

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ

О. А. Анисимов, В. Ю. Поляков

Государственный гидрологический институт, 199053, Ст.-Петербург, 2-ая линия В.О., 23, Россия

Прогнозы изменения климата, полученные различными независимыми методами, сходятся в том, что потепление будет наиболее значительным в высоких широтах северного полушария и можно ожидать, что оно окажет заметное воздействие на криолитозону. Для оценки последствий потепления необходимы данные о современном и будущем климате, снежном покрове, растительности, почве, вечной мерзлоте, а также модели, связывающие природные процессы с климатом. Такие данные и ряд моделей природных процессов были объединены в информационную систему для персонального компьютера, которая может применяться для решения различных прикладных задач. Одна из вошедших в информационную систему геоэкологических моделей была применена для расчета сезонного протаивания вечной мерзлоты в Барроу в 1949—1995 гг., и с достаточно высокой точностью воспроизвела ее межгодовые изменения.

Изменение климата, модели, информационная система, расчеты

INFORMATION SYSTEM FOR THE EVALUATION OF THE CLIMATE CHANGE IMPACTS AT PERMAFROST REGIONS

O. A. Anisimov, V. Yu. Poljakov

State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, 2-nd Line V.O., 23, Russia

There is an agreement between different climatic predictions that warming will be amplified at high latitudes of the northern hemisphere and may have significant impact on cryosphere. To evaluate the climate change impacts, data on modern and future climate, snow, vegetation, soil, and permafrost, and climate driven environmental models are essential. Such data and several environmental models have been integrated into the computer-based information system, which may be applied to various environmental problems. One of the models has been used to calculate the active layer thickness at Barrow for the period 1949-1995 and successfully replicated the observed data.

Climate change, models, information system, calculations

ВВЕДЕНИЕ

Имеются основания полагать, что антропогенное потепление в ближайшие несколько десятилетий окажет значительное воздействие на многие природные процессы и явления. Прогнозы изменения климата, различаясь региональными деталями, сходятся в том, что потепление будет более сильным в высоких широтах северного полушария [Будыко и др., 1991; Greco et al., 1994]. К середине следующего столетия потепление может привести к заметному изменению температуры почвы, глубины сезонного промерзания и протаивания и сокращению площади вечной мерзлоты. Для количественной оценки этих процессов необходимы современные эмпирические данные, модели, связывающие процессы в криосфере с параметрами климата, и прогнозы изменения климата.

Традиционный подход, применяемый при решении прикладных задач по изучению последствий глобального изменения климата, содержит несколько основных этапов:

— разработка прикладных математических моделей, описывающих зависящие от климата природные процессы;

— сбор, систематизация и анализ эмпирических данных для исследуемого региона, континента или полушария;

— выбор сценария изменения климата, наиболее адекватного рассматриваемой прогностической задаче;

— верификация прикладных моделей с использованием современных эмпирических данных;

— проведение модельных расчетов для выбранного прогноза изменения климата и получение оценок влияния потепления на исследуемые процессы.

Эта работа значительно облегчается в случае, когда вся необходимая информация, математические модели и программы, осуществляющие статистический анализ и визуализацию данных, собраны в единую автоматизированную систему со взаимосвязанными компонентами. Такая информационная система для изучения изменения климата и его последствий была разработана и, хотя она главным образом ориентирована на анализ процессов, связанных с веч-

ной мерзлотой, ее применение не ограничивается только лишь этой областью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Автоматизированная информационная система выполнена в виде компьютерной программы для Windows, структура которой показана на рис. 1. Система состоит из нескольких взаимо-

связанных блоков, к которым относятся база современных климатических и геокриологических данных; блок климатических прогнозов; блок обработки данных, обеспечивающий статистический анализ, построение графиков и карт различных характеристик вечной мерзлоты и климата; модельный блок, в котором имеются несколько прикладных моделей различной де-

