

**WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION**

**LECTURES PRESENTED AT THE  
FORTY-SIXTH SESSION  
OF THE  
WMO EXECUTIVE COUNCIL**



**WMO-No. 822**

**Secretariat of the World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland  
1995**

**© 1995, World Meteorological Organization**

**ISBN 92-63-00822-1**

**NOTE**

The designations employed and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the World Meteorological Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

# CONTENTS

|                                                                                                                     | <i>Page</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Foreword .....                                                                                                      | V           |
| Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) .....<br>P. Morel                                                  | 1           |
| Very short-term weather forecasting .....<br>M. D. Eilts                                                            | 7           |
| Гидрологический цикл: влияние естественных и антропогенных факторов .....<br>(Hydrological cycle)<br>I. Shiklomanov | 13          |



## **FOREWORD**

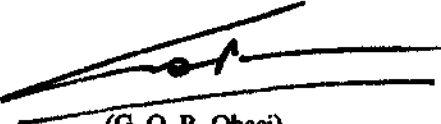
The themes selected for the scientific lectures presented during the forty-sixth session of the Executive Council related to three different but very related areas. The lectures were presented by the following three distinguished scientists:

Professor I. Shiklomanov (Russian Federation) — Hydrological cycle

Professor P. Morel (WMO Secretariat) — Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)

Mr M. D. Bilts (United States) — Very short-term weather forecasting

The three presentations raised a great deal of interest in the Executive Council and were followed by lively discussions. Sincere thanks were expressed to the lecturers for their valuable contributions.



(G. O. P. Obasi)  
Secretary-General



# GLOBAL ENERGY AND WATER CYCLE EXPERIMENT (GEWEX)

P. Morel

*World Meteorological Organization  
Geneva, Switzerland*

## FAST AND SLOW CLIMATE PROCESSES

It is convenient to distinguish, in the working of the coupled atmosphere-ocean-ice and land surface system, "fast" and "slow" climate processes. The fast processes, taking place mainly in the atmosphere and at the Earth surface, regulate the flow and transformation of energy, radiation and heat as well as the global hydrological cycle. The study of these fast processes, i.e. the transfer of radiation through the atmosphere, the role of clouds, and near-surface hydrological processes, is the task of the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX).

The slow climate processes, on the other hand, are those which involve changes in the ocean or ice. These slower processes are responsible for considerable transport of heat and salinity from one region to another and largely determine natural climate variability. Ocean and ice dynamics are also essential in fixing the rate of change of global climate and regional differences in the climate response to an otherwise homogeneous increase in greenhouse gases. These phenomena, involving in an essential way the role of the ocean in climate, are the object of the CLIVAR programme within the World Climate Research Programme (WCRP) (Figure 1).

## CLIMATE SCIENCE VERSUS WEATHER PREDICTION

The atmospheric and surface processes investigated by GEWEX are generally associated with weather phenomena and meteorological time-scales. Nevertheless, GEWEX research is very relevant to the study of "global change" and an essential component of any climate science programme. The reason is that the fast climate processes, the adjustments of atmospheric water vapour and clouds, atmospheric radiation and rain, soil moisture and evaporation, control the planet's radiation balance, surface conditions and climate regime. These processes determine:

- (a) The sensitivity of the Earth (equilibrium) climate to changes in external parameters, e.g. the global warming that would result from a persistent doubling of the concentration of carbon dioxide;
- (b) The response of the atmospheric circulation to changes in surface boundary conditions and corresponding changes in surface fluxes of radiation, water, and heat, i.e. the strength of the atmospheric feedback on the slower components of the physical climate system.

On the other hand, the GEWEX programme is certainly germane to the development of numerical weather prediction (NWP), because extending the range of forecasts beyond a few days requires increasingly accurate formulations or "parameterizations" of physical processes

in the atmosphere and the Earth surface; GEWEX delivers the required micro-meteorological insight (from special field or microscale model studies) and research-quality global climatological datasets for the validation of model results. Conversely, GEWEX and WCRP in general are heavily dependent on the support and further progress of operational NWP and four-dimensional data assimilation. Modern data assimilation systems provide by far the best approach for inferring the value of essential global climate quantities, such as wind stress or surface fluxes of sensible and latent heat, that cannot be determined directly from sparse observations.

## COOPERATION WITH SPACE RESEARCH AGENCIES

A scientific research programme obviously does not command the level of resources that are necessary to undertake new space system development. Thus, GEWEX cooperates with national and multinational space research and development agencies in order to gain recognition for the objectives and methods of climate science and meteorology in general. In particular, GEWEX has campaigned to convince space agencies that understanding the Earth system can only result from the synergistic combination of a multiplicity of data sources, including a mix of surface-based observations and satellite remote sensing. In particular, no single satellite instrument delivers precisely the information needed for climate diagnostics, and the best determination of geophysical fields must come from a complex analysis and merging process, known as four-dimensional data assimilation, making full use of past observations and of the laws of physics embedded in the meteorologists' models of the atmosphere and climate. The current polar platform projects under development by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) of the United States, the European Space Agency (ESA) and the National Space Development Agency (NASDA) of Japan feature multiple instruments that do aim to acquire synergistic simultaneous data on atmospheric properties. Furthermore, these plans include substantial resources to develop considerably more advanced instruments (especially, atmospheric temperature and moisture sounders) that will eventually replace the existing sensors on today's operational meteorological satellites.

Despite the bewildering array of "innovative" satellite instruments planned or actually being built by the world space agencies, there is as yet no definite plan to observe from space the three-dimensional distribution of clouds and its changes in the course of climatic fluctuations; such observations can only be made by a space-borne millimeter-wave cloud radar that is still missing from the list of planned instruments and satellite missions. GEWEX

is now concentrating its efforts on the definition of this future cloud radar mission (Figure 2) and the constitution of a supportive community of scientific users.

### GEWEX CLIMATOLOGICAL DATASETS

An essential task of GEWEX is to develop adequate diagnostic datasets to serve as a basis for the study of global energy budgets and the hydrological cycle in the current climate, and to assist in the further improvement of atmospheric circulation and climate models. As noted above, many of the potentially-observable atmospheric and surface properties will only come under systematic global observation at the end of the century, with the deployment of the new generation of research Earth observation satellites being developed by NASA, ESA and NASDA. Thus, the GEWEX climatological data projects undertaken so far have an experimental character and are active research projects that leave considerable scope for further improvements, as our understanding of natural phenomena and retrieval algorithms progresses. Through its various climatological data projects, GEWEX organized the systematic production, archival and distribution of the datasets listed below, provided a cooperative framework for the validation and multidisciplinary applications of these products, encouraged continuing improvements in retrieval algorithms, and organized re-analyses of archived data, as appropriate. This work of GEWEX also constitutes a pilot programme for the eventual analysis and assimilation of the much larger data outputs one expects from the forthcoming generation of "Earth observing platforms" in space.

The GEWEX climatological data projects are the following:

#### Radiation at the top of the atmosphere (TOA)

The NASA Langley Research Center (Hampton, Virginia, USA) has taken responsibility for delivering the radiation fluxes at the top of the atmosphere obtained from the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). International coordination is needed to organize a consistent central archive for similar data from the forthcoming Scanner for Earth's Radiative Budget (ScaRaB) instruments (Russian-French Meteor-3, European ENVISAT and METOP satellites) and CERES radiometers (Japan-USA TRMM, NASA EOS AM and PM platforms).

#### Surface radiation budget

The Langley Research Center also accepted responsibility for assembling a systematic climatology of short-wave and long-wave radiation fluxes at the surface of the Earth, based on input information from the GEWEX International Satellite Cloud Climatology Projects (ISCCP) (see below) for cloud and surface optical properties, as well as meteorological satellite retrievals and operational analyses for atmospheric properties. The Langley Research Center has issued the first WCRP Surface Radiation Budget Global Dataset on CD-ROM for the period March 1985–December 1988 (short wave only).

#### Cloud amount and radiation properties

The GEWEX ISCCP completed its tenth year of operation on 1 July 1993. The ISCCP acquires and calibrates imaging

radiometer data from (normally) four operational geostationary and one (or two) polar orbiting operational meteorological satellites, with a sampling period of three hours. ISCCP thereby constitutes an essential source of quality-controlled radiance data for the retrieval of cloud amount and optical properties (inasmuch as these can be determined from observations at the top of the atmosphere only) and the estimation of other radiation quantities (see above). The ISCCP has undertaken to recalibrate its basic radiance data archive and will reprocess the full 10-year period with an improved cloud-retrieval scheme, notably for polar clouds.

#### Water vapour

The GEWEX Water Vapour (GVaP) project has undertaken combining data from several satellite sensors with available upper-air soundings in order to deduce a more exact climatological description of global atmospheric water vapour, an essential input for radiation balance computations, and a sensitive test for climate models.

#### Global rainfall

The GEWEX Global Precipitation Climatology Project (GPCP) is aiming to provide the best possible global estimate of monthly-mean, area-averaged ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ) precipitation that can be inferred from indirect satellite observations and raingauge data, over the oceans as well as over land. The project is under way since 1986, but only incomplete products have been distributed so far:

- (a) A tropical precipitation product, based on the statistics of cold cloud tops associated with strong convective cells, deduced from geostationary satellite infrared image data collected every three hours worldwide (GOES-East and West, Meteosat, GMS);
- (b) A continental rainfall products based on raingauge data only, collected and analysed by the Global Precipitation Climatology Centre created and maintained by the Deutscher Wetterdienst, Germany at the request of WCRP<sup>1</sup>.

The project, led by a new manager (Dr A. Gruber of NOAA/NESDIS), is now striving to develop an interim "optimal" estimation procedure based on combining passive-microwave and infrared radiometry data from satellites, raingauge measurements and numerical weather prediction products. Since all remote-sensing methods are indirect, it appears likely that satellite data provide a reliable indication of global precipitation patterns, but that precipitation amounts could best be inferred using state-of-the-art weather prediction systems.

#### Global land surface climatology dataset

The International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) has undertaken to distribute its first multidisciplinary global dataset on CD-ROM, including a characterization of land surface optical and physical properties, land use, precipitation, cloud and surface

<sup>1</sup> The essentially operational activity of the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) will become a contribution of Germany to the Global Climate Observing System (GCOS).



radiation on a  $1^\circ \times 1^\circ$  grid covering all continents (interpolated from the  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  grid of the basic WCRP products above).

#### Global Soil Wetness Data Project

"Soil moisture" is not a uniquely defined physical quantity but rather a parameter introduced in the formulation of individual models representing soil water storage, evaporation and surface hydrological processes. Nevertheless, GEWEX will undertake to produce a standard soil wetness index that could serve for simple scientific studies and large-scale climatological applications. This product will be based on a particular one-dimensional soil-vegetation-atmosphere transfer scheme and input data from the GPCP raingauge climatology, the WCRP surface radiation budget climatology and operational near-surface meteorological fields.

#### PREDICTION OF HYDROMETEORS AND HYDROLOGICAL PROCESSES

GEWEX was originally given the task to develop the ability to predict the variations of global and regional hydrological processes and water resources, and their response to environmental change.

It has been known for some time, from observational evidence and also from model results, that soil moisture anomalies tend to perpetuate themselves and, therefore, have a "memory" that can be exploited for predicting rain/drought anomalies over a period of one to several months, especially during summer. The spectacular variations in the hydrological regime of the Central Plain of the United States that occurred during the recent summers are typical manifestations of such persistent anomalies.

Recent results in dynamical extended-range forecasts over North America indicate definite skill in predicting rainfall one month in advance. Since such events involve considerable recycling of water within the region (re-evaporation and subsequent rainfall downstream), it was not unexpected that predictive skill could be achieved only with an improved formulation of hydrological processes. This was achieved with a new interactive scheme, developed by Mr A. Betts, that links soil moisture storage, evaporation and runoff to atmospheric properties and radiation fluxes.

The central objective of the GEWEX Continental-scale International Project (GCIP) is specifically to address this problem and to provide the validation data needed for making progress in quantitative predictions of coupled atmospheric and hydrological phenomena. GCIP covers the Mississippi river basin, an area large enough to be directly comparable to global model products over an ensemble of grid points, and yet small enough to allow intensive observations of soil properties, precipitation, water storage and runoff (Figure 3). Although the ultimate objective of GEWEX is to refine the parameterization of land surface processes in global climate models, this task will be greatly facilitated in the case of GCIP by the possibility to test these schemes in fine mesh limited area models, that can reproduce the day-to-day variations of hydrometeors and surface hydrological processes with considerable detail and lend themselves to the four-dimensional assimilation of observed meteorological and, eventually, hydrological data.

GCIP is also the main WCRP project for promoting the collaboration between atmospheric and hydrological scientists interested in developing interactive models of atmospheric and "macroscale" hydrological processes, to predict intraseasonal rainfall variations, and to assess the impact of climate change on regional water resources.

#### GEWEX PROCESS STUDIES

It was originally stated that GEWEX would model the global hydrological cycle and its impact on the atmosphere and ocean. This term of reference is rather broad and GEWEX has concentrated instead on improving the knowledge and parametric formulations of the physical processes that directly influence energy fluxes and the hydrological cycle, e.g.:

- (a) Atmospheric radiation transfer (in cooperation with the atmospheric radiation measurement programme of the United States Department of Energy);
- (b) Cloud dynamics and optical properties (GEWEX Cloud-System Study; ISCCP field experiments);
- (c) Atmospheric boundary layer and land surface processes (HAPEX and similar combined atmospheric and hydrological field studies) (Figure 4).

A large and scientifically challenging component of GEWEX is a broad and diverse programme of regional field studies to investigate these processes under various terrain and climatic condition. The most comprehensive regional GEWEX projects are described below.

#### MacKenzie GEWEX Study (MAGS)

MAGS is the central piece of the Canadian GEWEX programme. The focus of the programme is to model the water and energy balances of the Canadian Arctic basin on spatial scales of 100 kilometres and temporal scales of one month, and to assess the changes in Canadian water resources arising from climatic variability and climate change. MAGS will organize coordinated hydrological modelling and process studies in the MacKenzie river basin, building upon Canadian expertise in cold regions and high latitude climate.

#### Baltic Sea Experiment (BALTEX)

BALTEX is an initiative of Germany and nordic countries to determine the energy and water budgets of the entire region covered by the Baltic Sea and surrounding river basins, and to investigate the response of the Baltic Sea to changes in freshwater budgets. The BALTEX domain covers an area of about 2 million square kilometres and discharges about  $350 \text{ km}^3$  of water into the world ocean, i.e. about half as much as the Mississippi river. The key scientific issues in BALTEX is coupling the atmospheric circulation to hydrological processes over relatively complicated terrain, sea and ice. It is envisaged that the BALTEX intensive study period will extend over a five-year period (1997–2001).

#### GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME)

GAME is a broad multidisciplinary programme being developed by Japan, China and other Asian countries for:

- (a) Long-term monitoring of surface energy and water fluxes at a large number of sites over a variety of

terrains, by means of a network of Automated Weather Stations (AWSs) being deployed for a period of at least 10 years. The network will cover tropical rain forests in Borneo and Malaysia, the monsoon region of China, several arid or semi-arid regions (China, Mongolia, Central Asia and Siberia) and the Tibetan plateau;

- (b) Intensive field studies of atmospheric and hydrological processes, over various sites including the Chao Praya river and the Huai He river basins in China, and an experimental area on the Tibetan plateau;
- (c) Estimation of energy and water budgets over the eastern half of the Eurasian continent, based on four-dimensional data assimilation and initialization of a limited area model by the Japan Meteorological Agency.

#### **Large-scale Study of the Atmospheric Moisture Balance of Amazonia using Data Assimilation (LAMBADA)**

LAMBADA is intended to augment the upper-air sounding and surface meteorological/hydrological measurement networks within the Amazon basin for a period of one-to-two years, in order to provide the basic data for the analysis of the atmospheric circulation, water transport and water recirculation in the region. LAMBADA will be

complemented by an intensive programme of micro-meteorological, bio-geochemical and ecological studies over six experimental areas located in different ecoclimatic regions of the Amazon basin.

#### **GEWEX AND GLOBAL CHANGE RESEARCH**

Altogether, GEWEX is a central component of WCRP that interacts with many disciplines in Earth system sciences. Determining surface fluxes of radiation, heat and water over the ocean and ice, and their responses to changes in surface or bulk forcing of the atmosphere, is indispensable to the study of the Arctic climate system (ACSYS) or the variability and predictability of the coupled ocean-atmosphere system (CLIVAR). GEWEX also provides the foundation for the study of biogeochemical cycles, as soil moisture, rainfall and radiation are important factors that influence biogeochemical processes as well as biological-ecological developments. This strategic role is the reason for the multiplicity of interdisciplinary linkages established between GEWEX and related programmes in hydrological sciences, atmospheric and soil chemistry, and terrestrial ecosystems. GEWEX is also a scientific programme of considerable practical importance for application to the assessment of climate impacts on water resources and the prediction of variations in the hydrological regime of large continental regions.

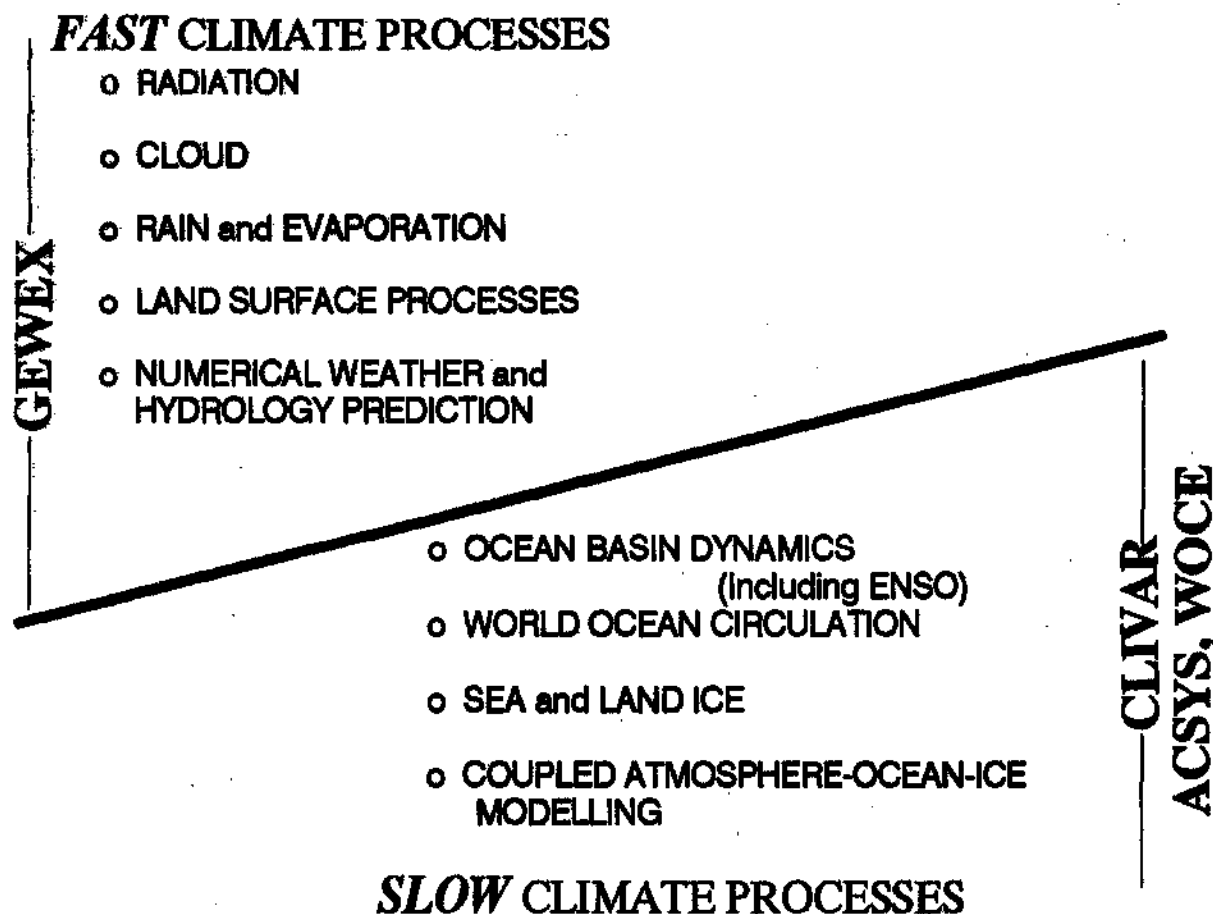


Figure 1 — Structure of WCRP thematic programmes for studying "fast" and "slow" climate processes.

