили известный палеогеографический факт, заключающийся в том, что при общем похолодании климата наибольшие изменения температуры имеют место в умеренных и высоких широтах. Потепление, вызываемое увеличением притока солнечной радиации сильнее проявляется в низких и умеренных широтах. Кроме того, эти эксперименты показали, что росту ледниковых покровов действительно способствует понижение температуры поверхности океана, но только до определенной степени. Слишком сильное охлаждение поверхности океана вызывает усиление континентальности климата, что в свою очередь приводит к деградации ледниковых щитов. Таким образом, здесь также имеет место существенно нелинейная реакция всей системы на перманентное выхолаживание.

Эксперименты с малопараметрической моделью показали, что в климатической системе могут реализовываться автоколебательные режимы с периодом колебаний около 100 тыс. лет. Внешние воздействия в виде колебаний инсоляции, обусловленные возмущениями орбитальных параметров Земли, увеличивают период колебаний в модели. Имеющаяся климатическая межвековая изменчивость, вызванная короткопериодным в масштабах геологического времени (порядка сотни лет) взаимодействием атмосферы и океана, обуславливает существование колебаний с периодами от 10 до 100 тыс. лет, т.е. влияет на характер спектра колебаний. Сделана попытка объяснить переход климатической системы из

апериодического режима к колебательному внутренним свойством самой системы океан-атмосфера-льды. Данные расчеты показывают, что при моделировании долгопериодных колебаний климата необходимо учитывать и межвековую изменчивость. Спектр колебаний за последние 500 тыс. лет, вычисленный по результатам этой модели, характеризуется пиками с типичным временем от 11-12 тыс. лет до 100 тыс. лет. Наиболее значительные пики на спектральной кривой соответствуют периодам около 100, 45 и 20 тыс. лет, но они не обусловлены астрономическими возмущениями. Это свойства самой нелинейной климатической системы при наличии в ней стохастического шума.

Но так как величина этого шума (и, следовательно, характер спектра колебаний) существенно зависят от обостренности меридиональных градиентов, возникающих на фронтальных разделах воздушных и водных масс, которая в основном определяется зональным распределением солнечной радиации, в палеогеографических данных должна существовать некоторая зависимость спектра колебаний климатической системы от возмущения орбитальных параметров Земли, влияющих на распределение инсоляции.

Практическое значение. Рассмотренные механизмы взаимодействия различных компонент климатической системы позволяют более адекватно описывать их совместное влияние и, следовательно, давать более достоверный прогноз будущего изменения климата. Разработанные модели могут использоваться для анализа современного и палеоклиматов океана и в палеоклиматических исследованиях климата Земли.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 11 научных статей. Результаты работы докладывались на семинарах Лаборатории моделирования климата океана Института океаноло-

гии АН СССР им. П. П. Ширшова, на III Всесоюзном съезде океанологов, на Конференции молодых ученых ИОАН СССР и на Ученом Совете ИОАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 142 страниц машинописного текста, включая 35 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 109 наименования.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются цели и задачи исследования, дается краткий обзор моделей, имитирующих поведение атмосферы и океана, малопараметрических моделей климата. Приводится краткая характеристика содержания по главам.

Первая глава содержит описание математической модели общей циркуляции океана, модели термогидродинамики атмосферы и результатов численного моделирования океанской циркуляции для северных частей Атлантического и Тихого океанов, соответствующей последней стадии четвертичного оледенения (18000 лет назад).

В § 1.1. дается общая характеристика современной картины океанской циркуляции в изучаемом районе. Подчеркивается принципиальное отличие типов циркуляций северных частей Атлантического и Тихого океанов. На основе краткого обзора палеогеографических данных обсуждаются карты распределения поверхностной температуры океана и возможная структура меридиональной циркуляции вод Северной Атлантики.

В § 1.2 приводится модель океанской циркуляции (Сейдов, 1984, 1985). Записываются уравнения динамики жидкости, обсуждается задание граничных условий, вводятся различные упрощающие предположения. Исходными уравнениями модели океанской цир-

куляции являются уравнения баланса импульса, тепла, количества соли, записанные в левой сферической системе координат, в приближении Буссинеска, несжимаемости и гидростатического равновесия. В уравнениях движения пренебрегают нелинейными членами, и для простоты полагается, что слой бароклинности везде лежит выше неровностей рельефа. После этих упрощений и в приближении геострофичности течений получается система уравнений для вспомогательных функций: интегральной по вертикали относительно завихренности течений и функции полных потоков. Компоненты сдвиговой скорости рассчитываются по геострофическим соотношениям. На поверхности океана учитываются составляющие дрейфовой скорости. Вертикальная компонента вектора скорости рассчитывается по вихрю сдвиговых геострофических скоростей. Кратко рассматривается численный метод решения уравнений переноса и уравнений для вспомогательных функций, описывающих среднее по глубине океана движение вод.

