BRITISH COUNCIL BRITISH - RUSSIAN CONFERENCE

HYDROLOGICAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE

13-15 June 2007
Novosibirsk, RUSSIA

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

13-15 июня 2007
Новосибирск, Россия

IWEP РФФИ

Сибирское отделение Российской Академии наук
Институт водных и экологических проблем

Российский фонд фундаментальных исследований

Британский совет

Федеральное агентство водных ресурсов
(Министерство природных ресурсов РФ)

Федеральная служба по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды
(Росгидромет)

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Institute for Water and Environmental Problems

Russian Foundation for Basic Research

British Council

Federal Water Resources Agency
(Ministry of Natural Resources of the Russian Federation)

Federal Service for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring
(RosHydromet)

HYDROLOGICAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE

Proceedings of British-Russian Conference

Scientific editors

Prof. Oleg F.VASILIEV
Institute for Water and Environmental Problems
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russia

Prof. Nigel W.ARNELL
University of Southampton
UK

June 13-15, 2007

Novosibirsk, Russia

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Материалы Британско-Российской конференции

Научные редакторы

Академик О.Ф. ВАСИЛЬЕВ
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения РАН
Новосибирск, Россия

Профессор Н. У. АРНЕЛЛ
Университет Саутгемптона
Великобритания

13-15 июня 2007

Новосибирск, Россия

УДК 551.5 + 556
UDK 551.5 + 556

ББК 22.247.6 + 22.222
BBK 22.247.6 + 22.222
Г46

Гидрологические последствия изменений климата: Труды Британско-Российской конференции / Изд-во ООО «Пять плюс», г. Барнаул, 2009. –210 с.

В сборник включены материалы Британско-Российской конференции, организованной в Новосибирске 13-15 июня 2007 г. Британским советом и Институтом водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук. Конференция проведена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Федерального агентства водных ресурсов (Министерство природных ресурсов РФ) и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

Hydrological Impact of Climate Change: Proceedings of British-Russian Conference / "Pyat Plus" Publisher, Barnaul, Russia, 2009. – 210 p.

The proceedings include the reports of the British-Russian Conference held in Novosibirsk on June 13-15, 2007 by the British Council and Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The Conference was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Federal Water Resources Agency (Ministry of Natural Resources of the Russian Federation) and Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (RosHydromet).

ISBN 978-5-904014-02-5

Содержание

Table of Content

ПРЕДИСЛОВИЕ 10

INTRODUCTION 11

THE IMPLICATIONS OF CLIMATE CHANGE FOR HYDROLOGICAL REGIMES AND WATER RESOURCES: AN OVERVIEW
Nigel W. Arnell 12

STUDIES EXPLORING THE PROCESSES THAT AFFECT RUNOFF GENERATION IN THE ARCTIC
E. Blyth 19

EXTREME RAINFALL AND FLOOD RESPONSE IN A CHANGING CLIMATE
R. J. Moore, S. J. Cole and V. A. Bell 27

CONTINUOUS FLOW SIMULATION MODELLING INCORPORATING CLIMATE CHANGE
C. Prudhomme 34

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АРКТИКИ НА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ АНГАРСКОГО КАСКАДА ГЭС
Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, В. В. Ветрова 42

IMPACT OF ARCTIC WARMING ON THE WATER INFLOW TO THE RESERVOIRS OF THE ANGARA HPP CASCADE AND LAKE BAIKAL
N. V. Abasov, T. V. Berezhnykh and V. V. Vetrova 42

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ЮГЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ
А. Н. Антипов, Н. Н. Густокашина, Н. В. Кичигина, А. С. Балыбина 50

REGIONAL FEATURES OF HYDROCLIMATIC CHANGES IN THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA
A. N. Antipov, N. N. Gustokashina, N. V. Kichigina and A. S. Balybina 50

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ
О. Ф. Васильев, А. Т. Зиновьев, Т. Э. Овчинникова, А. Н. Семчуков 57