## SPACEBORNE CLOUD RADAR SYSTEM DESIGN CONCEPT

- NADIR-LOOKING 95 GHz PROFILING RADAR TO MEASURE CLOUD REFLECTIVITY
- DETERMINE REFLECTIVITY vs. HEIGHT BY SHORT-PULSE RADAR RANGING
  - CLOUD BASE HEIGHT
  - CLOUD LAYER THICKNESS
  - MULTIPLE LAYER DETECTION
- ESTIMATED CLOUD PROFILING CAPABILITY:
  - INTRINSIC HORIZONTAL RESOLUTION = 800 m
  - VERTICAL RESOLUTION = 500 m
  - MINIMUM DETECTABLE REFLECTIVITY  $\leq -30$  dBZ
  - MULTIPLE PULSES INTEGRATED
    - EFFECTIVE HORIZONTAL RESOLUTION  
~ 800 m x 2.3 km
- PRELIMINARY RADAR SYSTEM CHARACTERISTICS
  - MASS: 125 kg
  - POWER: 225 W
  - ANTENNA: 2 m DIAMETER
  - DATA RATE: 2 kbps

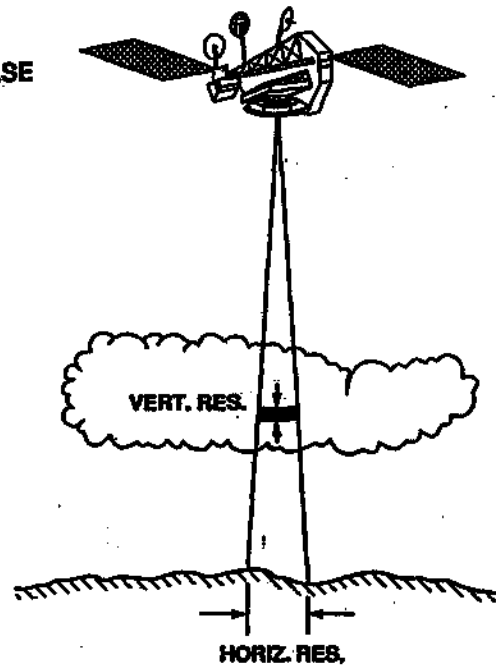


Figure 2 — Design guidelines for a future satellite-borne millimetre-wave radar system to observe non-precipitation clouds.

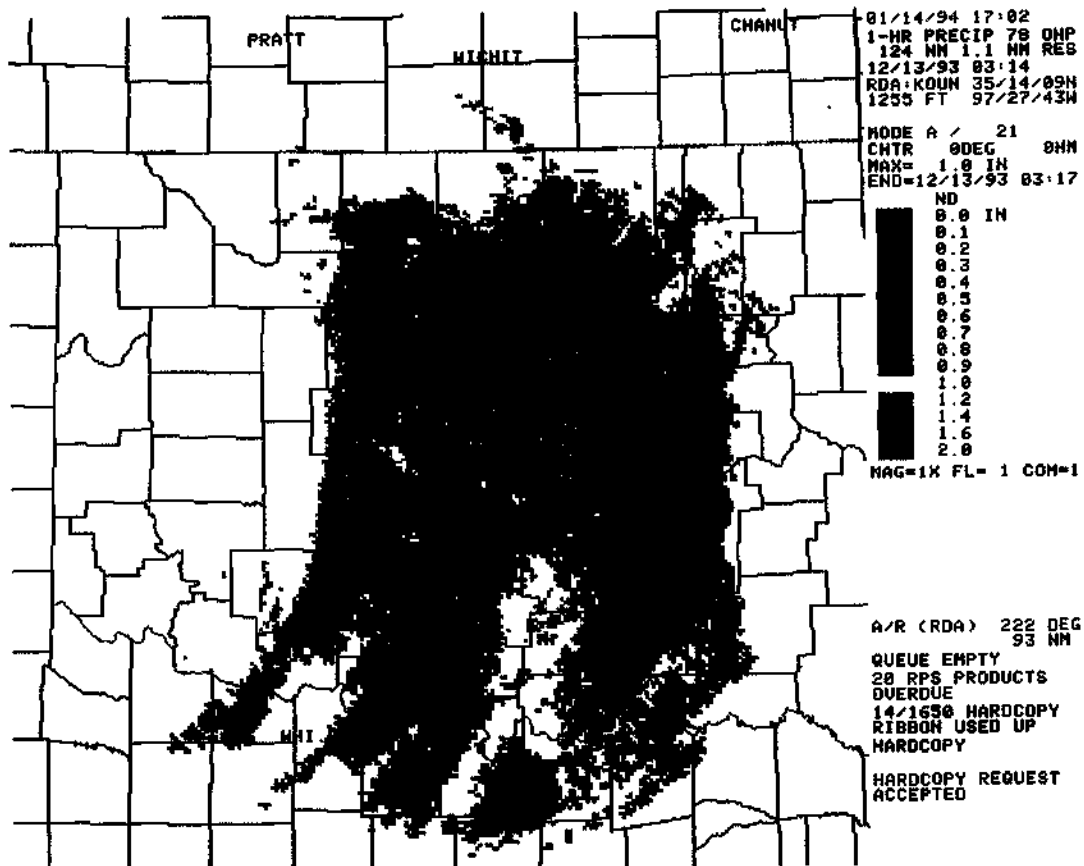


Figure 3 — Rainfall pattern observed by the WSR-88D Weather Radar System of the Central Plain of the United States.

## REGIONAL GEWEX CONTINENTAL-SCALE PROJECTS

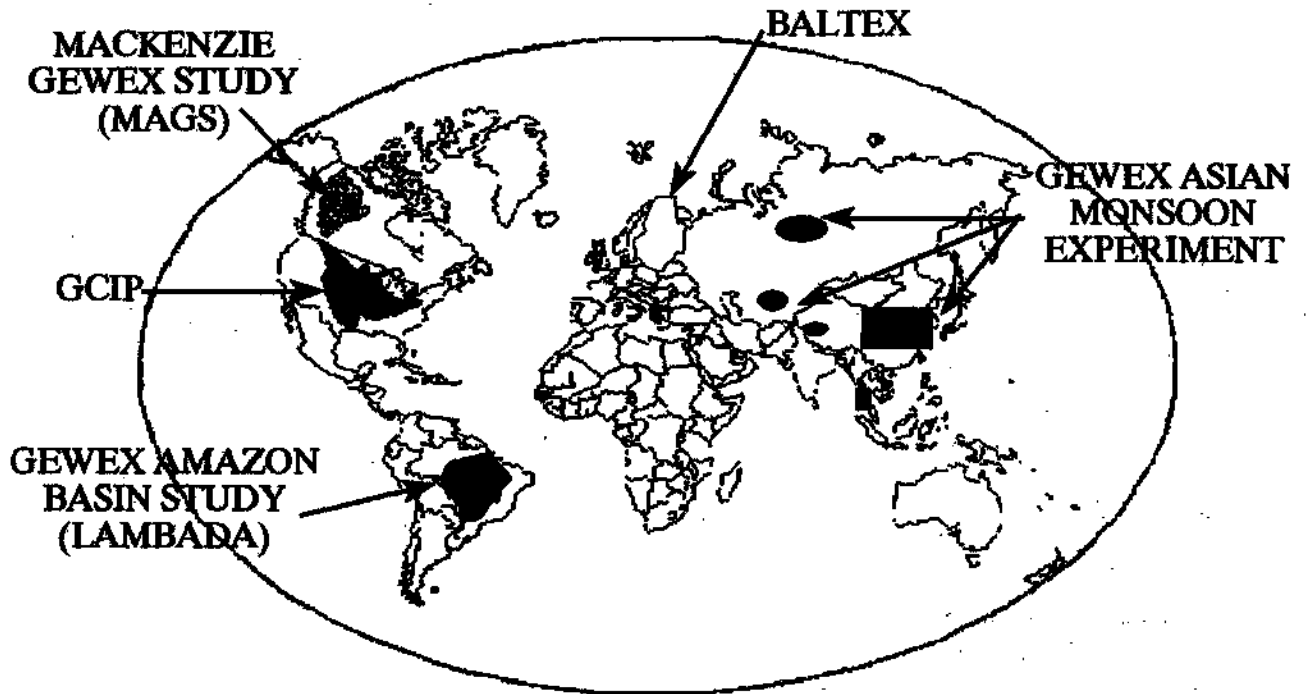


Figure 4 — Regional GEWEX field studies.

# VERY SHORT-TERM WEATHER FORECASTING

M. D. Eilts

*National Severe Storms Laboratory  
Norman, Oklahoma, United States of America*

## INTRODUCTION

Recent advances in our knowledge of storm processes and in our capability to observe the atmosphere, to extract information automatically from observational data, and to model the evolution of atmospheric phenomena, should lead to increases in meteorologists' capability to forecast significant weather in the short term. Accurate short-term warnings (zero to 30 minutes) and forecasts (zero to two hours) of severe weather, heavy precipitation, and lightning can provide many benefits to society. The recent deployment of networks of Doppler radars is one example of a new found opportunity to attempt to provide very specific spatial and temporal forecasts and warnings of weather that impact society. This paper discusses how to enhance the warning decision process including: (a) how new observational sensors will allow better detection and analysis of storms; (b) how expert systems and artificial intelligence techniques can extract information from these data to help with warning decisions; (c) the need to integrate data from numerous observational systems; and (d) the need for interactive display capabilities that are designed specifically for meteorologists who are making warning decisions. In addition, we will examine the processes associated with, and information needed, to make short-term forecasts (0–2 hours), which include mesoscale and storm-scale models integrated with observational data streams, along with the capability to visualize and interact with this forecast guidance information. Implicit in this discussion is the continuing need to perform research to better our understanding of weather processes and the need to educate and train operational meteorologists' so they have a thorough understanding of weather processes, the ability to use data from new observational sources, and the ability to manipulate data and information using new display capabilities.

## SEVERE WEATHER WARNINGS

Warnings to the general public, aviation concerns and private industry provide great benefits to society. Warnings of tornadoes, damaging winds, large hail, flash floods, and lightning allow citizens to seek safe shelter, allow aircraft to avoid hazardous shears, and sometimes allow action to be taken that mitigates the loss or damage of property. In order to provide very accurate and timely warnings of these phenomena, a number of capabilities have to be developed. These include: (a) the capability to observe the phenomena or preferably their precursors; (b) the capability to "detect" the signatures in the observational data streams reliably (either by human or computer); (c) the capability to provide warning decision aids to meteorologists who have to make the warning decisions; and (d) the capability to visualize and interact with the data and information.

## New observational tools

A Doppler radar is an important tool for meteorologists to use to detect severe weather and to forecast the development, movement and evolution of convective storms. Other important observational data sources are lightning detection networks, surface networks of instruments that measure meteorological variables and precipitation amount, satellites, vertical profilers, and meteorological data collected by sensors on operational aircraft. To be able to predict accurately the evolution and movement of weather systems on short-time scales, it is important that data from all of these sources are integrated to provide a holistic view of weather phenomena.

Using a highly sensitive Doppler radar, we are able to measure the reflectivity and radial velocity in storms and precipitating systems out to ranges of >300 km. In this way, we can detect severe weather phenomena and observe precursors to severe weather phenomena which are both important for providing timely severe weather warnings. We can also measure the winds in the clear-air boundary layer, sometimes to ranges of >100 km. This is important for tracking gust fronts and synoptic fronts, for detecting "dry" downbursts, and for measuring the wind profile in the near-storm environment. The United States Federal Government is in the process of deploying a national network of Doppler radars called Weather Surveillance Radar-1988 Doppler (WSR-88D) (Crum and Alberty, 1993). These radars are helping to enhance the warning skill of National Weather Service (NWS) offices (Polger, *et al.*, 1994).

Lightning detection networks are important for determining the initiation of thunderstorms, the location of thunderstorms (especially in mountainous terrain where radar beams can be blocked), and the time trend of lightning rate and polarity which often provide clues to the potential severity or stage of life cycle of a storm (Holle and Lopez, 1993; MacGorman, 1993).

Satellite data are important to observe the formation of thunderstorms, to ascertain the near-storm environment, and to understand certain characteristics about storms (Menzel and Purdom, 1994). Surface networks of meteorological instruments provide both an understanding of the near-surface environment and whether the network is dense enough, and of the capability to track surface features, such as synoptic fronts and gust fronts (Brock, *et al.*, 1995). Profilers, rawinsondes, and sensors on operational aircraft provide crucial pieces of information on the thermodynamic and wind structure of the atmosphere in the vertical.

## Decision support systems

The potential utility of the data from Doppler radars and other observational sensors is immense. However, at times it will be impossible for a meteorologist to assimilate all of

these data, especially in the short time available to make warning decisions. In order for meteorologists to make the best decisions possible, they must have easy interactive access to the data, but even more importantly, decision support systems need to be developed that provide information, in addition to data, to the forecaster.

One example of a prototype decision support system is the Severe Weather Warning Decision Support System (SWWDSS) developed at the National Severe Storms Laboratory. This SWWDSS is the combination of: (a) expert systems that analyse Doppler radar data and other meteorological data to diagnose storm structure and to detect severe weather signatures automatically; (b) innovative display capabilities that allow a meteorologist to access information and data rapidly; and (c) techniques to disseminate warnings rapidly (which will not be discussed in this paper). An example of the type of warning guidance information provided is "this storm has an 80 per cent chance of producing large hail in the next 30 minutes," or the "height of the storm core is falling rapidly".

#### *Automated severe weather detection and storm diagnosis*

To provide timely and highly location-specific warnings of severe weather, meteorologists have to integrate and assimilate large amounts of data from a number of sources. This warning decision process is an important area where artificial intelligence and expert system techniques can be used to help decision makers. We will discuss recent advances in the development of automated algorithms that ingest data from Doppler radars and other meteorological sensors, automatically detect signatures of storms in the data, and then provide both diagnostic and prognostic guidance information to meteorologists. These algorithms use image processing, artificial intelligence, expert system and other techniques to turn the data into meaningful information. Recently developed algorithms can take advantage of tremendous increases in computing technology, artificial intelligence and image processing techniques, and in our knowledge of severe storms and their signatures in observational data streams to provide this type of decision aid to meteorologists.

In this paper, five severe weather detection algorithms will be discussed: Storm Cell Identification and Tracking Algorithm, Hail Detection Algorithm, Mesocyclone Detection Algorithm, Tornado Detection Algorithm, and Downburst Prediction and Detection Algorithm. All of these algorithms were designed to detect severe weather phenomena automatically using mainly Doppler radar data as the input source. These algorithms also detect known precursors to the phenomena, and track the evolution of features associated with the phenomena. These five algorithms are not the only algorithms that have been developed in the meteorological community; they are discussed as examples of what can be done to help forecasters make decisions.

#### *The Storm Cell Identification and Tracking (SCIT) Algorithm*

Knowing the present location of convective storms, characteristics about the storms, and their movement is important information for a meteorologist whose job is to

provide the public severe weather warnings. The main purpose of the SCIT algorithm is to identify the location of storms, to track them over time, to forecast their movement, and to provide diagnostic information about the storms (Witt and Johnson, 1993). Figure 1 is an example of algorithm output during the time of a severe storm near Phoenix, Arizona (United States). The radar data come from the local WSR-88D. The algorithm output shows the present location of the centroid of the storm. The white dots the past track and the pink, cross-hairs the forecasted movement of the storm. In addition, the SCIT algorithm provides diagnostic information about a storm and the time trend of each of these parameters can be displayed. For example, it calculates the maximum reflectivity (related to the intensity of rain or hail) in the storm, the top and base of the storm, and other attributes of the storm that are important for meteorologists to analyse in real time to determine the likelihood that it will produce severe weather. These storm attributes can be seen in the table near the top of Figure 1. In addition, the SCIT algorithm saves the attributes so that the time trend of each of them can be displayed as in the example on the right side of Figure 1.

The SCIT algorithm also ingests data from the National Lightning Detection Network. Lightning detections are correlated with individual storm cells which allow the algorithm to analyse the lightning characteristics of individual storms and display them to users. Also, surface instrument data (surface measured winds and temperatures) and profiler (measures winds up to several kilometers above the ground) data are ingested, which allow the algorithm to determine the near-storm environment which is important for understanding a storm's potential to grow and/or decay.

#### *Hail Detection Algorithm*

In rare cases, hail stones exceed 10 centimetres in diameter. One recent example of the devastation that hail storms can produce was the storm that hit the Orlando, Florida (United States) area on 25 March 1992.

This storm produced hail with a diameter greater than 8 cm that caused extensive damage to homes, businesses, automobiles, and agriculture and which totalled over US\$ 600 million.

The NSSL-developed Hail Detection Algorithm (HDA) examines Doppler radar data in real time to determine the probability that a storm produces any size hail. It also determines the probability that the storm produces hail greater than 3/4 of an inch (~2 cm) in diameter (deemed severe by the U.S. National Weather Service). And finally, it estimates the maximum size of hail stones associated with a storm (Witt, 1990; Witt, 1993). Data from the Melbourne, Florida WSR-88D during the time of the Orlando hail storm illustrates the HDA output (Figure 2). In the table near the top of the display you can see that the HDA determined that there was 100 per cent probability that the storm was producing hail and severe hail and estimated the maximum size of the hail stones to be greater than 3 inches (8 cm). In fact, hail stones the size of baseballs (7 cm) were reported falling at this time. In addition, the trend windows on the left side of the figure show the trend of probability of hail, the probability of

severe hail, and the estimated maximum hail size over the previous hour. When this type of decision support system is made available to operational meteorologists, it will provide them with important information to use to warn the public of impending damaging hail storms.

#### *Mesocyclone Detection Algorithm*

A mesocyclone is a very strong circulation in a storm. Storms that have deep, persistent mesocyclones produce severe weather at the surface approximately 95 per cent of the time, and they are associated with tornadoes approximately 258 of the time. The NSSL-developed Mesocyclone Detection Algorithm (MDA) detects these strong circulations in thunderstorms and forecasts their movement out to 30 minutes. The algorithm also analyses the mesocyclone to display its strength of rotation, its depth, its diameter, and the time trend of each of these important parameters that meteorologists examine to try to determine whether severe thunderstorm or tornado warnings should be issued. Mesocyclone Detection Algorithm output overlayed on Doppler weather radar data from the Twin Lakes, Oklahoma (near Oklahoma City) WSR-88D during the time that two tornadoes occurred simultaneously shows the features of the MDA (Figure 3). In this case, the MDA has detected the parent circulations of these tornadoes which are indicated by the yellow circles. Meteorologists making warning decisions need a reliable algorithm that detects mesocyclones because it is an important tool to determine the severity of storms and to examine their potential to produce tornadoes.

#### *Tornado Detection Algorithm*

Tornadoes range from being only a few yards wide with relatively weak winds to nearly a mile wide with winds over  $100 \text{ m s}^{-1}$ . Tornadoic winds are the strongest winds produced by nature. Some tornadoes only stay on the ground for seconds, while others stay on the ground for over an hour and track tens of kilometers. Since winds from tornadoes do extensive damage, and can cause deaths, they are one of the most important weather phenomena that meteorologists can warn the public about.

The Tornado Detection Algorithm examines Doppler velocity data to detect signatures that indicate a tornado is present. The algorithm detects circulations in the Doppler velocity field and requires that the circulation signature has a certain depth and strength of rotation, which is a good discriminator between circulations that do produce tornadoes versus those that do not produce tornadoes (Vasiloff, 1993). A display of the Doppler radar reflectivity and velocity fields during the time that a large tornado was on the ground shows the Doppler velocity signature of this tornado (Figure 4). The triangle-shaped icon represents the detection of the signature by the Tornado Detection Algorithm. Being able to detect signatures of tornadoes and precursors to tornadoes automatically is a very important function that will improve future warnings.

#### *Downburst Prediction and Detection Algorithm*

Downbursts, often called microbursts when their diameter is <4 kilometers, produce deadly wind shears for aircraft

that penetrate them at low altitudes. In addition, some downbursts are strong enough to produce damaging winds at the surface (sometimes  $>50 \text{ m s}^{-1}$ ). Because of the short life-time of the phenomenon (often < 10 minutes), it is very difficult to warn the public and aviation concerned before it occurs unless precursors can be detected. Thus, it is an important opportunity for the application of artificial intelligence techniques. Algorithms have been developed to both detect and predict downbursts (e.g., Wolfson, *et al.*, 1995; Merritt, 1991; Eilts, *et al.*, 1994). An example of output of one of these algorithms, developed at NSSL, which is called the Damaging Downburst Prediction and Detection Algorithm (DDPDA), is shown in Figure 1. These data are from the Phoenix, Arizona WSR-88D approximately five minutes before this downburst produced damaging winds at the surface. The DDPDA examines the Doppler radar data looking for precursors to downbursts, such as a rapidly descending reflectivity core and convergence at mid-altitudes. Predictions of downbursts are made up to seven to 10 minutes in advance with some skill. The microburst prediction algorithm, developed at MIT/Lincoln Laboratory for the Federal Aviation Administration, uses integration of radar data with other data sources (to estimate the environment near the storm) to make predictions of microbursts for use in airport terminal operations (Figure 5; Wolfson, *et al.*, 1995).