В § 1.3 рассматривается зональная одномерная модель атмосферы (Вербицкий, Чаликов, 1982), которая основывается на решении осредненных по высоте уравнений переноса тепла и влаги при соответствующей параметризации турбулентных притоков тепла и влаги и притоков тепла коротковолновой и длинноволновой радиации. Модель позволяет при заданных среднегодовых широтных распределениях потока коротковолновой радиации, поверхностной температуры океана, заданных распределениях границ распространения и толщин материкового льда и балла материков получить распределения по меридиану средней зональной температуры воздуха и температуры воздуха в приводном слое, оценить тепловые потоки в атмосфере, поток тепла в океан и среднеширотное распределение осадков.

В § 1.4. приводятся условия численных экспериментов. Описано задание условий на границе раздела воздушной и водной масс, другие граничные условия, определяются параметры модели океанской циркуляции и зональной атмосферы.

В § 1.5. обсуждаются результаты моделирования объединенной системы океан - атмосфера для современного периода и вюрмского оледенения северных частей Атлантического и Тихого океанов, с трехмерной моделью циркуляции океана и моделью зональной атмосферы. Показывается отличие реакции на похолодание атмосферы этих океанов из-за различия в типах циркуляций. Циркуляция Северной Атлантики при понижении температуры атмосферы изменяется весьма существенным образом. При похолодании происходит сжатие в меридиальном направлении горизонтальной крупномасштабной ячейки циркуляции (максимальное поджатие наблюдается в вюрме). Дальнейшее понижение атмосферной температуры вызывает растяжение этой ячейки, проникающей далеко на север и достигающей почти современных размеров. Подобных изменений в циркуляции Тихого океана не наблюдается. Делается предположение, что наблюдаемые отличия в характере изменения крупномасштабных циркуляций рассматриваемых океанов определяют возможность существования крупных ледниковых покровов на континентах, омываемых водами Атлантического океана.

Во второй главе на основе гидродинамической модели ледниковых покровов рассматриваются основные механизмы эволюции ледниковых щитов. Показывается, что основные изменения объема ледникового покрова происходят из-за изменения бюджета массы в его краевой зоне.

В § 2.1. приводятся данные о теплофизических свойствах льда и современных и реконструированных из палеогеографических

данных для последнего оледенения материковых ледниковых щитов. Приводятся характерные величины объемов крупных ледниковых покровов, границы их распространения в настоящее время и во время последнего оледенения (18000 лет назад).

В § 2.2 описывается гидродинамическая модель равнинных ледниковых покровов для самого простого случая - симметричного покрова и изотермического льда. Лед считается линейно-вязкой, несжимаемой жидкостью. Модель основывается на решении уравнения неразрывности для несжимаемой среды записанного в цилиндрической системе координат, кинематического условия на поверхности ледникового щита. Эта система уравнений замыкается с помощью реологического закона для линейно-вязкого вещества. При принятых допущениях для зон аккумуляции и абляции покрова в случае стационарного ледникового щита профиль покрова в этих зонах может быть выражен аналитически.

В § 2.3 рассматриваются механизмы эволюции профиля покрова в случае небольшого изменения величины чистой аккумуляции на поверхности покрова и в случае резкого усиления континентальности климата, когда над основной частью покрова осадки почти не выпадают. В последнем случае ледниковый щит за время порядка нескольких десятков тыс. лет исчезает за счет пластического растекания покрова под действием собственной силы тяжести. Делается вывод, что основные изменения объема ледникового покрова происходят из-за изменения бюджета массы в его краевой зоне, поэтому с достаточной степенью точности местоположение границы распространения ледниковых щитов определяется положением снеговой линии (где абляция равна аккумуляции).