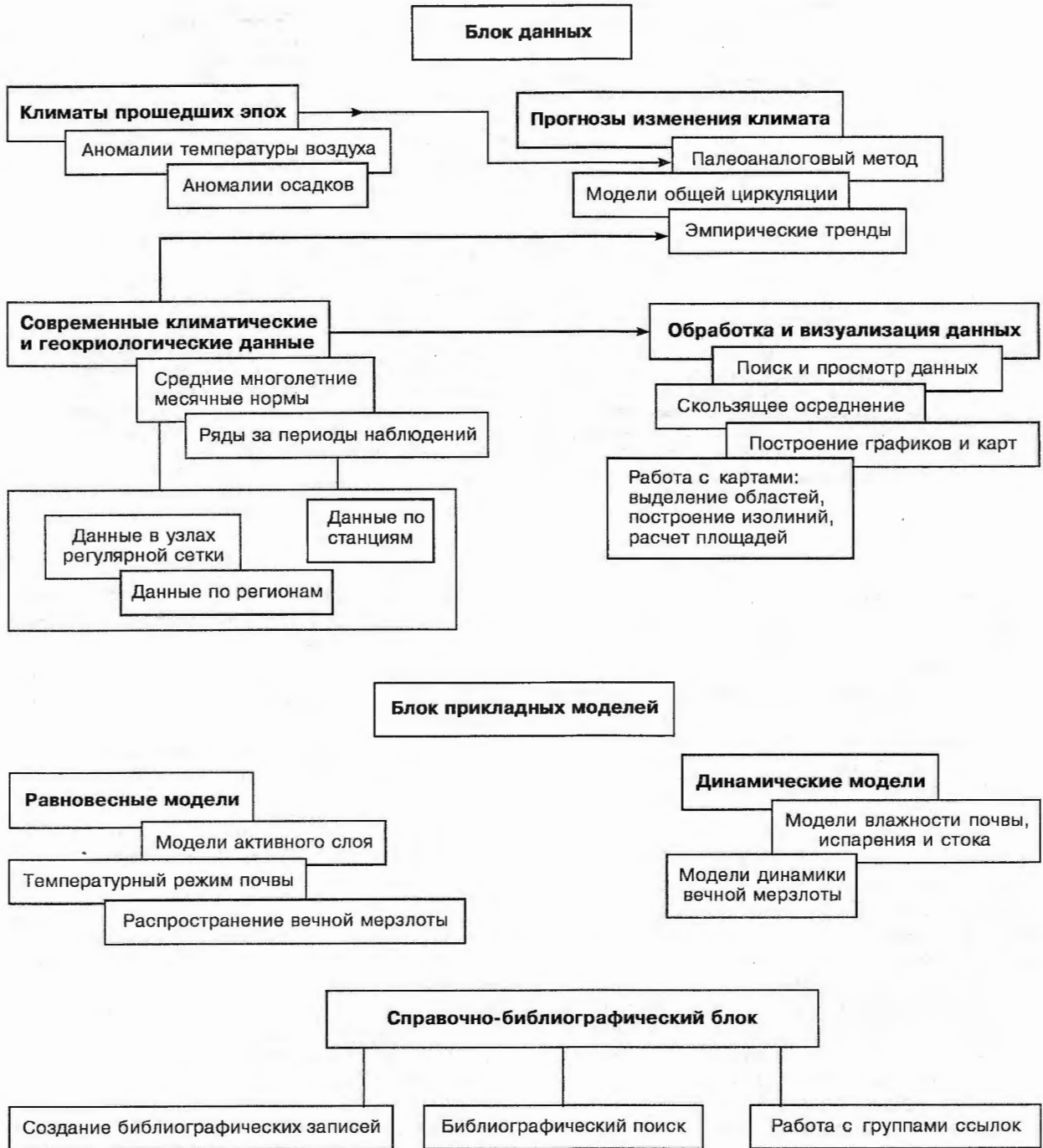


Рис. 1. Структура информационной системы.

тализации и степени сложности, при помощи которых оцениваются последствия изменения климата. Система также содержит библиографическую базу данных.

Собранная климатическая информация представлена данными, относящимися к современному глобальному и региональному климату, климатам трех теплых эпох прошлого (климатический оптимум голоцена, микулинское межледниковье, теплая эпоха плиоцена), и прогнозы (сценарии) изменения климата, полученные при помощи нескольких различных моделей общей циркуляции атмосферы, палеоклиматических реконструкций и современных эмпирических трендов климатических характеристик.

Вся информация разделяется на данные по метеостанциям и в узлах регулярной сетки. По временному разрешению данные разделяются на многолетние нормы климатических переменных, рассчитанные для продолжительных интервалов времени, и на срочные (3- и 6- часовые), суточные, декадные, месячные, сезонные и среднегодовые за определенные периоды наблюдений. Каждый из архивов, входящих в базу данных, сопровождается подробным описанием, в котором поясняется его происхождение; инструментальная база, при помощи которой проводились измерения и ее изменения на протяжении периода наблюдений; характеристики однородности рядов наблюдений; преобразования и поправки оригинальных результатов измерений, сделанные в процессе разработки базы данных; список публикаций, относящихся к данной разработке. Наличие таких „метаданных“ о каждом из входящих в систему архивов климатической информации значительно облегчает ее дальнейшее использование и позволяет во многом избежать возникновения ошибок, связанных с неверной интерпретацией исходных измерений.