#### *Interactive display system*

Because these new enhanced severe weather detection algorithms have the potential to provide an overwhelming amount of information to warning meteorologists, it is important to have a display capability that allows the meteorologists to call up any information they deem important very quickly. In addition, the display must always show the most important information, to give meteorologists a quick look at the most severe storms so that they can stay aware of the whole warning area, yet focus on one storm when they are making decisions about warnings for it.

One display capability that has been developed at NSSL to meet their meteorological research and development needs, meets both of these needs (Sanger, 1994). First of all, at the top of the display, a table of some very important severe storm parameters are shown for the five most severe storms within radar range (up to the top 100 can be observed by scrolling the table) (see Figure 1). In this table, all storms are weighted by their estimated severity, with the strongest at the top of the list. Parameters are colour coded by their potential to produce severe weather, thus, values that are colour coded red suggest severe weather may be occurring, yellow suggests the potential exists for severe weather, and green is a lesser threat. This gives a "heads up" to a busy meteorologist as to which storm should be examined more closely and what the main threat from the storm might be (e.g., tornadoes versus hail).

When the meteorologist selects a storm to examine, the display can be zoomed so that the storm of interest is the only one in the window, just by clicking on the storm ID number in the table. It can be overlaid with the local geopolitical boundaries, roads, etc. With an interactive

display such as this, a meteorologist can examine the Doppler velocity and reflectivity data in great detail and can use the mouse to click on the storm to bring up "trend windows" such as are shown in Figure 1. These trend windows allow the meteorologist to examine the growth/decay of this storm over the past hour. He/she can look at the trend of strength of circulation in the storm, the trend of the maximum hail size, the trend of lightning rates, etc. Potential users from the NWS who have seen this capability are excited about its potential utility in an operational warning situation, because it provides them with easy access to information they need in a concise and easily interpreted format.

Display capabilities that allow easy access to information, direct the meteorologist toward important information, and allow easy interactive visualization of the data are an important component of the warning decision process.

### SHORT-TERM PREDICTION OF SIGNIFICANT WEATHER

In order to be able to predict the initiation, movement and evolution of significant weather for the zero to two-hour time-frame, the enhancement of our present capability to observe the atmosphere, to model its evolution, and to integrate observations and models in a synergistic way needs to continue. At the present time, our skill at predicting significant weather often does not have enough accuracy so that the predictions are useful to the general public, aviation concerns, and public and private industry. Further research and development of numerical models, observational sensors, and techniques to combine models and observations are very important if we are to succeed in producing good short-term predictions. Three important areas where short-term prediction of significant weather can provide benefit to society are flash flood prediction; thunderstorm initiation, evolution and movement; and winter weather prediction (e.g., snow and icing conditions).

#### Numerical models

In order for numerical models to be used for very-short-term forecasting, it is imperative that we increase model spatial resolution which will allow us to predict on scales that are important for <2-hour predictions. It is also very unlikely that in the next decade we will be able to predict individual weather phenomena explicitly using numerical models. Instead, it is more likely that we will use both mesoscale (models with scale of a few hundreds of kilometers) and cloud-scale models as guidance tools for meteorologists. One method proposed is to use mesoscale models to produce six to 12-hour forecasts. Then, using output from this mesoscale model, cloud-scale models can be initiated in locations of developing or evolving interesting weather phenomena. The cloud-scale model would be run several times with a range of initial conditions that the forecaster would consider possible scenarios. In this way, the forecaster can determine how sensitive the development or evolution of the weather phenomena is to the initial conditions. This is particularly useful, if for example all runs of the model produce similar forecasts then the forecaster can be more confident in the forecast. If

the cloud-scale model output varies considerably based on the changing of one initial condition, for example, the shear in the environment, then the forecaster can focus on the evolution of shear in the environment as a critical forecast parameter (Brooks, *et al.*, 1991).

To be able to run models with very high resolution (<1 km grid spacing) in real time so that the forecast arrives before the verification time, it will take further increases in the speed of even the latest massively parallel computers, especially if a number of model runs are necessary to determine the sensitivity to initial conditions, as suggested above. In addition, these models will have to be able to ingest very high resolution data (e.g., Doppler radar data), to depict accurately the present weather scenario. The Center for Analysis and Prediction of Storms has developed such a model called the Advanced Regional Prediction System (Xue, *et al.*, 1995) and is able to run a 64 x 64 x 32 grid (1 km x 1 km x 0.5 km grid spacing) on a single processor of a Cray YMP-50 and sustain a rate of 180 megaflops. This equates to a one hour forecast taking approximately six minutes to run. The relationship between speed of computers and time to run models is depicted in Figure 6 (Droegemeier, *et al.*, 1995). The rapid increase in speed of computers in the past few years, and the projected increases in the future, lead us to believe that in the near future it will be possible to run these models in sufficient time. An example of the output of this model shows the high resolution output that results along with the changes in detail caused by changing the resolution of the model (Figure 7). With further advances in computing capabilities these type of models may become important tools for very short-term forecasting of thunderstorms, as well as many other atmospheric phenomena (Cotton, *et al.*, 1994).

#### The importance of integrating data and models to predict hazardous weather phenomena on the short term

It is very important to be able to integrate all possible observational data sources and numerical model output to predict the evolution and movement of weather phenomena for short time periods. Meteorologists need the capability to integrate data and visualize them, and also need a method to integrate the model output with observational data if they are going to have any success at these short-term predictions. As examples, we will discuss potential methods to produce flash flood predictions and thunderstorm initiation predictions, to show how important it is to integrate model and observational data.

#### Flash flood prediction

Flash floods cause millions of dollars of damage every year and many deaths and injuries. To be able to predict flash floods in a timely manner, a meteorologist needs to know how much rain either will fall (numerical models), or has already fallen (raingauge, radar estimates, and/or satellite estimates [Grody, 1991]) and at what rate. In addition, it is important to know how much of that rain will runoff (surface moisture data, hydrological runoff models) and how much runoff a given stream basin (or similar water reservoir) can handle before flooding occurs. To be able to predict flash floods reliably, not only do we need to



integrate meteorological and soil observational data, but also meteorological numerical models and hydrological models (Doswell, 1993a; Doswell, 1993b).

To show the utility of radar and raingauge networks in estimating rainfall and the need for integrating the two data sources, an example of a case is shown in Figure 8 from Phoenix, Arizona. On that particular day radar-based estimates of precipitation were between 0.2 and 0.9 inches and were fairly widespread. Most of the surface-measured rainfall also fell within that range of values, except for the raingauge located just to the southeast of the radar (radar is "KIWA" on Figure 8) which measured 2.66 inches of rain. It is likely that the radar algorithms underestimated the rainfall at this location due to the "cone of silence" near the radar. This case shows the extreme importance of integrating data to best represent and understand weather phenomena and their attendant precipitation.

### Thunderstorm initiation

Predicting the location and timing of the development of thunderstorms is a very difficult and complex task. Studies have shown that if the goal is to predict the location of the development of thunderstorms in the time-frame of five to 10 minutes there are clues in Doppler radar data that provide some skill, although the timing prediction is less accurate than the location prediction (Hondl and Eilts, 1994). One example of this is colliding boundaries that produce thunderstorms. These boundaries can be observed by Doppler radar and satellite, their movement can be discerned and the time of their collision can be predicted. However, to determine where along colliding boundaries storms may form and to gain valuable lead time, it is important to use satellite data, because satellites are the only operational data source with which we can observe visible clouds, which are indicative of developing thunderstorms (Wilson and Mueller, 1993). It is also very important to know the vertical thermal and moisture structure of the environment to ascertain whether storms are possible. These types of data are not presently available on the temporal and spatial scales necessary, except during special research projects (Mueller, *et al.*, 1993).

In addition, at ranges beyond 60–100 km from a radar, the radar beam is typically above the boundary layer, so convergence boundaries cannot be observed and thunderstorm initiation prediction will be much more difficult. Other difficulties in trying to predict thunderstorm initiation include: all storms do not form on boundary layer convergent boundaries, and once storms have developed their interaction and outflow can cause other storms to initiate on short-time scales, often with few radar observable signatures.

Research efforts at the National Center for Atmospheric Research have led to a nearly automated method of estimating the location of thunderstorm initiation for the next 30-minute period (Wilson and Mueller, 1993). Figure 9 shows an example of the automatic 30-minute prediction of where thunderstorms will be, along with the actual verification of the location. To be able to predict accurately thunderstorm development, evolution and movement requires further research, but our present skill does show some promise.

In order to predict reliably where, and possibly when, thunderstorm development may occur beyond 30 minutes in advance, cloud-scale or mesoscale models will have to be used. But as stated in the above section, it is likely that in the next decade or so models will not be able to predict thunderstorm initiation explicitly. Rather, they will only be valid as guidance tools for meteorologists to use.

### Data and model visualization for short-term prediction

For meteorologists to make very good and timely short-term predictions of significant weather, a display capability needs to be available to them that allows them to overlay model data on top of various observational data streams (e.g., satellite and radar data). It is also important to be able to loop through images so that the evolution and movement of weather phenomena are easily observed. The importance of easy interactive access to these data streams cannot be overstated. In the United States, display capabilities that meet these requirements are being developed and further enhanced. Two examples of this capability is the National Advanced Weather Information Processing System (N-AWIPS) (Figure 10; Olson, *et al.*, 1994), and the FX-ALPHA workstation (Bullock, *et al.*, 1994). These display capabilities have an easy, interactive human interface for letting an individual display satellite data, model output, radar data, surface data, and other data sources and overlay any of these fields on top of each other. This type of software/hardware display capability is a must for meteorologists who are trying to analyse all of the model and data sources available to make short-term predictions.

### CONCLUSIONS

To be able to provide timely and location specific very-short-term warnings and forecasts to the general public, aviation concerns, and private industry, it is important that we continue to provide meteorologists with improved observational tools, better decision support systems, better numerical models, and effective interactive display systems. Investment in all four areas—along with continued investment in research to enhance our understanding of weather processes and education and training of operational meteorologists both in basic meteorological knowledge and on the observational tools and displays at their disposal—will allow much improved forecasts and warnings which will ultimately save lives and reduce damage to public and private property.

### REFERENCES

- Brock, F. V., K. C. Crawford, R. L. Elliot, G. W. Cuperus, S. J. Stadler, H. L. Johnson and M. D. Eilts, 1995: The Oklahoma Mesonet: a technical overview. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in press.
- Brooks, H. E., C. A. Doswell III and R. A. Maddox, 1991: On the use of mesoscale and cloud-scale models in operational forecasting, *Weather and Forecasting*, Volume 7, pp. 120–132.

- Bullock, C. S. and U. H. Grote, 1994: FX-ALPHA: a new FSL workstation. *Preprints*, Tenth International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Nashville, Tennessee, American Meteorological Society, pp. 354–357.
- Cotton, W. R., G. Thompson and P. W. Mielke, Jr., 1994: Real-time mesoscale prediction on workstations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 75, Number 3, pp. 349–362.
- Crum, T. D. and R. L. Alberty, 1993: The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 74, Number 9, pp. 1669–1687.
- Doswell, C. A. III, 1993a: *Severe Convective Weather and Associated Disasters in North America*. Proceedings of the Workshop on Observations/Forecasting of Mesoscale Severe Weather and Technology of Reduction of Relevant Disasters, Tokyo, Japan, Science and Technology Agency, pp. 21–28.
- Doswell, C. A. III, 1993b: *Scientific Approaches for Very-short-range Forecasting of Severe Convective Storms in the United States of America*. Proceedings of the Workshop on Observations/Forecasting of Mesoscale Severe Weather and Technology of Reduction of Relevant Disasters, Tokyo, Japan, Science and Technology Agency, pp. 181–189.
- Droegemeier, K. K., M. Xue, K. Johnson, M. O'Keefe, A. Sawdey, G. Sabot, S. Wholey, N. T. Lin and K. Mill, 1995: Design and Implementation of a storm-scale numerical weather prediction model. In: *High Performance Computing*, Addison-Wesley, in press.
- Eilts, M. D., P. Spencer, J. Cordell, D. Fontenot, J. T. Johnson, 1994: *Damaging Winds Algorithm for the WSR-88D*. Informal publication available from the author at NSSL, 1313 Halley Circle, Norman, OK 73069, 20 pp.
- Grody, N. C., 1991: Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave/imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research*, Volume 96, pp. 7423–7435.
- Holle, R. L. and R. E. Lopez, 1993: *Overview of Real-time Lightning Detection Systems for Use by Meteorological Services*. Instruments and Observing Methods Report No. 51, WMO/TD-No. 570, WMO, Geneva, 77 pp.
- Hondl, K. D. and M. D. Eilts, 1994: Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning. *Monthly Weather Review*, Volume 122, Number 8, pp. 1818–1836.
- MacGorman, D. R., 1993: Lightning in tornadic storms: a review. The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards, American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 79, pp. 173–182.
- Menzel, W. P. and J. F. W. Purdom, 1994: Introducing GOES-I: the first of a new generation of geostationary operational environmental satellites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 75, Number 5, pp. 757–781.
- Merritt, M. W., 1991: *Microburst Divergence Detection for Terminal Doppler Weather Radar (TDWR)*. Massachusetts Institute of Technology/Lincoln Laboratory Project Report ATC-181, 164 pp.
- Mueller, C. K., J. W. Wilson and N. A. Crook, 1993: The utility of sounding and Mesonet data to nowcast thunderstorm initiation. *Weather and Forecasting*, Volume 8, Number 1, pp. 132–146.
- Olson, D., M. Eckert, L. Uccellini and J. Lynch, 1994: New Unit Provides Single Contact Point for Nowcasts, QPFs, Critical Path, Fall 1994. *National Weather Service Publication NWS-TPO-94-3*, available from the NWS, Silver Spring, MD, pp. 9–13.
- Polger, P. D., B. S. Goldsmith, R. C. Przywarty and J. R. Bocchieri, 1994: National Weather Service Warning Performance Based on the WSR-88D. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 75, Number 2, pp. 203–214.
- Sanger, S. S., 1994: An interactive Doppler radar and weather detection algorithm display system. *Preprints*, Tenth International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, American Meteorological Society, pp. 7–10.
- Vasiloff, S. V., 1993: Single-Doppler radar study of a variety of tornado types. The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards, American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 79, pp. 223–231.
- Wilson, J. W. and C. K. Mueller, 1993: Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. *Weather and Forecasting*, Volume 8, Number 1, pp. 113–131.
- Witt, A. W., 1990: A hail core aloft detection algorithm. *Preprints*, Sixteenth Conference on Severe Local Storms, Alberta, American Meteorological Society.
- Witt, A. W., 1993: Comparison of the Performance of Two Hail Detection Algorithms Using WSR-88D Data. *Preprints*, Twenty-sixth International Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society, pp. 154–156.
- Witt, A. W. and J. T. Johnson, 1993: An enhanced storm cell identification and tracking algorithm. *Preprints*, Twenty-sixth International Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society, pp. 141–143.
- Wolfson, M. M., R. L. Delanoy, B. E. Forman, R. G. Hallowell, M. L. Pawlak and P. D. Smith, 1995: Automated microburst wind shear prediction. *The Lincoln Laboratory Journal*, Volume 7, Number 2, in press.
- Xue, M., K. K. Droegemeier, V. Wong, A. Shapiro and K. Brewster, 1995: *Advanced Regional Prediction System User's Guide Version 4.0*, Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, 100 E. Boyd Street, Norman, Oklahoma, 73019, 243 pp.

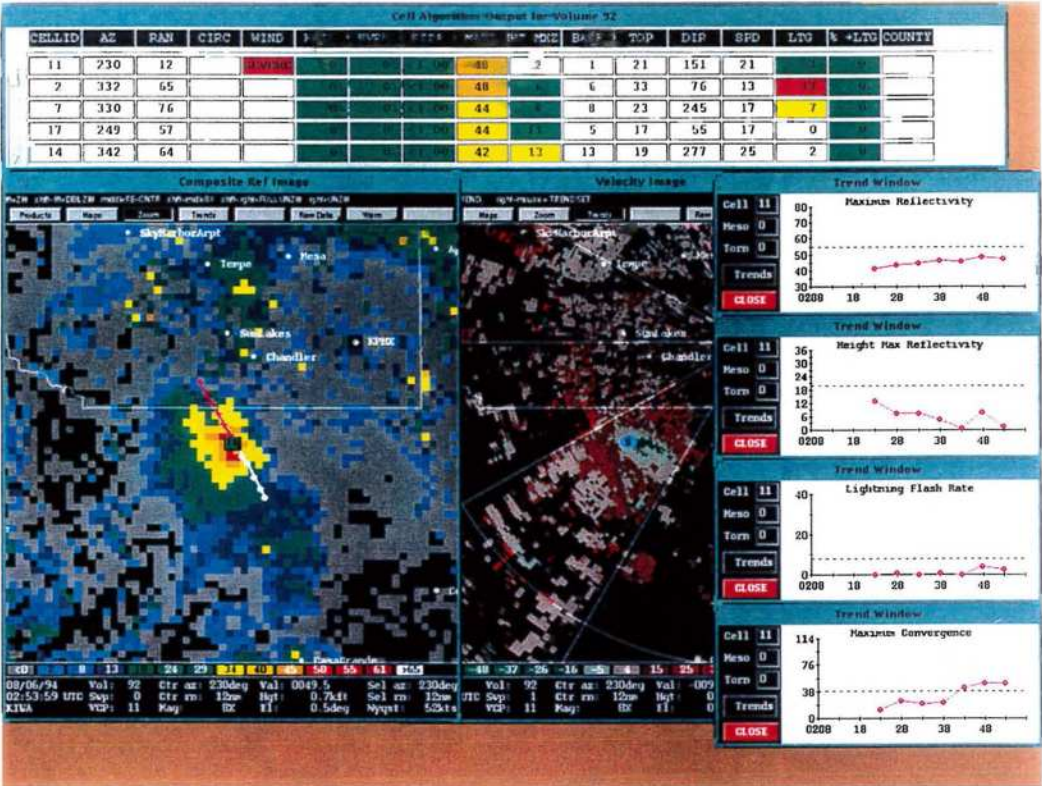


Figure 1 — Doppler radar reflectivity (left) and velocity (right) display from the WSR-88D near Phoenix, Arizona (KIWA) on 6 August 1994, 02:53 UTC. Data are colour-coded by the scale on the bottom. Negative velocities are towards the radar, positive away. The colour coded table at the top of the figure is a combination of algorithm output with storms weighted by their potential severity. The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm output has identified this storm (storm #11) and tracked it for 40 minutes, the connected white dots indicate the past track of the storm with each pink cross hair a forecast of future movement of the storm in five-minute intervals. Overlaid on the velocity field is a small blue ellipse with an "S" in it, indicating a severe downburst has been detected. The trend windows on the right side of the figure are trends over the past 40 minutes of certain storm parameters.

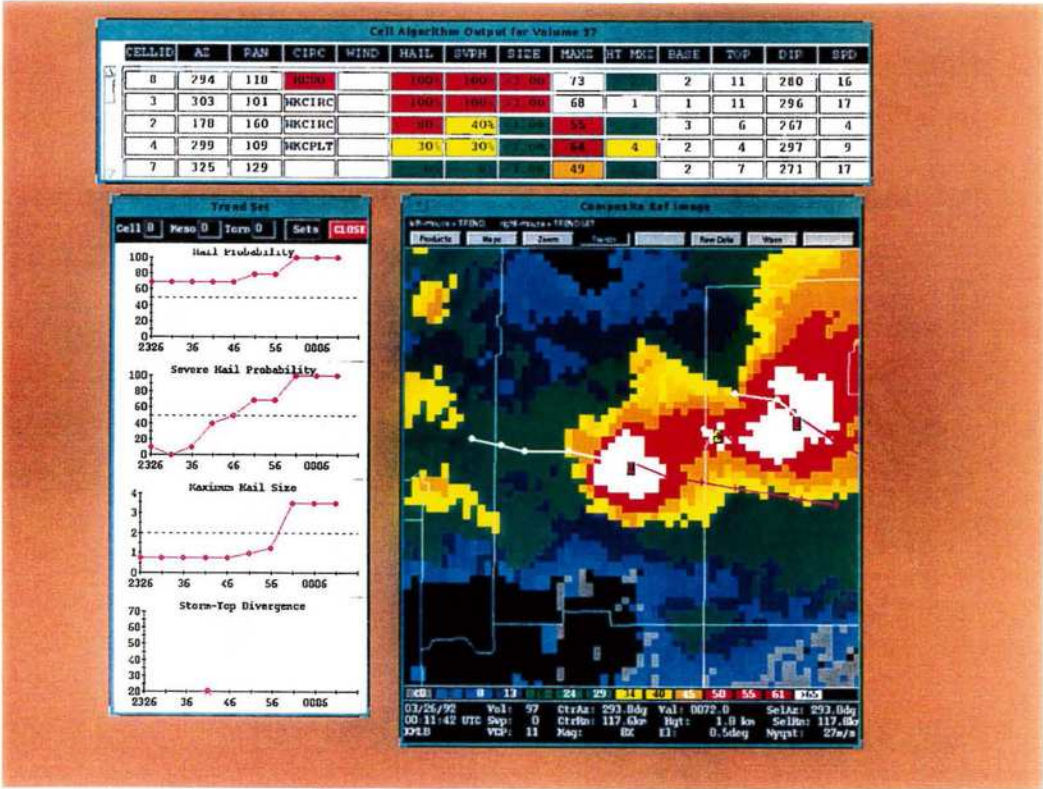


Figure 2 — Same as Figure 1 except for data from Melbourne, Florida WSR-88D (KMLB), 26 March 1992, 00:11 UTC. The "HAIR" column in the table represents Hail Detection Algorithm output probability of hail of any size (100 per cent for storm number 8 in the center of the display), the "SVRH" column represents the probability of severe hail (>3/4 inch diameter, 100 per cent for storm 8), and the "SIZE" column represents the maximum estimated hail stone in inches (> 3 inches for storm 8). This storm did US\$ 600 million of damage from near the time of this display to an hour later.