В формировании климата основная роль материковых льдов заключается в изменении термического режима атмосферы через изме-

нение альbedo поверхности. Возникновение континентального льда могло быть вызвано разрастанием горных ледников. Зарождаясь в горных районах, ледники спускались в долины. За счет увеличения альbedo поверхности понижалась ее температура. При благоприятных условиях, т.е. при наличии достаточного количества "строительного материала", происходил рост покровов уже на равнине.

В третьей главе описываются результаты численного исследования, выполненного с помощью усовершенствованной зональной модели атмосферы. Исследовался отклик атмосферы на вариацию условий как на верхней, так и на нижней границе атмосферы и на изменение некоторых параметров атмосферной модели.

В § 3.1 описаны изменения, которые были введены в зональную модель атмосферы Вербицкого и Чаликова. Основные отличия усовершенствованной модели от предыдущей заключаются в параметризации турбулентных потоков тепла и влаги. Поскольку основным поставщиком влаги, аккумулирующейся в материковых льдах, является океан, то вопрос параметризации испарения является весьма важным для правильного описания возникновения и распада континентальных ледниковых покровов. Над океаном принимается параметризация турбулентных притоков тепла и влаги, учитывающая положение субполярного фронта (пропорционально градиенту поверхностной температуры океана). Над континентами при вычислении этих потоков учитывается распространение границы ледниковых покровов.

В § 3.2 приводятся результаты численного исследования изменчивости режима атмосферы на изменение таких параметров модели как альbedo атмосферы, ее непрозрачности, инсоляции на верхней границе атмосферы, наличия океана на планете. Эти экспери-

менты подтвердили наблюдаемый из палеогеографических данных факт, что при похолодании наибольшие изменения температуры имеют место в умеренных и высоких широтах. Потепление, вызываемое увеличением притока солнечной радиации, сильнее проявляется в низких и умеренных широтах. Наиболее сильное похолодание происходит при отсутствии океана. В этом случае атмосфера становится холоднее и суше, увеличивается меридиональный перенос тепла в атмосфере. Последний результат согласуется с результатами численного моделирования, полученными с помощью полной модели климатической системы (Манабе, Брайн, 1972).

Четвертая глава посвящена описанию результатов численных экспериментов по взаимодействию атмосферы и криосферы, полученных с помощью усовершенствованной зональной модели атмосферы, при фиксированной температуре поверхности океана, соответствующей различным ледниковым эпохам, и с помощью малопараметрической модели системы океан-атмосфера-льды.

В § 4.1 приводятся результаты имитации в модели распространения границы ледникового льда при фиксированной температуре поверхности океана, значение которой в одном случае соответствовало вюрму (18000 лет назад), максимальному похолоданию, а в другом - более теплой, чем современная, эпохе. При понижении температуры поверхности океана происходит распространение границы континентальных ледниковых покровов в низкие широты (максимальное распространение которых соответствует вюрму), но только до тех пор, пока граница морского льда (ГМЛ) не опустится до максимально возможного южного положения (при максимальном похолодании), определяемого параметрами модели. Тогда аккумуляция в ледниковом щите резко уменьшается за счет блокирования морским льдом испарения с поверхности

океана в высоких широтах вплоть до широты ледниковой зоны и вследствие перестройки циркуляции вод, которая неявно учитывается изменением положения максимального градиента температуры поверхности океана. Происходит усиление континентальности климата, ведущее к деградации ледниковых щитов. Время разрушения покрова соответствует времени реакции океана на климатические изменения. После терминации ледниковых покровов наступает межледниковье. Образуются условия для повторения описанного выше цикла. Внешние возмущения (теория Миланковича выдвигает в качестве таких внешних факторов колебания инсоляции из-за астрономических возмущений орбитальных параметров Земли), накладываемые на собственные колебания системы, создают неравномерность по продолжительности и степени суровости ледниковых эпох.

