

*Faragó T.; Iványi Zs.; Szalai S., 1991:
Climate variability and change II. – Summary. MERP-NMS, Budapest ISBN 963 7702 44 X Ö
Az éghajlat változékonysága és változása II. – Összefoglalás. KTM-OMSZ, Budapest*

CLIMATE VARIABILITY AND CHANGE - II

SUMMARY

CHANGES IN COMPOSITION OF ATMOSPHERE AND
IN THE CLIMATIC CHARACTERISTICS,
DETECTION, MODELLING, SCENARIOS AND
IMPACTS OF THE REGIONAL CHANGES

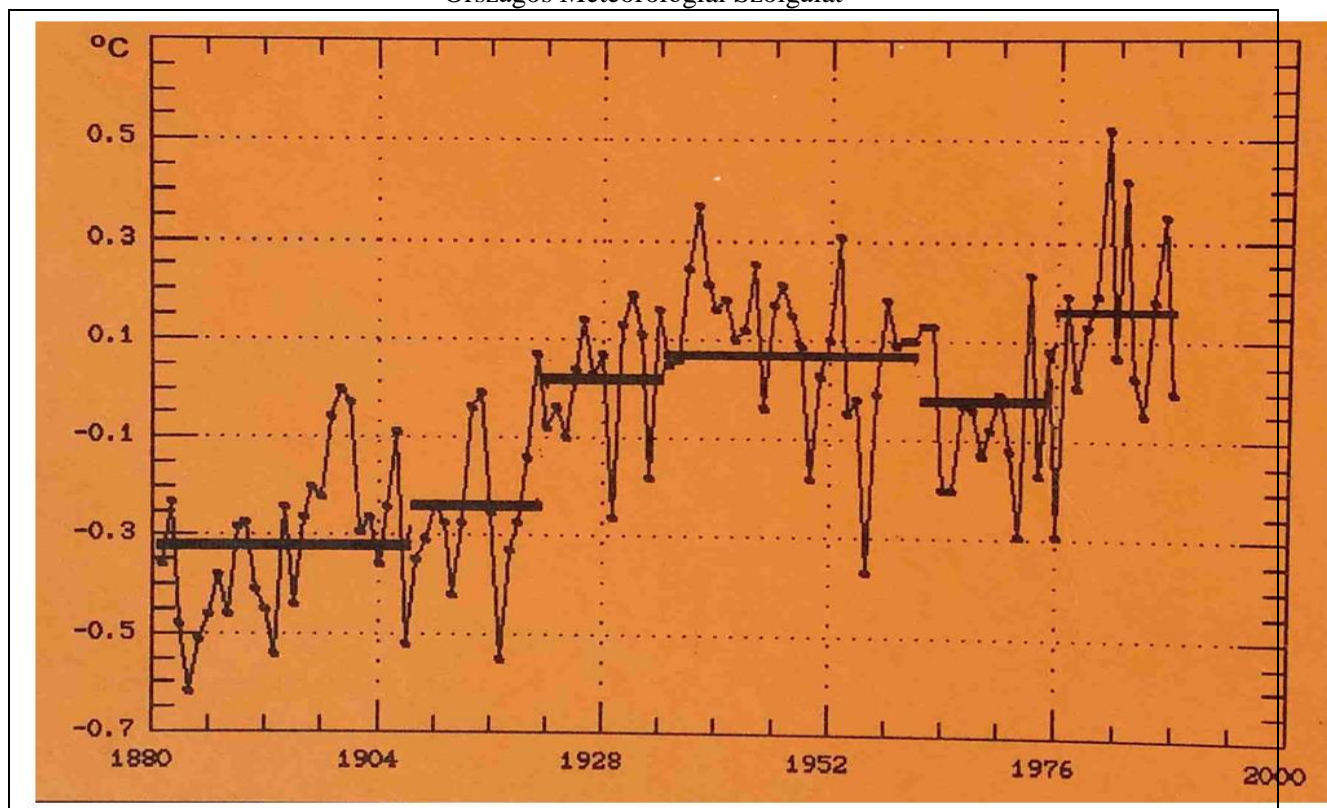
Hungarian Ministry for Environment and Regional Policy
Hungarian Meteorological Service

AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGA ÉS VÁLTOZÁSA - II.

ÖSSZEFOGLALÁS

A LÉGKÖR ÖSSZETÉTELENEK ÉS AZ
ÉGHAJLAT JELLEMZŐINEK VÁLTOZÁSA,
A VÁLTOZÁSOK MEGFIGYELÉSE,
MODELLEZÉSE, ELŐREJELZÉSE ÉS HATÁSAI

Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium
Országos Meteorológiai Szolgálat



This summary (in English and in Hungarian):
ISBN 963 7702 44 X Ö

The entire volume (in Hungarian):

ISBN 963 7702 45 8 II.k

Az éghajlat változékonysága és változása II.

(Climate Variability and Change – II)

A légkör összetételének és az éghajlat jellemzőinek változása,
a változások megfigyelése, modellezése, előrejelzése és hatásai

Szerkesztői (Editors):

dr. Faragó Tibor, dr. Iványi Zsuzsanna, dr. Szalai Sándor

Szerzői (Authors):

dr. Faragó Tibor, dr. Fűhrer Ernő, dr. Garbai László, dr. Iványi Zsuzsanna, dr. Járó Zoltán,
dr. Jászay Tamás, dr. Márkus László, dr. Mika János, Molnár Ágnes, dr. Nováky Béla,
dr. Práger Tamás, dr. Szalai Sándor, dr. Szász Gábor, dr. Szentimrey Tamás, dr. Tóth L. Ferenc

Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium - OMSZ,

Budapest, 210 o.

FOREWORD

This climate research project was sponsored by the Ministry for Environment and Regional Policy and the Hungarian Meteorological Service during the period of 1989-1990 and it was coordinated by an *ad hoc* research team at the Hungarian Meteorological Service. The global and the regional climate-related problems are multidisciplinary to a large extent so that researchers and experts from various fields – representatives of climatology, atmospheric physics and chemistry, hydrology, agricultural sciences, forestry, energy management, social sciences – took part in these research activities.

The main fields of research were determined on basis of the earlier scientific achievements, and also they are in due correspondence with the requirements and experiences which originate from the international cooperation on climate-related issues, the guidelines of World Climate Programme, the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Taking into account the proposals of the Working Groups of the IPCC and the Second World Climate Conference, beside the thorough analysis of emission and global cycle of the greenhouse gases, the assessment of possible regional implications and impacts of the climatic change, more research is needed in the future on the policy aspects of these problems. It is clear from these studies that the danger of the dramatic climatic change with the increasing antropogenous impacts on the climatic system is growing even if there are still scientific uncertainties about the realization of the potential danger, the actual terms, rates, processes and regional impacts of the global climate change.

dr. Tibor Faragó

SUMMARY

Results of research carried out in Hungary during 1990 under the title „Climate variability and change: the change in the composition of atmosphere and the climatic characteristics; monitoring, modelling, forecast and impacts of the climate change“ are presented. It consists of three chapters devoted to the three main topics, namely, to the recent changes in the atmospheric composition and the related domestic emissions, perspectives of the global and regional climate change and the possible ecological and socio-economic impacts of these changes.

Greenhouse gases, energy consumption, forests

The first chapter deals with the questions of balance of greenhouse gases with special emphasis on Hungarian contribution to the changes in emission rates and on the role of forests in the natural carbon cycle.

The first (1.1) section gives general overview on the main sources and rates of the main greenhouse gases, such as the carbon dioxide, the methane, the nitrous oxide (dinitrogen-oxide), the ozone and the chlorofluorocarbons.

The greenhouse-gas emissions caused by anthropogenic sources are compared with that of natural („background“) sources on global scale in next section (1.2). Trace gas concentrations including preindustrial data, recent observations and estimates for 2030, as well, furthermore contribution of the different gases to global warming are summarized. Recently, the energy sector (including the various ways of energy generation, supply and consumption) plays important role in the anthropogenic forcing mechanisms which can potentially result in global climate modification within several decades. Consequently, the expected tendencies of the energy demands is one of the most essential factors for the future (man-induced) greenhouse gas emissions. Beside these tendencies, general principles of the energy strategy providing environmentally conscious approach to sustainable development are also described in this section.

Concerning priorities, the need for urgent and radical reductions of CFC emissions is emphasized. At present, the overall contribution of the CFCs (chlorofluorocarbons) to the greenhouse effect is close to that of the carbon-dioxide in magnitude. At the same time, the emission of CO₂ caused by human activity (e.g., by burning fossil fuels) is incomparably higher than that of the CFCs. Therefore, the urgent reduction of CFC emissions seems to be much more realistic and of high priority. This would also ease the problem with the stratospheric ozone depletion. Nevertheless, the gradual decrease of anthropogenic emission of other greenhouse gases is unavoidable, however, by solving this problem, mankind can save time to prepare a feasible CO₂ emission control strategy with the adequate technical and energy management conditions.

Energy related CO₂ emission is a nearly linear function of the overall energy consumption due to the dominant role of fossil fuels. CO₂-free energy sources (such as the utilization of hydro-, nuclear, wind or solar energy) have only a rather limited share in the global energy supply. Taking into consideration the various societal processes which affect the energy demand (population growth, economic activity, life style, standard of living), the annual average increase of 1.2-1.6 % in energy demand is expected for the next decades. Increase of energy demand by 1.25 %/year assumes increase of the average GDP by 2 %/year; the increase of energy demand by 1.6 %/year corresponds to 3 %/year GDP increment. These empirical relations and energy demand rates for economic development are conditionally used in the estimation procedure. Actual and estimated data, predictions on population, fossil energy carriers, carbon emission and atmospheric CO₂ concentration up to 2020, 2050 and 2075 are presented.

The following section (1.3) gives details on the corresponding energy trends for Hungary between 1960 and 1989. Economy of Hungary was characterized by extensive development from 1960 till the middle of 1970s. The domestic energy consumption increased by 60 %. The structure of energy sources essentially changed during this period. The relative contribution of solid fuels decreased from 75 % to 50 % between 1960 and 1970. At the same time, the share of carbohydrates in energy supply increased and reached 42.5 % in 1970s. These tendencies lasted until 1978, then the domestic volume of energy consumption started to stagnate for a short period. Energy demand was increased again during the 1980s. As regards the gross energy use, the portion of the material branches was declined from 71.2 % per year to 60.7 % between 1970 and 1980 and at the same time, the ratio of non-material branches significantly increased. The medium-range perspectives of the domestic energy demand and supply are also investigated. Beside the estimates of expected energy demands and available sources, future tasks of the national energy policy are analyzed: possibilities of energy savings, energy rationalization, future of the coal mining industry, financial and trade options of the energy import, problems of environmental protection. In particular, the extent of air pollutants emitted by using various energy sources and originating from different economic sectors is given.

Carbon dioxide and methane belong to the most significant greenhouse gases. Their total domestic emissions are estimated in section 1.4 using various literature sources. In Hungary, the total methane and carbon dioxide emissions for 1986 are estimated to be 0.6-1.1 and 87.7-114.4 million ton carbon (C-equivalent), respectively.

Significant amount of methane is released not only by biological but anthropogenic sources. Among the biological sources, the importance of animal husbandry should be emphasized; the other biological sources (rice production, soils, water surfaces, etc.) have smaller contributions to the total methane emission in Hungary. The calculations show that the anthropogenic sources dominate in the total methane emission. While coal mining has smaller importance in this aspect, a large amount of methane is released to the atmosphere during the exploitation and distribution of natural gas. Although the most uncertain part of the estimation is the determination of methane emissions from different wastes, these sources are undoubtedly of high importance.