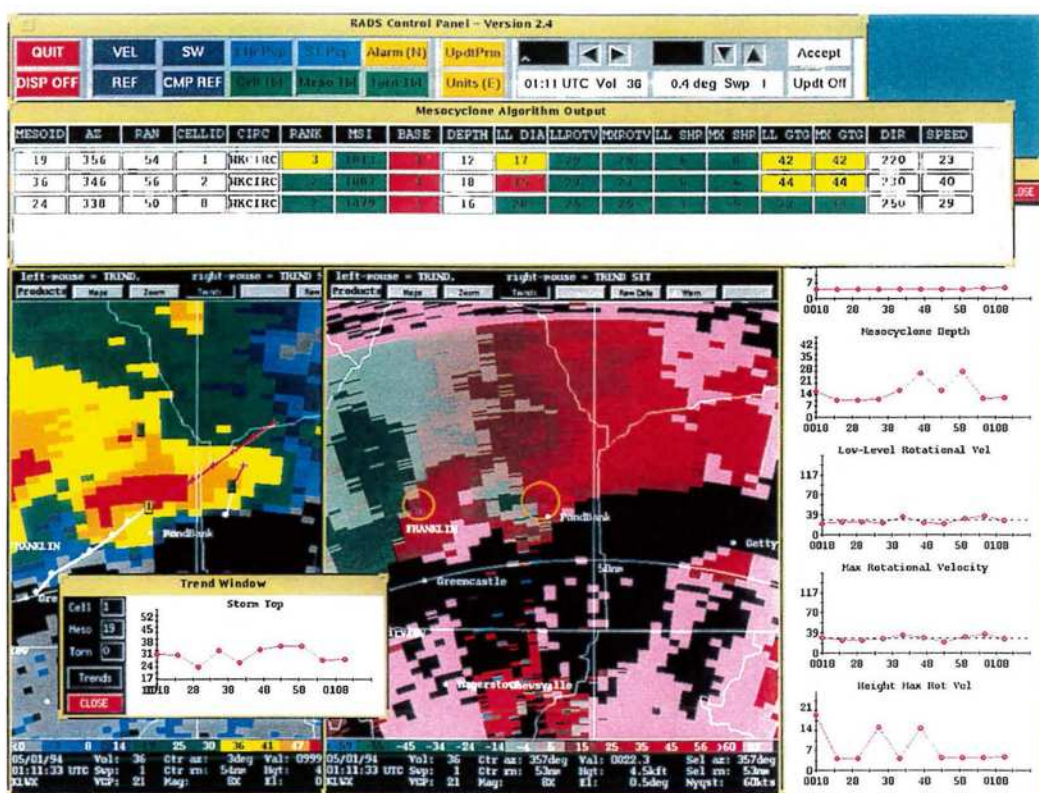


Figure 3 — Same as Figure 1 except for data from Sterling, Virginia WSR-88D (KLWX) on 1 May 1994, 01:11 UTC. Yellow circles represent detections of circulations by the Mesocyclone Detection Algorithm. This storm produced an F2 tornado that did damage in the town of Pond Bank. The table and trend windows in this figure show characteristics of circulations detected by the MDA.

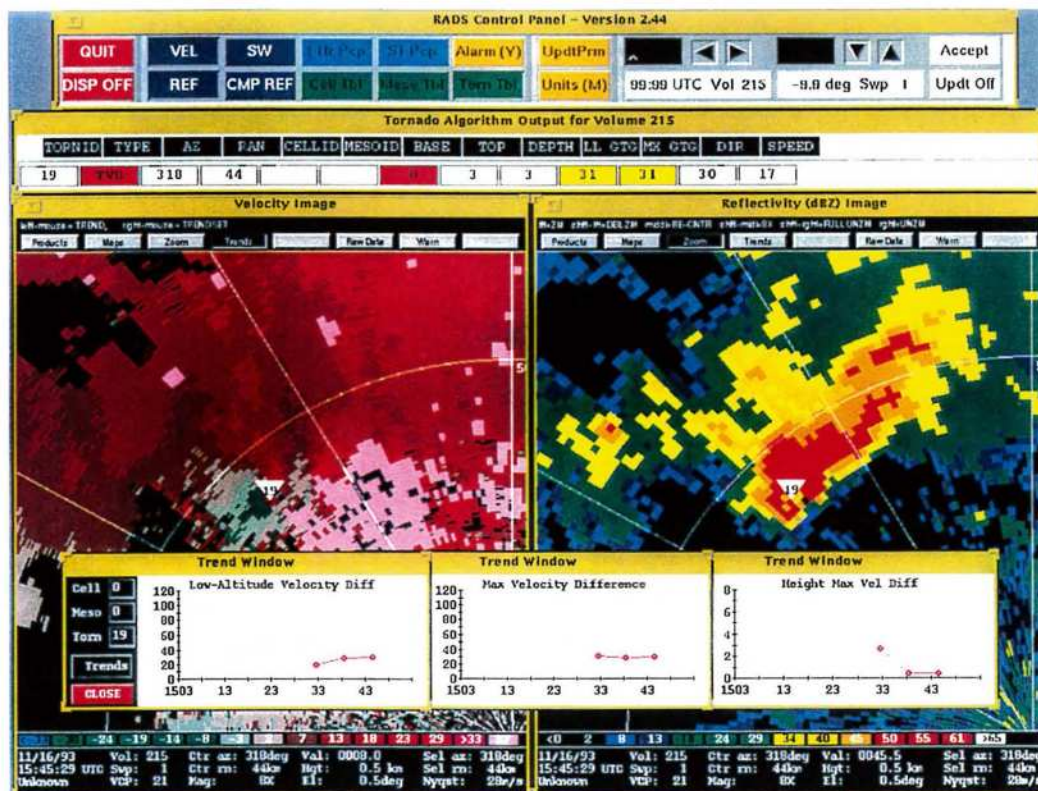


Figure 4 — Same as Figure 1 except for data from the WSR-88D near Houston, Texas on 16 November 1993, 15:45 UTC. The "white triangle" icon indicates the location of a detection by the Tornado Detection Algorithm. This circulation was associated with an F2 tornado. The table and trend windows in this figure show characteristics of the circulation detected by the TDA.



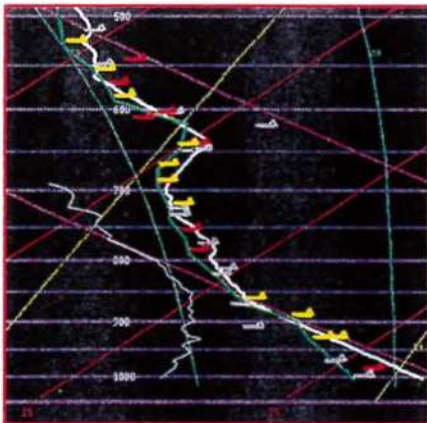


## OVERVIEW OF MICROBURST PREDICTION ALGORITHM

$$\text{VERTICAL ACCELERATION OF DOWNDRAFT} = \text{EVAPORATION + MELTING} + \text{WATER LOADING} + \text{PRESSURE FORCES}$$

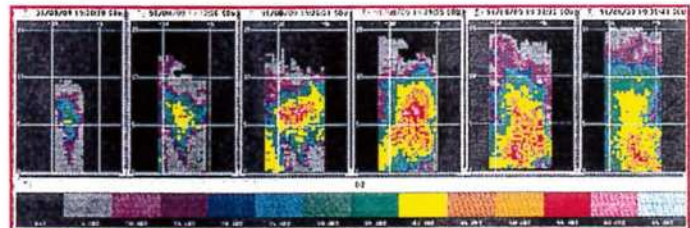
[RELATE TO OUTFLOW VIA CONTINUITY]

### ESTIMATION OF SOUNDING PARAMETERS



- USE MDCRS & ASOS & SA TEMPERATURE DATA
- DERIVE TIME & SPACE WEIGHTED PROFILE
- COMPUTE MEAN LAPSE RATE & FREEZING LEVEL

### DETECTION OF STORM GROWTH & DOWNDRAFT DEVELOPMENT



- LOOK FOR GROWTH (e.g., INCREASE IN VIL)
- LOOK FOR DOWNDRAFT (e.g., DROP IN CENTER OF MASS)
- ESTIMATE OUTFLOW STRENGTH USING SOUNDING
- ESTIMATE TIMING OF MICROBURST ONSET
- MAKE PREDICTIONS (MERGE W/ DETECTIONS FOR DISPLAY)
- RUN FEEDBACK (COMPARE DETECTIONS & PREDICTIONS)

Figure 5 — Schematic showing how the microburst prediction algorithm detects and predicts the location and timing of microbursts (from Wolfson, *et al.*, 1995).

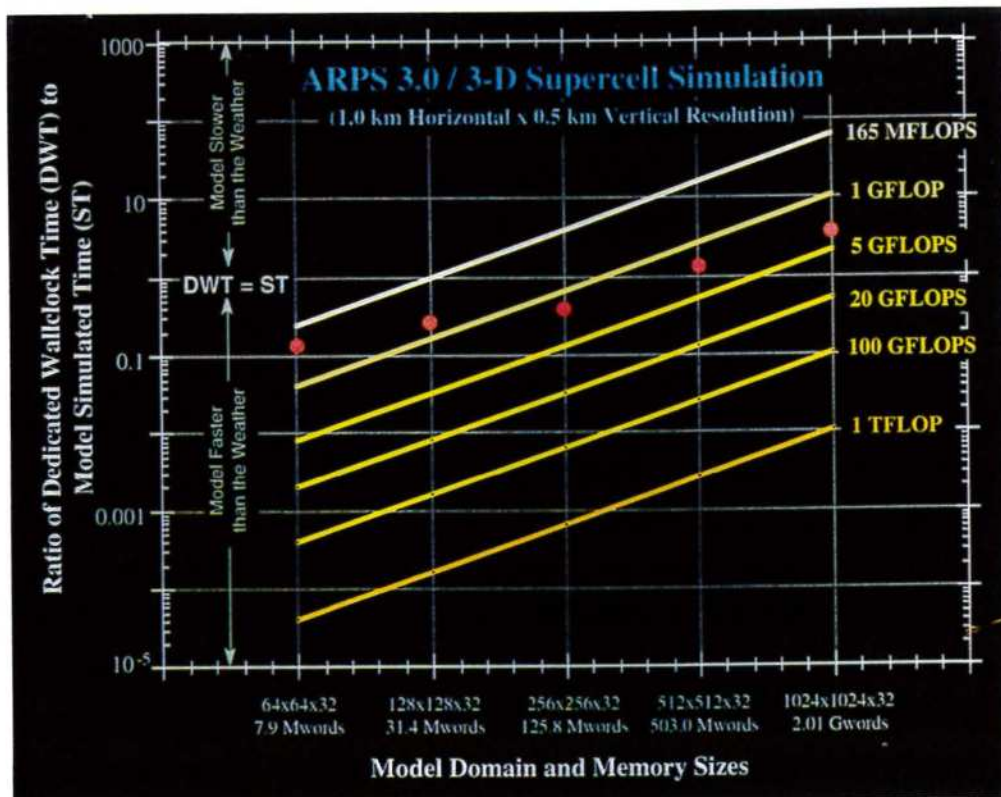


Figure 6 — Nomograph of the ratio of dedicated wallclock time to simulated time plotted against domain size for the Advanced Regional Prediction System numerical model version 3.0. The diagonal lines represent sustained model performance in megaflops, gigaflops, and teraflops. As an example using a grid size of 1024 x 1024 x 32 it will take a 100 gigaflop computer to run the model 10 times faster than wallclock time (from Droegemeier, *et al.*, 1995).





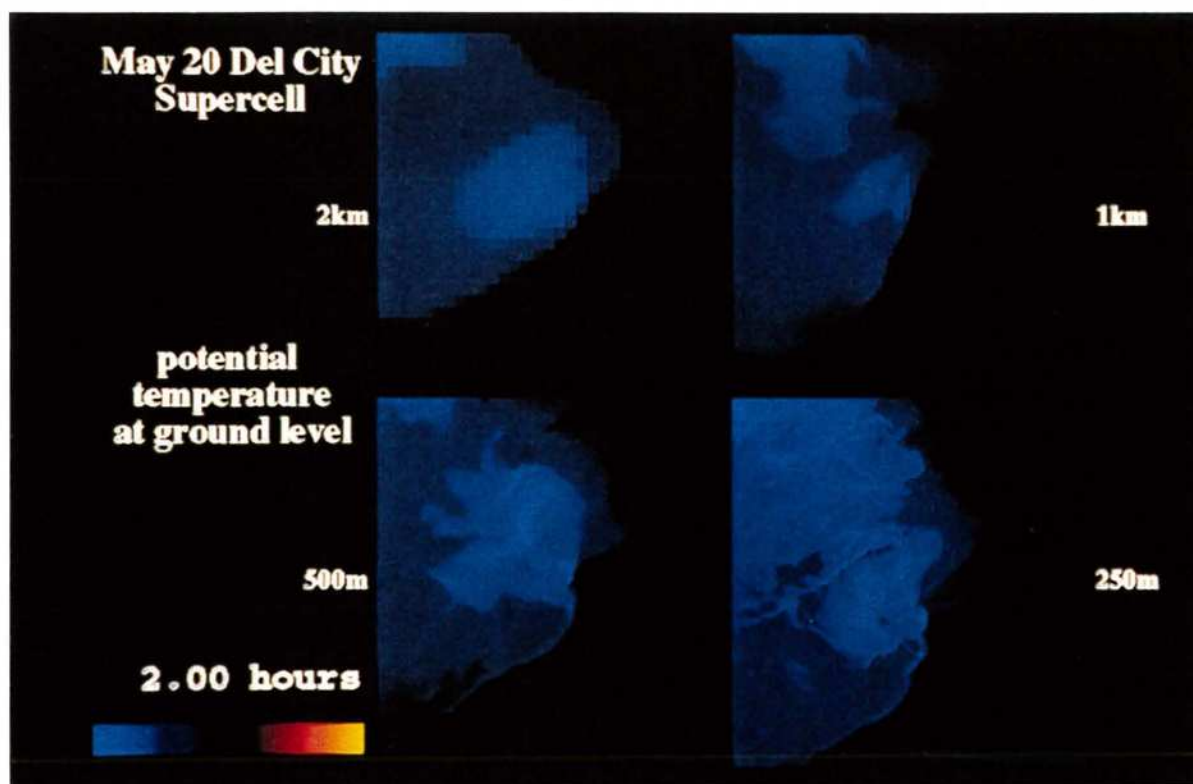


Figure 7 — Potential temperature at ground level from simulations using a cloud-scale numerical model and varying the grid resolution. Output is valid two hours from the beginning of the model run.

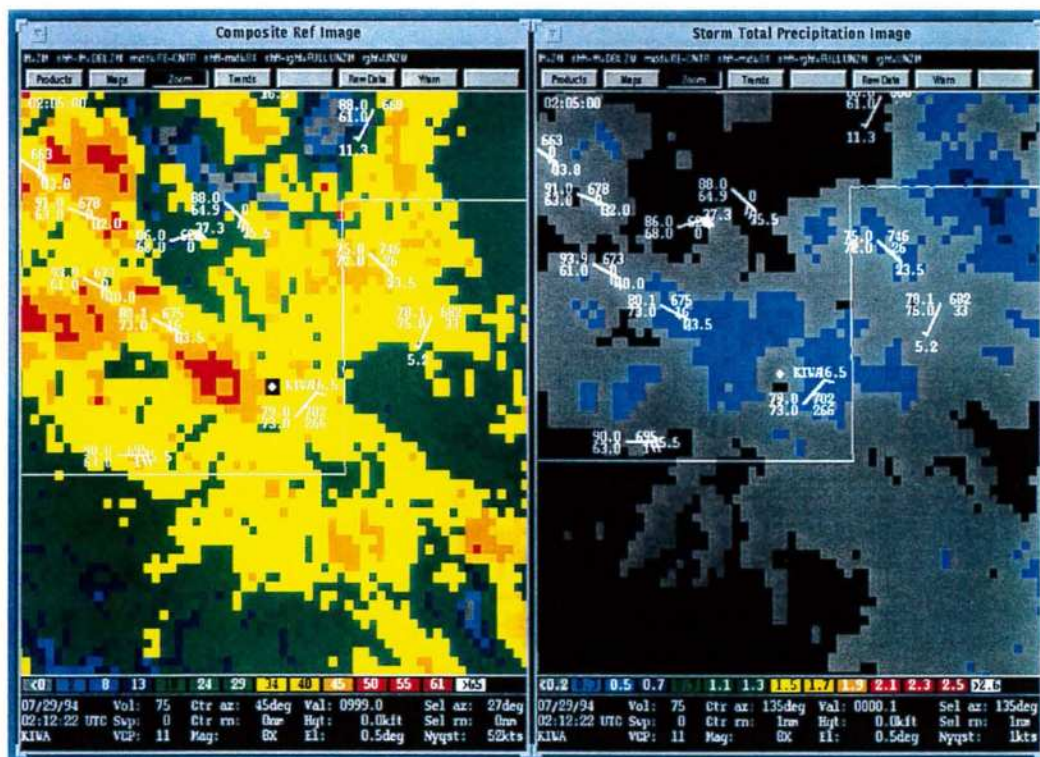


Figure 8 — Data from the Phoenix, Arizona WSR-88D on 29 July 1994 02:12 UTC. Reflectivity image is on the left, storm total precipitation image is on the right. Overlaid on the images are the parameters measured by the local surface mesonetwork. The flags indicate the direction from which the wind is blowing with the speed represented by a full wind barb for every 5 m s<sup>-1</sup>. The two numbers to the left of the wind flag indicate the temperature (on top) and dewpoint in degrees Fahrenheit. The two numbers to the right of the wind flag indicate altimeter setting in inches (on top) with the amount of precipitation in hundredths of an inch (on the bottom). Notice the surface site near the radar (KIWA) which has 2.66 inches of rainfall in a location where radar estimates are less than 0.5 inches. And also notice that the radar estimates fill in the gaps where the surface mesonetwork does not measure the precipitation. This figure shows the complementary nature of the two data sources for measuring rainfall.



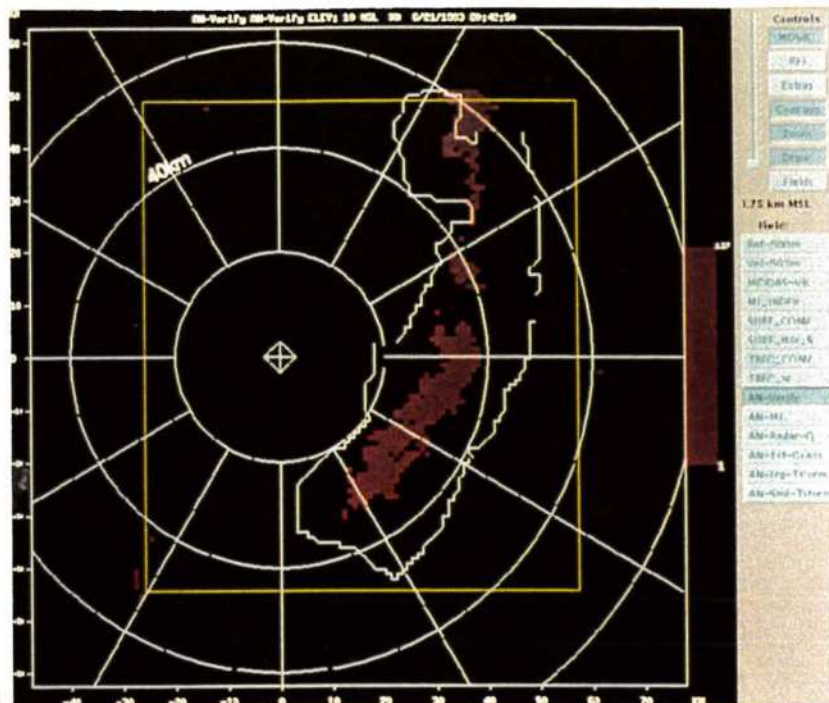


Figure 9 — Example of output of an automatic 30-minute Thunderstorm Forecast Algorithm. The area outlined by the white line is the automated forecast, while the verification of the forecast is the red area (Courtesy Jim Wilson, NCAR).

