**Глобальное потепление и Арктика**

Одно из наиболее значимых воздействий на биосферу и ее подсистемы, связанных с антропогенной активностью, - глобальное потепление. Оно проявляется в изменении климата и биоты: продукционного процесса в экосистемах, сдвиге границ растительных формаций, изменении урожайности сельскохозяйственных культур. Особое значение эти воздействия имеют для высоких и средних широт Cеверного полушария. Эти регионы оказываются одними из главных источников и одновременно объектов подобных воздействий. Здесь глобальное потепление проявится особенно сильно: по расчетам, температура атмосферы наиболее значительно повысится именно в высоких и средних широтах. Кроме того, природа высоких широт особенно восприимчива к различным воздействиям и крайне медленно восстанавливается. С другой стороны, процессы в Арктике могут оказать заметное влияние на глобальные изменения. Это, например, динамика и оптические свойства снега и льда, участие вечной мерзлоты в биогеохимических циклах и т. д. Оценка роли Арктики в формировании глобальных изменений должна учитывать взаимодействия следующих факторов: биота и глобальный цикл диоксида углерода, гидрологический режим, вечная мерзлота, снежный покров и ледники, прибрежные процессы, циркуляция океана и структура донных вод, динамика, тепловой баланс и состав атмосферы, солнечные и геомагнитные воздействия. Все это свидетельствует о важности математического моделирования климата и крупномасштабных процессов в экосистемах высоких и средних широт Северного полушария. Мы попытаемся рассказать о моделировании природных процессов, основанном на разработке и модификации системы различных математических моделей.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

В последние десятилетия созданы различные модели, с помощью которых можно оценить влияние на климат изменений состава атмосферы. Это способствовало пониманию механизмов предстоящих изменений климата. Для расчетов в таких моделях необходимо вычислять перенос солнечного и теплового (длинноволнового) излучения в атмосфере при различных соотношениях ее компонентов.

Наряду с этим требуется описать обмен энергией между радиационно-активной турбулентной атмосферой и неоднородными поверхностями суши, океана и криосферы. Система взаимодействующих элементов очень сложна, и до сих пор не существует моделей, которые могли бы полностью учесть всю совокупность естественных процессов переноса в атмосфере и у поверхности Земли. Существуют относительно простые и более сложные модели. Самыми сложными оказываются климатические модели, учитывающие общую циркуляцию атмосферы и океана. Кроме того, нужны модели, отражающие эволюцию морского льда и различные процессы на суше (образование и изменение снежного покрова, содержание влаги в почве и ее испарение растительностью).

Модель климата, разработанная в Вычислительном центре РАН, включает блок, описывающий процессы в атмосфере с пространственным разрешением 4 х 5°, и океанский блок, представляющий собой интегральную модель деятельного слоя океана с заданным распределением течений. Moдель удовлетворительно описывает основные сезонные и географические характеристики глобального климата.

В этой модели рассчитаны, в частности, распределения по высоте изменений температуры воздуха у поверхности Земли при удвоении содержания СО2 в атмосфере. Максимальное потепление составит 4°С, сильнее скажется над материками, а наиболее сильно проявится зимой в Азии. Это связано с неизбежным сдвигом границы снежного покрова к северу. Изменение количества осадков имеет "пятнистую" структуру. Увеличение количества осадков обусловлено более интенсивным испарением с поверхности океана и последующим выпадением на суше. Однако существуют области, где осадков станет меньше.

**ЭКОСИСТЕМЫ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ**

Отмечаемые ныне и прогнозируемые на ближайшие десятилетия повышение содержания СО2 в атмосфере и потепление ведут к серьезным изменениям в таежных и тундровых экосистемах Арктики и Субарктики: изменению продуктивности, смене видового состава, сдвигу границы между лесом и тундрой. Авторы предприняли попытку с помощью модели оценить, как повлияют изменения климата на продукционный процесс в лесной экосистеме и насколько сдвинутся северная и южная границы лесных экосистем умеренной зоны Северного полушария.

Модель продукционного процесса экосистем хвойного леса описывает динамику углерода и воды, а также основные биотические и абиотические факторы в них. В модели учтены следующие процессы, протекающие в растениях: фотосинтез, дыхание, рост и отмирание органов, распределение усваиваемых питательных веществ между органами. Модель учитывает динамику влажности почвы и потока воды по ее профилю, интенсивность осадков и испарения, гидродинамическое сопротивление и водный потенциал почвы, действие гравитации на транспорт воды. После проверки модели по результатам наблюдений над ельниками в южной тайге на Валдае и другими участками в хвойно-широколиственных лесах и северной тайге, ее использовали для описания глобальных процессов в высоких и средних широтах Северного полушария.

В частности, оценивалось влияние возможных изменений климата на продукционный процесс экосистем еловых лесов в различных климатических зонах (на разных широтах и меридианах). Было получено распределение изменений годовой продукции и испарения воды в экосистемах при условии, что температура воздуха в течение вегетационного периода выше на 1 °С. Оказалось, что продукция еловых лесов увеличивается севернее 60° (с широтой все больше - у 66° рост достигает 3%) и уменьшается южнее этой широты. С ростом количества осадков продуктивность экосистем повышается, причем к югу - все сильнее. Так, увеличение количества осадков на 6% на широте 62° влечет за собой рост продуктивности на 0,1%, а на широте 58° - 3,4%.

**СДВИГ ПРИРОДНЫХ ЗОН**

Различные изменения в экосистемах в результате изменения климата оценивались не раз. Здесь мы обсудим сдвиг границ системы природных зон "тайга - тундра". В используемой модели заложены разделяемые большинством специалистов представления о том, что в постоянных климатических условиях экосистема в своем развитии неизбежно приходит к устойчивому состоянию - климаксу. Иными словами, при постоянных условиях в данном месте экосистема пребывает в единственно возможном устойчивом положении равновесия, например "тундра" или "тайга".