The greatest parts of carbon dioxide release come from plant respiration and from the different soils, but the volume of anthropogenic emissions (combustion of fossil fuels, cement production) is also comparable with them. Less important, but not negligible amount of carbon

dioxide is released by respiration of animals. Carbon dioxide emissions from different wastes are also uncertain, as it is shown in the case of methane, but their contribution to the total carbon dioxide emission is insignificant.

Assessment of the carbon content and the carbon fixing capacity of the forests in Hungary is given in section 1.5. Hungary, being situated in the temperate zone of Europe, could efficiently contribute to the reduction of anthropogenically enhanced greenhouse effect in this region by the afforestation of about 1 million hectares. To plan such a project, the proper choice of species by sites and the carbon fixation properties of the various species should also be taken into account.

Growing stock is the total organic matter of the stands (stems, branches, foliage, root system) covering the forested area. From the point of view of the carbon cycle, one part of the foliage, branches and roots gets into the annual organic matter-carbon cycle, whilst the rest of the thin branches and roots turn into the cycle with time period of 10-100 years. The stem and thick branches represent the utilizable organic matter, the long-lasting carbon fixation.

Based on the observations, the following estimates of the above mentioned components are derived: the carbon content of the growing stock of the Hungarian forests amounts to about 103.7 million tons and that of the foliage to 2.2 million tons; the 57 per cent of the total carbon storage of our forests is found in the dendromass of the oak, Turkey oak, beech and hornbeam stands which cover the 41 per cent of the forested area. Owing to the annual increase in the growing stock (annual current increment), fixation of carbon of about 4 million tons takes place every year, the 70 per cent of which is accumulated and the rest is released again in the course of the annual human utilization and gets into the annual carbon cycle.

Climate change: detection, modelling, regional characteristics

The second chapter covers several questions of climate change detection, climate modelling, and analysis of the possible regional consequences of the global climate change.

First of all, time-series of observed data are investigated for the identification or rejection of systematic changes. In section 2.1, the statistical methodology of the climatic trend analysis is reviewed, then a special method is introduced and applied to averaged surface temperature data series. As an introduction to these investigations, terms of climate, climatic states (i.e. states of the climatic system) and climate change are analyzed from conceptual and statistical points of view. Despite the fact that the climate and climate change cannot be defined exactly for such investigations, the statistical task of climate change detection can be specified unambiguously. Actually, the detection problem is interpreted as a statistical decision making problem on the stationarity of the observed data series. Alternatively, the non-stationary character of these series – i.e., the trend function in extended sense – should be characterized and, of course, the obtained result should be properly interpreted from climatological point of view.

Several time series models are introduced for more detailed study of the detection problem. The systematic change or trend can be represented in the most general form, however, only rather simple models are suitable for the characterization of the given climate time series concerning at least their most essential properties. The problem is that the stochastic relation

among the components of the time series may also change in time and, moreover, the distribution (stochastic behaviour) of these components can change, as well.

According to the trend model, the given climate time series is a superposition of the trend function (characterizing the „change”) and the „noise” (representing the climate fluctuations). The purpose of the trend analysis is the separation of the trend function and the „noise”, or more exactly, we wish to get as much information about the trend function as possible at a given significance level. These are partially contradictory requirements: wishing to get too much information about the trend function can make the accomplishment of the hypothesis testing (about the significance of the trend) much more difficult. In view of these problems, the relatively simple linear analytical methods and the procedures based on the series expansion are studied. A principally new method is introduced: it is based on expansion of the trend in Haar series. This method is straightforward because no concrete shape of the possible trend is assumed a priori, yet the most significant changes in the mean values for the consecutive subperiods are identified. The refined structure of the climatic trend can be reconstructed upto the level of given significance without prescribing its particular functional shape. Annual averaged surface temperature data series for the Northern Hemisphere were examined by means of this model. The observational period could be subdivided into certain subperiods with a change of positive sign for the last significant „break” (at the late 1970s), however, as it is also well-known from other investigations, the assumed overall warming tendency due to the buildup of the greenhouse gases in the atmosphere was interrupted from the mid-1960s till the late 1970s. This period is identified with high significance within the model. Therefore, the hypothesis on the overall warming trend from this stepwise approach for the whole investigated period cannot be accepted with full certainty, moreover, we avoid to give an overall decadal rate of change which could be only an artifact of the particular model setting.

Section 2.2 is devoted to the technics of climate modelling. First of all, the components of the climate system and the conceptual questions of its modelling are considered. The climate system to be modelled consists of environmental sub-systems which play an active role in forming the Earth's climate: the atmosphere, the world ocean, the cryosphere, the continental surface and the biosphere. Effects forming the climate (the interactions among various constituents of the climatic system and the external forcings) are very complex. The most important forcings effecting the climatic system are characterized by the intensity of solar radiation, the orbital and revolution parameters of Earth, and the amount of gases and aerosols which interfere with the radiation in the atmosphere. The latter represent the so-called internal forcings which could change as a result of certain interactions within the climate system. The most important anthropogenous climatic forcings (the changing atmospheric content of carbon-dioxide, chlorofluorocarbons and aerosol) belong to this category. The most important classes of the interactions among the various sub-systems of the climate system are the radiation processes, the thermo-hydrodynamical processes (in the atmosphere and in the ocean), the processes of cryosphere and land surface thermodynamics and hydrology, finally, the physico-chemical and biochemical processes. Certain interactions form feedback mechanisms. The main feedback mechanisms of the climate system are as follows: the feedback interaction between the atmospheric water vapor and the global temperature, the ice albedo and the global temperature, the surface temperature and the cloud amount, the atmospheric carbon dioxide the ocean. These phenomena are briefly characterized.

Beside these basic elements of the climate system, several aspects of its dynamic behavior are also considered in this section. From this point of view, the climate system contains media strongly differing from each other by their mass and density. In turn, these constituents have different response times to forcings, according to their inertia. Atmosphere and continental surface represent the „fast” climatic sub-systems having relatively small inertia, while world ocean and cryosphere constitutes „slow” (slowly responding) climatic sub-systems. With the eternal adaptation process of the climatic system to the forcings, climate can be interpreted as the transient response of a multiple relaxation-time system to time-dependent forcings. Climate is not totally deterministic, i.e., it is not totally determined by the forcings. Several different climatic states can be produced by a given configuration of time-dependent climatic forcings. In a concrete realization of these processes, the climate represent an almost random oscillation among the possible responses. Such behavior of the climate system is called chaotic. Determination of the sensitivity of the climatic system to given forcings or the identification of the most probable future development of climate is a difficult problem, partly because of the chaotic behavior of system.

Further on, different classes of dynamic climate models constructed in the recent 25 years are evaluated from conceptual point of view. The two basic classes are determined by their dynamics: thermodynamic and dynamic climate models. Thermodynamic climate models are able to reproduce only the thermal characteristics of the climatic system, whereas the dynamic models are suitable for simulating both the thermal and flow characteristics. Among thermodynamic models one can find energy balance models constructed to simulate the global picture of climate near the surface, and radiative-convective models reproducing the climatic temperature distribution of the atmosphere, as well. One part of the dynamic models consists of simplified models with parameterized dynamics, which contain only some main features of the global circulation system; while the other part is suitable for reflecting the detailed three-dimensional picture of the flow. The latter types are called general circulation models (GCM) of the climate. Depending on the climatic sub-systems included in the models, atmospheric and coupled models can be distinguished. Coupled atmosphere-ocean models are the most widely used coupled models.

Application aspects of the climate models are reviewed from conceptual and practical points of view. The numerical simulations by such models represent the only possibility to analyze climatic processes that cannot be observed. Models are also capable to reproduce the present climatic state, climatic fluctuations of some recent periods, climates of certain historical and geological ages, and they can be used, as well, to simulate the climates of other planets in our solar system. Climate sensitivity experiments and the simulations of short-term climate variability are of greatest practical importance. In all numerical applications of these climate models, the enormous data and computing requirements should be emphasized. The recent development of climate modeling is characterized by growing interdisciplinarity: its characteristic feature is the very intense activity concerning the observations and simulations of the ocean and the cryosphere which gradually decrease the gap between the knowledge of the atmosphere and these climatic sub-systems. The contemporary tendencies of climate modeling are equally directing toward the design of the comprehensive models, and toward constructing simplified models for specific aims.

The aim behind climate modeling in the period of its formation was almost totally the

demand to gain scientific knowledge. This „pure” theoretical approach changed dramatically in the seventies when the first signs of environmental deterioration caused by human activities were observed worldwide. The awareness that mankind's activities at the present stage can lead to significant or even irreversible global environmental changes resulted in increasingly wide consensus about the need for global environmental management in the 1980s. Understanding of the basic environmental (and climate forming) mechanisms and the assessment of the consequences of certain anthropogenous environmental influences constitutes an organic part of the rational environmental management which is necessary for the sustainable development. To achieve these goals, climate modeling became an important practical tool, since the results of model simulations give fundamental information for reasonable planning of the future activities of human society. In accordance with these general principles, the main aim of climate modeling activities in Hungary is to provide information about the expected local/regional features of the global climate change.

Numerical climate simulations mean only one of the possible approaches to derivation of estimates on the future behavior of global climatic system. Constructions based on paleoclimatological data have the advantage that such events, changes are investigated which actually took place in the past and, thereby, each elements of the climate system can be considered in the context of global processes. This method also has a disadvantage, namely, the accuracy of (the reconstructed) data is far behind the actually observed ones; furthermore, their areal distribution is very sparse compared to the present observational network. These disadvantages can be ignored to some extent by using analogue situations based on observed data, since these data can be taken from a relatively dense network. However, these data series are generally short in time (because of the limited number of stations with long-term data series), variation of data is not so marked and the extrapolation beyond the interval of observations can be made with high uncertainty. The third method is the numerical modeling: data fields can be made dense enough for the computation of the required regional climatic characteristics and any parameter can easily be changed. However, the main problem is that the model represents only a simplified version of the actual climate system. These problems can lead to essential errors. Furthermore, significant errors arise owing to the particular numerical methods. Beside these methodological aspects, several results or global climate scenarios gained by typical methods and models are referred, too. These results have similar, as well as, differing features. As regards the most probable global climatic scenarios, it has turned out that the main conclusions are similar for all types of the above mentioned methods.

Because of the limitations concerning the time series analysis or the use of the analogies and the difficulties associated with the climate modeling, the uncertainties of assessment of climate change and their reasons should be thoroughly analyzed (2.3). These uncertainties have various reasons. On the one hand, these are theoretical reasons which originate from the complicated inherent structure and behavior of the climatic system. On the other hand, these problems arise because of the difficulties to predict the forcing mechanisms. The main reasons of this uncertainty about the climate predictions are due to the external forces (mostly anthropogenic in origin: greenhouse gases, tropospheric aerosols). In addition, we have no satisfactory information on the sensitivity of the climatic system to the varying intensity of the forcing mechanisms.

Further, this section gives a brief presentation of the most important factors which

determine the sensitivity of climate system with special regard to feedback processes. The response of atmosphere to various forcings mostly depends on the following processes and features of the climate system: transient changes induced by varying forcings and transported by the ocean; radiative properties of clouds; variation of snow and ice cover in the high latitudes; internal dynamics of atmosphere (feedback mechanisms). Because of its huge mass, world ocean has enormous (thermal) inertia and thereby it might considerably delay the global warming. According to the estimations, this reaction time varies from some hundred years to some thousand years. The upper layer of ocean with a depth of 50-100 m is in direct connection with the atmosphere; its thermal response time extends only up to several decades. The role of clouds is very complex in the process of climate change since these are related to both the short- and longwave radiation. Experiments carried out by general circulation models have shown that the role of clouds is decreasing in middle and low latitudes, and increasing in higher latitudes. Radiational features of clouds are related to processes of subgrid scale so that their parameterization in the general circulation models is not satisfactory. The snow and ice covers dominate in high latitudes. Their effect is usually handled in a very simple way in the models. A more realistic approach can be applied only in the case if the heat transport is described by thermodynamic and dynamical ways.