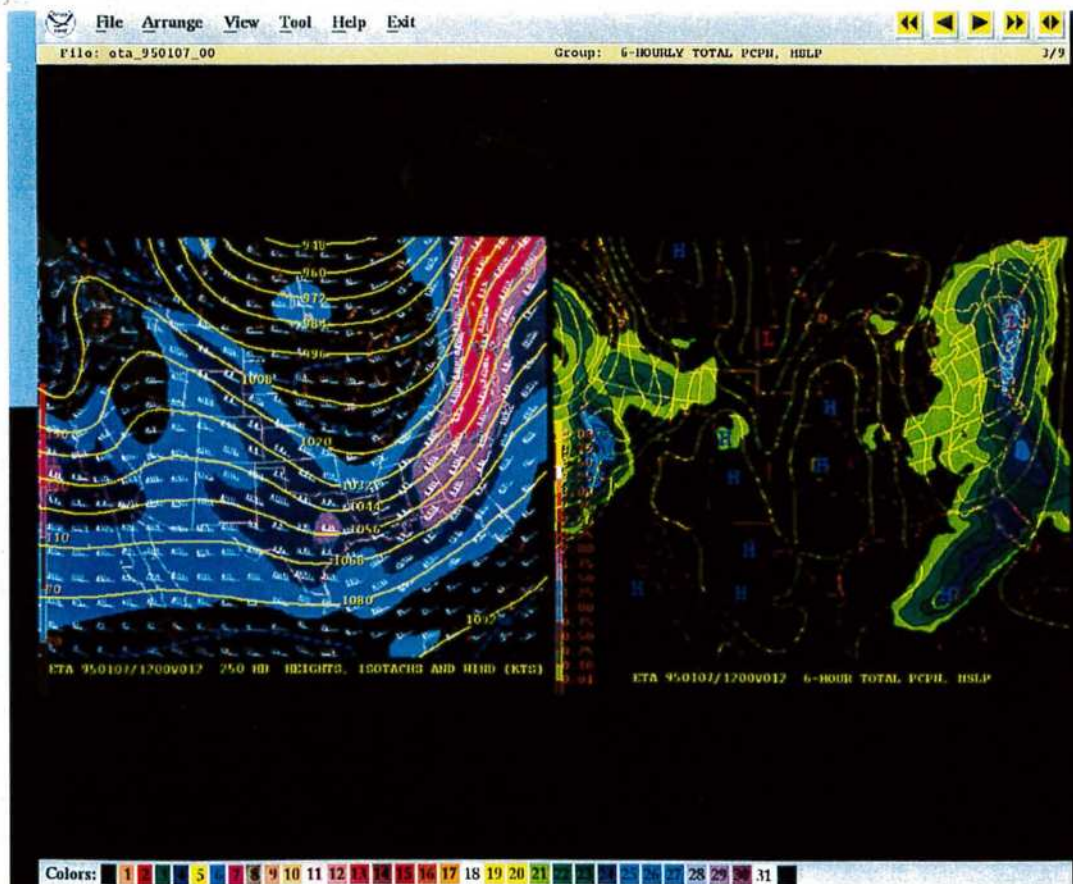


Figure 10 — Example of display from the N-AWIPS, showing how colours and other techniques allow overlaying of different fields which are important for a meteorologist to try to understand model output and observations.



# ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ: ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Профессор И. А. Шикломанов

Государственный гидрологический институт, С.-Петербург

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ: ПОНЯТИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА, ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Гидрологический цикл, или круговорот воды в системе атмосфера-гидросфера-литосфера, является одним из основных геофизических процессов на нашей планете, обеспечивающих относительную устойчивость природных условий и характеризующих распределение вод между сушей, океаном и атмосферой. Являясь наиболее ярким показателем единства природных вод на Земле, гидрологический цикл объективно обуславливает необходимость тесной взаимосвязи между науками (метеорология, океанология, гидрология и гидрогеология), изучающими его отдельные компоненты.

Очевидно, что проблема изучения круговорота воды чрезвычайно обширна и, как ученый, работающий в области гидрологии суши, в своей лекции я буду касаться главным образом тех аспектов гидрологического цикла, которые непосредственно связаны с формированием речного стока и его изменениями под влиянием естественных факторов и хозяйственной деятельности. На мой взгляд, именно эти аспекты и прежде всего взаимодействие поверхностных и подземных вод в различных условиях требуют особенно тщательного изучения с применением всего современного арсенала методических подходов и технических средств.

План лекции предусматривает представление и обсуждение материалов по глобальному и континентальному гидрологическому циклу, по изменениям гидрологического цикла в пределах речных водосборов; особо я предполагаю остановиться на некоторых проблемах, связанных с экспериментальным изучением гидрологического цикла.

Такой план обусловлен тем, что гидрологи обычно рассматривают гидрологический цикл для различных пространственных и временных масштабов: для Земли в целом, океанов, континентов, крупных природно-экономических районов: для больших и малых речных бассейнов; за многолетний период и за конкретные годы или сезоны.

Говоря об устойчивости гидрологического цикла, мы всегда имеем ввиду, что равновесие между отдельными его компонентами имеет место только в пределах определенного, достаточно ограниченного в историческом масштабе промежутка времени. За более длительные периоды — в течение сотен и даже десятков лет отдельные компоненты гидрологического цикла могут испытывать значительные изменения, обусловленные как естественными, так и антропогенными

факторами, что приводит к соответствующему изменению климатических и гидрологических условий. При этом масштабы и характер изменений гидрологического цикла в значительной мере зависят от размера территории, для которой он определяется: чем больше территория, тем более устойчивы естественные соотношения между отдельными компонентами гидрологического цикла и тем менее они подвержены влиянию хозяйственной деятельности человека.

На рисунке 1 показана схема глобального гидрологического цикла с основными численными показателями его компонентов, которые были определены российскими гидрометеорологами в 70-х годах (Мировой водный баланс, 1974). Отвечающие этой схеме элементарные уравнения многолетнего водного баланса для различных по масштабам территорий обычно представляются гидрологами в следующем виде:

— для Земли в целом:

$$P = P_o + P_e' + P_e'' = E_o + E_e' + E_e'' = E \quad (1)$$

— для океанов:

$$E_o = P_o + R = P_o + R_s + R_{un} \quad (2)$$

— для областей внешнего стока и речных бассейнов

$$P_e' = E_e' + R_s + R_{un} \quad (3)$$

— для замкнутых (внутренних) площадей

$$P_e'' = E_e'' \quad (4)$$

В уравнении (1-4):

$P, P_o, P_e', P_e''$  — осадки соответственно для Земли в целом, для океанов, областей внешнего и внутреннего стока;

$E, E_o, E_e', E_e''$  — испарение для Земли в целом, для океанов, областей внешнего и внутреннего стока;

$R, R_s, R_{un}$  — сток суммарный, поверхностный и подземный.

Приведенные уравнения справедливы для стационарных условий при допущении, что приход воды из космоса уравновешивается поступлением водяного пара в космос, а приток глубоких ювинильных вод компенсируется затратами воды на гидротацию.

Для анализа изменений компонентов гидрологического цикла весьма важно понятие коэффициента влагооборота, представленного в виде:

$$K_C = \frac{P}{P_{ad}} = \frac{P_{ad} + P_E}{P_{ad}}$$

где:  $K_C$  — коэффициент влагооборота;  $P$  — общие

осадки;  $P_{ад}$  — адвективные осадки, образованные за счет водяного пара, принесенного извне;  $P_E$  — местные осадки, образованные за счет испарения на рассматриваемой территории.

Очевидно, что коэффициент влагооборота должен иметь достаточно хорошую зависимость от площади рассматриваемой территории: при площадях менее 500–1000 тыс. км<sup>2</sup>  $K_C \approx 1$ , для площадей более 1 млн. км<sup>2</sup>  $K_C > 1$ , достигая, например, для Африки  $K_C \approx 1,42$ , для Евразии  $K_C \approx 1,65$  (Калинин Г. П., 1968, Мировой водный баланс .... 1974).

Анализируя приведенные уравнения (1-5) и приближенные численные характеристики их компонентов, показанные на схеме (рисунок 1), можно сделать некоторые общие (качественные) выводы в отношении возможностей воздействия человека на те или иные компоненты гидрологического цикла:

- поскольку осадки на суше в основном обусловлены переносом влаги, испарившейся с океана, непосредственно воздействуя на речной сток и испарение с суши, человек может влиять на осадки лишь в очень ограниченных масштабах;
- антропогенные изменения испарения с океана (например в результате его загрязнения, покрытия масляной пленкой и т.п.) могут весьма сильно сказаться на осадках и стоке с суши;
- интенсивное хозяйственное использование вод в бессточных областях не может заметно повлиять на их общий водный баланс и характеристики глобального влагооборота;
- воздействие человека на глобальные климатические характеристики (суммарные осадки, температура воздуха, испарение) могут особенно сильно сказаться на водных ресурсах континентов, регионов и речных бассейнов.

Применительно к антропогенным изменениям речного стока в различных пространственных масштабах, важно отметить следующие обстоятельства:

- для земного шара в целом никакие воздействия человека на сток не могут изменить общее уравнение глобального водного баланса;
- для океанов, в водном балансе которых речной сток играет весьма малую роль (за исключением, пожалуй, Северного Ледовитого океана), изменения его под влиянием хозяйственной деятельности, даже самые значительные, не могут существенно сказаться на водном балансе;
- для континентов и крупных природно-экономических регионов, для которых коэффициент влагооборота  $K_C > 1$ , при оценке антропогенных изменений стока необходимо учитывать возможные дополнительные осадки, обусловленные увеличением испарения за счет хозяйственной деятельности и формирующие дополнительные водные ресурсы, в какой-то степени компенсирующие водопотребление;
- для отдельных районов и речных бассейнов с площадями 500–1000 тыс. км<sup>2</sup> ( $K_C \approx 1$ ) и замкнутым водным балансом увеличение испарения за счет хозяйственной деятельности непосредственно приводит к уменьшению суммарного речного стока; в то же

время факторы хозяйственной деятельности, способствующие перераспределению поверхностной и подземной составляющих речного стока, не могут привести к уменьшению суммарных водных ресурсов;

— для малых районов и речных бассейнов, где речная сеть не дренирует подземные воды, не только антропогенные изменения испарения в бассейне и изъятия воды из речной сети, но и перевод поверхностного стока в подземный приводят к изменению суммарного стока и гидрологического режима в замыкающих створах. В таких бассейнах вообще возможно полное прекращение стока под влиянием хозяйственной деятельности.

Остановимся более детально на некоторых проблемах изучения и оценки количественных характеристик гидрологического цикла и их динамики в глобальном и континентальном масштабах, а также для речных водосборов, имея в виду в первую очередь компоненты, связанные со стоком рек и ресурсами пресных вод.

## ГЛОБАЛЬНЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Количественные характеристики глобального гидрологического цикла оценивались многими исследователями, начиная с конца прошлого столетия. Среди исследований, выполненных в последние десятилетия, следует отметить работы Будыко (1963), Нейса (1967), Калинин (1968), Львовича (1974), ГТИ, Мировой водный баланс (1974), Баумгартнера и Рейзеля (1975) Национального Совета по научным исследованиям США (1986), Бернера и Бернера (1987). Наиболее детальные оценки всех основных компонентов гидрологического цикла приводятся в работах российских ученых, выполненных в ГТИ под руководством В. И. Корзуна и А. А. Соколова (Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли, 1974), а также в монографии немецких ученых А. Баумгартнера и Е. Рейзеля. Сравнение этих данных с величинами, опубликованными в последние годы в США (Национальный совет научных исследований, 1986), показывает весьма значительные различия в оценках (таблица 1). Это свидетельствует, к сожалению, об ограниченности наших знаний даже в отношении глобальных характеристик гидрологического цикла и требует проведения дополнительных исследований. Особенно велики различия в запасах пресных вод на Земле, что связано с большими трудностями их определения с использованием ввиду недостаточности исходных данных косвенных методов.

Роль отдельных компонентов гидрологического цикла в круговороте воды на Земле зависит не только от величины запасов, но и в неменьшей степени от периода их полного возобновления (таблица 2), который колеблется в очень широких пределах — от нескольких часов (биологическая вода) до нескольких тысячелетий (ледники) и даже десятков тысячелетий (подземные льды). В соответствии с приведенными данными атмосферная влага в среднем возобновляется каждые 8 дней, запасы воды в реках мира — в течение

Таблица 1 — Главные компоненты глобального гидрологического цикла в км<sup>3</sup> по различным источникам

| Виды вод                     | Национальный Совет по научным исследованиям США, 1986 г. | ГТИ. Мировой водный баланс, 1974 г. | Германия. Баушартнер и Рейхель, 1975 г. |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| Содержание воды в атмосфере  | 15500                                                    | 12900                               | 13000                                   |
| над сушей                    | 4500                                                     | 3100                                | —                                       |
| над морями                   | 11000                                                    | 9800                                | —                                       |
| Осадки (годовые) над сушей   | 107000                                                   | 119000                              | 111000                                  |
| над морями                   | 398000                                                   | 458000                              | 385000                                  |
| Испарение и транспирация     | 508000                                                   | 577000                              | —                                       |
| в год с суши                 | 71000                                                    | 72000                               | 71400                                   |
| с моря                       | 434000                                                   | 505000                              | 424700                                  |
| Запасы воды на суше          | 59000000                                                 | 47565210                            | 36020000                                |
| снег и лед                   | 43400000                                                 | 24064100                            | 27820000                                |
| поверхностные воды           | 360000                                                   | 189990                              | 225000                                  |
| подземные воды               | 15300000                                                 | 23400000                            | 8062200                                 |
| Биологическая вода           | 2000                                                     | 1120                                | —                                       |
| Речной сток в океан, годовой | 36000                                                    | 47000=44700+2200                    | 39700                                   |
| Запасы воды в океане         | 1400000000                                               | 1338000000                          | 1348000000                              |

16 дней, в озерах — в течение 17 лет, полное возобновление океанских вод происходит приблизительно за 2500 лет (Мировой водный баланс, 1974).

Одним из главных компонентов гидрологического цикла, оказывающих огромное влияние на состояние жизни на Земле и экономическое развитие человеческого общества, является речной сток, имеющий наиболее широкое распространение и достаточно высокую скорость полного возобновления. Оценки суммарного годового стока рек мира, опубликованные за последние 30 лет и приведенные в таблице 3, колеблются в пределах от 36000 до 44700 км<sup>3</sup>. Наиболее детальные оценки, полученные в ГТИ в 1993–94 гг. с использованием данных наблюдений по более чем 2000 гидрологическим створам на всех континентах, (расположение основных станций показано на карте, рисунок 6) дают величину порядка 42500 км<sup>3</sup> в год.

Речной сток поступает в океан крайне неравномерно, что можно продемонстрировать данными,

представленными на рисунке 2, полученными по последним оценкам ГТИ. В районе экватора в зоне от 10° северной до 10° южной широты поступает в океан в среднем около 40% всего речного стока. На наш взгляд, эти данные за отдельные годы или сезоны, полученные по материалам наблюдений, могут представлять большой интерес для специалистов, разрабатывающих модели циркуляции воды в океане.

Компоненты глобального гидрологического цикла достаточно устойчивы, однако все же не постоянны во времени, если рассматривать периоды 50–100 и более лет. Об этом, в частности, свидетельствует продолжающийся вот уже более 100 лет постепенный подъем уровня мирового океана (рисунок 3б). Суммарная величина подъема за этот период составила 12–14 см, причем наиболее интенсивный прирост наблюдается в последние 30 лет. Ведущиеся во многих странах исследования пока не дают однозначного ответа на вопрос о причинах повышения уровня океана, хотя большинство исследователей

Таблица 2 — Периоды полного возобновления водных ресурсов на Земле (Мировой водный баланс .... 1974)

| Виды вод                                    | Период возобновления |
|---------------------------------------------|----------------------|
| Мировой океан                               | 2500 лет             |
| Подземные воды                              | 1400 лет             |
| Почвенная влага                             | 1 год                |
| Полярные льдины и постоянный снежный покров | 9700 лет             |
| Бюрые ледники                               | 1600 лет             |
| Подземный лед зоны вечной мерзлоты          | 10 000 лет           |
| Запасы воды в озерах                        | 17 лет               |
| Воды болот                                  | 5 лет                |
| Вода в руслах рек                           | 16 дней              |
| Биологическая вода                          | Несколько часов      |
| Атмосферная влага                           | 8 дней               |



Таблица 3 — Суммарный речной сток в мировой океан по данным различных авторов (км<sup>3</sup>/год)

| Автор                      | Гг   | Речной сток, км <sup>3</sup> /год |
|----------------------------|------|-----------------------------------|
| Нейс                       | 1967 | 39600                             |
| Львович                    | 1974 | 38900                             |
| ГТИ. Мировой водный баланс | 1974 | 44500                             |
| Баумгартнер и Рейхель      | 1975 | 37700                             |
| Бернер и Бернер            | 1987 | 37400                             |
| Мировые ресурсы            | 1992 | 40790                             |
| ГТИ                        | 1994 | 42700                             |

связывают это явление с повышением глобальной температуры воздуха (рисунок 3а). Например, еще в 1974 г. Г. П. Калинин и Р. К. Клите была получена достаточно надежная ( $r = 0,94$ ) прямая зависимость между уровнем мирового океана и изменением средней глобальной температуры воздуха с запаздыванием в 19 лет (рисунок 3б), которая в общем неплохо подтверждается и данными за последние десятилетия. Однако физически объяснить это не так просто, и роль отдельных факторов, влияющих на уровень мирового океана при глобальном потеплении, далеко не очевидна и требует дальнейших тщательных исследований. Так, в обобщениях МГЭИК (Climat Change. The IPCC Scientific Acc. 1990) принимается, что примерно 40% всего повышения уровня за последние 100 лет происходило за счет термического расширения, еще 40% — за счет более интенсивного таяния горных материковых ледников и 20% — за счет уменьшения ледяного покрова Гренландии. По моему мнению, вторая причина весьма сомнительна, поскольку никак не подтверждается данными наблюдений над стоком рек мира: за последние 50 лет суммарный сток рек мира не имеет заметной тенденции к увеличению (рисунок 3г), как это должно было бы иметь место при более интенсивном таянии ледников в бассейнах рек.

Мало того, скорее следует ожидать в последние десятилетия уменьшения речного стока в мире за счет интенсификации хозяйственной деятельности человека и, в частности, роста водопотребления.

Выполненные в ГТИ исследования динамики водопотребления в мире (Shiklomanov, 1991) на различные хозяйственные нужды за 1900–2000 гг. показали (Шикломанов и Маркова, 1987), что наиболее интенсивный рост водопотребления имел место, начиная с 50-х годов текущего столетия (рисунок 4, табл. 4). Если с 1900 по 1950 гг. прирост годового водопотребления в мире составил всего 780 км<sup>3</sup>, то за 10 лет (с 1951 по 1960) — 630 км<sup>3</sup>, т.е. интенсивность прироста увеличилась более чем в 4 раза. В последующие годы прирост водопотребления еще более увеличивался и составлял в целом по земному шару 700–1000 км<sup>3</sup> за каждые 10 лет. В 1990 г. суммарное водопотребление в мире составило 4100 км<sup>3</sup> в год (примерно 10% от годового стока рек). При этом 65% полного и 87% безвозвратного водопотребления в мире забирает сельское хозяйство (главным образом орошение); примерно 60% общего мирового водопотребления и около 70% безвозвратных потерь воды приходится на Азию, где

располагаются основные орошаемые земли. Таким образом уже в настоящее время потребление пресных вод начинает оказывать заметное воздействие на компоненты глобального гидрологического цикла, в перспективе ближайших десятилетий это влияние еще более усилится, и изучение этих процессов представляет собой серьезную научную проблему.