В § 4.2 описывается малопараметрическая модель климатической системы океан-атмосфера-льды, состоящей из 2-х компонент - средней температуры поверхности океана -  $\Theta$  и доли океана, покрытого льдом -  $y$ . Исходя из современной геометрии северного полушария Земли, рассматривается область океана в умеренных и высоких широтах. С юга эта область ограничена широтой, до которой происходит максимальное поджатие антициклональной ячейки круговорота во время максимального оледенения. Из сохранения баланса тепла и при линеаризации уравнения радиационного баланса в атмосфере и бюджета тепла на поверхности океана относительно современного состояния выводится уравнение для нормированного на некоторый масштаб отклонения средней по всей области поверхностной температуры от ее современного значения:

$$\dot{x} = (1-y)(Ax^2 - Bx + D(y_0 - y)) + \alpha x + G.$$

При выводе уравнения для  $y$ , считается, что положение границы морского льда линейно связано с радиусом распространения ледникового щита. Изменение положения границы ледникового щита при изменении средней температуры поверхности от ее современного значения ищется из уравнения бюджета массы в ледниковом покрове:

$$\dot{y} = (F(1-mx) - My)x + N.$$

В этих уравнениях  $A$  и  $B$  описывают эффекты длинноволнового излучения,  $D$  - эффект изменения притока коротковолновой радиации за счет изменения альbedo поверхности,  $\alpha$  - параметрирует меридиональный перенос тепла океаном,  $G$  и  $N$  - описывают эффект современного наступления ледниковых покровов,  $F$  и  $M$  - аппроксимируют изменчивость скорости роста ледниковых щитов.

При исследовании данной системы уравнений находятся основные бифуркационные параметры, которыми оказываются отношение интегрального меридионального потока тепла, переносимого океаном к суммарной длинноволновой радиации, излучаемой атмосферой над рассматриваемым районом во внешнее пространство  $\frac{\alpha}{B}$  и отношение  $\frac{F}{M}$ .

В § 4.3 приводятся результаты экспериментов, полученных с помощью сосредоточенной климатической модели. Для параметров, характеризующих северное полушарие, получен автоколебательный режим в климатической системе с периодом около 40 тыс. лет. Исследуются свойства этой системы при наличии в ней вынуждающей силы и ее отклик на вариацию параметров этой модели. Обнаружен параметрический резонанс на частотах, соответствующих астрономическим возмущениям - наклонению оси вращения Земли к плоскости эклиптики и эксцентриситету. Обнаружено также, что возмущения

орбитальных параметров Земли удлиняют период автоколебаний климатической системы.

В § 4.4 исследуются свойства климатической системы при наложении на нее стохастического возмущения, имитирующего межвековую изменчивость. Эксперименты с вариацией параметров при наличии в системе шума существенно уменьшили число основных параметров, сильно влияющих на динамику, по сравнению с экспериментами без шума. Вместо затухающих колебаний, наблюдаемых при вариации большинства параметров модели в системе без шума, в данных экспериментах устанавливается колебательный режим с периодическим изменением во времени амплитуды колебания (бие-ния). Наиболее сильная изменчивость наблюдается при увеличении или уменьшении (до 30%) отношения  $\frac{\alpha}{B}$  или  $\frac{\tau}{M}$ . Колебаний в данном случае не возникает. Следовательно, если свойства компонент климатической системы ОАЛ (например, содержание в атмосфере) не изменяются, то вариации параметров модели при наличии в климатической системе шума не переводит систему ОАЛ в аperiodический режим, т.е. невозможно существование Земли полностью свободной от льда или полностью покрытой им при современном расположении континентов. Стохастический шум обуславливает существование колебаний с периодами от 10 до 60 тыс. лет, т.е. влияет на спектр колебаний.

В § 4.5 исследуется переход климатической системы из аperiodического режима в периодический (имитируется переход от плиоцена к плейстоцену). В начале эксперимента полагалось, что океан был теплее современного состояния на  $10^{\circ}\text{C}$ . Все остальные параметры соответствовали современному состоянию. Системе с такими начальными условиями была предоставлена возможность свободно эволюционировать. Через время порядка миллиона лет в

системе самовозбудились колебания с периодом колебаний от 10 до 100 тыс. лет. Спектральный анализ полученных колебаний климата за время, соответствующего последним 500 тыс. лет дал пики, соответствующие наблюдаемым, с максимумом на периоде около 100 тыс. лет (Hays, Imbrie, Shackleton, 1976). Однако, спектр, построенный по более длительному временному ряду (1,5 млн. лет) имеет максимальный пик на периоде значительно меньшем, чем 100 тыс. лет. Наблюдаемый характер спектральной кривой обусловлен свойствами самой нелинейной климатической системы при наличии в ней стохастического шума. На величину этого шума (и, следовательно, на характер спектра колебаний) существенно влияет обостренность меридиональных градиентов, возникающих на фронтальных разделах воздушных и водных масс, которая в основном определяется зональным распределением солнечной радиации. Поэтому Хейс, Имбри и Шеклтон и обнаружили на палеоклиматических кривых 100 000, 41000 и 23000-летние климатические циклы, следующие за колебаниями эксцентриситета орбиты, в наклоне земной оси и в прецессии, которые влияют на широтное распределение инсоляции и, следовательно, на характер шума. Хотя, если бы используемый временной ряд палеогеографических данных был длинее, то результат исследования возможно был бы иным.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты, полученные в работе.