Beside the external forcings, the climate system is under the effect of several feedback mechanisms which act within the system. The multitude of these interactions, their individual character and temporal scale, the non-linearity of the cause-effect relations make the system extremely complicated. In particular, the geophysical (vapor, clouds, snow and ice cover) and the biogeochemical feedbacks are reviewed in more details. The most important biogeochemical effects are as follows: physical effects of warming (changing methane release from hydrates due to higher temperatures, changes in the ocean circulation, etc.); responses given to warming and CO₂ increase (CO₂ and methane flux deriving from the balance of organic compounds in the soil, CO₂ flux owing to the increasing fertilization); effects related to the processes within the ecosystems (e.g., changes of surface albedo through the changes in the plant cover, biological coal transport in the ocean). The most important effects are probably caused by the geophysical feedbacks, whilst the role of the biogeochemical feedbacks is not so significant. On the whole, however, the amplification of the initial effects caused by the multitude of the feedbacks may lead to large-scale consequences. For this reason, it would be desirable to put the most remarkable biogeochemical effects into the transient models of climate system.

The possible regional climatic consequences of the expected global warming for our area are described in 2.4. More exactly, the purpose of these studies is the derivation of the conditional regional climate forecasts for the area of the Carpathian Basin by using the large-scale climatic scenarios for the Northern Hemisphere. The main quantitative conclusions are based on time series of instrumental measurements from the Northern Hemisphere, the temperate latitudes and Hungary. More general validity of the relations found among the climatic characteristics for the different scales is verified by applying historical and paleoclimatic information. Moreover, an energy balance model of the surface-atmosphere system (parameterized for our regional conditions) is constructed to investigate the causal mechanisms of these changes. The simplest methods seem adequate for the assessments in the case of a modest global warming rate. Regional features of global warming with average surface temperature increase exceeding 1°C are estimated by several methods: by method based on the seasonal cycle of meteorological elements, by interpolating the results of paleoclimatic reconstructions, by using the simulated

results of general circulation models.

More specifically, the method of „slices” is developed to investigate the connections between regional climatic elements and two hemispherical temperature characteristics, namely, the average surface temperature and the contrast between the air temperature above the continents and the oceans for the period 1881-1980. According to this method, the time series of the annual mean temperature are divided into subperiods of equal length and regression analysis is carried out using the time averages of the subperiods. A „quasi-equilibrium” division with periods characterized by negligible trend components in the continental temperature and also six „non-equilibrium” divisions with different lengths are introduced in order to randomize the systematic errors in the hemispherical series. The aim of „slicing” is the quantification of the connections being non-significant in the year-by-year resolution, whilst not distorting the original coefficients. Furthermore, the more general validity of the above mentioned connections is investigated by using historical data from the period 1490-1779 and paleoclimatic information from 6000 to 1000 years BP. The hemispherical indicator in this case is the O¹⁸ isotope content in Greenland ice sheets that is in close connection with the hemispherical mean temperature. Direct effects of changes in the carbon dioxide concentration, volcanic activity and vegetation coverage are investigated in the regional climate model. Equilibrium features of the more intense warming (exceeding 1°C) are estimated on the basis of the seasonal cycle. Because of shortcomings of such a solution as an analogue to the greenhouse warming, regional features of the warming up to +4°C are also established by interpolating the paleoclimate reconstructions and the results of general circulation models for Hungary.

The principal conclusions for the possible regional climatic consequences in the case of the greenhouse gas induced global warming are as follows. The amplification of the global warming for the temperate zone is well-known from other sources. As concerns its magnitude, the regional average temperature increase parallel to the mean hemispheric temperature change in the summer half-year is 1.0-1.6°C/°C. This corresponds to the increase of 5-10 days in the vegetation period in case of the modest global warming of 0.5°C. In the winter half-year, the local average temperatures are significantly related to the annual mean of the continent-ocean temperature contrast with amplification coefficients between 1.5 and 2.0. Obviously, this amplification factor is higher than that for the summer period. According to the estimates, the precipitation amounts decrease considerably parallel to the increase of hemispheric mean temperature with the rate of 50-110 mm/°C. This change qualitatively corresponds to the simultaneous change in the circulation patterns (i.e., the circulation is expected to become more anticyclonic). Frequency of dry months with less than 30% relative soil moisture content would increase by about 60% in case of the 0.5°C hemispheric warming. Sign of the precipitation change in the winter half-year is ambiguous. The relative sunshine duration increases considerably in the summer half-year parallel to the increase in the hemispheric mean temperature with a coefficient of 2.0/°C. It means 8% increase in the global radiation at the surface in case of the 0.5°C hemispheric warming. This tendency corresponds to the strengthening anticyclonic character of the circulation. According to the equilibrium estimations for the 1-4°C hemispheric warming, the regional warming for the summer half-year has the same or even smaller rate, whilst it remains about 1.5°C/°C for the winter period. Summer precipitation and also the annual precipitation amounts are substantially less than those under the present climatic conditions in the case of the hemispherical warming of 1°C. The change of the annual precipitation is close to zero for higher temperature rise.

Climate impact studies

Regional impact studies are described in Chapter 3. Because of their expressive climate-sensitive character, the hydrological, the ecological/agricultural impacts, moreover the impacts on the growing of trees and the forestry, as well as, on the energy demand and consumption are analyzed.

First of all, the methodological aspects of investigation of the connections between the socio-economic development and the climate change are reviewed in section 3.1. The development of these methods was stimulated by the fact that over the past two decades the scales and character of interactions between the socioeconomic development and the natural environment have changed drastically. There is an increasing concern about the larger scale problems that affect more nations, continents, persist for several decades up to centuries, influence a number of economic sectors and, in turn, which may cause severe implications on the Earth environment.

One of the common characteristics of the global environmental problems is that the driving forces, no matter where they originate geographically, will affect the global system through their impacts on the global biogeochemical cycles. In the final account, there are two main types of societal responses to these global processes: the adaptation to the local/regional impacts and the prevention (or at least the reduction of the rate) of the expected global change. The latter would involve a series of international conventions requiring the consensus of nations on the required measures.

From a general socio-economic point of view, there are numerous common or at least closely related roots of the antropogenous climate forcings and the societal impacts of the climate change. In order to investigate the former relation, the future trends in the most important socio-economic activities should be assessed which can lead to the enhancement of the greenhouse effect. Thus the different parameters of the socio-economic development, for instance, the number, geographical distribution and density, age structure, rural-urban distribution, level of education, and migration patterns of future population will directly affect what stresses will influence the environmental systems associated with global climate. Many driving forces, however, result not from people per se but from what people do. With respect to the issue of climate change, those human activities which influence the global cycle of the greenhouse gases are of primary significance.

Modeling various impact areas of climate change requires scenarios of climate change at different scales of resolution. The impact models have been successfully used in several research projects to assess local impacts of climate change. These aspects are briefly demonstrated for climatic impacts on agriculture and water management. This conceptual and methodological introduction is followed by more specific impact studies.

The hydrological impacts of the climatic variability and the modest climatic change are studied for Hungary in section 3.2. The goals of water resources management, closely connected to the variability of climatic elements, may considerably be modified by potential climatic

changes. Scenarios of the latter describe the average climatic characteristics for longer periods. Special attention is paid to climatic impacts related to the annual runoff. It is one of the most important parameters of hydrological regime for a given region which are necessary on the one hand, in the solution of the basic long-term water management problems, namely, the problems of water transfer and multiyear water storage, on the other hand, which are required for the characterization of the maximum available potential water resources of the given region.

By utilizing runoff and climatic observations of 45 catchment basins in Hungary, nonlinear regional climatic relationship has been established for the average annual runoff by using average annual rainfall and average annual mean temperature as independent variables. This statistical relationship has a limited goodness-of-fit. One basic source of error in this regional model is the limited accuracy of data available for its calibration. According to this nonlinear model, the runoff is rather sensitive to the changes in the climatic characteristics. For example, an error of 0.5°C in regional averaging of mean temperature causes an error of 10% in runoff estimate. Another source of error of the regional model is the regionalization itself, which does not take into consideration the surface characteristics changing from one catchment area to another. The accuracy of the estimates can be increased by taking into account the characteristics of the land surface.

Further on, climatic relationships of interannual variability of annual runoff have been investigated for the Nagymaros section of Danube, for the Jásztelek section of the Zagyva River, for the catchment basin of Lake Balaton and for the series of annual changes of stored water in the Lake Balaton. Two methods have been adopted: a linear regression relationship between annual runoff and the climatic variables, as well as, one variant of the above mentioned regional model calibrated for the given catchment basins. According to the investigations, the results of the two models are more or less identical within the range of observed data. By means of these statistical schemes, the time series of annual runoff observations and annual change of stored water are decomposed into climatically determined and residual components. In the case of the Danube and Zagyva Rivers, the residual is a „white noise” term, while there is a considerable degree of autocorrelation for both the residual time series of runoff and the annual change of stored water in the cases of Lake Balaton and its catchment area. As a result of completing the linear model with an autoregression model, the obtained residual is again statistically identical to a „white noise” term.

According to the presented models, the confidence interval of the estimation of average annual runoff is about 5 to 15% around the most probable value, i.e. this is the reliability of the estimation of average annual runoff from climatic characteristics. Since this accuracy is similar to the order of magnitude of changes in average annual runoff due to relatively small conditional changes in climatic characteristics, the model is not capable to unambiguously separate climatic effects from random impacts. Although the changes in potential runoff due to the higher degree of climatic changes unambiguously surpass the random fluctuations, in such cases, the suitability of the given model is questionable.

In order to improve their accuracy, the models are refined by the increase of the time resolution. The investigation carried out for the Nagymaros section of the Danube River shows how the utilization of the seasonal pattern of precipitation reduces the standard deviation of the

residual term. The accuracy of the estimated relationships between climate and runoff can also be increased by adopting monthly time increments. Despite such improvements, the principal problem of model verification cannot be solved properly. As a fact, only partial verification procedure can be accomplished: the model can be verified only in a relatively narrow domain of the observed climatic characteristics. Eventually, there are two types of uncertainties of extrapolations based on the models which are developed and parameterized by means of past observations. The first type of uncertainties arise because of the stochastic nature of relationship between the variables and the statistical method of the determination of the model coupled with the limited possibility of its verification. The other source of possible errors is due to the uncertainties about the hydrological and water management consequences of the expected climatic change.

Based on these results, only crude estimates of the expected hydrological impacts of the climatic change can be derived, and even these estimates can be accepted as first guesses for the limited range of changes in the related climatic variables which is close to their observed range. More specifically, as the first stage of the expected climatic change, a rather small increase of temperature (of about 0.5°C in the annual mean) and the precipitation decrease of about 5% in its annual amount are conditionally predicted for our region. These values are deduced from the most probable scenarios. As a consequence, a reduction of average annual runoff by 10-15 %, a slight increase of its variability, and consequently, the reduction of critical annual water resources with the rate surpassing the mean reduction rate can be expected. Due to the latter, the demand for water storage will probably increase, whilst hydrological conditions for water storage will worsen. Water exchange in the lakes may also become slower.

The agro-ecological potential is used to investigate the possible regional ecological/agricultural impacts of climatic change (3.3). This potential expresses the primary production which can be produced in a given area under given environmental circumstances (atmosphere, soil). By means of the energy and mass transport processes which take place in the ecological system, the agro-ecological potential and its variations in time and space can be assessed. The atmosphere, as a natural resource may significantly modify the output of ecological systems in a wide range.

