

Международная школа молодых ученых
«Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде:
CITES – 2003», Томск, 1-7 сентября 2003 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА

Лекция 1. Физика климатической системы

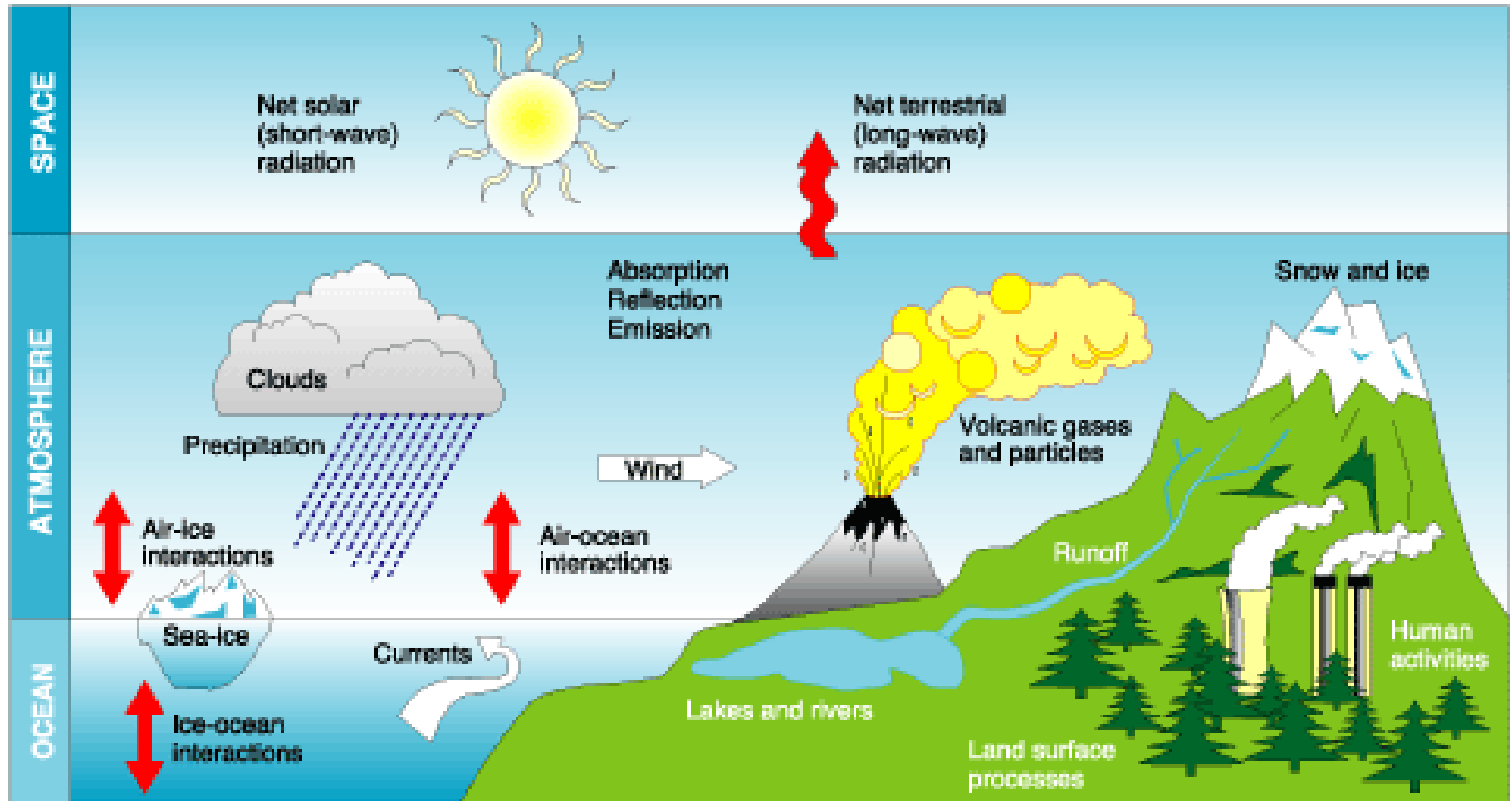
В.Н. ЛЫКОСОВ

Институт вычислительной математики РАН,
119991, Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 8
e-mail: lykossov@inm.ras.ru

Составляющие климатической системы

- Климатическую систему планеты Земля образуют следующие, взаимодействующие между собой, компоненты:
- 1. **атмосфера** - газовая оболочка Земли (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар, озон и т.д.), воздействующая на перенос к поверхности Земли солнечной радиации, поступающей на ее верхнюю границу;
- 2. **океан** - главный водный резервуар в системе, состоящий из соленых вод Мирового океана и прилегающих к нему морей, поглощающий основную часть поступающей на его поверхность солнечной радиации - мощный аккумулятор энергии;
- 3. **суша** - поверхность континентов с ее гидрологической системой (внутренние водоемы, болота и реки), почва (в том числе, с грунтовыми водами) и криолитозона ("вечная мерзлота");
- 4. **криосфера** - континентальные и морские льды, горные ледники и снежный покров;
- 5. **биота** – растительность на суше и океане, а также живые организмы в воздухе, море и на суше, включая человека.

The climate System(T. Slingo, 2002)



Особенности климатической системы как физического объекта

- Главные компоненты климатической системы - атмосфера и океан - представляют собой тонкие пленки с отношением вертикального масштаба к горизонтальному порядка 0.01-0.001.
- Систему можно считать квазидвумерной, однако, вертикальная стратификация по плотности очень важна.
- Характерные временные масштабы энергетически значимых физических процессов лежат в диапазоне от 1 часа до десятков и сотен лет.
- Лабораторное моделирование такой системы крайне затруднительно.
- С климатической системой нельзя поставить целенаправленный физический эксперимент.
- Например, ее нельзя “накачать” углекислым газом и, сохраняя прочие равные условия, измерить полученный эффект.
- В распоряжении исследователей имеются лишь короткие ряды данных наблюдений, да и то лишь об отдельных компонентах климатической системы.
- Главным (но не единственным) инструментом изучения климатической системы является **математическое** (численное) **моделирование** с помощью гидродинамических моделей.
- Основу этих моделей должны составлять глобальные модели общей циркуляции атмосферы и океана.