Предположим, содержание диоксида углерода в атмосфере вдвое выше современного. Чтобы проследить за перемещением северной границы леса, разобьем ее на участки в широтном направлении, на каждом из которых положение границы определяют температура, рельеф, речной сток и вечная мерзлота (перечень факторов заимствован из публикаций и экспертных оценок). Результаты модельных расчетов свидетельствуют, что зона тайги сдвинется к северу преимущественно на 100-200 км. Кое-где этот сдвиг будет гораздо меньше или его не будет вовсе.

**ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА АРКТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН**

Арктический бассейн - весьма специфический объект для математического моделирования общей циркуляции из-за ряда важных отличий от остальной части Мирового океана. Во-первых, он почти повсеместно и постоянно покрыт льдом. При этом потоки тепла, влаги и импульса из атмосферы в океан в значительной мере определяются состоянием морского льда: его толщиной, сплоченностью и т. д. Во-вторых, распределение плотности воды в Северном Ледовитом океане обусловлено распределением ее солености, а не температуры, как в других океанах. В-третьих, значительная доля океана приходится на мелководные окраинные моря, а дно его глубоководной части изрезано высокими подводными хребтами. В Вычислительном центре РАН была разработана многослойная гибридная модель общей циркуляции океана. Вычисления выполнялись в точках, расположенных в узлах сетки с шагом 2° по широте, т.е. около 220 км. По вертикали толща воды в океане делилась на 6 слоев. Соленость соседних слоев различалась примерно на 0,8%. Рельеф дна задавался в самом общем виде, однако сохранял все основные особенности природного. Учитывались стоки основных рек, впадающих в океан. Дополнительный береговой сток распределялся равномерно по всей границе области.

Результаты расчетов позволили выявить реакцию океана на парниковый эффект. Средневзвешенное по всей глубине океана потепление составило около 1,5°С, что меньше, чем в целом по Северному полушарию. Это вызвано тем, что верхний слой океана оказался сильно распресненным из-за таяния льда и увеличения речного стока. Более теплая, пресная и, стало быть, менее плотная вода, скапливаясь в верхнем слое, препятствует проникновению тепла в нижние слои. Таяние морского льда из-за потепления оказалось столь сильным, что его площадь в летние месяцы уменьшилась бы на 80%. Нарушение вертикальной конвекции океанских вод (наибольшее потепление в верхнем слое) вызывает перестройку всей циркуляции океана. В частности, увеличиваются скорости дрейфовых течений, что наряду с уменьшением толщины льда ведет к росту торосистости. Такие изменения климатического режима неизбежно будут иметь последствия не только непосредственно в акватории, но и в прибрежных областях. Так, подъем уровня океана за счет потепления составит от 0,1 до 0,2 м, что может привести к затоплению устьев крупных рек, особенно в Сибири.

В целом можно сказать, что климат Арктического бассейна станет более теплым и влажным, резко усилятся штормовые ветры, а в самом океане сократится площадь льдов, летом почти до нуля.

**ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ И СДВИГ ЗОНЫ ЛЕСОВ**

Чтобы оценить влияние увеличения концентрации СО2 и потепления на климат, экосистемы и урожайность, мы выполнили численные расчеты на климатической модели. Модели, описывающие динамику экосистем, и экспертные оценки позволили определить смещение границ лесов при соответствующем изменении климата. Это ведет к изменению альбедо (отражающей способности) и влажности земной поверхности, что, в свою очередь, повлияет на глобальный климат. Конечно, заметное смещение растительных зон произойдет только через 100-200 лет, однако указанный эффект может проявляться как тенденция изменения климата. Основные изменения состоят в смещении зоны лесов на север. Естественно, что это больше всего скажется на климате полярных и приполярных областей.

Численные эксперименты проводились на климатической модели Вычислительного центра РАН. В качестве граничных условий задавались новые значения альбедо в тех областях, где лес замещается другими растительными сообществами. Результаты расчетов предвещают заметное похолодание (на 1-2 °С) в северных регионах Европы и Азии из-за ослабления нагрева земной поверхности вследствие увеличения альбедо. Таким образом, сдвиг природных зон частично компенсирует общее потепление, вызванное парниковым эффектом в Европе и Северной Азии.

Итак, результаты расчетов предсказывают значительные изменения климата и биотических процессов в Арктике, а также перестройку общей циркуляции в Северном Ледовитом океане за счет парникового эффекта. Эти изменения будут иметь экономические и экологические последствия планетарного масштаба и должны вызвать адекватную реакцию человечества. Это тем более важно в свете возрастающей роли севера России как сырьевой базы (нефть, природный газ, цветные металлы, древесина) и важнейшей транспортной магистрали. Освобождение поверхности Северного Ледовитого океана от льда позволит превратить его в важнейшую круглогодичную транспортную артерию, однако увеличение влажности, усиление туманов и штормов потребует больших вложений в обеспечение безопасности морского и воздушного транспорта. Затопление устьев рек повлияет на планы размещения промышленных и жилых зон, а также транспортных терминалов. Изменение продуктивности и видового состава тундровых и таежных экосистем скажется на биоте всего региона, поэтому необходимо развернуть работы по сохранению уникальной природы Арктического бассейна. Для анализа возможной ситуации и определения адекватных превентивных мер, способных предотвратить (а если надо, то и использовать) последствия парникового эффекта в данном регионе, необходимо дальнейшее развитие и совершенствование математических моделей и методов, насыщение их новыми натурными данными.

**Список литературы**

А.А. Мочалов, В.П. Пархоменко, А.М. Тарко. Глобальное потепление и Арктика.