The variability of agroclimatic compounds of the ecological potential determines the extent of the actual production directly. In the case of climate change, the potential changes, as well. Assuming stationarity, the production can be described by various models. In these production models, the main climatological elements (radiation, temperature, precipitation etc.) and certain atmospheric components (CO_2) are the predictor parameters. Other parameters can also be involved, as well. For its advantageous features, the agro-ecological potential is proposed as a complex indicator of the climatic impacts on the plant cultivation. This potential has significant interannual variability which results in fluctuation of the plant yields. If the yield series is homogeneous, that is the plant species and technology of plant production are more or less unchanged, the fluctuation is caused by the agroclimatic components.

As concerns the numerical studies, first, the basic agroclimatic characteristics are investigated. It was revealed that the climatic components of the agroecological potential show a special course for our region during the past 130 year. The most important conclusions are as follows: the annual means of temperature show an increasing tendency ($0.013^{\circ}\text{C}/\text{year}$; there is a

similar tendency in other neighboring countries); in turn, duration of vegetation period became longer by about 20 days; annual deviations of temperature from the longterm mean became more moderate; the winters are milder in average, whilst the summers are cooler; annual amount of precipitation shows a decreasing tendency (about 0.8mm/year); number of days with snow has significantly decreased; annual amount of potential evaporation has increased by about 80-150 mm; annual water deficit calculated on the base of surface water balance and the relative evapotranspiration increased from 150 mm/year to 250-300 mm/year.

The statistically determined changes showed by climatological elements significantly modify the value of climatological potential. The probability of achieving high yields decreased in certain cases. Other main results are as follows: utilization of solar energy by the plants shows an increasing tendency; for certain species (wheat, barley, maize), the utilization of radiation energy increased by 4-5 % (in terms of PhAR), for others (sunflower, lucerne) this value is 1-2 % which is probably the consequence the enhanced productivity; rise in mean temperature results in more frequent occurrence of thermal stress; higher temperature increases the potential evapotranspiration and thereby the water demand of plants is enhanced.

Higher average yields mean increasing demand for the CO₂ by plants. According to estimations in Hungary in the areas used for agricultural purposes (8.3 million ha), plants absorb in average 600-800 million tons of carbon-dioxide annually. The maximum of this value may reach 1300 million tons. The quantity of CO₂ utilized by the plants balances only partially the increment of (anthropogenically enhanced) surface emission so that it does not prevent the increasing atmospheric CO₂ concentration.

For the past decades, the water demand of plant canopies has significantly risen. It could be compensated by use of mineral fertilizers to a certain extent. Biomass associated with a good harvest, needs big amount of water, whilst the decreasing trend of precipitation would result in the greater occurrence of drought and water stress situations. Increase of water demand and decrease of precipitation are the most explicitly appearing trends for agriculture system which can lead to severe consequences. Problems arising from to the probably increasing water shortage will be those of the most important problems of plant cultivation to be solved in the next decades.

Beside the climatic consequences, the direct impact of the increasing CO₂ level on the plants should also be taken into account. Theoretically, productivity of photosynthesis is increased by the growing CO₂ concentration. However, it will happen only in the case if the water supply is also increasing. On the contrary, the enhancement of drought hazard is expected, so that the CO₂ absorption will eventually decelerate (even with the more efficient utilization of the available water resources) and consequently, the development of plant mass can also slow down. Thus, according to the assessments, the direct benefits from the increasing CO₂ concentrations will not exceed the expected decrease in the agro-ecological potential in this region.

Section 3.4 is devoted to the climate related problems of forests. Forest is such an ecological system the composition and organic matter production of which is primarily determined by climate, the former directly and the latter indirectly. Within the framework of the impact studies, the relationship between the climate change and the growth of trees is investigated.

Analysis of the data series on the annual increase in the girth and other features of various tree stands and the corresponding meteorological elements in the region of Gödöllő is accomplished and the following results are obtained: the climatic relationships can be detected only by comparing the various related processes because the growth of forests does not depend exclusively on the meteorological parameters but it is influenced by other (e.g., biotic) factors, as well; the degree of annual increase in the girth depends on the amount of precipitation during the water storage period (November-April) and the main water-consuming period (May-July); the study of the relationship between the increase in girth or in the organic matter production and the meteorological elements makes the ecophysiological evaluations possible (e.g., the annual growth pattern of stands, abiotic and biotic damage, effects of silvicultural treatments, etc.); the conclusions which can be drawn in this way are well utilizable for annual ring analyses and climate reconstructions if the appropriate meteorological observations and data series on the width of annual rings of trees characteristic of the site in question are available. Based on the empirically derived relationships between the stand characteristics and the climatic parameters, the natural water supply is the basic climatic factor of the tree growth. Respectively, the impacts of the climatic change on the forests should be investigated by means of estimated (conditionally predicted) values of this climatic variable beside the direct implications of the increasing amount of atmospheric carbon-dioxide.

At last, the climatic sensitivity of the energy demand and consumption in Hungary is analyzed in section 3.5. First of all, the dependence of the energy use (nationwide) on the mean temperature of the heating season is presented. Using these estimates, the energy impacts of the climatic scenarios (namely, the expected global and regional warming) are investigated. If the mean winter temperature changes by 1°C, it would cause the change of 6% of opposite sign in the domestic energy use for heating purposes. It means the energy amount of 20 PJ in absolute terms. The estimated effects of temperature change on energy consumption are presented in terms of the overall energy demand, and in particular, for the heating demand in the residential and communal sector. Estimates are given for the future energy demand and supply in the case of various climatic scenarios by means of probability functions. It is concluded that the climatic change will have essential impact upon the energy demand and consumption, and the energy policy should take into consideration these changes adequately.

ELŐSZÓ

Az éghajlatváltozás regionális következményeire vonatkozó kutatási programot az 1989-1990-es időszakban a Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat támogatta. A kutatásokat az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alakult ad hoc munkacsoport koordinálta. Az éghajlatváltozással összefüggő globális és regionális problémák számos területet, tudományágat érintenek, s ennek megfelelően a kutatásokban közreműködtek a klimatológia, a légkörfizika és levegőkémia, a hidrológia, a mezőgazdasági és az erdészeti tudományok, az energetika és a társadalomtudományok képviselői.

A kutatások fő irányainak és feladatainak meghatározásánál egyrészt a korábbi hazai kutatások eredményeit vettük figyelembe, másrészt a nemzetközi éghajlatkutatási együttműködésből származó ismereteket, az Éghajlati Világprogram és az Éghajlatváltozás Kormányközi Bizottságának javaslatait. E bizottság munkacsoportjainak és a Második Éghajlati Világkonferenciának az ajánlásai alapján a jövőben az üvegházgázok emissziójának részletes elemzése, valamint a globális klímaváltozás regionális következményeinek és hatásainak vizsgálata mellett több figyelmet kell fordítani a megelőzés és az alkalmazkodás gazdaság- és társadalmi-politikai teendőire. Vizsgálatainkból kitűnik, hogy az éghajlati rendszerre gyakorolt növekvő mértékű emberi beavatkozások miatt az éghajlatváltozás kockázata egyre növekszik, mégha továbbra is jelentős a tudományos bizonytalanság e kockázat mértékét, tényleges bekövetkezését, a változások ütemét, folyamatait és lehetséges hatásait illetően.

dr. Faragó Tibor

ÖSSZEFOGLALÁS

E kötet az „Éghajlat változékonysága és változása: a változások megfigyelése, modellezése, előrejelzése és hatásai” címmel 1990-ben végzett kutatások eredményeit mutatja be. Három fejezete a kutatások három fő témakörében végzett vizsgálatokról szól, nevezetesen a légkör összetételének jelenlegi változásairól és az ezzel kapcsolatos hazai emissziókról, a globális és regionális éghajlatváltozás feltételezhető jövőbeli alakulásáról, valamint e változások lehetséges ökológiai és társadalmi-gazdasági hatásairól.

Üvegház-gázok, energiafelhasználás, erdők

Az első fejezet az üvegház-gázok egyensúlyának kérdéseivel foglalkozik, különös tekintettel a magyarországi emissziók becslésére és várható alakulására, valamint az erdők szerepére a természetes szén ciklusban.

Az első (1.1.) rész általános áttekintést ad az üvegház-gázokról, mindenekelőtt a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, az ózon, a halogénezett szénhidrogének fő forrásairól és légköri koncentrációik jelenlegi változásáról.

Az antropogén üvegház-gáz források emisszióját és a természetes („háttér”) források emisszióját hasonlítjuk össze a tanulmány következő részében (1.2.). A preindusztriális adatok, a jelenlegi megfigyelések és a 2030-re becsült értékek egybevetésével nyomonkövethető e gázok mennyiségének számottevő változása. Az összehasonlító elemzések alapján jelenleg az energiaszektor (beleértve az energiatermelés és a felhasználás különféle módjait) meghatározó szerepet játszik abban az antropogén hatásmechanizmusban, amely végsősoron globális éghajlatváltozást idézhet elő. Következésképpen az energiaigények várható alakulása alapvető tényezője lesz a további üvegház-gáz kibocsátásoknak. E tendenciák összefoglalásán kívül a környezeti hatásokat is figyelembevevő energiastratégia fő elveit is áttekintjük ebben a részben.

Fontosságának megfelelően hangsúlyozzuk a CFC (freon) emisszió mielőbbi radikális csökkentésének szükségességét. Jelenleg a freonok a szén-dioxidét megközelítő nagyságrendben járulnak hozzá az üvegházhatáshoz. Ugyanakkor azonban – a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből és más forrásokból származó – antropogén CO₂ emisszió mennyisége sokkal nagyobb, mint a freonoké. Emellett a fosszilis tüzelőanyagok jelentősége, technológiai és gazdaságossági okok miatt is sokkal realisabb a CFC-emisszió mielőbbi csökkentése; ez egyúttal a sztratoszférikus ózonréteg ritkulásával kapcsolatos problémák megoldását is elősegíti. Ennek ellenére, a többi üvegház-gáz és főképpen a CO₂ emissziójának fokozatos csökkentése is elkerülhetetlennek látszik. Az említett megoldással azonban időt nyerhetünk arra, hogy a CO₂-

emisszió nagymértékű csökkentésére hatékony globális stratégia születhessen, ennek technikai, energiagazdálkodási és más feltételei – a további kutatások, fejlesztések révén – egyértelműbbé válhassanak.

A fosszilis tüzelőanyagok felhasználási arányának figyelembevételével, az energiafelhasználással összefüggő CO₂-emisszió közel lineáris függvénye a teljes energiafogyasztásnak. E kibocsátástól mentes energiaforrások (mint a víz-, a nukleáris, a szél- és a napenergia) csak korlátozott mértékben járulnak hozzá a globális energiatermeléshez. Számításba véve azokat a társadalmi folyamatokat, amelyek hatással vannak az energiaigényre (népességnövekedés, gazdasági tevékenység, életmód, életszínvonal), az energiaigény 1,2-1,6%/év mértékű átlagos növekedése várható az elkövetkező évtizedekben. Az energiaigény 1,25%-os, illetve 1,6%-os évi növekedése a GDP átlagosan 2%-os, illetve 3%-os évi növekedésének felel meg – az alkalmazott becslési eljárások keretében a fejlődés adott mértékű energiaigényességét feltételezve. Más jelenlegi és becsült adatokat, népesség-előrejelzést, a fosszilis energiahordozók felhasználását, a szén-dioxid emissziót és annak légköri koncentrációját is bemutatjuk a 2020, 2050 és 2075 évekre.