Говоря о возможных в перспективе изменениях глобального гидрологического цикла, нельзя не коснуться проблем, связанных с антропогенным потеплением климата, обусловленным ростом концентрации в атмосфере CO<sub>2</sub> и других «парниковых» газов. Эти проблемы особенно беспокоят гидрологов, поскольку водные системы суши очень чувствительны даже к незначительным изменениям климатических характеристик и немедленно, без задержки на них реагируют. Естественно, что для оценки компонентов глобального гидрологического цикла на перспективу, так же как и для планирования использования водных ресурсов, крайне необходимо учитывать возможные антропогенные изменения глобального климата. Однако здесь мы непосредственно сталкиваемся с проблемами надежности и достоверности прогнозирования климатических изменений, или с так называемыми климатическими сценариями будущего, от которых главным образом и зависят получаемые выводы. Последнее нетрудно показать, сравнивая результаты оценок изменений будущих климатических характеристик и суммарного речного стока для характерных регионов мира, используя сценарии, полученные по лучшим моделям общей циркуляции атмосферы и по палеоклиматическим аналогам. На рисунке 5 показаны взятые из отчета МГЭИК (Climat Change. The IPCC Scientific Acc. 1990) крупные регионы мира, и для каждого из них определены изменения климатических характеристик по трем моделям общей циркуляции атмосферы (данные МГЭИК) и по последним прогнозам проф. М. И. Будыко (ГТИ), основанным на палеоклиматических аналогах (таблица 5). На основании этих климатических данных для каждого региона по одной и той же методологии ГТИ рассчитаны возможные изменения суммарного речного стока (последние графы таблицы 5).

Нетрудно заметить, что для большинства регионов выводы различаются не только по величине, но и по направленности процессов возможных

Таблица 4 — Динамика суммарного водопотребления в мире различными водопотребителями

| Водопотребитель                        | Годы |      |      |      |      |      |                      |                      |      |      |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|----------------------|----------------------|------|------|
|                                        | 1990 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1975 | 1980                 | 1990                 | 2000 | %    |
|                                        |      |      |      |      |      |      | км <sup>3</sup> /год | км <sup>3</sup> /год |      | %    |
| Сельское хозяйство                     | 525  | 892  | 1130 | 1550 | 1830 | 2050 | 2290                 | 2680                 | 3250 | 52,6 |
| Промышленность                         | 409  | 679  | 859  | 1180 | 1400 | 1570 | 1730                 | 2050                 | 2500 | 36,2 |
| Коммунальное водопотребление           | 37,2 | 124  | 178  | 330  | 540  | 612  | 710                  | 973                  | 1280 | 24,7 |
| Водоохлаждение                         | 3,5  | 9,7  | 14,5 | 24,9 | 38,5 | 47,2 | 61,9                 | 88,5                 | 117  | 4,0  |
| Водоохлаждение                         | 16,1 | 36,3 | 52,0 | 82,0 | 130  | 161  | 200                  | 300                  | 441  | 8,5  |
| Водоохлаждение                         | 4,0  | 9,0  | 14   | 20,3 | 29,2 | 34,3 | 41,1                 | 52,4                 | 64,5 | 2,2  |
| Водоохлаждение                         | 0,3  | 3,7  | 6,5  | 23,0 | 66,0 | 103  | 120                  | 170                  | 220  | 4,2  |
| Водоохлаждение                         | 0,3  | 3,7  | 6,5  | 23,0 | 66,0 | 103  | 120                  | 170                  | 220  | 7,6  |
| Суммарное водопотребление (округленно) | 572  | 1080 | 1360 | 1990 | 2520 | 2930 | 3320                 | 4130                 | 5190 | 100  |
|                                        | 417  | 701  | 894  | 1250 | 1540 | 1760 | 1950                 | 2360                 | 2900 | 100  |

Примечание. В числителе — суммарное водопотребление; в знаменателе — безвозвратное водопотребление.

изменений, т.е. оценки на будущее имеют очень большую неопределенность и во многом зависят от принятого сценария.

Следует отметить, что сценарий, основанный на палеоклиматических данных, дает весьма оптимистическую картину резкого увеличения при глобальном потеплении годовых осадков в районах недостаточного увлажнения, что не коррелируется со сценариями, основанными на моделях общей циркуляции атмосферы при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$ . В связи с приведенными в таблице 5 данными, по моему мнению, главная современная проблема оценки возможных изменений глобального гидрологического цикла, которая стоит перед гидрометеорологами мира — разработка для различных регионов Земли надежных прогнозов характеристик будущего климата, прежде всего осадков и температуры воздуха.

### ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА В КОНТИНЕНТАЛЬНОМ МАСШТАБЕ

Величины компонентов гидрологического цикла для территории континентов приводятся в работах различных авторов за последние 30 лет. Наиболее полные и детальные оценки представлены в двух уже упомянутых выше капитальных монографиях, опубликованных примерно 20 лет назад российскими (Мировой водный баланс ...1974) и немецкими (Баумгартнер и Рейхель, 1975) учеными. До настоящего времени эти данные широко используются в мире как наиболее надежные. Однако сравнение их (таблица 6) показывает весьма пессимистическую картину — различия по отдельным континентам достигают 17-20% для осадков и 32-40% для речного стока. Эти различия объясняются главным образом способами учета поправок к измеренным осадкам и методами оценки величин речного стока — в российских исследованиях суммарный речной сток определяется непосредственно по данным наблюдений на гидрологических станциях, в немецких — косвенным путем по разности величин осадков и испарения. Последний подход, естественно, дает большие погрешности в районах недостаточного увлажнения.

Следует отметить, что наиболее надежные данные по речному стоку с континентов (средние и по годам с 1920 по 1985 гг.) получены в ГТИ в 1994 г. с использованием материалов наблюдений для большого количества станций (от 200 до 600 для отдельных континентов). Они отличаются от российских данных 1974 на величины от 1 до 10 (таблица 7).

Для оценки влияния хозяйственной деятельности на гидрологический цикл континентов с использованием большого количества исходных данных по многим старым мира и косвенных методов расчета выполнено исследование динамики за текущее столетие водопотребления на орошение, сельскохозяйственные и промышленно-коммунальные нужды, а также затрат воды на дополнительное истощение с водохранилищ. В результате исследования для каждого континента получены величины полного и безвозвратного

Таблица 5 — Антропогенные изменения глобального климата и суммарного речного стока для характерных регионов мира (различные сценарии на 2020—2030 гг.)

| Регион                 | № | Сценарии | Т°С  |      | $\Delta R_{\text{реч}}$<br>% или мм | $\Delta R_{\text{доп}}$ |     |
|------------------------|---|----------|------|------|-------------------------------------|-------------------------|-----|
|                        |   |          | зима | лето |                                     | мм                      | %   |
| Центр Северной Америки | 1 | ГТИ      | 3    | 2    | 50 мм                               | 26                      | 10  |
|                        |   | CCC      | 4    | 2    | -2,5%                               | -43                     | -17 |
|                        |   | GFDL     | 2    | 2    | 10%                                 | 28                      | 11  |
|                        |   | ИКМО     | 4    | 3    | 0                                   | -40                     | -16 |
| Юго-Восточная Азия     | 2 | ГТИ      | 0,5  | 0    | 200 мм                              | 140                     | 16  |
|                        |   | CCC      | 1    | 1    | 0                                   | 12                      | 1,5 |
|                        |   | GFDL     | 2    | 1    | 5,0%                                | 31                      | 4   |
|                        |   | ИКМО     | 2    | 2    | 15%                                 | 118                     | 14  |
| Сахель                 | 3 | ГТИ      | 0    | 0    | 250 мм                              | 20                      | 62  |
|                        |   | CCC      | 2    | 2    | -5,0%                               | -10                     | -31 |
|                        |   | GFDL     | 1    | 1    | 0                                   | -1,0                    | -3  |
|                        |   | ИКМО     | 2    | 1    | 0                                   | -5,0                    | -16 |
| Южная Европа           | 4 | ГТИ      | 2    | 1    | 170 мм                              | 60                      | 23  |
|                        |   | CCC      | 2    | 2    | -10%                                | -80                     | -31 |
|                        |   | GFDL     | 2    | 2    | 5,0%                                | -29                     | -11 |
|                        |   | ИКМО     | 2    | 3    | -7,5%                               | -75                     | -29 |
| Австралия              | 5 | ГТИ      | 0    | 1    | 210 мм                              | 26                      | 54  |
|                        |   | CCC      | 1    | 2    | 7,5%                                | -2,0                    | -4  |
|                        |   | GFDL     | 2    | 2    | 2,5%                                | -2,0                    | -4  |
|                        |   | ИКМО     | 2    | 2    | 5,0%                                | -1,0                    | -2  |

водопотребления. Последние представляют наибольший интерес для анализа изменений компонентов гидрологического цикла. Для континентов, где коэффициент влагооборота  $K_C > 1$ , величины безвозвратного водопотребления на хозяйственные нужды могут привести к изменению всех основных компонентов гидрологического цикла: осадков, испарения, речного стока. Действительно, если учесть, что безвозвратное водопотребление по существу представляет собой дополнительное испарение, то, согласно общей теории влагооборота, последнее будет способствовать некоторому увеличению осадков, что для отдельных континентов может в значительной степени компенсировать затраты речного стока на хозяйственные нужды. Приближенные оценки этого эффекта для всех континентов, выполненные в ГТИ с использованием метода, разработанного проф. О. А. Дроздовым, приведены в таблице 8. Согласно этим оценкам, в результате водопотребления на хозяйственные нужды увеличение суммарных осадков в Европе, Азии и Северной Америке составит на уровень 2000 г. от 65 до 116% от соответствующих величин безвозвратного водопотребления. Дополнительный сток при этом составит от 17 до 34% суммарного безвозвратного водопотребления, т.е. компенсация затрат воды на хозяйственные нужды будет весьма значительной. Что же касается величин изменений основных компонентов гидрологического цикла, то они не столь существенны: увеличение годовых осадков составляет по континентам от 0 до 4%, уменьшение годового стока от 1 до 10%.

Для оценки возможных изменений гидрологического цикла на более отдаленную перспективу в первую очередь необходимо учитывать антропогенные изменения глобального климата; сценарии этих

изменений, полученные различными современными методами, как уже указывалось выше, весьма разноречивы, поэтому в настоящее время какие-то достаточно достоверные оценки по континентам получить невозможно. Тем не менее, чтобы судить о порядке величин, о которых может идти речь, в ГТИ были выполнены (Шикломанов, Бабкин, 1992) приближенные расчеты возможных изменений осадков и речного стока континентов при глобальном потеплении на 1 и 2°С по палеоклиматическому сценарию проф. М. И. Будыко, результаты которых приведены в таблице 9. Как следует из таблицы при потеплении на 1°С изменение средних по континентам осадков составит от 5 до 20%; изменение годового стока рек от 75 (Европа) до 22% (Азия). Выше упоминалось, что этот сценарий дает очень оптимистический прогноз значительного увеличения осадков в районах недостаточного увлажнения практически всех континентов, который не подтверждается сценариями, базирующимися на моделях общей циркуляции атмосферы.

Помимо континентов, анализ элементов гидрологического цикла был выполнен для 26 крупных природно-экономических регионов мира (от двух до восьми в пределах каждого континента), имеющих сходные физико-географические условия и экономическое развитие (Shiklomanov, 1990). Схема расположения регионов показана на рисунке 6. Для каждого региона были определены основные гидроклиматические характеристики и динамика хозяйственного использования пресных вод, которые изменяются в очень больших пределах: сток — от 17

Таблица 6 — Сравнение элементов водного баланса для континентов, представленных в работах «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» (Россия) и «Мировой водный баланс» (Германия)

|                                 | Бразилия | Азия | Африка | Австралия | Северная Америка | Южная Америка | Антарктида | В среднем для суши | Глобально |
|---------------------------------|----------|------|--------|-----------|------------------|---------------|------------|--------------------|-----------|
| Осадки (Р, мм)                  |          |      |        |           |                  |               |            |                    |           |
| Россия (без поправки)           | 637      | 670  | 702    | 766       | 635              | 1503          |            |                    | 1130      |
| Россия (с поправкой)            | 789      | 742  | 742    | 791       | 736              | 1597          | 177        | 800                |           |
| Германия                        | 657      | 696  | 696    | 803       | 645              | 1564          | 169        | 746                | 973       |
| Разница в %                     | +20      | +7   | +7     | -2        | +17              | +2            | +5         | +7                 | +16       |
| Испарение (Е, мм)               |          |      |        |           |                  |               |            |                    |           |
| Россия                          | 470      | 414  | 533    | 491       | 418              | 850           | 0          | 463                | 1130      |
| Германия                        | 373      | 420  | 582    | 534       | 403              | 946           | 28         | 480                | 973       |
| Разница в %                     | +25      | -1   | -8     | -8        | +4               | -10           |            | -4                 | +16       |
| Сток (R, мм: R <sub>0</sub> -E) |          |      |        |           |                  |               |            |                    |           |
| Россия                          | 306      | 332  | 151    | 267       | 339              | 661           | 165        | 315                | 0         |
| Германия                        | 282      | 276  | 114    | 269       | 242              | 618           | 141        | 266                | 0         |
| Разница в %                     | +8       | +20  | +32    | -1        | +40              | +7            | +17        | +18                | 0         |
| Нехватка водного баланса, мм    | +13      | -4   | +58    | +33       | -1               | +86           | +12        | +22                | 0         |
| % от осадков                    | 2        | 0,5  | 8      | 4         | 0                | 5             | 7          | 3                  |           |
| % от стока                      | 4        | 1,5  | 40     | 13        | 0                | 13            | 8          | 7                  |           |

до 1500 мм, использование его на хозяйственные нужды от 1 до 75%. На схеме (рисунок 6) для каждого региона приведена величина суммарного речного стока (в км<sup>3</sup>/год), процент использования вод, как отношение общего водопотребления к суммарному стоку. Здесь же показаны основные гидрологические станции, которые использованы в ГГИ для оценки величин речного стока.

Анализ полученных данных (Шикломанов, 1988) позволил установить приведенные на рисунке 7 надежные зависимости стока и удельного (на одного жителя) безвозвратного водопотребления от интегрального климатического показателя — индекса сухости, выраженного в виде  $\frac{R_0}{L \cdot P}$  ( $R_0$  — радиационный баланс,  $P$  — осадки,  $L$  — удельная теплота испарения). При этом с увеличением индекса сухости средняя величина речного стока уменьшается, а удельное водопотребление увеличивается. Именно эти обстоятельства объясняют два важных вывода в отношении водообеспеченности и водопотребления в мире:

— постоянно растущий дефицит водных ресурсов во многих регионах мира;

— в условиях интенсивной хозяйственной деятельности влияние климатических факторов на водообеспеченность не ослабевает, а наоборот увеличивается, особенно в районах недостаточного увлажнения; они определяют не только величину естественного речного стока, но и в значительной мере степень его уменьшения за счет деятельности человека.

Для оценки влияния водопотребления на компоненты гидрологического цикла крупных природно-экономических регионов, имеющих площади от 2 до 9 млн. км<sup>2</sup>, так же как и для континентов, необходимо учитывать возможность некоторого увеличения осадков за счет дополнительного испарения при хозяйственном использовании (Шикломанов, 1989) вод. Приблизженные оценки, выполненные для регионов мира с развитым орошением и приведенные в таблице 10, показали, что к концу столетия здесь величины безвозвратного водопотребления на 10–40% могут быть компенсированы стоком, сформированным дополнительными осадками. Тем не менее в некоторых из этих регионов развитие орошения будет способствовать уменьшению суммарного речного стока до 20–30 и даже 75%.

Все приведенные данные получены для условий стационарного климата. Исследования показывают (Шикломанов, Линз, 1991), что регионы с недостаточным увлажнением очень чувствительны даже к весьма незначительным изменениям климатических характеристик, обусловленным прогнозируемым глобальным потеплением. Повышение температуры воздуха на 1°–2°С и уменьшение осадков на 10% могут привести здесь к уменьшению годового или сезонного стока до 40–70%. Для аридных и семиаридных регионов проблема учета влияния возможного глобального потепления на речной сток и водопотребление стоит особенно остро.

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ В ПРЕДЕЛАХ РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ: РОЛЬ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Речные водосборы — основной объект исследований гидрологии суши, естественно поэтому, что гидрологический цикл для речных водосборов принято считать наиболее изученным. Особенно это касается естественных колебаний его компонентов: осадков, испарения, стока и др. При наличии длительных рядов наблюдений для их оценки широко применяются методы теории вероятности и математической статистики, при недостаточности или отсутствии данных используются методы аналогии, различного рода модели и эмпирические формулы.

Более сложна проблема влияния антропогенных факторов на гидрологический цикл речных водосборов, на чем я и хотел бы остановиться подробнее на основании результатов комплексных исследований, полученных в ГТИ за последние 20 лет для территории бывшего СССР.

Исследовалось влияние на гидрологический цикл следующих факторов хозяйственной деятельности: орошения и осушения, водохранилищ и прудов, агротехнических мероприятий, вырубки и посадки леса, промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водоснабжения; был собран огромный материал по динамике хозяйственного освоения водосборов за прошлые годы и планы на будущее, разработан комплекс методов и математических моделей для оценки влияния антропогенных факторов на годовой, сезонный и месячный сток рек, расположенных в различных физико-географических условиях. Отметим, что применительно к речным водосборам, для которых коэффициент влагооборота, влияние антропогенных факторов сказывается на изменении испарения и стока, его поверхностной и подземной составляющей; величины осадков при этом не претерпевают заметных изменений.

На рисунке 8 показана динамика уменьшения годового стока крупных рек бывшего СССР за счет комплекса факторов хозяйственной деятельности с 1936 по 2000 гг. (Шикломанов, 1989). Это реки, водные ресурсы которых наиболее интенсивно используются на хозяйственные нужды, уменьшение стока дано в км<sup>3</sup> в год. Согласно приведенным данным, на уровень 1990 г. годовой сток ряда крупных рек бывшего СССР, расположенных в районах интенсивного хозяйственного использования, уменьшился за счет комплекса антропогенных факторов до

20–40% (Волга — на 8%); уменьшение стока Сырдарьи и Амударьи, впадающих в Аральское море, достигло 85–90%. Для большинства крупных рек основным фактором, способствующим уменьшению стока, является орошаемое земледелие, вторая по значимости роль принадлежит сооружению и эксплуатации водохранилищ.

Исследования показали, что воздействие антропогенных факторов на гидрологический цикл в значительной степени зависит от метеорологических условий в бассейне. В жаркие сухие годы, когда естественные величины стока минимальны, увеличение испарения и уменьшение стока под влиянием хозяйственной деятельности особенно велико. Например, для бассейна крупнейшей реки Европы Волги, как показано в таблице 11, затраты стока на хозяйственные нужды в сухие и жаркие годы примерно в два раза больше, чем во влажные и холодные.

Указанное обстоятельство имеет огромное практическое значение при перспективном планировании водообеспечения экономики. Оценка величин возможных изменений стока для разной климатической ситуации и хозяйственной деятельности осуществляется с использованием математических моделей формирования и использования стока в бассейнах крупных рек. В частности, такая наиболее детальная модель разработана для бассейна р. Волги, с использованием которой получено возможное изменение месячного стока реки за счет хозяйственной деятельности на уровень 2000 г. в условиях очень сухого жаркого и влажного холодного годов. В качестве модели последних принята метеорологическая ситуация в бассейне 1972 г. и в 1974 г. Результаты расчетов антропогенных изменений стока представлены на рисунке 9; они очень четко показывают роль метеословий в изменениях стока за счет хозяйственной деятельности, особенно это касается развития орошения и испарения с водохранилищ.