Состояния климатической системы

Климатическая система характеризуется конечным множеством параметров (компоненты скорости ветра и течений, температура и соленость, водяной пар, плотность, давление и др.), значения которых в фиксированный момент времени определяют ее **состояние**. Эта система - глобальна, поскольку ее состояния характеризуются пространственными неоднородностями с масштабами от планетарных (порядка 10000 км по горизонтали и порядка 10 - 100 км по вертикали) до размеров мельчайших турбулентных неоднородностей в атмосфере и океане, элементов растительности и структурных неоднородностей почвы.

Климат - ансамбль состояний климатической системы

- Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени, который с математической точки зрения удобно выбрать очень большим (в пределе бесконечным). В практических приложениях часто под климатом понимаются некоторые характеристики части траектории климатической системы, проходимой ею за определенный промежуток времени (~ 30 лет). В общем случае, под ансамблем понимается не только множество состояний, но и некоторая вероятностная мера, заданная на этом множестве и определяющая вероятность того, что система может находиться на некотором подмножестве данного множества (Дымников и Филатов, 1994).

Вынужденная климатическая изменчивость

- Вариации состояния климатической системы со строго определенными периодами:
- 1) **суточные колебания**, обусловленные суточными изменениями инсоляции вследствие вращения Земли,
- 2) **приливные колебания**, связанные с гравитационными воздействиями на вращающуюся Землю Луны и Солнца, 3) **сезонные колебания** и связанные с ними муссонные эффекты, вызываемые изменениями инсоляции при движении Земли вокруг Солнца.
- Сезонный и суточный циклы - наиболее яркое проявление вынужденной изменчивости климатической системы, обусловленной астрономическим фактором. Изменения в амплитуде и фазе отклика климатической системы на эти внешние воздействия - индикатор изменений климата.

Внутренняя климатическая изменчивость

- Характеризуется интенсивными нерегулярными колебаниями вследствие внутренних **нелинейных взаимодействий** параметров ее состояния и включает следующие составляющие:
- 1) **синоптические колебания** с масштабами ~ 1000 км и периодами в несколько суток — в атмосфере и с масштабами ~ 100 км и периодами в несколько недель — в океане,
- 2) **глобальные колебания** с периодами от недель до месяцев (двухнедельный цикл индекса зональной циркуляции атмосферы в средних широтах и 30-60-дневные колебания в тропиках),
- 3) **межгодовые колебания** максимальной интенсивности в диапазоне периодов 2-5 лет (квазидвухлетние вариации зонального течения в экваториальной атмосфере и явление Эль-Ниньо).

Региональный климат

- Множество типов разнообразных климатов, которые определенным, **региональным**, образом распределены по земной поверхности.
- Их классификация базируется на разделении существующих климатов по **температурному режиму** и степени **увлажнения**, на выделении **ландшафтно - географических** зон суши, на рассмотрении особенностей **общей циркуляции атмосферы** и других критериях.
- С экологической точки зрения удобно рассматривать региональные процессы **континентального** или **субконтинентального** масштабов, что позволяет учесть большой разброс в степени **уязвимости** различных популяций и видов природной среды, возникающих в результате ее локальных различий, экономических, социальных и политических условий и степени зависимости от ресурсов, чувствительных к климату.
- **Уязвимость** определяется как степень, до которой та или иная природная среда способна противостоять разрушительному воздействию изменений климата и является функцией **чувствительности** системы к изменениям в климате и ее способности адаптироваться к этим изменениям.

Опасные региональные последствия изменений климата

- В мире нет ни одного региона, где бы не происходили **природные бедствия**, приводящие к значительному экономическому ущербу.
- В период с 1965 по 1999 г.г. 39% от общего числа крупнейших **катастроф** случилось в Азии, 26% - в Южной и Северной Америке, по 13% - в Европе и Африке (Осипов, 2001).
- По данным МЧС России, за 10 лет (1990-99) было зарегистрировано 2877 событий, связанных с **опасными** природными явлениями, среди которых 28% пришлось на атмосферные процессы (ураганы, бури, шквалы, смерчи), 24% - на землетрясения и 19% - на наводнения.
- При этом, растет количество жертв, связанных с **наводнениями**, в то время как распределение по годам погибших от других видов катастроф не подчиняется каким-либо закономерностям.
- **Ущерб** от наводнений за последние 25 лет выше, чем за предыдущие 65 лет (Kunkel et al., 1999). В то же время, в период с 1967 г. по 1991 г. в результате **засух** погибло более 1 миллиона людей (Kogan, 1997). Жестокая засуха 1988 г. в США принесла ущерб в 40 млрд. долларов, что "лишь" в 2-3 раза меньше потерь от землетрясения 1989 г. в Сан-Франциско.

OF DROUGHT

A Commentary

BY KELLY T. REDMOND

This issue of *BAMS* contains several articles that emphasize how we describe the status of drought. Interest in this topic has risen because of a combination of natural and human factors. The Southwest-southern Great Plains drought of 1995–96 led to the establishment of the Western Drought Coordination Council (WDCC) and the Western Governors Association. The subsequent National Drought Policy Commission (NDPC) expanded on WDCC recommendations distilled from the western experience. Both groups emphasized climate monitoring as a necessity. In May 1999, drought in an area of tremendous climatic significance—Washington, D.C.—led to the establishment of the Drought Monitor. A small cadre of climatologists, originally in the West—the Climate Prediction Center, the National Climatic Data Center (NCDC), and the National Drought Mitigation Center—are involved in every step in this sequence, and participation has gradually grown since.