A következő (1.3) rész részletesen beszámol a magyarországi energiarendekről 1960 és 1989 között. 1960-tól a 70-es évek közepéig Magyarország gazdaságát extenzív fejlődés jellemezte. A lakossági energiafelhasználás 60%-kal nőtt. Az energiaforrások szerkezete alapvetően megváltozott ezalatt az időszak alatt. A szilárd tüzelőanyagok felhasználásának relatív aránya az 1960-as 75%-ról 1970-re 50%-ra csökkent. Ugyanakkor a szénhidrátok felhasználása nőtt, a 70-es években elérte a 42,5%-ot. Ez a tendencia 1978-ban véget ért, ezután a lakossági energiafelhasználás rövid ideig stagnált. Az energiaigény a 80-as években ismét nőtt. A bruttó energiafelhasználásban az anyagi ágak részesedése az 1970. évi 71,2%-ról az 1980. évi 60,7%-ra csökkent, és ezzel párhuzamosan nőtt a nem anyagi ágak részesedése. A lakossági energiaigény és energiafelhasználás középtávú perspektíváit szintén vizsgáltuk. Az energiaigény és a hozzáférhető források becslése mellett az országos energiapolitika jövőbeli feladatait is elemeztük: az energiamegtakarítás lehetőségeit, az energiafelhasználás racionalizálását, a szénbányászat jövőjét, az energiainport pénzügyi és kereskedelmi hátterét, a környezetvédelmi problémákat. A további elemzések érdekében megadtuk az egyes gazdasági ágazatokban a különböző energiaforrások által kibocsátott légszennyező anyagok mennyiségét.

A szén-dioxid és a metán a legjelentősebb üvegház-gázok közé tartozik. Az 1.4. részben különböző szakirodalmi források alapján megadjuk e gázok teljes hazai kibocsátását. E becslések szerint Magyarországon az 1986-os év teljes metán és szén-dioxid kibocsátása 0,6-1,1, illetve 87,7-114,4 millió tonna C (C-ekvivalens egységben).

Jelentős mennyiségű metán szabadul fel nemcsak biológiai, de antropogén forrásokból is. A biológiai források közül az állattenyésztés fontosságát kell hangsúlyozni, a többi biológiai forrásnak (rizstermesztés, talajok, vízfelszín stb.) kisebb szerepe van a magyarországi metánkibocsátásban. A számítások szerint az antropogén források dominálnak a teljes metán-emisszióban. Ebből a szempontból kisebb a szénbányászat szerepe, a földgáz kitermelése, szállítása és felhasználása során azonban nagy mennyiségű metán kerül a légkörbe. Bár a

becslések legbizonytalanabb része a különböző hulladékokból származó metán-emisszió meghatározása, ezek kétségtelenül jelentős források.

A szén-dioxid legnagyobb része a növények légzése során és a különböző talajokból szabadul fel, de az antropogén emisszió mennyisége (fosszilis tüzelőanyagok égése, cementgyártás) ezzel összehasonlítható nagyságrendű. Kevésbé jelentős, de nem elhanyagolható mennyiségű szén-dioxid szabadul fel az állatok légzése folyamán. A különböző hulladékok szén-dioxid kibocsátása (a metánéhoz hasonlóan) bizonytalan, de a teljes szén-dioxid emisszióban játszott szerepük nem jelentős.

Az 1.5. rész a magyarországi erdők széntartalmának és szénmegkötő kapacitásának becslésével foglalkozik. A mérsékeltövi Európában fekvő területünkön jelentősen hozzájárulhatunk a térség antropogén eredetű üvegház-hatásának csökkentéséhez mintegy 1 millió hektár erdősítéssel. Egy ilyen megoldásnál tekintettel kell lenni a megfelelő fajkiválasztásra és a különböző fajok szénmegkötő képességére.

Az élőfaállomány az erdőállomány teljes szervesanyag készlete (törzs, ágak, lombzat, gyökérrendszer). A szénciklus szempontjából a lombzat, ágak és gyökerek egy része az évi szerves szénanyagcserébe kerül, míg a vékonyabb ágak és gyökerek maradék része 10-100 éves periódusidővel kerül vissza a ciklusba. A törzs és a vastag ágak jelentik a hasznosítható szervesanyagot, a hosszúidejű szénmegkötést.

A fenti összetevőkre a hazai adatok alapján az alábbi becslések tehetők: a magyar erdők élőfaállománya mintegy 103,7 millió tonna, a lombkorona ebből 2,2 millió tonna, a dendromassza 57%-a található tölgyben, cserben, bükkben és gyertyánban, amely az erdős terület 41%-át borítja. Az élőfaállomány éves növekedésének köszönhetően (éves folyó növekmény) mintegy 4 millió tonna szén kötődik meg évente, amelynek 70%-a raktározódik, a maradék rész emberi hasznosításra és az éves szénciklusba kerül.

Az éghajlatváltozás detektálása, modellezése, regionális jellemzői

A kötet második fejezete az éghajlatváltozás detektálásával, az éghajlat modellezésével és a globális éghajlatváltozás lehetséges regionális következményeivel foglalkozik.

Elsőként a megfigyelt adatok idősorait vizsgáljuk a célból, hogy teszteljük (elfogadjuk vagy elvessük) az esetleges szisztematikus változásokra vonatkozó hipotézist. Ennek érdekében a 2.1. részben áttekintjük a trendanalízis statisztikai alapjait és az éghajlati idősorokra való alkalmazásának feltételeit, majd egy speciális trendillesztési módszert mutatunk be és azt a felszíni hőmérséklet globális átlagainak idősoraira alkalmazzuk. E vizsgálatok klimatológiai háttérének megalapozása érdekében összefoglaljuk az éghajlat, az éghajlati állapot (azaz az éghajlati rendszer állapota) és éghajlatváltozás legfontosabb fogalmait és értelmezzük azokat statisztikai szempontból. Annak ellenére, hogy az éghajlat és az éghajlatváltozás nem definiálható teljes pontossággal az ilyen vizsgálatok céljaira, az éghajlatváltozás detektálásának feladata egyértelműen meghatározható. A detektálás – a változás felismerése – valójában a megfigyelt adatok stacionaritására vonatkozó statisztikai döntési feladatnak tekinthető. Amennyiben ez a hipotézis nem fogadható el, akkor az idősor nem-stacionárius jellegét – vagyis tág értelemben

vett trendjét – kell kifejezni, és az így kapott trendfüggvényt klimatológiai szempontból megfelelően értelmezni.

A detektálási probléma részletesebb tanulmányozásához bemutatunk néhány idősor-modellt. A szisztematikus változás vagy trend elvileg a legáltalánosabb alakban is megadható, ennek ellenére csak a viszonylag egyszerű modellek alkalmasak a legalapvetőbb tulajdonságokat tartalmazó konkrét éghajlati idősor jellemzésére. A probléma az, hogy az idősorok elemei közötti sztochasztikus kapcsolat szintén változhat az időben, sőt, ezen elemek eloszlása (sztochasztikus viselkedése) is megváltozhat.

A statisztikai trendmodell szerint az adott éghajlati idősor a változást leíró trendfüggvény és az éghajlati ingadozásokat reprezentáló „zaj” összege. A trendanalízis célja, hogy elkülönítse a trendfüggvényt e „zaj”-tól, pontosabban az, hogy az adott szignifikancia-szinten a lehető legtöbb információt állítsuk a trendfüggvényről. Ezek egymásnak részben ellentmondó követelmények: ha túl sok információt akarunk nyerni a trendfüggvényről, ez sokkal bonyolultabbá teszi a hipotézis tesztelésének elvégzését (a trend szignifikanciájáról). E problémák miatt csak a viszonylag egyszerűbb lineáris analitikus módszereket és a sorfejtésen alapuló eljárásokat tanulmányozzuk. Egy alapvetően új módszert mutatunk be, melynek alapja a trendfüggvény Haar-sorfejtése. E módszer azért előnyös, mert nem feltételezi *a priori* a trendfüggvény konkrét alakját, mégis lehetővé teszi az egymást követő időszakokra vonatkozó középértékekben bekövetkező leglényegesebb változások felismerését. Így végsősoron rekonstruálható az éghajlati trend finomabb szerkezete egy adott szignifikancia-szinten anélkül, hogy a függvény formájára valamilyen kikötést tennénk. E modell felhasználásával az északi félgömb átlagos évi felszínhőmérsékleti adatsorát vizsgáltuk. Az adott módszerrel a megfigyelési időszakot feloszthattuk néhány részperiódusra: az időben legutolsó szignifikáns „törés” valóban pozitív előjelű volt (ami az 1970-es évek végétől kezdődően felmelegedésként értelmezhető), ugyanakkor – mint az más vizsgálatokból is jól ismert – az üvegház-gázok koncentrációjának növekedése miatt feltételezett hosszútávú általános melegedési tendencia az 1960-as évek közepétől az 1970-es évek végéig terjedő időszakban megszakadt. Ez az időszak szignifikánsan elkülöníthető az adott trendmodellben. Emiatt a vizsgált teljes időszakra vonatkozó általános melegedési trend hipotézise nem fogadható el a modell feltételei között, s emiatt célszerű elkerülni például az évtizedenkénti felmelegedési ütem megadását.

A 2.2. rész az éghajlatmodellezés technikájával foglalkozik. Elsőként az éghajlati rendszer elemeit és modellezésének fogalmi kérdéseit tekintjük át. A modellezni kívánt éghajlati rendszer környezeti alrendszerekből (léggör, világóceán, krioszféra, szárazföldi felszín és bioszféra) áll, melyek aktívan részt vesznek a Föld éghajlatának alakításában. Az éghajlatalakító hatások (az éghajlati rendszer különböző alkotóelemei és a külső kényszerek kölcsönhatásai) nagyon bonyolultak. Az éghajlati rendszert befolyásoló legfontosabb külső kényszerek a napsugárzás intenzitása, a Föld keringési és forgási paraméterei, valamint a sugárzásátviteli szempontból aktív anyagok (gázok és aeroszolok) a légkörben. Ez utóbbiak jelentik a belső kényszereket, amelyek az éghajlati rendszeren belüli kölcsönhatások következtében változhatnak. A legjelentősebb antropogén éghajlati kényszerek (pl., a széndioxid vagy a CFC-k emissziója) ebbe a kategóriába tartoznak. Az éghajlati rendszer alrendszerei között fellépő kölcsönhatások legfontosabb csoportjai a sugárzási, a termo-

hidrodinamikai (a légkörben és az óceánban lejátszódó) folyamatok, a krioszférában lejátszó jelenségek, a szárazföld felszínén végbemenő termodinamikai és hidrológiai folyamatok, végül a fizikai-kémiai és a biokémiai folyamatok. A kölcsönhatások egy része visszacsatolásként működik. Röviden jellemezzük az éghajlati rendszer következő visszacsatolási mechanizmusait: a légköri vízgőz és a globális hőmérséklet, a jég albedója és a globális hőmérséklet, a felszíni hőmérséklet és a felhőzet, a légköri szén-dioxid koncentráció és az óceán hőmérséklete.

Az éghajlati rendszer alapvető elemeinek bemutatásán kívül e részben kitérünk a rendszer legfontosabb dinamikai tulajdonságaira is. Ebből a szempontból az éghajlati rendszer tömegükben és sűrűségükben erősen különböző közegekből áll, melyeknek ezáltal – eltérő tehetetlenségükből fakadóan – különböző a kényszerekre adott válaszidejük. A leggyorsabb, viszonylag kis tehetetlenségű éghajlati alrendszer a légkör és a szárazföldi felszín, míg a világóceán és a krioszféra lassú (a külső kényszerek hatására lassan igazodó) éghajlati alrendszerek. Az éghajlati rendszerben a különböző kényszerek hatására állandóan adaptációs folyamatok zajlanak le, ezért az éghajlat úgy tekinthető, mint egy többféle igazodási idővel rendelkező bonyolult rendszer tranzienst válaszolva az időben változó kényszerekre. Az éghajlat nem teljesen determinált, azaz a kényszerek nem határozzák meg egyértelműen. Az időben változó éghajlati kényszerek meghatározott szintje és összetétele mellett az éghajlatnak elvileg több különböző realizációja lehetséges. Ebben az esetben az éghajlat majdnem véletlenszerűen oszcillál a lehetséges válaszok között. Az éghajlati rendszer fent leírt viselkedését kaotikusnak nevezzük. Az éghajlati rendszer érzékenységének meghatározása az adott kényszerekre vagy az éghajlat legvalószínűbb jövőbeli alakulásának meghatározása – részben a rendszer kaotikussága miatt – nagyon bonyolult probléma.