Основу климатического блока составляют данные о температуре воздуха и атмосферных осадках, прежде всего потому, что под прогнозом климата обычно понимают изменения именно этих двух переменных. Поскольку многие прикладные модели, оценивающие различные последствия антропогенного потепления, требуют привлечения более широкого набора параметров, в системе также содержатся данные о таких элементах, как снежный покров, температура почвы (поверхностная и на глубинах), скорость и направление ветра, влажность воздуха и облачность. Для ограничения объема информации, постоянно хранящейся в системе, какие-либо иные климатические характеристики в нее включены не были. Однако для того, чтобы обеспечить возможность ее расширения в будущем, были разработаны и включены в систему программы, осуществляющие трансформацию данных с внешних источников информации (компакт-

диски с данными, компьютерные файлы, данные из сети Интернет и т.п.) в базу данных информационной системы.

Наиболее полные ряды наблюдений за длительные интервалы времени и рассчитанные с их помощью нормы климатических характеристик представлены для территории бывшего СССР. Измерения охватывают период с конца прошлого столетия до середины 1990-х гг., количество станций на территории бывшего СССР, измерения на которых вошли в базу данных, для разных климатических переменных составляет от 622 до 820, многие из станций (более 250) расположены в области распространения вечной мерзлоты.

Блок прикладных расчетов содержит несколько достаточно простых равновесных моделей, и более сложные динамические, отличающиеся прежде всего тем, что они учитывают инерционные процессы, присущие климатической системе, и за счет этого дают оценки скорости изменения параметров вечной мерзлоты в реальном масштабе времени.

Равновесные модели используют в качестве входных параметров месячные нормы температуры воздуха и осадков, по которым рассчитываются средняя за зиму высота снежного покрова, температура почвы, глубина сезонного протаивания и почвенно-мерзлотный индекс, при помощи которого оценивается распространение вечной мерзлоты и положение границ между ее различными типами. Модели, вошедшие в информационную систему, достаточно хорошо известны и описаны в ряде публикаций [Анисимов, Нельсон, 1990; Кудрявцев и др., 1974; Nelson, Outcalt, 1987]. Они неоднократно проверялись на эмпирических данных и показали хорошие результаты. В рамках информационной системы их легко можно использовать совместно с климатическими прогнозами и, выбирая тот или иной сценарий изменения климата, получать оценки ожидаемого изменения расчетных характеристик в условиях антропогенного потепления.

Некоторые из оценок изменения температуры воздуха, почвы и глубины сезонного протаивания по крупным регионам, ожидаемые к середине следующего столетия, приведены в таблице 1. Представленные в таблице значения были получены при помощи информационной системы с использованием равновесных геофизиологических моделей; глобального архива данных в узлах регулярной пространственной сетки с пространственным разрешением $0,5^\circ$, содержащего современные месячные нормы температуры воздуха и осадков и преобладающий гранулометрический состав почвы [Staub, Rozenzweig, 1992]; сценария изменения климата для середины следующего столетия, полученного при

Ожидаемое к 2050 г. увеличение среднегодовой температуры воздуха (ΔT_v), почвы ($\Delta T_{\text{п}}$) и глубины максимального сезонного протаивания (ΔZ) для различных областей криолитозоны северного полушария

Область криолитозоны	ΔT_v , °C	$\Delta T_{\text{п}}$, °C	ΔZ , %
Арктическое побережье Аляски и Канады	0,5—1,0	0,5—1,0	30—50
Центральная Канада	1,5—2,5	1,0—2,0	30—50
Западное побережье Канады	1,0—2,0	0,5—1,5	10—20
Север Скандинавии	1,5—2,0	1,0—2,0	10—20
Западная Сибирь	1,5—2,5	1,5—2,0	15—25
Якутия	1,5—2,5	1,5—2,0	25—50
Дальний Восток	1,0—2,0	1,0—2,0	40—50

помощи транзитивной модели общей циркуляции атмосферы ECHAM1-A [Greco et al., 1994]. Информационная система позволяет проводить расчеты и строить прогностические гео-криологические карты с использованием альтернативных данных о современном и будущем климате, и, в зависимости от выбора той или иной базы данных, результаты могут несколько различаться. Так, например, доля площади современной вечной мерзлоты, на которой за счет потепления к середине следующего столетия могут сформироваться талики с поверхности, оценивается в 12 %—22 %, в зависимости от выбора сценария изменения климата. Сопоставление результатов и оценка их достоверности представляет собой важную самостоятельную задачу, обсуждение которой выходит за рамки данной публикации.