The Drought Monitor is both a product and an activity. An extended e-mail “conversation” takes place for about 2–3 days each week, and the results are assimilated into the “author of the week” into a consensus product in the form of a national map. During a typical week about 20 out of a total distribution of around 140 individuals participate, mostly from affected areas. The article by



AFFILIATION: REDMOND—Western Regional Climate Center, Desert Research Institute, Reno, Nevada

CORRESPONDING AUTHOR: Dr. Kelly T. Redmond, Western Regional Climate Center, Desert Research Institute, 2215 Raggio Parkway, Reno, NV 89512-1095

E-mail: krwrcc@dri.edu

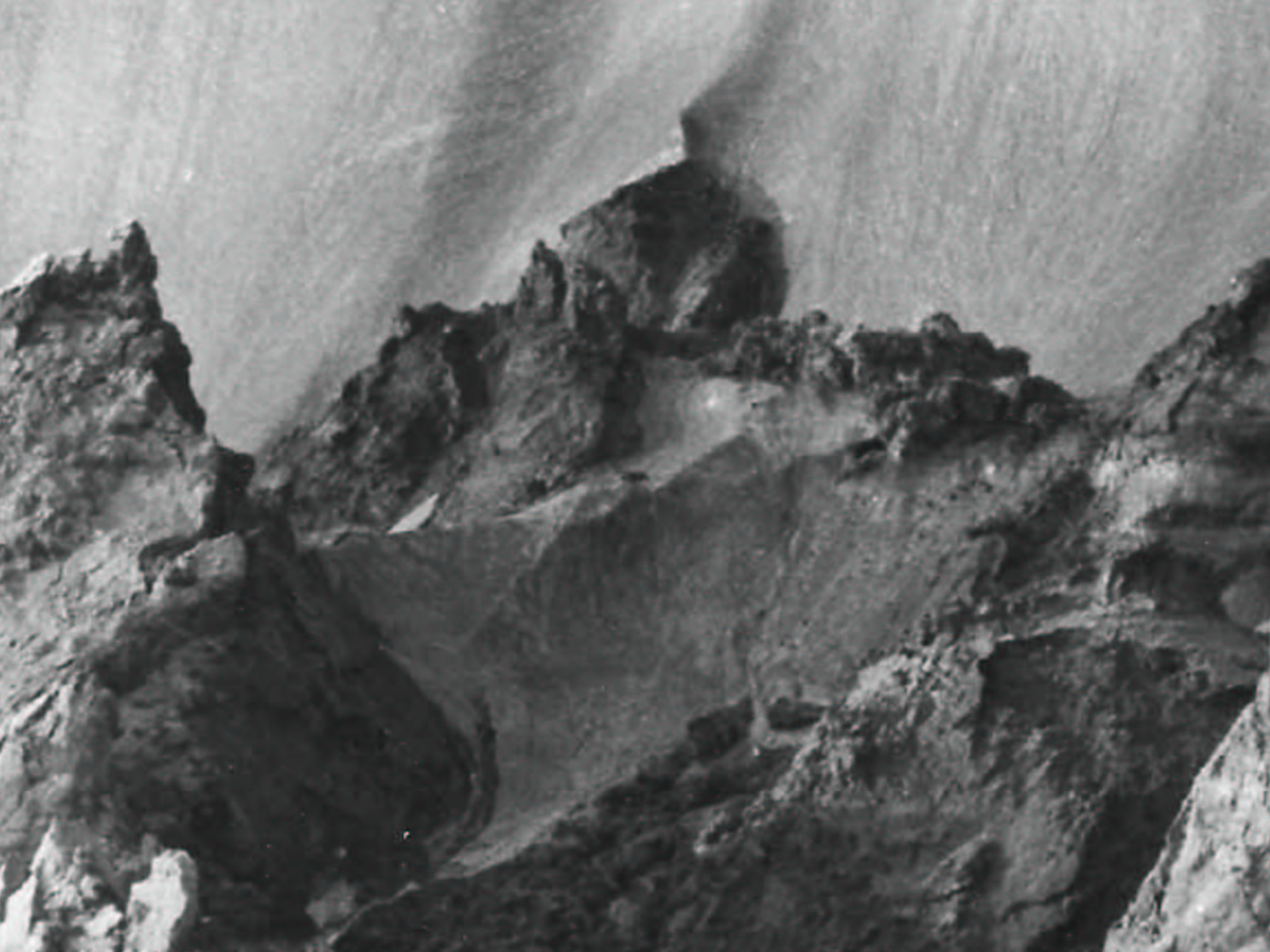


Антропогенные изменения климата

- Последствия климатических изменений, вызванных увеличением концентрации **парниковых газов** в атмосфере (углекислого газа, озона, метана и др.), уже сегодня сказываются на состоянии основных природных ресурсов (в первую очередь, биосферы), областей деятельности общества и здоровья людей.
- По разным оценкам за последние сто лет средняя температура на Земле **увеличилась** на 0,5-1 °C, а концентрация основного парникового газа - CO₂ **возросла** на 20-24 %, а метана на 100 %.
- Необходимо для конкретных регионов мира оценить:
- 1) степень воздействия глобальных изменений климата на **природную среду** (состояние подстилающей поверхности, естественные экосистемы, водные ресурсы и т.д.),
- 2) **общество** (сельскохозяйственное производство, уровень эпидемических заболеваний и т.п.),
- 3) возможности **минимизации ущерба** от неблагоприятных для человека изменений климата (защита и задача управления).

Опасные последствия антропогенной деятельности

- 1. Уничтожение **растительного покрова** приводит в "сухих" областях к их **опустыниванию**, разрушению **почвенного** покрова, усилению **пыльных бурь** и интенсивному выносу **почвенного аэрозоля** в атмосферу. Так например, в Индийском регионе глобальная эмиссия почвенной пыли составляет ≈ 1000 Мт/год, в то время как индустриальной пыли ≈ 40 Мт/год. Пыль не только воздействует на **радиационный баланс** атмосферы (Tegen & Funk, 1994), но и модифицирует процессы **турбулентного переноса** в пограничном слое (Barenblatt & Golitsyn, 1974; Wamser et al., 1993). В пустынях и полупустынях аэрозоль интенсивно поступает в атмосферу в сухую жаркую погоду также и в отсутствие среднего ветра (Голицын и др., 1999).
- 2. При массовых **лесных пожарах** резко усиливаются конвективные процессы, большое количество локальных пожаров сливаются в один гигантский пожар ("огненный шторм") и происходит интенсивное образование и выброс в атмосферу высокодисперсных частиц - на 1 т сожженного материала - до 75 г частиц (Израэль, 1984).
- 3. Изменения гидрологических условий на поверхности суши и в деятельном слое почвы (наводнения из-за ликвидации лесов, деградация **вечной мерзлоты**, засухи).