1. Климат Земли самым существенным образом зависит от крупномасштабной структуры океанской циркуляции океана в первую очередь от размеров антициклонального круговорота и зональности субполярного фронта. Циркуляция в Северной Атлантике в плейстоцене претерпевала существенные изменения. Согласно мо-

дели в ней осуществлялись два различных характерных типа океанской циркуляции: с вытянутой на север антициклонической ячейкой циркуляции, при которой увеличивается перенос тепла и влаги в высокие широты (характерной для океана с так называемой циркуляцией средиземноморского типа) и с субтропической ячейкой сильно сжатой в меридиональном направлении (океан эстуариевого типа). Оба этих состояния при определенных условиях оказываются неустойчивыми. Неустойчивость существования безледной Атлантики (при неизменном газовом составе атмосферы) обусловлена существованием суши в высоких широтах. Неустойчивость сильно зонального состояния определяется увеличением теплозапаса океаном в низких широтах, что в конечном счете приводит к переходу к циркуляции с увеличенным переносом тепла в высокие широты. Следствием данного вывода является то, что океан эстуариевого типа не может длительное время поддерживать рост ледниковых покровов.

2. Роль материковых льдов в формировании климата заключается в изменении термического режима атмосферы через изменение альбедо поверхности. Возникновение континентального льда могло быть вызвано разрастанием горных ледников. При дефиците питания покровов ледники могут самопроизвольно исчезать за счет пластического растекания льда под действием силы тяжести.

3. Разрушение континентальных покровов происходит из-за усиления континентальности климата. Отступление ГМД и материкового оледенения в высокие широты идут со скоростями одного порядка. Образованию материковых покровов в этот момент препятствует малая величина испарения с поверхности океана, обусловленная существованием холодной воды на его поверхности, образовавшейся в результате таяния континентального и морско-

го льда.

4. Согласно результатам, полученным с помощью малопараметрической модели ОАД, при определенных условиях в этой системе существует колебательный режим. Автоколебания обусловлены нелинейной обратной связью: образование ледниковых щитов при похолодании и их разрушение из-за усиления континентальности климата.

5. В системе ОАД может иметь место параметрический резонанс на периодах изменения астрономических внешних факторов. Происходит либо увеличение, либо деградация ледниковых покровов при изменении внешних условий. Система резонирует сильнее всего на периодах внешней силы 40 и 100 тыс. лет.

6. Периоды автоколебаний в модели варьируют от 10 до 150 тыс. лет. Преобладают колебания с периодом около 100 тыс. лет. При наличии внешних возмущений возникают колебания, периоды которых превышают периоды собственных колебаний модели.

7. В малопараметрической модели правильно воспроизводятся качественные особенности колебаний климата и оледенения. Так, например, вычисленные отклонения температуры земной поверхности от современного ее значения в сторону похолодания в 2-3 раза больше, чем в сторону потепления. Сам процесс терминации ледниковых покровов и сопутствующее этому потепление протекает намного быстрее, чем происходит распространение льдов и похолодание.

8. В результате моделирования установлен сдвиг фаз между изменениями средней поверхностной температуры Земли и границей распространения ледниковых щитов. Он соответствует эмпирическим данным о последнем оледенении: минимальная температура земной поверхности имела место не в момент максимального рас-

пространения континентальных льдов, а когда они уже начали сокращаться.

9. Численные эксперименты показали, что для правильного воспроизведения долгопериодных колебаний климата необходимо учитывать межвековую климатическую изменчивость, вызываемую неустойчивостью глобальных круговоротов в океане из-за смещения фронтов раздела в воздушной и водной средах. Именно эта изменчивость, порождающая "климатический шум", обуславливает существование различных по продолжительности ледниковых эпох.