При интерпретации результатов расчетов по равновесным гео-криологическим моделям необходимо принимать во внимание, что они описывают лишь установившийся режим взаимодействия климата и вечной мерзлоты, и неявно предполагают стационарность всех внешних условий. Для изучения и прогнозирования изменения взаимодействующих параметров во времени, например, во внутригодовом цикле, большие возможности дают динамические модели энергии и массообмена между глубокими слоями грунта, слоем годовых теплооборотов, растительностью и атмосферой. Несколько таких моделей, адаптированных к условиям вечной мерзлоты, были включены в информационную гео-криологическую систему [Анисимов, 1990; Anisimov, 1989; Goudrich, 1978; Waelbroeck, 1993]. Динамические модели, различаясь деталями, в целом имеют достаточно схожее строение и обычно состоят из двух основных блоков: метеорологического, в котором по заданным параметрам атмосферного климата рассчитывается равновесная температура подстилающей поверхности, и почвенного, в котором рассчитываются профиль температуры, влажность почвы и положение фазовых границ. Расчет осуществляется с заданным временным шагом, обычно от нескольких часов до нескольких суток, в зависимости от наличия данных.

Одна из вошедших в информационную систему динамических моделей была применена для

расчета межгодовой изменчивости глубины слоя сезонного промерзания в Барроу, на арктическом побережье Аляски. Расчеты проводились для периода с 1949 по 1995 г., для которого имелись суточные данные по всем необходимым метеорологическим параметрам, предоставленные на-

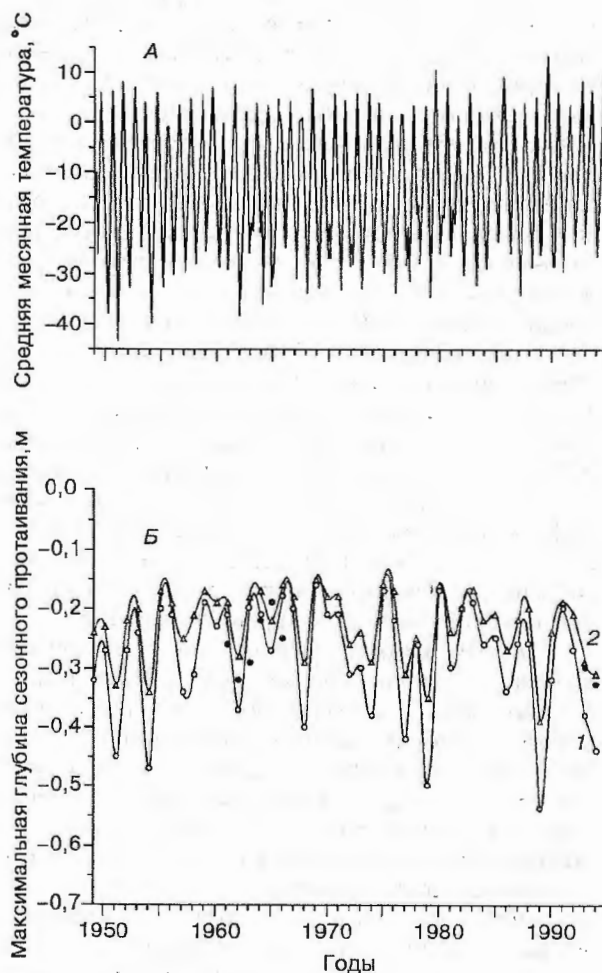


Рис. 2. Средняя месячная температура воздуха (А) и расчетная глубина максимального сезонного протаивания суглинистой почвы (Б) в Барроу, 1949—1995 г.

Данные расчета для влажности почвы 600 мм/м (1); 350 мм/м (2) и результаты измерений отдельных лет (показаны точками).