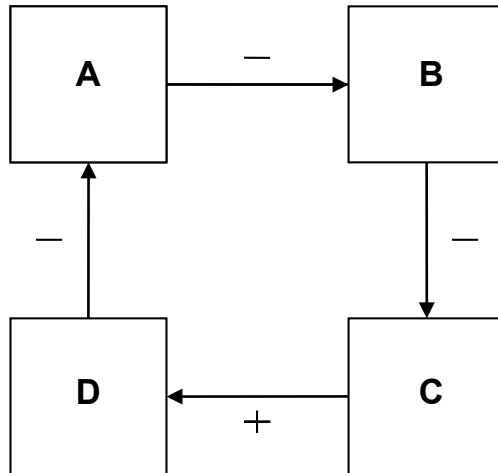
Обратные связи

- Процессы, протекающие в климатической системе, осуществляются в виде обратных связей между различными параметрами ее состояния. Механизмы обратной связи могут либо усиливать аномалии одного из взаимодействующих параметров (**положительная** обратная связь), либо ослаблять их (**отрицательная** обратная связь).

Пример положительной обратной связи: взаимодействие между снежным покровом и радиацией. Зимой снег на подстилающей поверхности отражает почти всю приходящую солнечную радиацию, что приводит к постоянному ее охлаждению. При таянии части снежного покрова альбедо уменьшается и усилившееся поглощение солнечной радиации земной поверхностью или водой способствует таянию снега.

Пример отрицательной обратной связи: облачность – радиация. Повышение температуры поверхности влажной суши приводит к росту содержания водяного пара и к увеличению облачности, которое уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности, и к понижению ее температуры. В этом случае имеется также некоторая положительная обратная связь, обусловленная поглощением облаками длинноволнового излучения Земли.

Граф обратных связей



- Если стрелка направлена от А к В и увеличение А приводит к росту В, то имеет место положительная обратная связь, отмеченная на рисунке знаком (+); если же рост характеристики А вызывает уменьшение В, то проявляется отрицательная обратная связь – знак (-); наконец, если изменения в А никак не влияют на В, то обратная связь отсутствует и отмечается знаком (0). Демонстрируемый цикл связей показывает, что реализуется процесс, в котором увеличение некоторой характеристики А вызывает уменьшение параметра В, что в свою очередь приводит к росту характеристики С. Это увеличение С затем обуславливает рост параметра D и в конечном счете к уменьшению величины А. Поскольку произведение $(-)(-)(+)(-) = (-)$, то рассмотренный пример описывает отрицательную обратную связь, заключающуюся в том, что начальное положительное возмущение в характеристике А вызывает последовательность событий, которые приводят к уменьшению этого возмущения).

Роль атмосферы в динамике океана

- **Крупномасштабные** движения в океане формируются под влиянием атмосферных процессов различных временных и пространственных масштабов.
- Альтернатива: отдельные явления, такие как
- 1) **приливные волны**, вызываемые силами притяжения небесных тел;
- 2) процессы **распреснения**, обусловленные втоком речной воды;
- 3) уединенные волны типа **цунами**, возникающие в результате действия источника на дне океана (вулканического или тектонического происхождения);
- 4) **вертикальные движения** под влиянием геотермальных потоков на дне океана.

Климатические режимы океана

- Две проблемы:
- формирование **квазистационарного** состояния океана (с характерным временным масштабом порядка **сотен лет**) и
- его сезонной и межгодовой **изменчивости**.
- Особенности квазистационарных (климатических) режимов океана связаны с процессами формирования его **главного термоклина, макроциркуляционных систем и меридионального теплообмена**.
- Внешние факторы, вызывающих течения в глубинах океана:
- 1) воздействие процессов в **экмановском слое трения**, формирующих вертикальные токи на его нижней границе, и
- 2) **термохалинное** взаимодействие, обусловленное двумя основными причинами: пространственным распределением **потоков тепла и соли** на поверхности и процессами **глубокой конвекции**, ответственными за образование холодных глубинных вод океана.

Главный термоклин

Рассмотрим взаимодействие процессов горизонтальной и вертикальной макротурбулентной диффузии в формировании термоклина, используя для этого следующее (стационарное) уравнение теплопроводности (Марчук, 1970):

$$\nu \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0,$$

где ν и μ — коэффициенты вертикального и горизонтального теплообмена, соответственно. Легко убедиться, что если приведенной толщиной термоклина H_n считать ту, на которой градиент температуры уменьшается в π раз, то

$$H_n = \frac{L}{n} \sqrt{\frac{\nu}{\mu}},$$

где L — характерный горизонтальный масштаб, а n — номер гармоники в Фурье — разложении по спектру оператора горизонтальной диффузии.

Принимая в качестве характерных значений $L = 10^7$ м, $\nu = 10^{-4}$ м²/с и $\mu = 5 \cdot 10^3$ м²/с, получим:

$$H_n \approx 10^4 / 7n,$$

то есть толщина термоклина составляет примерно 1.4 км, что хорошо согласуется с данными наблюдений для средних широт. Масштабный анализ нестационарного уравнения теплопроводности позволяет определить характерное время формирования термоклина

$$t_n = 1 / \mu \lambda_n,$$

где λ_n - собственное число, соответствующее n -й гармонике спектра оператора (Лапласа) горизонтальной диффузии. Поскольку

$$\lambda_n = (n\pi / L)^2,$$

то для t_n (в сек) получаем

$$t_n = 2 \cdot 10^9 / n^2$$

и, следовательно, для $n = 1$ время t_1 составляет примерно 60 лет. Таким образом, связывая пространственный масштаб явления L с характерным размером внешних термических неоднородностей, можно сделать вывод, что уменьшение

Глубинная конвекция

- Два типа такой конвекции:
- 1) охлаждение в шельфовой зоне (например, в районах Гренландии и Антарктиды) с опусканием плотной воды вдоль континентального склона,
- 2) конвекция в открытом океане.
- Шельфовая конвекция развивается в зимнее время за счет льдообразования и осолонения вод (обычно соленость льда на 30 % меньше солености морской воды). Формирование донных антарктических вод связывают также с осолонением в полыньях в зимнее время вблизи ледника (Gill, 1979).
- Глобальный апвеллинг (подъем холодных вод) в районе экватора приводит к подъему термоклина, а климатическое воздействие поля ветра проявляется в деформации полей температуры и плотности в районах антициклонических (в средних широтах обоих полушарий) и циклонических (в северном полушарии) макроциркуляций в Атлантическом и Тихом океанах.