A probléma megoldására az utóbbi 25 év folyamán az éghajlati modellek különböző osztályait fejlesztették ki. Az éghajlatmodellek a bennük szereplő dinamikai blokk szerint két fő csoportra oszthatók: termodinamikai és dinamikai éghajlatmodellekre. A termodinamikai modellek csupán az éghajlati rendszer termikus jellemzőinek reprodukálására képesek, míg a dinamikai modellek alkalmasak a termikus és áramlási karakterisztikák előállítására. Termodinamikai modell az energiaegyensúlyi modell, amely a felszínközeli éghajlati mennyiségek meghatározására, és a sugárzási-konvektív modell, amely a függőleges hőmérsékleteloszlás megállapítására szolgál. A dinamikai modellek egy csoportja parametrizált dinamikát tartalmaz, és így a globális cirkuláció néhány fő jellegzetességét adja meg, míg a másik csoport az áramlás részletes háromdimenziós képének leírására alkalmas. Az utóbbiakat az éghajlat általános cirkulációs modelljeinek (GCM) nevezzük. Ha most az éghajlati modelleket a bennük szereplő éghajlati alrendszerek szerint csoportosítjuk, megkülönböztethetünk légköri és csatolt modelleket. A leggyakrabban használt csatolt modellek a légkör-óceán csatolt modellek.

A továbbiakban az éghajlatmodellek alkalmazásaival foglalkozunk. E modellek segítségével olyan éghajlati folyamatok elemezhetők, amelyekről nincsenek megfigyeléseink. A modellekkel reprodukálható a jelenlegi éghajlat, egy-egy vizsgált periódus éghajlati fluktuációja, geológiai és történelmi korok vagy más bolygók éghajlata. Nagy gyakorlati jelentőséggel bírnak a klímaérzékenységi és a rövidtávú változékonysági vizsgálatok. Az éghajlatmodellek adat- és számítási igénye óriási. Az éghajlatmodellezést a növekvő interdiszciplinaritás jellemzi: a

viszonylag ismert atmoszférán kívül főleg az óceán és a krioszféra fokozott megfigyelésével próbálják ezen alrendszeréről szerzett ismereteinket bővíteni. A fejlődés tendenciái főleg a bonyolultabb modellek további fejlesztésére irányulnak, de folynak kísérletek speciális célú egyszerűbb modellek létrehozására is.

Keletkezése idején az éghajlatmodellezés célja szinte kizárólag a tudományos ismeretszerzés volt. E célok alapvetően átalakultak a 70-es években, amikor az emberi tevékenység környezetkárosító hatásait világszerte megfigyelték. A veszély, hogy az emberi tevékenység a jelenlegi állapotban jelentős vagy akár irreverzibilis globális környezeti változásokat okozhat, az 1980-as években arra a felismerésre vezetett, hogy nemzetközileg egyeztetett globális környezetgazdálkodásra van szükség. Az alapvető környezeti (és éghajlatformáló) mechanizmusok megismerése és az antropogén környezeti hatás következményeinek becslése a fenntartható fejlődéshez szükséges ésszerű környezetgazdálkodási program szerves része. Ezen célok eléréséhez az éghajlatmodellezés fontos gyakorlati eszköz, mert alapvető információkat szolgáltat a tervezéshez és az emberi tevékenység jövőbeli alakításához. Ezzel összhangban a magyarországi éghajlatmodellezési tevékenység alapvető célja az, hogy információkat nyerjünk a globális éghajlatváltozás várható lokális/regionális sajátosságairól.

A globális éghajlati rendszer jövőbeli állapotának becslésére a numerikus klímamodellezés csak az egyik lehetséges eszköz. A paleoklimatológiai adatokon alapuló szcenáriók előnye, hogy olyan eseményeket, változásokat vizsgálnak, melyek már megtörténtek, így az éghajlati rendszer minden elemét figyelembe veszik. A módszer hátránya az, hogy az adatok pontossága (rekonstrukció) messze elmarad a jelenlegi megfigyelések pontosságától, továbbá a területi eloszlás is nagyon ritka a jelenlegi megfigyelő hálózathoz képest. E hátrányokon bizonyos mértékben segíthet a megfigyelt adatokra épülő analóg helyzetek alkalmazása, mivel ezek az adatok jóval sűrűbb hálózathoz származnak. Ezek az adatsorok azonban általában rövidek (mivel csak kiszámított hosszú adatsorú állomás létezik), az adatok nem fedik le a szükséges változás intervallumát és a megfigyelt intervallumon túli extrapolálás jelentős bizonytalansággal jár. A harmadik módszer a numerikus modellezés: az adatmezők a szükséges regionális éghajlatkarakterisztikák számításához kellően sűrűvé tehetők, és bármely paraméter egyszerűen változtatható. Ugyanakkor tekintettel kell lenni a modellezés alapvető elvi korlátjára: a modell a valós éghajlati rendszernek csak egy egyszerűsített változatát jelenti. Ez a probléma komoly hibákhoz vezethet. Szignifikáns hibák keletkezhetnek egy adott numerikus módszer alkalmazásából is. A módszertani kérdésen kívül példát mutatunk az egyes módszerekkel kapott konkrét számítások eredményeire is. Ezeknek az eredményeknek vannak hasonló és eltérő sajátosságai is. Ami a legvalószínűbb globális éghajlati szcenáriókat illeti, a három módszer fő következtetései hasonlóan bizonyultak.

Az idősoranalízis vagy az analógiák használatának korlátai, valamint az éghajlatmodellezés nehézségei miatt az éghajlatváltozás becslési bizonytalanságait és azok okait külön részletesen elemezzük (2.3. rész). E bizonytalanságoknak egyrészt elméleti okai vannak, amelyek az éghajlati rendszer bonyolult belső szerkezetéből és viselkedéséből származnak. Másrészt a kényszermechanizmusok előrejelzésének nehézségei miatt is keletkeznek problémák. Az éghajlati előrejelzés ezen utóbbi problémakörének fő okai a külső kényszerek (főként az

antropogén eredetűek: üvegház-hatású gázok, troposzférikus aeroszolok). Emellett nincs elégséges ismeretünk arról, hogy az egyes kényszerek intenzitásának változására milyen az éghajlati rendszer érzékenysége.

A részben röviden bemutatjuk azokat a legfontosabb tényezőket, melyek meghatározzák az éghajlati rendszer érzékenységét, különös tekintettel a visszacsatolási mechanizmusokra. A légkör válasza a különböző kényszerekre főként az éghajlati rendszer következő folyamataitól és tulajdonságaitól függ: a változó kényszerek által keltett tranziens változások és az óceán szerepe ezek szállításában; a felhőzet sugárzási tulajdonságai; a hó- és jégborítottság változása a nagy szélességeken; a légkör belső dinamikája (visszacsatolási mechanizmusai). Hatalmas tömege miatt a világóceánnak nagy (termikus) tehetetlensége van, és így késleltetheti a globális felmelegedést. A becslések szerint a reakcióidő néhány száz és néhány ezer év között változik. Az óceán néhányszor tíz, illetve néhányszor száz méter mélységű felső rétege közvetlen kapcsolatban áll a légkörrel, ezáltal a termikus reakcióidő néhány hét lehet. A felhők szerepe az éghajlatváltozás folyamatában nagyon bonyolult, mivel hatnak a rövid- és a hosszuhullámú sugárzásra is. Az általános cirkulációs modellekkel végzett kísérletek tanúsága szerint a felhőzet szerepe csökken a közepes és alacsony szélességeken, növekszik a magas szélességeken. A felhők sugárzási tulajdonságai olyan szubgrid skálájú folyamatok, amelyek parametrizálása nem kielégítő az általános cirkulációs modellekben. A magasabb szélességeken a hó- és a jégtakaró meghatározó éghajlatalkító tényező, mégis hatásukat gyakran nagyon egyszerű módon veszik figyelembe a modellekben. Reálisabb közelítés csak abban az esetben alkalmazható, ha a termodinamikai és dinamikai egyenletekkel leírják a hőtranszportot.

Az éghajlati rendszerre a külső perturbációkon (kényszereken) kívül sok, a rendszeren belüli visszacsatolás is hat. Ezen kapcsolatok sokasága, egyedi jellege és időskálája, az ok-okozat kapcsolatok nemlinearitása az éghajlati rendszert roppant bonyolulttá teszi. Főként a geofizikai (gázok, felhőzet, hó- és jégtakaró) és a biogeokémiai visszacsatolásokat tekintjük át részletesen. A legfontosabb biogeokémiai hatások a következők: a melegedés fizikai hatásai (megváltozik a metán felszabadulása a hidrátokból a magasabb hőmérséklet hatására, megváltozik az óceáni cirkuláció stb.); a melegedésre és a szén-dioxid tartalom növekedésére adott válaszok (a talaj szerves összetevőinek egyensúlyából származó szén-dioxid és metán fluxus, a növekvő műtrágyázásnak köszönhető szén-dioxid áram); az ökoszisztémán belül zajló folyamatok hatásai (például a felszíni albedó változása a növénytakaró változásakor, biológiai szénszállítás az óceánban). A legfontosabb hatásokat valószínűleg a geofizikai visszacsatolások keltik, míg a biogeokémiai visszacsatolások nem ennyire jelentősek. Egészében azonban a kezdeti hatások megerősödése, melyet a visszacsatolások sokasága okoz, nagyskálájú következményekhez vezethet. Ezért kívánatos lenne a leglényegesebb biogeokémiai hatások figyelembevételével az éghajlati rendszer tranziens modelljében.

A várható globális melegedés területünket érintő lehetséges regionális éghajlati következményeit a 2.4. részben tárgyaljuk. Pontosabban ezen tanulmányok célja feltételes éghajlati előrejelzések készítése a Kárpát-medence térségére az északi félgömb nagytérségű szcenárióinak a felhasználásával. A fő mennyiségi következtetések az északi félgömbön, a mérsékelt szélességeken és a Magyarországon végett műszeres mérések idősorain alapulnak. A

különböző skálájú éghajlati jellemzők között talált kapcsolatok általánosabb érvényességét történeti és paleoklimatológiai információk felhasználásával ellenőriztük. Ezenkívül elkészült a felszín légkör egy (területünkre parametrizált) energiaegyensúlyi modellje, amelynek a segítségével a globális és a regionális folyamatok közötti kapcsolatok ok-okozati mechanizmusa vizsgálható. A legegyszerűbb módszerekkel nyert becslések egy mérsékelt globális felmelegedési sebességet adnak. Többféle módszerrel becsültük meg az 1°C-ot meghaladó felszíni átlagos hőmérsékletemelkedéssel járó globális felmelegedés regionális jellemzőit: a meteorológiai elemek évszakos menetén alapuló módszerrel, a paleoklimatológiai rekonstrukciók eredményeinek interpolációjával és általános cirkulációs modellek szimulált eredményeinek felhasználásával.