Исследования показали, что для бассейнов южных рек, сток которых формируется в горной зоне, а используется главным образом на орошение и непродуктивное испарение на равнинах и низменностях с жарким, сухим климатом, развитие хозяйственной деятельности может весьма сложным образом воздействовать на гидрологический цикл, не приводя весьма продолжительное время к уменьшению речного стока в замыкающем створе. Показательный пример в этом отношении — бассейны рек Амударьи и Сырдарьи, впадающих в бессточное Аральское море (Шикломанов, 1988). На рисунке 10 представлена динамика гидрологических характеристик и хозяйственной

Таблица 7 — Суммарный речной сток с континентов по данным различных авторов (в мм слоя)

| Автор                            | Европа | Азия | Африка | Сев. Америка | Юж. Америка | Австралия и Океания |
|----------------------------------|--------|------|--------|--------------|-------------|---------------------|
| Львович, 1969                    | 300    | 286  | 139    | 265          | 445         | 218                 |
| Львович, 1972                    | 319    | 293  | 139    | 275          | 583         | 226                 |
| ГТИ «Мировой водный баланс»      | 283    | 324  | 153    | 339          | 661         | 280                 |
| Баумгартнер и Рейхель, 1975      | 282    | 276  | 114    | 242          | 617         | 269                 |
| Мировые ресурсы, 1992            | 312    | 324  | 126    | 326          | 588         | 263                 |
| Предварительные данные ГТИ, 1994 | 276    | 312  | 138    | 322          | 664         | 267                 |

Таблица 8 — Возможные изменения к 2000 г. осадков и стока континентов за счет хозяйственной деятельности

| Континент           | Средний год.<br>сток<br>$\bar{R}$ , км <sup>3</sup> | Средние годовые<br>осадки, $P$ , км <sup>3</sup> | Безвозвратное<br>водопотребление<br>$U_{\text{вкз}}$ , км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | Дополнительные                                    |                                                   | $\frac{\Delta R}{U_{\text{вкз}}} \cdot 100\%$ | Изменения                                               |                                  |
|---------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                     |                                                     |                                                  |                                                                                          | осадки                                            | сток                                              |                                               | стока                                                   | осадков                          |
|                     |                                                     |                                                  |                                                                                          | $\Delta P$ ,<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | $\Delta R$ ,<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> |                                               | $\frac{U_{\text{вкз}} - \Delta R}{\bar{R}} \cdot 100\%$ | $\frac{\Delta P}{P} \cdot 100\%$ |
| Европа              | 3210                                                | 8290                                             | 222                                                                                      | 173                                               | 55                                                | 24,8                                          | -5,2                                                    | 2,1                              |
| Азия                | 14410                                               | 32240                                            | 2020                                                                                     | 1320                                              | 512                                               | 25,3                                          | -10,4                                                   | 4,1                              |
| Африка              | 4750                                                | 22350                                            | 211                                                                                      | 245                                               | 36                                                | 17,1                                          | -3,7                                                    | 1,1                              |
| Сев. Америка        | 8200                                                | 18300                                            | 302                                                                                      | 338                                               | 104                                               | 34,4                                          | -2,4                                                    | 1,3                              |
| Южн. Америка        | 11760                                               | 28400                                            | 116                                                                                      | 0,0                                               | 0,0                                               | 0,0                                           | -1,0                                                    | 0                                |
| Австралия и Океания | 2390                                                | 7080                                             | 22                                                                                       | 0,0                                               | 0,0                                               | 0,0                                           | -0,9                                                    | 0                                |

Таблица 9 — Приближенные оценки ожидаемых изменений речного стока с континентов при глобальном потеплении на 1° и 2° С (наисоциалистический сценарий М. Н. Будыко)

| Континент           | Средний годовой сток<br>$\bar{R}$ , км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | Изменения осадков, мм |     | Изменения температуры, °С |     | Изменения среднего годового стока |                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----|---------------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                     |                                                                       | 1°                    | 2°  | 1°                        | 2°  | %                                 | км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> |
|                     |                                                                       |                       |     |                           |     |                                   |                                   |
| Европа              | 3210                                                                  | 40                    | 130 | 2,3                       | 3,2 | -6,6/ -210                        | 9,1/ 290                          |
| Азия                | 14400                                                                 | 120                   | 170 | 1,1                       | 2,2 | 22/ 3170                          | 37/ 5330                          |
| Сев. Америка        | 8200                                                                  | 50                    | 120 | 1,4                       | 3,5 | -3,0/ -250                        | -4,0/ -330                        |
| Южн. Америка        | 11800                                                                 | 150                   | 180 | 0,6                       | 0,8 | 13/ 1530                          | 12/ 1420                          |
| Африка              | 4570                                                                  | 170                   | 170 | 0,1                       | 0,5 | 20/ 910                           | 19/ 870                           |
| Австралия и Океания | 2390                                                                  | 125                   | 220 | 0,3                       | 0,6 | 10/ 240                           | 18/ 430                           |
| Всего в мире        | 44540                                                                 |                       |     |                           |     | 12/ 5400                          | 18/ 8000                          |



Таблица 10 — Ожидаемые к 2000 г. антропогенные изменения речного стока для регионов мира с разным орошением

| Регион                            | Площадь<br>млн. км <sup>2</sup> | Годовой<br>сток,<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | Орошаемая<br>площадь,<br>млн. га | Безызвестное<br>водопотребл.,<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | Дет. осадки<br>ΔP,<br>мм год <sup>-1</sup> | Коэфф.<br>стока<br>α | Дет. сток<br>ΔR,<br>мм год <sup>-1</sup> | ΔR<br>Указ. · 100% | Указ.-ΔR,<br>100% |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Южная Европа                      | 1,76                            | 564                                                   | 10,2                             | 73                                                                 | 61                                         | 0,33                 | 20                                       | 27                 | -9,4              |
| Юг Европейской части бывшего СССР | 3,71                            | 603                                                   | 17,1                             | 129                                                                | 66                                         | 0,26                 | 17                                       | 13                 | -18,5             |
| Сев. Китай и Монголия             | 9,14                            | 1470                                                  | 44,0                             | 360                                                                | 319                                        | 0,32                 | 102                                      | 28                 | -17,5             |
| Южная Азия                        | 4,49                            | 2200                                                  | 102                              | 865                                                                | 612                                        | 0,48                 | 294                                      | 34                 | -26,0             |
| Западная Азия                     | 6,82                            | 490                                                   | 18,7                             | 190                                                                | 172                                        | 0,28                 | 48                                       | 25                 | -29,0             |
| Северная Африка                   | 8,78                            | 154                                                   | 11,0                             | 112                                                                | 95                                         | 0,08                 | 8                                        | 7                  | -67,5             |
| Западно-Африка                    | 6,96                            | 1380                                                  | 2,8                              | 34                                                                 | 55                                         | 0,24                 | 13                                       | 38                 | -2,1              |
| Восточная Африка                  | 5,17                            | 809                                                   | 1,4                              | 28                                                                 | 60                                         | 0,18                 | 11                                       | 39                 | -2,1              |
| Южная Африка                      | 5,11                            | 349                                                   | 3,0                              | 34                                                                 | 35                                         | 0,11                 | 4                                        | 12                 | -8,6              |
| Центральная Америка               | 2,67                            | 1200                                                  | 11,4                             | 93                                                                 | 110                                        | 0,34                 | 37                                       | 40                 | -4,7              |

деятельности в бассейне Арала за период с 1930 по 1988 гг. Особенно интересен здесь период с 1930 по 1960 гг. За 30 лет орошаемые площади увеличились на 2 млн. га, годовое водопотребление возросло на 20 км<sup>3</sup>, или в два раза, но это не привело к уменьшению притока воды к морю и снижению его уровня. Детальные исследования позволят объяснить это необычное явление: оказалось, что за рассматриваемый период примерно на 20 км<sup>3</sup>, в год уменьшились непродуктивные потери воды в бассейне (испарение в дельтах, на поймах при разливах и т.д.), которые полностью компенсировали увеличение испарения на орошаемых землях. В последующие годы, когда компенсационные возможности были исчерпаны, дальнейший рост водозаборов привел к резкому уменьшению притока воды в Аральское море и катастрофическому падению его уровня, продолжающемуся до настоящего времени.

В северных лесных районах наибольшее воздействие на гидрологический цикл речных бассейнов оказывают лесотехнические мероприятия (вырубка леса и лесовосстановление — искусственное и естественное). Исследования этих проблем для лесной зоны Европейской части России привели к очень интересным научным результатам, имеющим большое практическое значение. Вырубка лесов и последующее лесовосстановление приводит к очень значительным изменениям испарения и стока в бассейнах рек, которые происходят в течение многих десятилетий после вырубки (Шклямов, 1989). На рисунке 11 представлены полученные экспериментальным путем обобщенные данные по динамике величин испарения и стока (годового и сезонного) после вырубки леса в условиях лесной зоны Европейской части России. В первые десять лет после вырубки годовой сток с вырубленной площади резко возрастает (примерно на 50–70%); через 40–60 лет он будет значительно меньше, чем до вырубки, а в среднем за 100 лет будет меньше по сравнению со старым лесом примерно на 15%.

Полученные выводы, на мой взгляд, подводят итоги многолетней дискуссии среди гидрологов многих стран: вырубка леса уменьшает или увеличивает сток? Однозначно на этот вопрос ответить невозможно, все зависит от того, какой период времени после вырубки рассматривается.

Таблица 11 — Современные антропогенные изменения годового стока р. Волги в различные по водности годы

|                                      | R<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> | ΔR антр.,<br>км <sup>3</sup> год <sup>-1</sup> |
|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| Средний год                          | 254                                    | 18                                             |
| Маловодный год (сухой и жаркий)      | 180                                    | 26                                             |
| Многоводный год (влажный и холодный) | 310                                    | 12                                             |

Проблемы количественной оценки влияния антропогенных факторов на гидрологический цикл речных водосборов требуют дальнейшего изучения путем проведения всесторонних теоретических исследований, лабораторных и полевых экспериментов в различных физико-географических условиях. Особенно важен вопрос учета влияния факторов хозяйственной деятельности на компоненты гидрологического цикла в условиях антропогенных изменений глобального климата.

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Среди некоторых ученых — гидрометеорологов и специалистов по водному хозяйству бытует мнение, что наземная часть гидрологического цикла очень хорошо изучена и проблема заключается лишь в учете региональных особенностей того или иного речного водосбора. Я категорически не согласен с этим и наоборот считаю, что наземные ветви гидрологического цикла: воды в подземных горизонтах, поверхностный и подземный сток, их взаимодействие, испарение с различных ландшафтов, физические процессы их формирования и движения в природе являются наименее изученными и трудно поддающимися надежной количественной оценке, анализу и обобщению.

Достаточно отметить, например, что отсутствуют методы прямого (контактного или дистанционного) измерения стока подземных вод и их взаимодействия с поверхностными; то же самое можно сказать в отношении измерения испарения с различных угодий. Применяемые для оценки указанных компонентов расчетные методы нередко дают результаты, не отвечающие реальной физике процесса. Так, экспериментальные исследования, выполненные в последние годы в разных странах мира с использованием современных методов изотопного анализа показали, что наши представления о формировании речного стока и о роли подземных вод крайне примитивны, а существующие расчетные методы и математические модели просто не отражают сложные процессы, происходящие на водосборах. По моему мнению, именно этим можно объяснить, что даже самые совершенные математические модели речных водосборов, применяемые в практике гидрологических расчетов и прогнозов, обычно не дают более надежных и точных результатов, чем элементарные эмпирические зависимости; они также неплохо работают для обычных стандартных ситуаций и имеют большие погрешности для экстремальных условий формирования стока.

Например, во всем мире принимается, что доли подземных вод в годовом стоке рек обычно невелика и составляет 25–35%, а во время паводков не более 10–15%, что дождевые паводки и половодья формируются главным образом за счет стекания поверхностных и подземных вод, путем непосредственно выпавших осадков или таяния снега, находящегося на водосборе. В то же время детальные изотопные исследования дают совершенно другую картину: доли подземных вод в формировании паводочного стока обычно составляет 50–70% и может достигать 80–90%; только небольшая часть (10–20%) паводочного стока формируется от выпавших осадков, остальной сток образован за счет осадков, поступивших на водосбор год-два и даже 3–5 лет назад; в среднем годовой сток реки формируется за счет осадков, поступающих на водосбор в течение 4–6 лет.

Детальные экспериментальные исследования формирования стока с использованием изотопов начинал с 1985 г. ведутся на полевой экспериментальной базе ГТИ (Валдайский филиал). Эти исследования не только подтвердили приведенные выше выводы, но и позволили выявить некоторые другие явления, которые не учитываются ни одной из существующих даже самых

сложных и совершенных моделей стока. На рисунке 12а показана схема малого экспериментального водосбора (лог Усадьевский, площадь — 0,36 км<sup>2</sup>) и представлена полученная путем изотопного анализа структура дождевого паводка после выпадения 45 мм осадков в августе 1988 г. Результаты изотопного анализа паводка таковы: примерно 10% гидрографа стока было сформировано выпавшими осадками; другие 30% — вода весеннего снеготаяния данного года (3–4 месяца назад); остальные 60% объема стока составила вода, поступившая на водосбор в течение 8–10 предшествующих лет. В результате анализа формирования большого числа паводков на рассматриваемом водосборе было установлено также, что весьма часто усиление притока воды в русло начинается задолго до выпадения осадков, а в отдельных случаях наблюдаются паводки даже при полном отсутствии осадков в пределах водосбора. Пример такого явления показан на рисунке 13, где четко видно прохождение паводка без выпадения каких-либо осадков, но при заметном изменении атмосферного давления. Приведенные примеры свидетельствуют о чрезвычайно сложных процессах формирования стока на речных водосборах, даже самых незначительных по величине. Водосбор, его поверхностная и подземная часть представляют собой единую динамическую систему, в которой подземные воды играют очень большую роль и чутко реагируют не только на осадки, но и на изменения других метеорологических характеристик — атмосферного давления, влажности воздуха, температуры и др. Детальное изучение всех этих процессов, их адекватное математическое описание требуют организации комплексных полевых экспериментов в различных физико-географических условиях.

Экспериментальные исследования необходимы также для решения другой важной проблемы изучения гидрологического цикла — стыковки гидрологических моделей с моделями общей циркуляции атмосферы (МОЦ). Сложность в том, что МОЦ требуют гидрологические данные по квадратам координатной сетки, а гидрологические модели разрабатываются и калибруются для речных водосборов по обычно имеющимся достаточно надежно измеренным величинам стока в замыкающих створах. Для стыковки с МОЦ наиболее удобно иметь надежные гидрологические модели для произвольных площадей земной поверхности, которые бы позволили решать задачи определения не стока, а суммарного испарения. Последнее требует проведения комплексных экспериментов и разработки надежных методов измерения и расчета испарения с различных угодий за короткие интервалы времени.

Широкое развитие экспериментальных исследований в различных регионах Земли позволит значительно улучшить наши знания о гидрологическом цикле в глобальном и региональном масштабах, даст возможность разработать надежные методы оценки его важнейших компонентов и их изменений под влиянием хозяйственной деятельности и антропогенного потепления глобального климата. Для решения этих проблем необходима тесная творческая кооперация ученых разных специальностей и прежде всего гидрологов и метеорологов, организаторов науки.

## Список литературы

- Будько М. И., И. И. Борзенкова, Г. В. Менжулин, К. И. Семенов, 1992. Предстоящие изменения регионального климата. Известия РАН. Серия географ. № 4, сс. 36–52.
- Калинин Г. П., 1968. Проблемы глобальной гидрологии. Л., Гидрометеоиздат, 378 с.
- Калинин Г. П., Клите Р. К., 1974. Изменения уровня мирового океана. В монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли», Л., Гидрометеоиздат, сс. 563–569.
- Львович М. И., 1974. Мировые водные ресурсы и их будущее, Мысль, 263 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли, 1974, Л., Гидрометеоиздат, 638 с.
- Шикломанов И. А., 1988. Исследования водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы, Гидрометеоиздат, 152 с.
- Шикломанов И. А., 1984. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Гидрометеоиздат, 301 с.
- Шикломанов И. А., Маркова О. Л., 1987. Проблемы водообеспечения и переброски стока в мире, Гидрометеоиздат, 308 с.
- Шикломанов И. А., Ливз Г., 1991. Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство, Метеорология и гидрология, № 4.
- Шикломанов И. А., Бобкин В. И., 1992. Изменения климата и водное хозяйство, Метеорология и гидрология, № 8.
- Barnett T.R. 1988. Global Sea level change. In: NCPO, Climate variations over the past century and greenhouse effect. A report based on the First Climate Trends Workshop, 7–9 September 1988, Washington D.C. NCP Office/NOAA, Rockville. Maryland.
- Baumgartner A., E. Reichel, 1975, The World Water Balance, R. Oldenbourg Verlag Munchen. Wien, p.180.
- Berner E.K. and R. A. Berner, 1987, The Global Water Cycle: biochemistry and Environment, pp. 13–14, reprinted, adapted by permission of Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Climate Change. The IPCC Scientific Assessment 1990, Cambridge University Press, p. 365.
- Nace R, 1967, Are we running out of water? U.S. Geological Survey Circular No. 536, Washington D.C.
- National Research Council. 1986, Global Change in the Geosphere-Biosphere, 91 (National Academy Press, Washington D.C.).
- Shiklomanov I.A., 1989, Climate and Water resources, Hydrological Sciences Journal, 34.5.10, p.495-528.
- Shiklomanov I.A., 1990, Global Water Resources, Nature and Resources, 26(3), pp. 34-43.
- Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources 1993, Edited by Peter H. Gleick, Oxford University Press, p. 473.
- World Resources 1992–1993; 1992, A Guide to the Global Environment, Oxford University Press, p. 385.

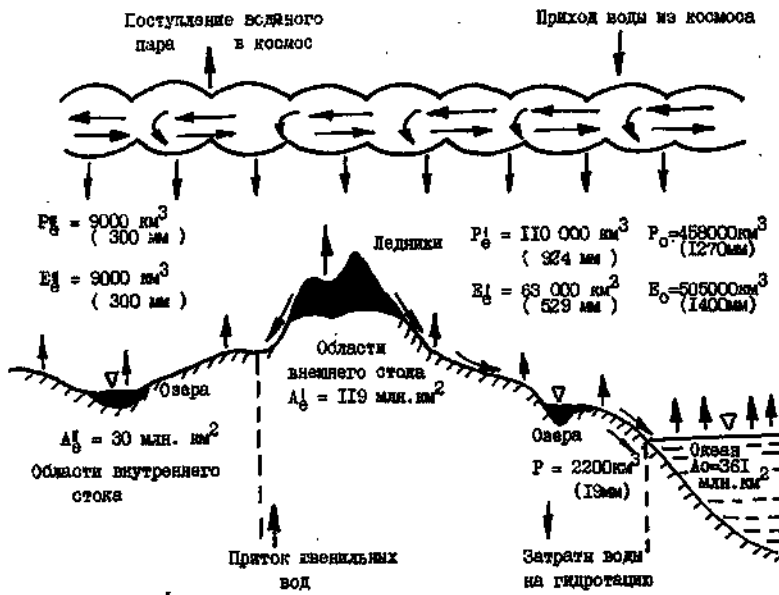


Рисунок 1 — Схема глобального гидрологического цикла.

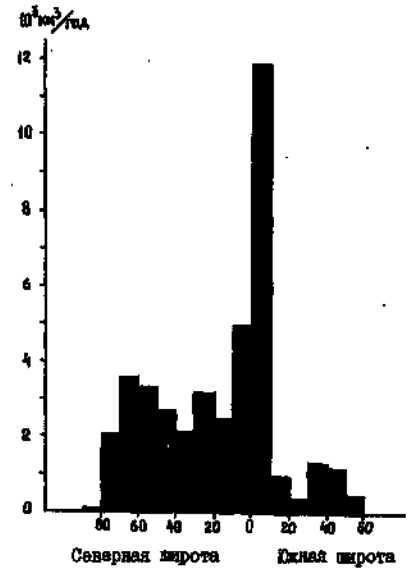


Рисунок 2 — Приток речных вод в мировой океан по широтным зонам.

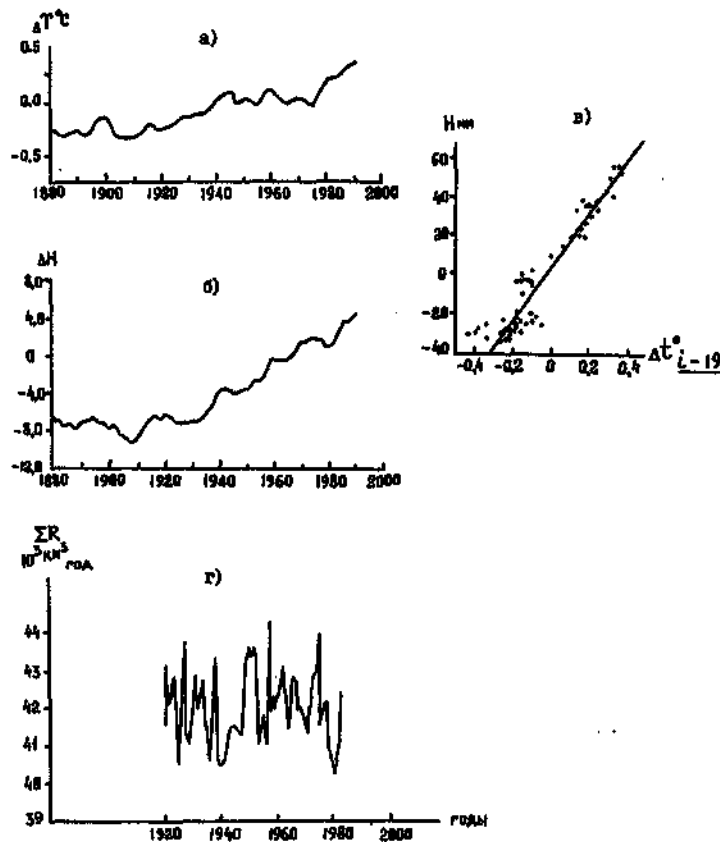


Рисунок 3 — Изменения глобальной температуры воздуха, уровня мирового океана и суммарного речного стока: а) глобальная температура воздуха; б) уровень мирового океана (Barnett, 1988); в) зависимость уровня мирового океана от изменения глобальной температуры воздуха с запозданием в 19 лет (Калинин, Клиге 1974 г.); г) суммарный сток рек мира.