Сезонная и межгодовая изменчивость

- Определяющее значение имеет правильное воспроизведение волнового характера движений. Наиболее отчетливо сезонный ход проявляется в Индийском океане (ветровое воздействие, связанное с зимней и летней муссонными циркуляциями). Самая значительная межгодовая изменчивость - в средних широтах Северной Атлантики (колебания Гольфстрима) и в экваториальной части Тихого океана (явление Эль-Ниньо).
- Сезонная изменчивость прослеживается по данным измерений основных гидрологических характеристик: поверхностной температуры, глубины залегания сезонного термоклина, скоростей и, соответственно, расходов основных течений, солёности в верхнем слое океана.
- Сезонный ход температуры обычно распространяется до глубин 200-300 м – нижней границы сезонного термоклина.
- Сезонные колебания течений связаны, в основном, с динамическим атмосферным воздействием на поверхности океана: во внеэкваториальных широтах напряжение трения ветра максимально зимой и минимально летом.

Роль океана в климате атмосферы

- Океан - практически неограниченный источник водяного пара, вместе с образующейся из него облачностью регулирует радиационные потоки и притоки тепла.
- Скрытое тепло конденсации (особенно в низких широтах) также представляет собой один из основных источников формирования общей циркуляции атмосферы.
- Большая термическая инерция океана существенно уменьшает амплитуду годового хода температуры атмосферы (Монин и Шишков, 1979) и климат атмосферы при наличии океанов становится более мягким.
- Географическое распределение океанов и континентов (особенно в северном полушарии) определяет географию региональных климатов.
- Термическая неоднородность поверхности океана и суши в сочетании с орографией порождает зимой квазистационарные волны с центрами действия (Блинова, 1943, Smagorinsky, 1953), а летом – циркуляцию муссонного типа.

Энергоактивные зоны океана

- Океан определяет географию источников нагревания атмосферы: в низких широтах поток тепла зависит в основном от поглощенной океаном прямой солнечной радиации, а в средних широтах – от характеристик сухого (и зимой холодного) континентального воздуха.
- В средних широтах северного полушария зимой максимум источников нагревания формируется вдоль восточных берегов континентов (сухой холодный континентальный воздух выходит на теплый океан, определяя потоки скрытого и явного тепла в атмосфере).
- В связи с этим можно выделить климатические энергоактивные зоны Мирового океана как зоны, где наблюдается в среднем максимальная отдача тепла океаном в атмосферу. В средних широтах северного полушария эти зоны связаны с теплыми океанскими течениями – Гольфстримом в Северной Атлантике и Кuroсио в северной части Тихого океана (Будыко, 1956).

Аномалии температуры поверхности океана

- Основной фактор, определяющий короткопериодные (до нескольких лет) флуктуации климата.
- Поскольку межгодовая изменчивость поверхностной температуры в низких широтах Тихого океана превышает амплитуду ее нормального годового хода, а в Атлантическом океане – наоборот (что является следствием различных размеров этих океанов в тропических широтах), то наиболее интенсивные исследования отклика атмосферы на аномалии ТПО проводились именно для Тихого океана.
- Самый яркий пример крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в низких широтах - явление Эль-Ниньо (выход теплых вод у берегов Перу) и Южное колебание (с периодами 3-7 лет), в качестве индекса которого традиционно принимается разность приземного давления между метеостанциями, расположенными в Дарвине (Австралия) и на Таити.
- Установлено (Bjerknes, 1969), что явление Эль-Ниньо и Южное колебание сильно коррелируют между собой: существует статистически значимая связь между эволюцией Эль-Ниньо и динамикой атмосферных процессов в экваториальной области Тихого океана.
- Теплая аномалия ТПО экваториальной части Тихого океана приводит к возникновению влажной конвекции и конвергенции в нижней части атмосферы.
- Это вызывает ослабление пассатных ветров.
- Поскольку пассаты генерируют интенсивный апвеллинг холодной воды, то их ослабление является причиной ослабления также апвеллинга.
- Редуцированное поступление холодной воды к поверхности поддерживает положительную обратную связь с первоначальной теплой аномалией ТПО, усиливая ее.
- Эта аномалия распространяется в западном направлении – от берегов Южной Америки в центр экваториальной области Тихого океана.

Экваториальная часть Мирового океана - область, где аномалии поверхностной температуры воздействуют на первичную атмосферную циркуляцию через аномалии источников нагрева. Отклик атмосферы реализуется (в предположении малости возмущений) в основном двумя физическими механизмами – волновым процессом и простым адвективным переносом.

Публикация (Hoskins & Karoly, 1981): рассматривается стационарная баротропная задача для функции тока ψ , линеаризованная относительно некоторого климатического состояния и записанная в ортогональной системе координат:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0,$$

где

$$\beta = \frac{2\Omega}{a} \cos^2 \varphi - \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial}{\partial y} (\cos^2 \varphi u),$$

$$x = a\lambda, \quad y = a \ln[(1 + \sin \varphi) / \cos \varphi].$$

Здесь a и Ω – радиус и угловая скорость вращения Земли, λ и φ - широта и долгота, $\bar{u}$ - средняя скорость зонального потока.