10. Вариация параметров модели при существовании "климатического шума" для современного состояния ОАД не переводит эту систему в аperiodический режим. Это свидетельствует о невозможности существования не осцилляционного, аperiodического режима, если не будут нарушены свойства компонент климатической системы ОАД (например, изменение газового состава атмосферы, загрязнения океана и т.д.).

11. Вычисленные кривые перехода от сравнительно теплой эпохи (когда отсутствуют собственно материковые ледниковые покровы) к условиям плейстоцена показывают, что слабые колебания температуры сменяются более крупными. Такое изменение характера колебаний происходит несмотря на то, что внешние возмущения, обусловленные изменениями орбитальных параметров, действуют непрерывно. Этот эксперимент демонстрирует роль океанской циркуляции, ее межвековую изменчивость. Наблюдается понижение среднего уровня температуры при переходе к плейстоцену. Эти результаты хорошо согласуются с эмпирическими данными.

Таким образом, результаты моделирования не только дают ответ на вопрос о причине колебаний климата и оледенения Земли в холодные эпохи, но и объясняют отсутствие значительных ко-

лебаний в теплые эпохи. Отсутствие неустойчивости струйных течений на фронтах раздела воздушной и водной масс, которая в теплые эпохи была слабо выражена, способствует медленному остыванию океана. Поскольку период собственных колебаний системы ОАД очень велик, процесс образования континентальных покровов идет чрезвычайно медленно.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Бараш М.С., Еникеев В.Х., Оськина Н.С., Сеидов Д.Г., Степанов Вл.Н. Реконструкция палеоциркуляции Северной Атлантики методом численного моделирования по данным фораминиферового анализа. М., ИОАН СССР, Тезисы докл. 7 Всесоюзной школы по морской геологии, 1986, т.1, с.14-15.
2. Еникеев В.Х., Степанов Вл.Н. Моделирование климатической системы океан-атмосфера в период оледенений. М., "Наука", 1986, с.24-30.
3. Еникеев В.Х., Степанов Вл.Н. Моделирование четвертичной палеоциркуляции в Северной Атлантике. Л., Гидрометеоиздат, Тезисы докл. на III Всесоюзном съезде океанологов, секция геология, геофизика и геохимия океана. Осадочный слой, палео-океанология, 1987, с.94.
4. Личнов Е.Г., Степанов Вл.Н. Перенос пассивной примеси крупномасштабными течениями в Северной Атлантике. В сб.: "Проблемы современной океанологии", М., ИОАН СССР, 1987, с.31-34.
5. Сеидов Д.Г., Еникеев В.Х., Степанов Вл.Н. Моделирование межгодовой и сезонной изменчивости крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике. Л., Гидрометеоиздат, Тезисы докл. на III Всесоюзном съезде океанологов, Секция физика и химия океана. Климат, взаимодействие океана и атмосферы, космическая

океанология, 1987, с.210.

6. Сеидов Д.Г., Еникеев В.Х., Степанов Вл.Н., Черкасов А.В.

Циркуляция и осадкообразование в Северном Атлантическом океане в современную эпоху и 18000 лет назад. М., ИОАН СССР, Тезисы докл. 7 Всесоюзной школы по морской геологии, 1986, т.1, с.124-125.

7. Сеидов Д.Г., Еникеев В.Х., Степанов Вл.Н., Черкасов А.В.

Циркуляция и осадкообразование в Северной Атлантике в современную эпоху и 18000 лет назад. М., 1986, Рус., Деп. в ВИНТИ 03.09.86 № 6439-В-86.

8. Степанов Вл.Н. Моделирование современной циркуляции и вюрмской палеоциркуляции в северной части Атлантического и Тихого океанов. В сб.: "Проблемы современной океанологии", М., ИОАН СССР, 1987, с.34-37.

9. Степанов Вл.Н. К вопросу об изменчивости термического режима атмосферы в зависимости от граничных. М., 1988, Рус., Деп. в ВИНТИ 11.07.88 № 5549-В-88.

10. Степанов Вл.Н. Об одном возможном механизме эволюции континентального ледникового покрова. М., 1988, 15с., Рус. Деп. в ВИНТИ 15.06.88, № 4725-В-88.

11. Seidov D.G., Enikeev V.H., Stepanov V.N., Cherkasov A.V.

Modelling of the quaternary and modern circulation and sediment transport in the North Atlantic ocean, Ocean Modelling, 1986, № 70, pp. 14-17.