Részletesebben kifejlesztettük a szeleteléses módszert, amely a regionális éghajlati elemek kapcsolatát vizsgálja két hemiszférikus hőmérsékleti jellemzővel, az átlagos felszínhőmérséklettel, valamint az óceán és a szárazföld feletti levegő hőmérsékleti kontrasztjával az 1881-1980-as időszakra. E módszer szerint az átlagos évi hőmérséklet idősorait azonos hosszúságú részidőszakokra bontjuk, és az ezekre vonatkozó (időbeli) átlagokat felhasználva regresszióanalízist alkalmazunk. A hemiszférikus sorok szisztematikus hibáinak randomizálása céljából bevezetünk egy „kvázi-egyensúlyi” felosztást a szárazföldi hőmérsékleti adatsorban elhanyagolható trendkomponenssel, valamint hat különböző hosszúságú „nem-egyensúlyi” felosztást. A „szeletelés” célja, hogy oly módon számszerűsítse az évenkénti felosztásban nem szignifikáns kapcsolatokat, hogy ne tegye tönkre az eredeti együttthatókat. Az említett összefüggések általánosabb érvényességét az 1490-1779 közötti történeti és az i.e. 6000 - i.e. 1000 közötti paleoklimatológiai adatok felhasználásával vizsgáltuk. Az elemzéshez szükséges hemiszférikus indikátor a grönlandi jégmezők O^{18} izotóp tartalma, mely szoros összefüggésben áll a hemiszférikus átlaghőmérséklettel. A regionális éghajlatmodellben vizsgáltuk a szén-dioxid koncentráció, a vulkáni tevékenység és a növénytakaró változásainak közvetlen hatásait. Az intenzívebb (1°C-ot meghaladó melegedés egyensúlyi sajátosságait az évszakos menet alapján becsültük. Esetünkben ezen módszer lehetőségei már nem terjednek ki a 4°C-os felmelegedés regionális sajátosságainak vizsgálatára, így ehhez a paleoklimatikus rekonstrukciókat használtuk fel, illetve alkalmaztuk az általános cirkulációs modellek eredményeit Magyarországra.

A vizsgálatok alapján az üvegház-gázok légköri mennyiségének növekedésével várható globális éghajlatváltozás lehetséges regionális éghajlati következményei a következők. A globális melegedés erősödése a mérsékelt szélességeken más forrásokból jól ismert. Ami ennek mértékét illeti, a mérsékelt (+0,5°C-os küszöbértékig terjedő) hemiszférikus hőmérsékletváltozással párhuzamosan térségünkben átlagosan 1,0-1,6°C/°C-os felszíni hőmérsékletemelkedés várható a nyári félévben; tehát 0,5°C-os nagytérségű változás esetén a közepes regionális nyári felmelegedés becsült értéke 0,5-0,8°C. Ez a – meghatározott hőmérsékleti küszöbértékekkel jellemzett – vegetációs periódus 5-10 napos növekedésének felel meg. A téli félévben a lokális átlaghőmérséklet szignifikáns kapcsolatot mutat a szárazföld-óceán hőmérsékleti kontraszt évi átlagos értékével, 1,5 és 2,0 közötti regressziós együttthatóval (ami a felmelegedést jelentő hatás regionális felerősödésének mértékét jelzi). Láthatóan, a téli hőmérséklet emelkedés várhatóan számottevően meghaladja a nyári félévre számítottat. A becslések szerint a csapadékmennyiség a hemiszférikus átlaghőmérséklet növekedésével párhuzamosan, 50-100 mm/°C mértékben csökken. Ez a változás minőségében megfelel a cirkulációs helyzetek egyidejű változásának (a

várakozások szerint a előtérbe kerül az anticiklonitás). 0,5°C-os átlagos hemiszférikus melegedés esetén a 30 %-nál kisebb relatív talajnedvességű száraz hónapok gyakorisága mintegy 60 %-kal növekedhet. A csapadék változásának előjele a téli félévben nem egyértelmű. A relatív napfénytartam a hemiszférikus átlaghőmérséklet növekedésével együtt 2,0°C-os együttthatóval nő a nyári félévben. Ez 0,5°C-os hemiszférikus melegedést feltételezve a globálsugárzás 8 %-os növekedését jelenti a felszínen. Ez a tendencia megegyezik a cirkuláció anticiklonális jellegének erősödésével. A további 1-4°C-os hemiszférikus melegedés – sokkal bizonytalanabb – egyensúlyi becslései szerint a regionális melegedés a nyári félévben azonos, esetleg kisebb mértékű lesz, míg a téli félévben körülbelül 1,5 °C/°C marad. 1°C-os hemiszférikus melegedés mellett a nyári és az éves csapadékösszeg is lényegesen kisebb lesz, mint a jelenlegi éghajlati feltételek mellett. Nagyobb hőmérsékletemelkedés esetén az évi csapadékmennyiség változása – a becslések szerint – elenyésző.

Éghajlati hatástanulmányok

A kötet harmadik fejezete a regionális hatástanulmányokkal foglalkozik. Kifejezett éghajlatérzékenységük miatt a hidrológiai, ökológiai/mezőgazdasági hatásokat, a fák növekedésére és az erdészetre gyakorolt hatásokat, valamint az energiaigénynek és az energiafogyasztásnak az éghajlati jellemzőktől való függését elemezzük.

A 3.1 részben elsőként az éghajlatváltozás és a társadalmi-gazdasági fejlődés közötti kapcsolatok vizsgálatának módszertani szempontjait tekintjük át. E módszerek kifejlesztését az a tény serkentette, hogy az utóbbi két évtized folyamán a természeti környezet és a társadalmi-gazdasági fejlődés közötti kölcsönhatások jellege és mértéke alapvetően megváltozott. Egyre növekvő gondot okoznak azok a nagytérségű problémák, amelyek több országot vagy kontinenst érinthetnek, hosszú időn át – több évtizeden vagy akár több évszázadon keresztül fennállnak –, különböző földrajzi helyeken a gazdasági élet több szektorát érintik és jelentékeny változásokat idézhetnek elő a földi környezetben.

A globális környezeti problémák közös jellegzetessége, hogy a változásokat kiváltó folyamatok keletkezési helyüktől függetlenül a globális biogeokémiai ciklusra gyakorolt hatásukon keresztül befolyásolják a globális rendszert. Végsősoron e globális folyamatokra adható társadalmi válaszoknak két fő típusa létezik. Az első típus a lokális-regionális változásokhoz való alkalmazkodás. A második típus a globális változás megelőzése vagy legalábbis ütemének lassítása. Ez utóbbi a nemzetek egyetértésén alapuló nemzetközi megállapodások megkötését feltételezi, amelyekben ajánlásokat vagy kötelezettségeket fogadnak el a megfelelő környezetvédelmi lépésekről.

A feltételezett klímaváltozás antropogén okainak és e változás társadalmi-gazdasági következményeinek számos közös vetülete van. Az antropogén éghajlatalakító folyamatok kutatása érdekében meg kell vizsgálni a azokat a fontosabb folyamatokat, amelyek az üvegházhatás további erősödését eredményezik. Így a jövő népességének nagysága, földrajzi eloszlása és sűrűsége, életkorának szerkezete, a falusi-városi lakosság megoszlása, a képzettségének szintje és migrációjának irányai közvetlenül hatással lesznek arra, hogy milyen

igénybevétel éri a globális éghajlattal összefüggő környezeti rendszereket. A legtöbb antropogén hatás azonban nem közvetlenül a társadalmi folyamatok, hanem döntően egyes gazdasági tevékenységek következménye. Elsősorban azokról a tevékenységekről van szó, amelyek valamilyen módon befolyásolják az üvegház-gázok globális körforgalmát.

Az éghajlatváltozás különböző hatásainak modellezéséhez különböző felbontású éghajlatváltozási scenáriók szükségesek. Néhány gazdasági ágazat példáján áttekintjük az éghajlati hatáselemzések főbb szempontjait. Röviden utalunk a mezőgazdasági és a vízgazdálkodási hatások vizsgálatának főbb szempontjaira. A fogalmi és a módszertani bevezetés után specifikusabb hatástanulmányok következnek.

A 3.2. részben az éghajlat változékonyságának és korlátozott mértékű változásának egyes hazai hidrológiai hatásait tanulmányozzuk. Az éghajlati elemekkel szoros kapcsolatban álló vízgazdálkodás céljai lényegesen megváltozhatnak egy esetleges éghajlatváltozás esetén. Az éghajlati scenáriók általában hosszabb időre vonatkozó karakterisztikákat tartalmaznak. Különleges figyelmet kell szentelni azoknak az éghajlati hatásoknak, amelyek az évi lefolyást befolyásolják. Egy adott területre a lefolyás az egyik legfontosabb hidrológiai paraméter azok sorában, amelyek jelentősek egyrészt az olyan alapvető hosszútávú vízgazdálkodási problémák megoldásában, mint a vízzsállítás és a többéves víztározás; másrészt pedig az adott régió maximálisan hasznosítható potenciális vízkészletének jellemzésében.

45 magyarországi vízgyűjtő lefolyásának és éghajlati megfigyeléseinek felhasználásával nemlineáris regionális éghajlati kapcsolatot állítottunk fel az évi átlagos lefolyás becslésére az átlagos évi csapadék és az átlagos évi középhőmérséklet mint független változók felhasználásával. E statisztikai összefüggés pontossága erősen korlátozott. A regionális modell egyik alapvető hibaforrása a kalibrálásához rendelkezésre álló adatok korlátozott reprezentativitása és pontossága. A vizsgált változók közötti illetve a modell által is leírt nemlineáris kapcsolat következményeként a lefolyás igen érzékeny a figyelembevett éghajlati elemek eltéréseire (hibáira) és változásaira. Például, a középhőmérséklet regionális átlagának 0,5°C-os hibája 10 %-os eltérést eredményez a lefolyás becslésében. A regionális modell másik hibaforrása maga a regionalizálás, mely nem veszi figyelembe a felszíni karakterisztikák vízgyűjtőről vízgyűjtőre történő változását. A becslés jósága növelhető a felszín tulajdonságainak figyelembevételével.

A továbbiakban a lefolyás évközi változékonyságának éghajlati összefüggéseit vizsgáltuk a Duna nagymarosi szelvényére, a Zagyva jászteleki szelvényére, a Balaton vízgyűjtőjére és a Balatonban tárolt vízmennyiség évi változásának sorozatára. Két modell veszünk számításba: egy lineáris regressziós kapcsolatot az évi lefolyás és az éghajlati változók között, valamint a fent említett regionális modell egy változatát úgy, hogy azt az adott vízgyűjtőre kalibráljuk. A vizsgálatok szerint a két módszer eredményei többé-kevésbé azonosak a megfigyelt adatok területi határain belül. A modell az éves lefolyás idősorainak és a tárolt víz évi változásának mindegyikét felbontjuk egy éghajlatilag meghatározott és egy maradék idősorra. A Duna és a Zagyva esetében a maradéktag egy „fehér zaj” folyamat, míg a Balaton és vízgyűjtőjének esetében jelentős autokorreláció figyelhető meg mind a lefolyás, mind a tárolt víz évi

változásának maradék idősoraiban. Ha az eredeti lineáris modellt kiegészítjük a megfelelő autoregressziós modellel, akkor az eredményül kapott maradék idősorok ugyancsak „fehér zaj” típusú véletlen folyamatok lesznek.