Отыскивая волновые решения ($\psi = e^{i(kx+ly+\omega t)}$) и ограничиваясь случаем стационарных волн ($\omega = 0$), можно получить следующее уравнение для луча:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v_{gr}}{u_{gr}} = \frac{l}{k},$$

где u_{gr}, v_{gr} - компоненты групповой скорости, абсолютная величина которой определяется по формуле

$$c_g = \frac{2k\bar{u}}{k^2 - l^2 + l^2}$$

Для случая движения с постоянной угловой скоростью (типа вращения твердого тела), при котором $\bar{u} = a\Omega_0$, будем иметь

$$\beta = \frac{2\cos^2\varphi}{a}(\Omega + \Omega_0),$$

$$k_s = \frac{\cos\varphi}{\varepsilon a}, \quad \varepsilon^2 = \frac{\Omega_0}{2(\Omega + \Omega_0)}, \quad \frac{dy}{dx} = \left(\frac{k_s^2}{k^2 - 1} \right)^{1/2}.$$

Поскольку

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \cos\varphi \frac{dy}{dx},$$

то решение приведенного выше уравнения луча имеет вид

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}\alpha \sin(\lambda - \lambda_0),$$

где $\cos\alpha = \varepsilon ak$. Эта формула является уравнением, описывающим окружность, проходящую через точку на экваторе с координатами $\lambda = \lambda_0, \varphi = 0$. Иными словами, в этом простом случае энергия от источника распространяется вдоль дуги большого круга с групповой скоростью

$$c_{gr} = \frac{2k\varepsilon a^2\Omega_0}{\cos\varphi}.$$

При реальных распределениях зонально-осредненного $\bar{u}$ также получается аналогичный результат, который подтверждается также статистическими эмпирическими исследованиями синхронных корреляционных связей monthly осредненных метеорологических полей для различных точек земного шара (Wallace & Gutzler, 1981).

Отклик атмосферы на аномалии ТПО

- Основные выводы:
- 1) отдаленный отклик на аномалии нагревания в низких широтах возникает, если эта аномалия (или хотя бы ее часть) расположена в слабом западном потоке,
- 2) наиболее сильный отклик имеет место зимой при аномалии, расположенной в субтропиках,
- 3) возмущение от источника распространяется вдоль луча со скоростью, равной групповой скорости волн Россби, т.е. в северо-восточном направлении,
- 4) возмущения имеют бароторопный характер даже для бароклинной атмосферы, если источник занимает всю толщу тропосферы,
- 5) в противном случае существует зависимость от вертикального расположения источника,
- 6) отклик атмосферы на аномалии источников нагревания имеет ярко выраженный сезонный характер,
- 7) для средних широт зимой присущ сильный отклик по отношению к тропическим аномалиям и слабый отклик по отношению к локальному нагреванию,
- 8) внетропические области летнего полушария чувствительны к локальному нагреванию, но практически не реагируют на экваториальные источники.

АДВЕКТИВНЫЙ ОТКЛИК И СОПРЯЖЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Исследование адвективного механизма в формировании отклика атмосферы может быть проведено на основе линеаризованного относительно климатического состояния уравнения притока тепла с использованием методологии сопряженных уравнений (Marchuk, 1975). Пусть линеаризованное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \theta'}{\partial z} = \varepsilon',$$

где $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ - климатические составляющие вектора скорости, удовлетворяющие уравнению неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0,$$

а θ' и ε' - возмущение потенциальной температуры и аномалия источников нагревания, соответственно. Пусть $(x, y, z) \in G$, а $t \in [0, T]$. Примем в качестве краевых условий либо условия периодичности, либо обращение нормальной компоненты вектора скорости на границе области G в нуль, а в качестве начального условия

$$\theta' = 0 \quad \text{при } t = 0.$$

Сопряженная задача:

$$-\left(\frac{\partial \theta^*}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \theta^*}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \theta^*}{\partial z}\right) = f$$

с теми же краевыми условиями и с начальным условием $\theta^* = 0$ при $t = T$. Умножим уравнение для аномалии температуры скалярно в G на θ^* , а уравнение для сопряженной функции θ^* на θ' и найдем разность полученных выражений. В результате будем иметь уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta', \theta^*) = (\varepsilon', \theta^*) - (f, \theta'),$$

проинтегрировав которое от 0 до T с учетом начальных условий для θ' и θ^* получим следующее соотношение:

$$\int_0^T (\theta', f) dt = \int_0^T (\varepsilon', \theta^*) dt.$$

Если f выбрать в виде $f = 1/\tau$ при $t \in [0, \tau]$, $x, y, z \in D$ и $f = 0$ в противном случае, то вышеприведенное соотношение примет вид

$$\overline{\overline{\theta'}} = \int_0^T (\varepsilon', \theta^*) dt,$$

где двойная черта сверху есть знак осреднения по области D и за период времени $[0, \tau]$.

Процессы на поверхности суши и климат

- В средних и высоких широтах термодинамическое влияние почвы сравнимо с тем, что проявляет океан.
- Океан аккумулирует солнечную энергию летом и отдает накопленное тепло атмосфере зимой.
- Почва накапливает осадки зимой с тем, чтобы снабжать атмосферу влагой летом и охлаждать ее (Schär et al., 1999) - эффект долговременной памяти с масштабом в несколько месяцев.
- Увеличение эвапотранспирации прямым или косвенным образом усиливает осадки (на масштабах в несколько сотен километров).
- Сильный отклик в осадках на вариации в эвапотранспирации как на глобальном, так и на региональном масштабах (Shukla & Mintz, 1982).
- Роль аномалий влажности почвы в формировании засух и наводнений (Giorgi et al., 1996): максимальный отклик достигался в летних конвективных условиях при слабой синоптической активности.
- Анализ данных наблюдений о межгодовой изменчивости влажности почвы и осадков показывает их региональную связь.