циональной метеорологической службой США. В 1960-х гг. на протяжении шести лет Лабораторией арктических исследований корпуса военных инженеров США (CRREL) проводились измерения глубины промерзания, температуры и влажности (льдистости) почвы до глубины 1,5 м, а также снежного покрова на нескольких экспериментальных площадках в Барроу. Эти измерения были возобновлены в 1989 г. в связи с выполнением национальной научной программы изучения Арктики (ARCSS). База геокриологических, климатических и почвенных данных, построенная на основе измерений, проведенных в различное время на нескольких экспериментальных площадках вблизи Барроу, в 1995 г. была выпущена в виде компакт-диска. В данном исследовании она была использована для проверки динамической модели вечной мерзлоты. При проведении расчетов использовались средние суточные значения температуры воздуха и осадков за период 1949-1995 гг. Теплоемкость и теплопроводность почвы рассчитывались с использованием полуэмпирических формул для суглинка в зависимости от влагосодержания [Павлов, 1979]. Предполагалось наличие органического слоя мощностью 10 см. Лдьистость мерзлой почвы принималась равной 500 мм/м (в водном эквиваленте), влажность талой почвы принималась равной 350 мм/м и 600 мм/м, что соответствует полученным в измерениях средним величинам влажности в Барроу в годы с небольшим количеством осадков и при обильном увлажнении.

Сравнение результатов расчетов и имеющихся данных измерений показало, что модель очень точно воспроизводит термический режим и глубину слоя оттаивания. Рассчитанные кривые изменения глубины слоя протаивания для условий достаточно увлажненной и сухой почвы представлены на рис. 2, Б, там же точками показаны имеющиеся измерения для отдельных лет. На рис. 2, А показаны средние месячные значения температуры воздуха за весь период расчета. Примечательно, что даже визуальное сравнение указывает на наличие корреляции годовой амплитуды температуры воздуха и глубины сезонного протаивания.

Применение геокриологической информационной системы не исчерпывается рассмотренными примерами. С ее помощью были получены оценки распространения вечной мерзлоты в северном полушарии при различных сценариях потепления [Anisimov, Nelson, 1996, 1997], а также рассчитаны и построены прогностические карты, иллюстрирующие изменение мощности снежного покрова, температуры почвы, глубины сезонного протаивания и продолжительности ве-

гетационного периода. Все расчеты для современных климатических условий находятся в хорошем соответствии с имеющимися эмпирическими данными, что свидетельствует о достаточно высокой точности входящих в информационную систему прикладных моделей и подтверждает возможность ее использования для изучения взаимосвязей геокриологических процессов и климата как в современных условиях, так и в условиях антропогенного изменения климата.

Данное исследование поддерживается совместным российско-американским грантом CRDF, RG1-225 и грантом NSF США, OPP-9614537.

Литература

- Анисимов О.А. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на режим вечной мерзлоты // Метеорология и гидрология, 1990, № 3, с. 40-46.
- Анисимов О.А. Нельсон Ф.Е. О применении математических моделей для изучения взаимодействия климата и вечной мерзлоты // Метеорология и гидрология, 1990, № 10, с. 13-20.
- Будыко М.И., Израэль Ю.А., МакКракен М.С., Хект А.Д. Предстоящие изменения климата. Л., Гидрометеоздат, 1991, 272 с.
- Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А. Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М., Наука, 1974, 431 с.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 285 с.
- Anisimov O.A. Changing climate and permafrost distribution in the Soviet Arctic // Physical Geography, 1989, No. 10, p. 285-293.
- Anisimov O. A. and Nelson F.E. Permafrost distribution in the northern hemisphere under scenarios of climatic change // Global and Planetary Change, 1996, No. 14, p. 59-72.
- Anisimov O.A. and Nelson F.E. Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: results from general circulation models // Climatic Change, 1997, vol. 35, p. 241-258.
- Goodrich L.E. Efficient numerical technique for one-dimensional thermal problems with phase change // Inter. J. Heat and Mass transfer, 1978, No. 21, p. 615-621.
- Greco S., Moss R., Viner D., Jenne R. Climate Scenarios and Socioeconomic Projections for IPCC WG II Assessment // Consortium for International Earth Science Information Network, 1994, 12 p.
- Nelson F.E. and Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // Arctic and Alpine Research, 1987, No. 19, p. 279-288.
- Staub B., Rosenzweig C. Global Zabler soil type, soil texture, surface slope, and other properties. Digital raster data on a 1-degree geographic (lat/long) 180x360 grid // Global Ecosystems Database Version 1.0: Disc A. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center, 1992.
- Waelbroeck C. Climate-soil processes in the presence of permafrost: a systems modelling approach // Ecological Modelling, 1993, vol. 69, Nos. 3,4, p. 185-225.

Поступила в редакцию
8 января 1998 г.