A lineáris és nemlineáris modell szerint is az évi lefolyás becslésének konfidencia-intervalluma 5% és 15% között van a legvalószínűbb érték körül, azaz ekkora az éghajlati változók alapján előállítható becslés megbízhatósága. Mivel ez a pontosság hasonló azoknak a változásoknak az értékéhez, amelyeket az éghajlati elemekben bekövetkező viszonylag kisebb változások idézhetnek elő az átlagos évi lefolyásban, a modell nem képes egyértelműen (kellő pontossággal) meghatározni az éghajlati hatásokat. Bár egy nagyobb fokú éghajlatváltozás által a potenciális lefolyásban várhatóan előidézett változások egyértelműen meghaladják az ettől független – tehát e modell keretében véletlennek tekintett – hatásokat, ezekben az esetekben a leírt módon illesztett és kalibrált modell már nem alkalmazható, vagy alkalmazhatósága legalábbis kétséges.

A becslési pontosság növelésének egyik módja az, hogy növeljük a modell időbeli felbontását. A Duna nagymarosi szelvényére végzett mintavizsgálatok szerint, az évszakos csapadékmennyiségek használata jelentékenyen csökkenti a maradék tag szórását. Az éghajlati változók és a lefolyás közötti összefüggés kapcsolatának pontossága hónapos időlépcső felhasználásával is növelhető. E modelljavítások ellenére a modell megfelelő pontosságú verifikációjának problémája lényegében nem oldható meg. Ennek az az alapvető oka, hogy nem állnak rendelkezésünkre független minták. Ennek megfelelően, a modell csak az adott éghajlati megfigyelési sorok viszonylag szűk terjedelmén belül verifikálható. Végsősoron a múltbeli megfigyelésekre alapozott hatásmodellekkel végzett előrejelzéseknél kétféle bizonytalansági tényezőt kell tekintetbe venni. Egyrészt a becslések bizonytalansága a vizsgált változók közötti összefüggés sztochasztikus jellegének és a statisztikai modellnek a sajátossága, valamint annak következménye, hogy az empirikusan meghatározott modell kalibrálása csak korlátozottan lehetséges. Másrészt a becslési hibák lehetséges forrása az, hogy nem kellően ismertek a feltételezett éghajlatváltozás hidrológiai és vízgazdálkodási következményei.

A kapott eredmények felhasználásával csak meglehetősen bizonytalan becslések adhatók az éghajlatváltozás lehetséges hidrológiai következményeire. E becslések is csak meghatározott pontossággal a független változóknak tekintett éghajlati elemekben bekövetkező olyan kisebb mértékű változásokra vezethetők le, amelyek közel vannak a megfigyelések terjedelméhez. Az éghajlatváltozás első szakaszában viszonylag csekélyebb hőmérsékletemelkedés (mintegy 0,5°C évi átlagban) és az évi csapadékmennyiség mintegy 5 %-os csökkenése várható. Ezek az értékek a legvalószínűbb éghajlatváltozási scénáriókból származnak. E változások hatására az évi átlagos lefolyás 10-15%-os csökkenésére, az évi lefolyás változékonyságának kisebb mértékű növekedésére, s következésképpen a kritikus évi vízkészleteknek az átlagos csökkenésnél nagyobb mértékű csökkenésére lehet számítani. Ez utóbbinak köszönhetően a víztározási igény várhatóan megnő, míg a víztározás hidrológiai követelményei rosszabbodnak. A tavakban végbemenő vízkicserélődés ugyancsak lelassulhat.

Az agroökológiai potenciált alkalmazzuk az éghajlatváltozás lehetséges regionális ökológiai/mezőgazdasági hatásainak vizsgálatára (3.3.). Ez a jellemző azt az elsődleges

terménymennyiséget jelenti, amely adott területen, adott környezeti feltételek (légkör, talaj) mellett előállítható. Az ökológiai rendszerben végbemenő energia- és tömegtranszport figyelembevételével az agroökológiai potenciál, illetve annak tér- és időbeli változásai megbecsülhetők. A légkör mint természeti erőforrás az ökológiai rendszerek folyamatait és „outputjait” alapvetően módosíthatja.

Az ökológiai potenciál agroklimatológiai összetevőinek módosulása közvetlen hatással van a termésmennyiségre. Éghajlatváltozás esetén e potenciál is szükségszerűen megváltozik. Stacionaritást feltételezve a termelés különböző modellekkel becsülhető. E modellekben a fő éghajlati elemek (sugárzás, hőmérséklet, csapadék stb.) és bizonyos légköri összetevők (CO₂) a független változók (prediktorok). Emellett természetesen más paramétereket is számításba lehet venni. Kedvező tulajdonságai miatt az agroökológiai potenciált mint komplex indikátort alkalmazzuk a növénytermesztéssel kapcsolatos éghajlati hatások jellemzésére. Az agroökológiai potenciál évközi változása számottevő, s ez a termésmennyiség jelentékeny változékonyságát eredményezi. Ha a termésmennyiség időszora homogén, azaz a vizsgált növényfaj esetében változatlan biológiai alapokat és változatlan növénytermesztési technológiát feltételezünk, akkor az említett fluktuációkat az agroklimatikus jellemzőkben mutatkozó változások okozzák.

A számszerű elemzések során először az alapvető agroklimatikus jellemzőkkel foglalkozunk. A hazai éghajlati megfigyelések alapján megállapítható, hogy az agroökológiai potenciál éghajlati összetevői sajátos változásokon mentek keresztül az elmúlt 130 év során. E változások legfontosabb jellemzői: az évi átlaghőmérséklet növekvő tendenciát mutat (0,013°C/év; a szomszédos országokban hasonló tendencia figyelhető meg); a vegetációs időszak hossza mintegy 20 nappal hosszabb lett; az évi középhőmérséklet eltérése a sokévi átlagtól csökken; átlagosan a telek enyhébbek és a nyarak hűvösebbek; az éves csapadék csökkenő tendenciát mutat (körülbelül 0,8 mm/év); a havas napok száma szignifikánsan csökkent; az évi potenciális evapotranspiráció mintegy 80-150 mm-rel nőtt; a felszíni vízmérleg és a relatív evapotranspiráció felhasználásával számított évi vízhiány 150 mm/év-ről 250-300 mm/év-re nőtt.

Az éghajlati elemek statisztikusan meghatározott változásai jelentősen megváltoztatják az éghajlati potenciál értékét. Bizonyos esetekben csökken a magas terméshozamok elérésének valószínűsége. A további eredmények a következők: a növények által felhasznált napenergia növekvő tendenciát mutat; néhány fajra (búza, árpa, kukorica) az energiafelhasználás 4-5 %-kal (PhAR egységben), másokra (napraforgó, lucerna) 1-2 %-kal nőtt, ami valószínűleg a nagyobb produktivitás következménye; a hőmérsékletemelkedés növeli a hőstressz előfordulását; magasabb hőmérséklet miatt a növekszik a potenciális evapotranspiráció, ami a növények vízigényének növekedéséhez vezet.

A termésátlagok fokozatos növekedésével a növényeknek nő a szén-dioxid-igénye. Magyarországon végzett becslések szerint a mezőgazdasági területeken (8,3 millió ha) a növények átlagosan 600-800 millió tonna szén-dioxidot hasznosítanak évente. Ezen érték maximuma elérheti az 1300 millió tonnát is. A növények által hasznosított széndioxidmennyiség csak részben ellensúlyozza a felszíni (antropogén eredetű) kibocsátás növekedését, és nem akadályozza meg a légköri szén-dioxid koncentráció további növekedését.

Az utóbbi évtizedben a növényzet vízigénye jelentősen növekedett. Ezt bizonyos mértékig ellensúlyozta az ásványi sókkal történő trágyázás. A jó termés és a hozzá szükséges biomassza nagy mennyiségű vizet igényel, míg a csapadék csökkenő tendenciája a szárazságok és a vízhiányos időszakok gyakoriságának növekedését eredményezné. A vízigény növekedése és a csapadék csökkenése az a két legnyilvánvalóbb jelenség, amely a mezőgazdaság számára a legkomolyabb következményekkel járhat. A valószínűleg növekvő vízhiány jelenti a feltételezett éghajlatváltozással járó legnagyobb problémát, amelyet a növénytermesztésnek az elkövetkező évtizedekben meg kell oldania.

Az éghajlati hatásokon kívül, a szén-dioxid növekvő légköri mennyiségének a növények fejlődésére gyakorolt közvetlen hatását is számításba kell venni. Elméletileg a fotoszintézis mértéke növekszik magasabb szén-dioxid koncentráció esetén. De ez a hatás csak akkor juthat érvényre, ha a növény számára a megfelelő vízellátottság is biztosított. Ezzel szemben az aszályos időszakok gyakoriságának várható növekedésével a szén-dioxid abszorpció végsősoron csökkenni fog (még a hasznosítható vízkészlet hatékonyabb felhasználásának figyelembevételével is), és így a növényzet fejlődése is lelassul. Következésképpen, a becslések alapján a növekvő szén-dioxid koncentrációnak tulajdonítható biomassza (termés-) növekedés nem fogja meghaladni ebben a régióban az agroökológiai potenciál várt csökkenését.

A 3.4. részben az erdőgazdálkodásnak az éghajlattal kapcsolatos problémáival foglalkozunk. Az erdő egy olyan ökoszisztéma, amelynek összetételét és szervesanyag termelését döntően az éghajlat határozza meg, az előbbit közvetlenül, az utóbbit közvetve. A hatástanulmányok keretében az éghajlatváltozás és a fák növekedése közti kapcsolatot vizsgálják.

A Gödöllő térségében különböző faállományokban végzett kerület- és további jellemzőkre vonatkozó mérések és a megfelelő meteorológiai elemek közötti összefüggések vizsgálata alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le: az éghajlati összefüggések csak az összes lényeges hatásmechanizmus és folyamat figyelembevételével fejezhetők ki, mivel az erdő növekedése nemcsak a meteorológiai paramétereiktől függ, hanem azt más (például biotikus) tényezők is befolyásolják; a kerület éves növekedésének mértéke a víztározási (novembertől ápriliséig terjedő) és a fő vízfelhasználási (májustól júliusig terjedő) időszak csapadékösszegétől függ; a kerületnövekedés vagy a szervesanyag-produkció és a meteorológiai elemek közti összefüggés vizsgálata lehetővé teszi az ökofiziológiai becsléseket (például a faállomány éves növekedésének, a biotikus és abiotikus károknak, az erdészeti tevékenység hatásainak becslését); az így nyert ismeretek jól hasznosíthatók az évgyűrélemzésben és az éghajlat rekonstruálásában, ha az adott helyre vonatkozó meteorológiai megfigyelések és az évgyűrűk adatsorai rendelkezésre állnak. A kapott összefüggések alapján a csapadékellátottság a faállomány növekedésének meghatározó tényezője és az éghajlatváltozást – a légköri CO₂-koncentráció közvetlen hatásai mellett – első megközelítésben e klimatikus tényező változásának és a faállományra gyakorolt hatásának szempontjából célszerű vizsgálni.

Végül a magyarországi energiaigény és energiafelhasználás éghajlati érzékenységét elemezzük (3.5.). Mindenekelőtt az országos energiafelhasználást mutatjuk be a fűtési időszak középhőmérsékletének függvényében. E becsléseket felhasználva a globális és regionális

éghajlati scénáriók alapján az energiafogyasztási következményeit vizsgáljuk. A téli középhőmérséklet 1°C-os csökkenése a fűtési célú energiafelhasználás 6 %-os növekedését idézné elő. Ez 20 PJ (petajoule) értékű növekedést jelent az energiafelhasználásban. Bemutatjuk a hőmérsékletváltozás hatásait az összenergia-felhasználásra és külön-külön a lakossági és kommunális fűtésre. Különböző éghajlati scénáriókra megadjuk a várható energiaigényeket valószínűségi függvények segítségével. Vizsgálatainkból azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az éghajlatváltozás jelentős hatással lesz az energiaigényekre és az energiafelhasználásra, és emiatt az energiapolitikának ezeket a változásokat megfelelően figyelembe kell vennie.