Специфика вечной мерзлоты

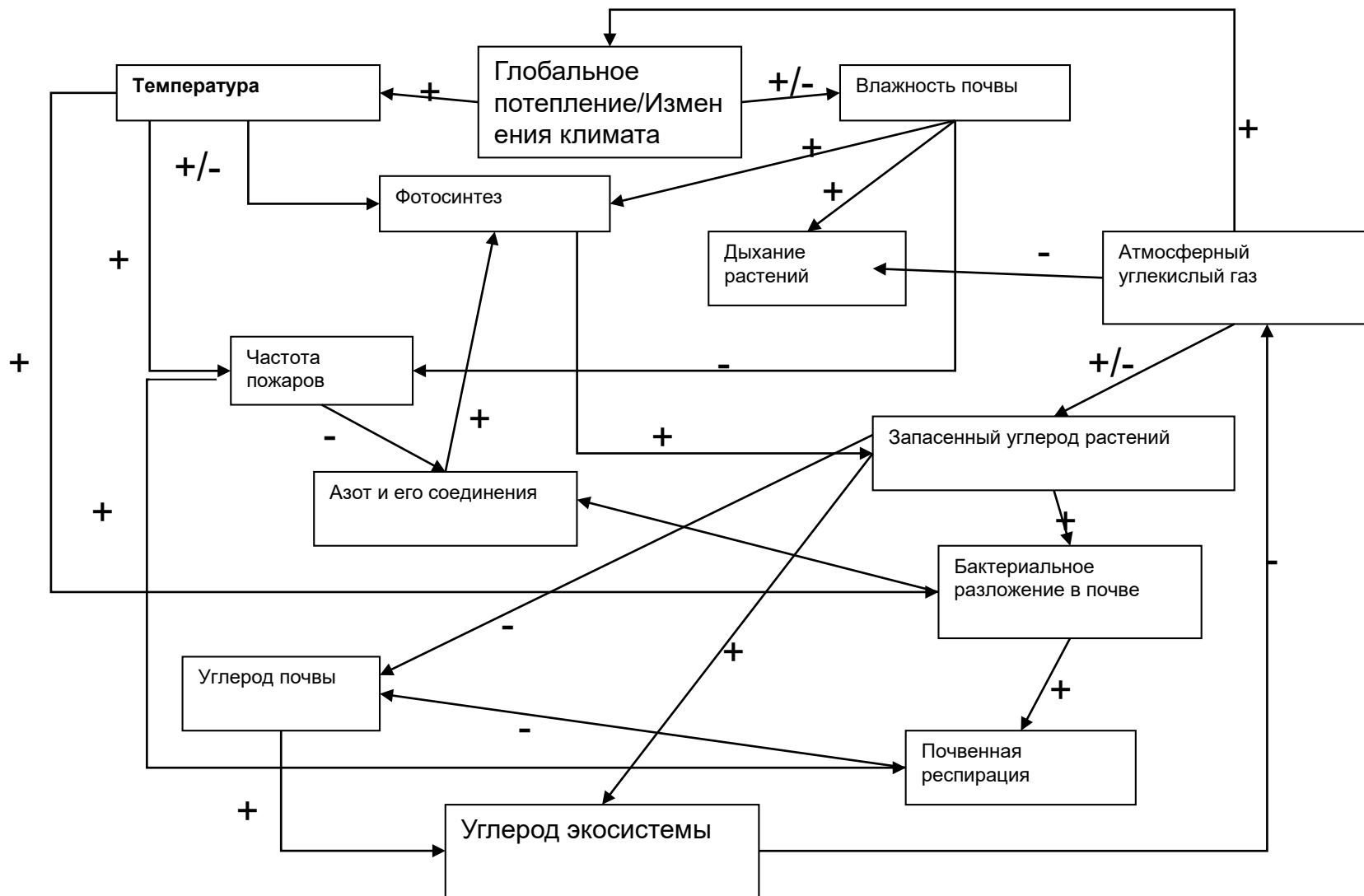
- Вечная мерзлота определяется как подповерхностный слой суши, температура которого остается ниже 0 °C в течение двух последовательных лет и дольше.
- Она образуется в результате весьма тонких процессов, которые зависят от баланса тепла поверхности Земли, геотермального потока тепла, содержания воды в почве и термических свойств почвы.
- Отсутствует тесная взаимосвязь между вечной мерзлотой и средними климатическими показателями (Унтерштейнер, 1987).
- Наиболее важная связь между вечной мерзлотой и климатом состоит в том, что вечная мерзлота препятствует подпитыванию и движению подземных вод, сдерживает развитие растительности и увеличивает поверхностный сток.
- Енисей и Лена протекают, в основном, по сплошной и пятнистой мерзлоте и большая амплитуда их стока может быть объяснена невозможностью его ослабления за счет "сброса" в грунтовые воды.
- В результате, мощные потоки пресной воды втекают в Карское море и море Лаптевых, определяя их термодинамический режим, процессы формирования льда и региональный климат.
- В районах вечной мерзлоты обмен массой между атмосферой и сушей в холодный период года пренебрежимо мал.
- Летом же потоки водяного пара и других газов (в основном, метана и углекислого газа) формируются за счет относительно неглубокого приповерхностного слоя сезонного оттаивания - активного слоя.

Антропогенные воздействия

- Общеизвестно, что потепление климата вследствие повышения концентрации парниковых газов в атмосфере наиболее ярко выражено в полярных областях Северного полушария.
- Это потепление может привести к увеличению глубины сезонного протаивания, прямо воздействуя на химические и биологические процессы в Арктической тундре.
- Наибольшие концентрации и амплитуды сезонных вариаций CO_2 и CH_4 наблюдаются на 600-700 с.ш. (Семилетов, 1996).
- Большая часть территории России находится в зоне вечной мерзлоты, оттаивание которой при нарастающем воздействии антропогенных факторов может вызвать серьезные последствия: расконсервация менее 0,1% количества органического углерода, захороненного в верхнем 100-метровом слое мерзлоты (примерно 10000 Гт углерода в форме CH_4) может привести к удвоению содержания атмосферного метана, радиационная активность которого примерно в 20 раз выше, чем у CO_2 .
- Это может привести к еще большему потеплению, а значит, и к ускорению таяния мерзлоты (реализуется механизм положительной обратной связи, способный многократно усилить глобальное потепление).
- В результате, значительным может оказаться ущерб от повреждений социальной инфраструктуры (дороги, здания, линии электропередач, газо- и нефтепроводы и т.д.).

Биосфера и климат

- Процессы эвапотранспирации, зависимость шероховатости шероховатости и альbedo подстилающей поверхности от типов растительности, фотосинтез и газовый обмен между атмосферой и растениями – все это влияет на долгопериодные изменения климата атмосферы.
- В свою очередь, динамика и глобальное распределение растительности в определяющей степени зависит от характеристик климата.
- Экстремальные погодно-климатические явления (засухи, наводнения, ураганы и тайфуны, лесные пожары и т.д.) являются основными источниками экосистемных возмущений, проявляющихся в изменении как структуры экосистемы (компоненты растительности и плотность их расположения), так и ее функциональных атрибутов (Parmesan et al., 2000).
- Экосистемы суши содержат в 3-4 раза больше углерода (в виде запасенного в почве и растительности органического вещества), чем общее содержание атмосферного CO₂, причем примерно 12 % этого содержания участвует в обмене с экосистемами через биологические процессы фотосинтеза и дыхания (Lashof et al., 1997).
- При рассмотрении изменений климата на временных масштабах 100 лет и более экосистемы нельзя считать статичными. Необходимо исследовать как характеристики их отклика на внешнее воздействие, так и механизмы обратных связей.