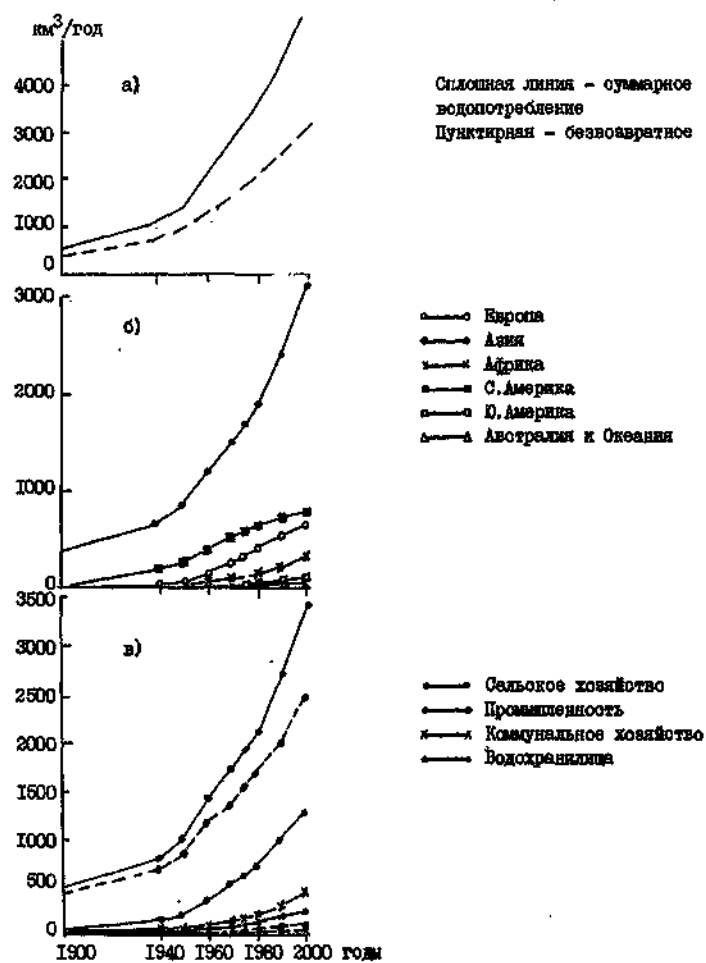


Рисунок 4 — Динамика водопотребления в мире: а) в целом для всего мира; б) по континентам; в) по водопотребителям.

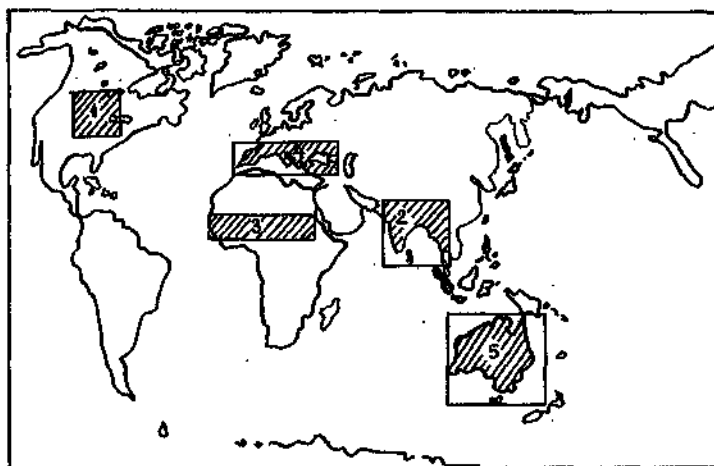


Рисунок 5 — Регионы мира, данные по которым представлены в таблице.

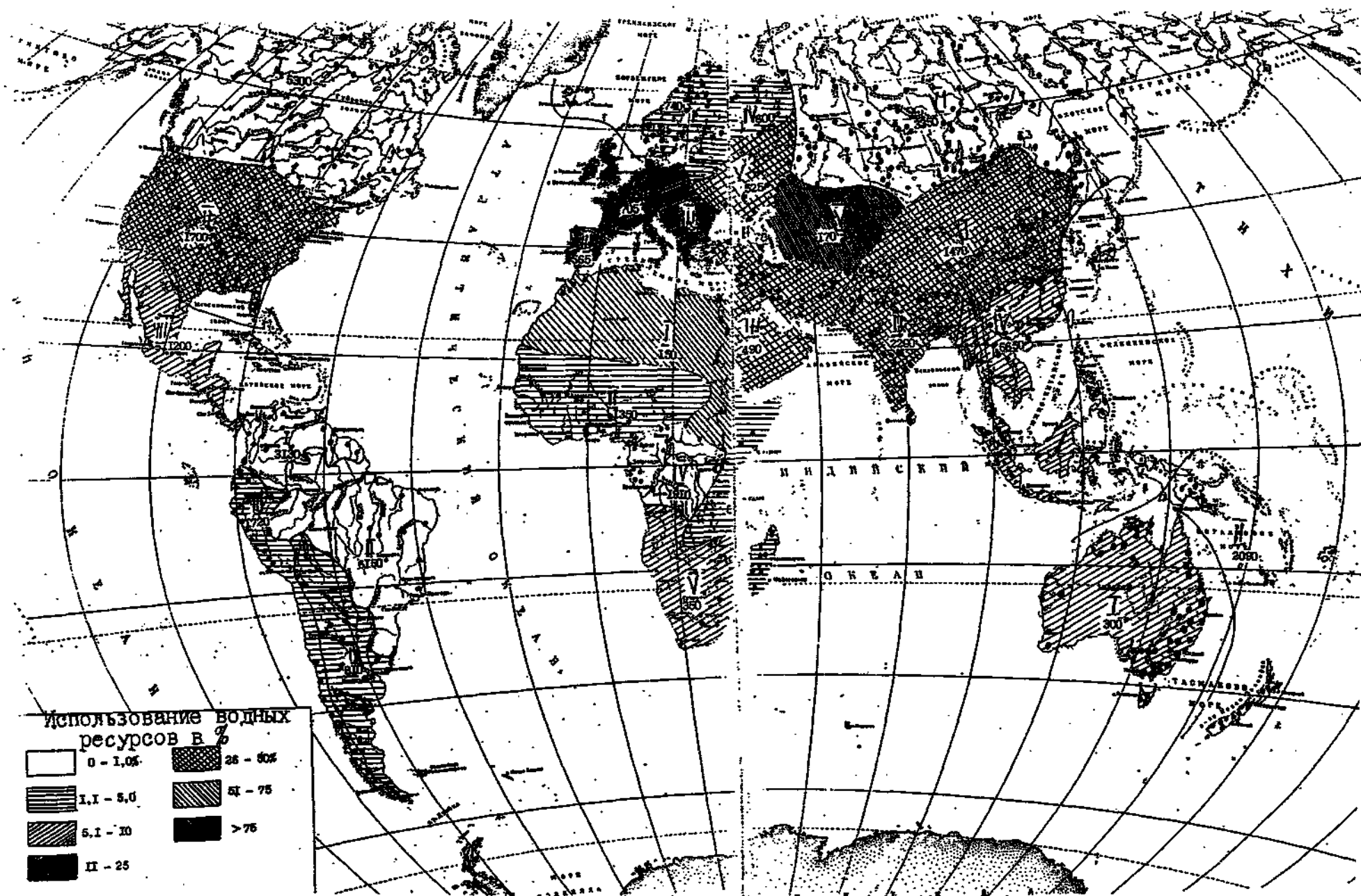


Рисунок 6 — Природно-экономические регионы мира. I, ... — номера регионов на каждом континенте; 350 — норма годового стока,  $\text{км}^3 \text{год}^{-1}$ ; точками обозначены основные гидрологические створы.



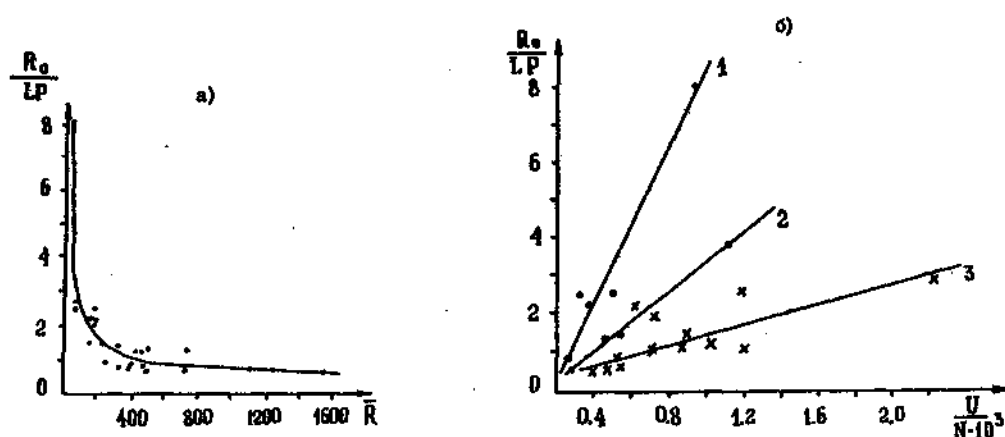


Рисунок 7 — Зависимость речного стока и водопотребления для регионов мира от индекса сухости: а) среднегодовой речной сток; б) удельное безвозвратное водопотребление на 1980 г. (1— Африка; 2— Европа и Австралия; 3 — Северная и Южная Америка, Азия).

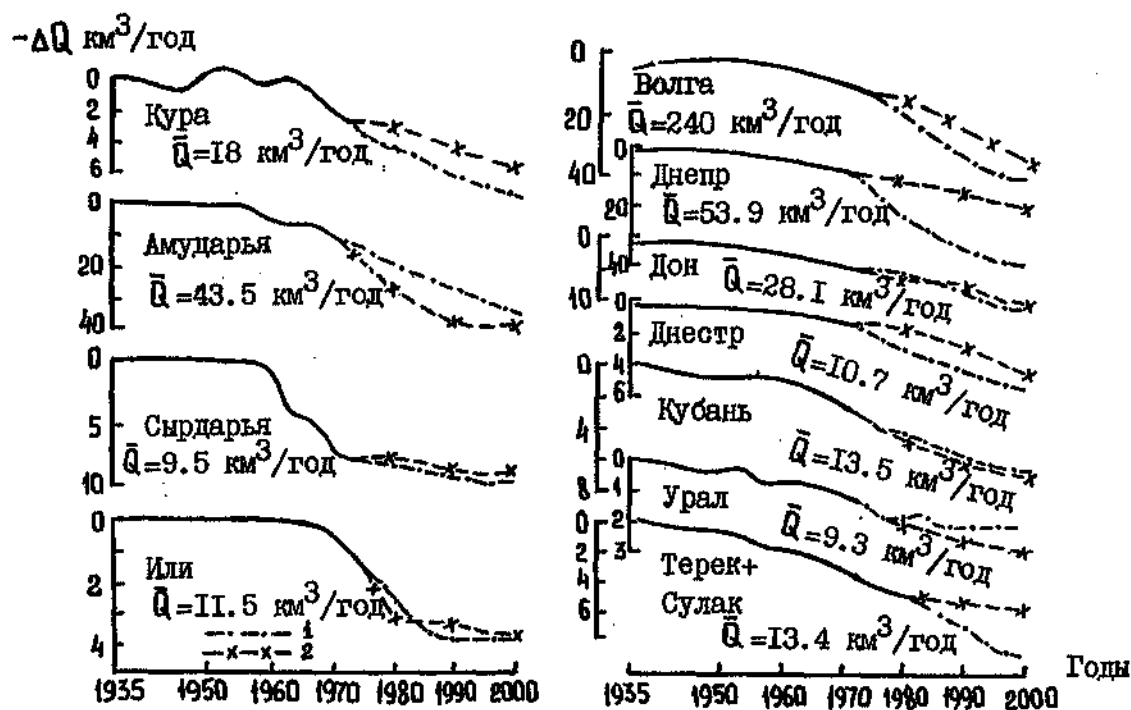


Рисунок 8 — Изменения среднего годового стока бывшего СССР под влиянием хозяйственной деятельности. 1 — расчеты, сделанные в 1975 г., 2 — расчеты, сделанные в 1985 г.

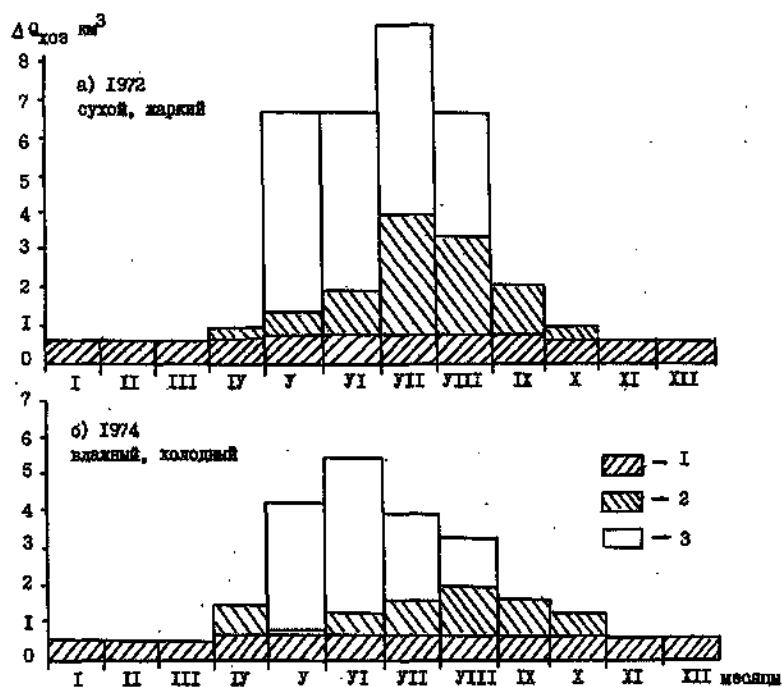


Рисунок 9 — Изменение стока р. Волги за счет хозяйственной деятельности  $\Delta Q$  по месяцам на уровень 2000 г., рассчитанные по модели очень сухого (а) и очень влажного года (б); 1— промышленное и коммунальное водопотребление; 2— водохранилища; 3 — орошение.

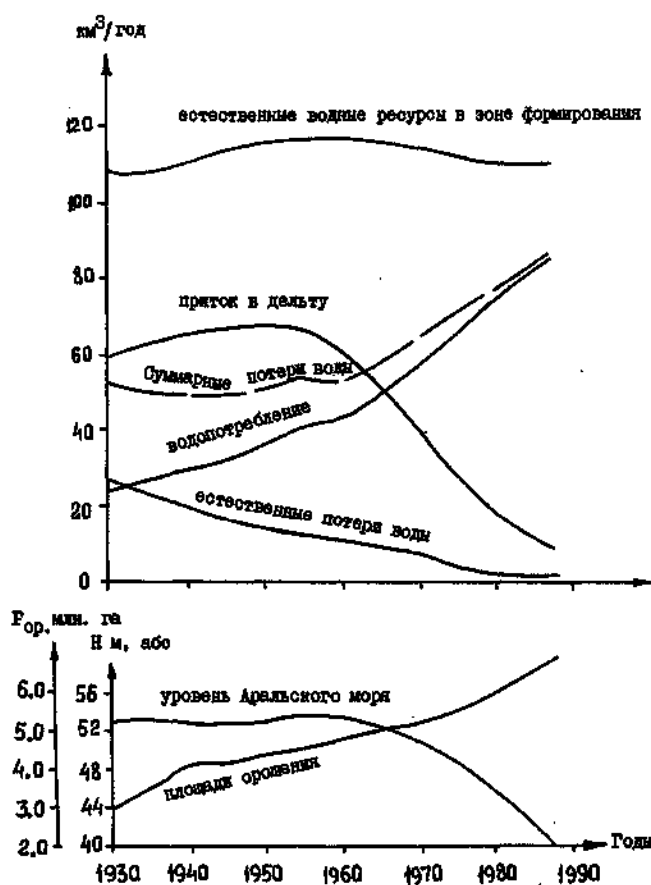


Рисунок 10 — Динамика гидрологических характеристик и хозяйственной деятельности в бассейне Аральского моря за 1930—1990 гг.

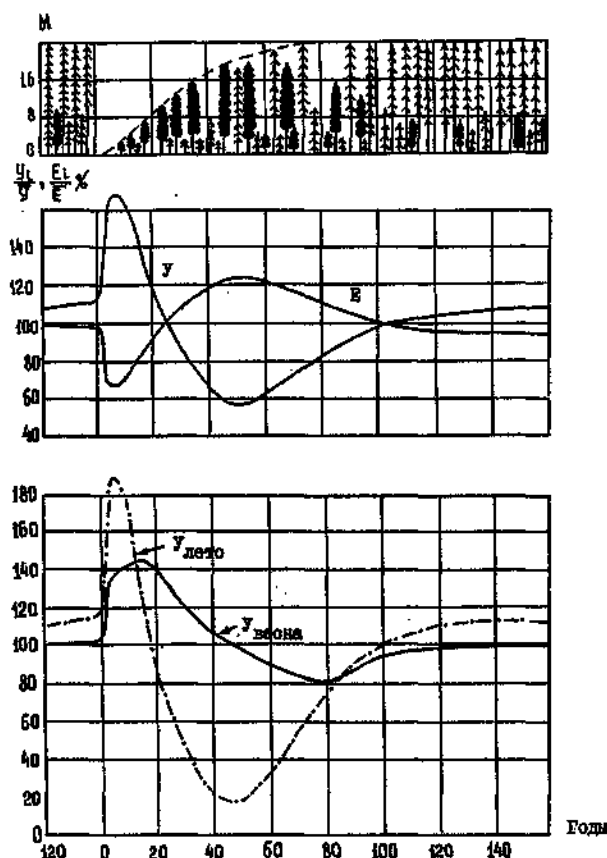


Рисунок 11 — Динамика испарения и стока после вырубki леса и последующего лесовосстановления (лесная зона России).

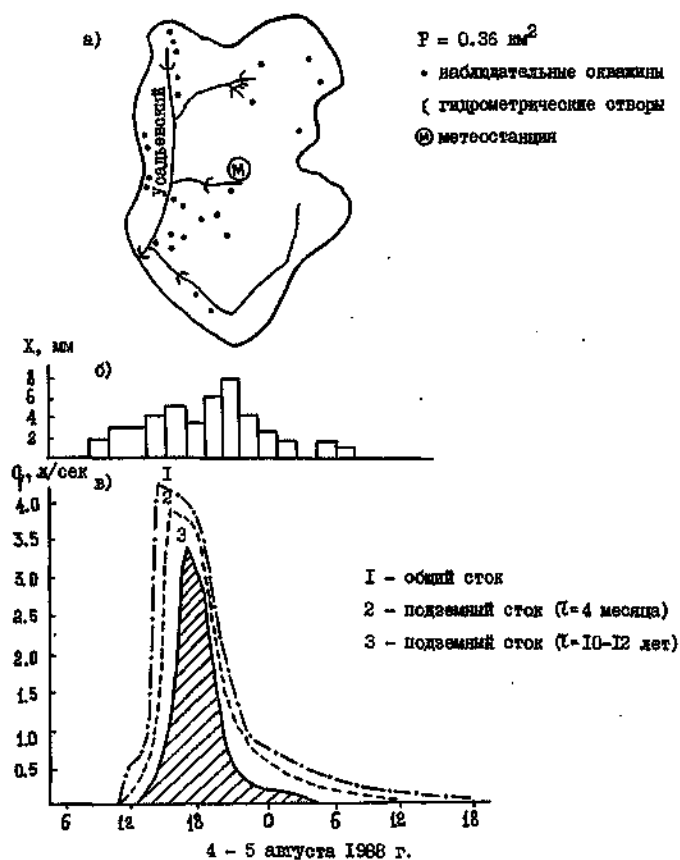


Рисунок 12 — Экспериментальные исследования стока по ВО ГГИ: а) схема водосбора лога Усачевский; б) ход осадков 4—5 августа 1988 г.; в) ход стока 4—5 августа 1988 г.

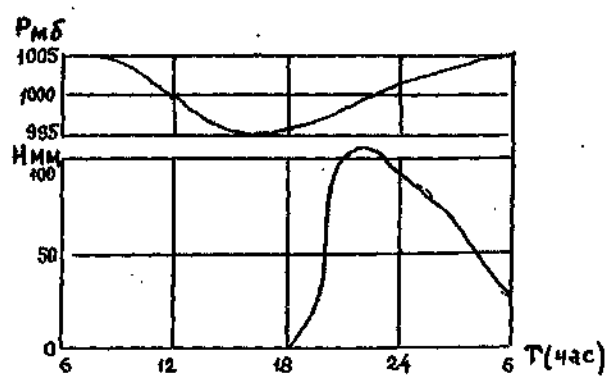


Рисунок 13 — ВОГТИ лог Ухальевский. Паводок при отсутствии осадков ( $P_{мб}$  — изменение атмосферного давления).