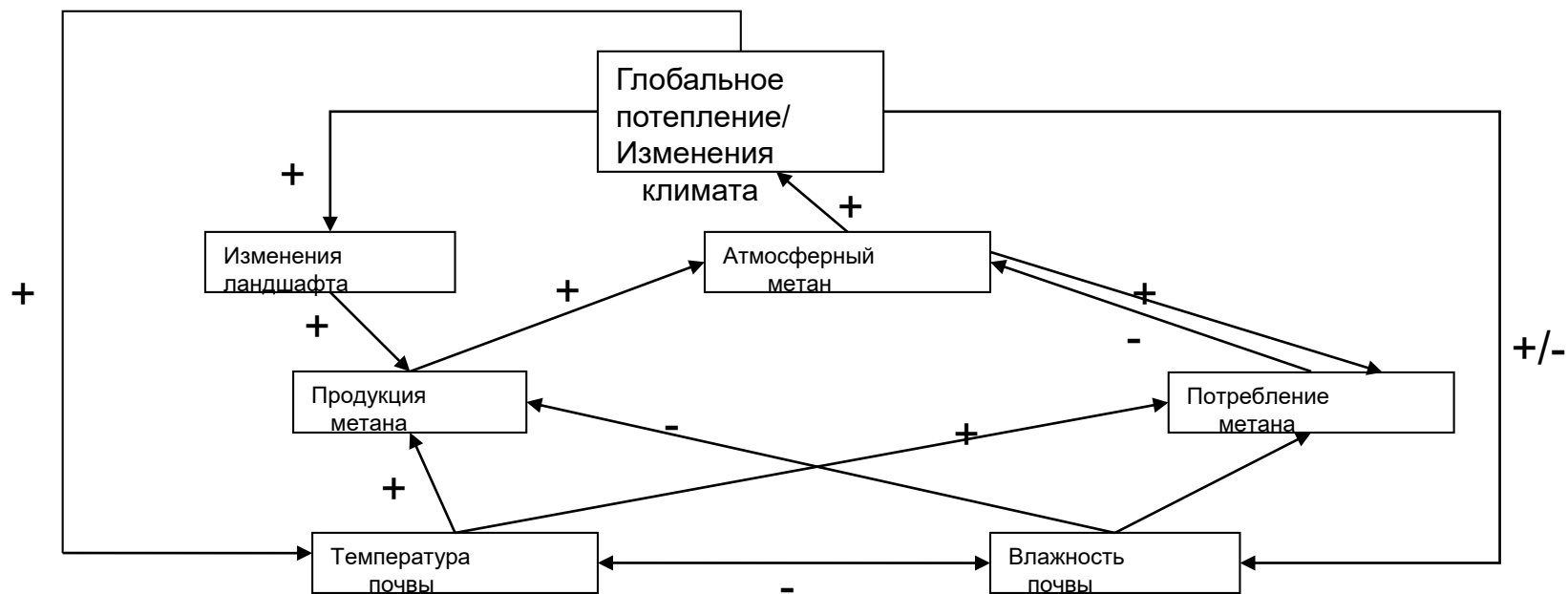
Климатические углеродные связи в экосистеме
(по Lashof et al., 1997)

Лесные пожары

- Лесной пожар представляет собой стихийное аэротермохимическое явление, в рамках которого происходят процессы испарения свободной и связанной в органическом веществе воды, пиролиза и горения лесных горючих материалов, а также переноса энергии и веществ из зоны пожара (Гришин, 1981).
- На протяжении тысячелетий представляли собой естественные возмущения в глобальной эволюции бореальных лесов.
- В состав леса входят, как правило, разные группы и виды лесных растений (деревья, кустарники, трава, мох, лишайники и т.п.) и последствия пожаров заключаются прежде в том, что восстановление растительности начинается с характеризующихся высокой продуктивностью представителей.
- Существенное снижение запасов углерода в биомах может быть следствием изменений в возрастной и типовой структуре лесов вследствие увеличения частоты пожаров и запаздывания восстановитель-ных процессов (Kurz et al., 1995).
- Результаты моделей общей циркуляции (Stocks et al., 1998) показали, что в Канаде и России при глобальном потеплении за счет удвоения концентрации CO₂ период пожаров наступает раньше и значительно расширяется пожароопасная территория (особенно в июне и июле).

Метан и метанозависимые обратные связи

- Метан - второй по значимости (после CO₂) парниковый газ.
- Его эмиссия обусловлена, в основном, биологическими источниками: анаэробное разложение органического вещества в болотах, рисовых полях и т.п. отвечает за 40 % поступления метана в атмосферу (Prather et al., 1995).
- В северных широтах основной круглогодичный региональный источник поступления CH₄ в атмосферу - подозерные талики, где в анаэробных условиях происходит процесс разложения ранее законсервированного органического вещества (Семилетов, 1996).
- Температура и влажность почвы являются ключевыми параметрами, контролирующими продукцию и поступление метана в атмосферу.
- При температурах ниже 10 °C производство метана практически отсутствует, а влажность почвы лимитирует диффузию кислорода и метана в почвенных порах (Bubier et al., 1995).
- С глобальным потеплением связана положительная обратная связь, поскольку производство метана растет быстрее, чем его потребление.
- Суммарный же эффект будет зависеть от поверхностной гидрологии, поскольку обусловленный нагреванием рост продукции метана может не привести к увеличению его эмиссии, если произойдет понижение грунтовых вод и окисление метана (Lashof et al., 1997).



Метанозависимые обратные связи (по Lashof et al., 1997)

Эмиссия метана сильно зависит от растительного покрова и топографических особенностей.

На перенос метана из анаэробных слоев в атмосферу оказывают влияние гидрологические процессы.

Весьма вероятно, что деградация вечной мерзлоты может более чем вдвое увеличить эмиссию метана из расположенных в высоких широтах болот, которая может составить от 5 до 65 Мт CH₄ в год (Hogan, 1993).