MODELLING HYDROLOGIC AND HYDROPHYSICAL PROCESSES IN LAKES AND RESERVOIRS
O. F. Vasiliev, A. T. Zinoviev, T. E. Ovchinnikova and A. N. Semchukov 57

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ОЦЕНКИ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
А. В. Игнатов 68

USING THE NUCLEAR ESTIMATE OF MULTIDIMENSIONAL PROBABILITY DISTRIBUTION IN INVESTIGATING THE CONNECTION OF CLIMATIC AND HYDROLOGIC PARAMETERS
A. V. Ignatov 68

ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА НА ВОДОСБОРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ФОСФОРНОГО РЕЖИМА В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова 76

ESTIMATION OF CHANGES OF RUNOFF IN LAKE LADOGA CATCHMENT AND ITS PHOSPHORUS REGIME AS A RESULT OF POSSIBLE CLIMATE CHANGES
S. A. Kondratyev and M. V. Shmakova 76

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В. Н. Лыкосов 84

CLIMATE CHANGE AND MATHEMATICAL MODELLING OF CLIMATE
V. N. Lykosov 84

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ РЕЧНОГО СТОКА
А. А. Любушин, М. В. Болгов 91

TIME SERIES STRUCTURE ANALYSIS FOR ANNUAL RIVERS RUNOFF VARIATIONS
A. A. Liubushin and M. V. Bolgov 91

ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
И. И. Мохов 103

ESTIMATES OF POSSIBLE REGIONAL HYDROLOGICAL REGIME CHANGES IN THE 21ST CENTURY BASED ON GLOBAL CLIMATE MODELS
I. I. Mokhov 103

ВЫЯВЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ ФАКТОРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ГЛОБАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБАХ
В. В. Пененко, Е. А. Цветова 112

REVEALING PRINCIPLE FACTORS AND A STUDY OF CLIMATIC SYSTEM VARIABILITY IN REGIONAL AND GLOBAL SCALES
V.V. Penenko and E.A. Tsvetova 112

О СВЯЗИ ЦИКЛИЧНОСТИ КЛИМАТА И ВОДНЫХ РЕЖИМОВ БОЛОТ И МОРЕЙ
Ю. И. Прейс, А. И. Кусков 121

ABOUT CONNECTION OF CYCLICITY OF WATER OBJECTS AND THE CLIMATE
Yu. I. Preis and A. I. Kuskov 121

ОСАДКИ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
С. М. Семенов 128

PRECIPITATION AND WATER RESOURCES
S. M. Semenov 128

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В. Ч. Хон 136

ESTIMATE METHODS OF HYDROLOGICAL REGIME CHANGES UNDER THE INFLUENCE CLIMATIC CHANGES
V. Ch. Khon 136

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕК РОССИИ
И. А. Шикломанов, В. Ю. Георгиевский 143

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON THE HYDROLOGICAL REGIME AND WATER RESOURCES OF THE RUSSIAN RIVERS
I. A. Shiklomanov and V. Yu. Georgievsky 143

ТЕНДЕНЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЙКАЛЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ОБЗОР
М. Н. Шимараев 152

TENDENCIES OF HYDROLOGICAL PROCESSES OCCURRING IN LAKE BAIKAL UNDER CLIMATE CHANGES: REVIEW
M. N. Shimaraev 152

ТЕЗИСЫ 164

ABSTRACTS 164

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON RIVER FLOWS AND GROUNDWATER RECHARGE IN THE UK: IMPACTS ON WATER RESOURCES
S. Wade and J.-Ph. Vidal 165

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИТОКА К ВОДОХРАНИЛИЩАМ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА ГИДРОУЗЛОВ: ПРИРОДНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ И ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА
С. Е. Беднарук 166

VARIABILITY OF WATER INFLOW TO THE RESERVOIRS OF VOLGA-KAMA WATERWORKS CASCADE: NATURAL RECURRENCE AND CLIMATE CHANGE INFLUENCE
S. E. Bednaruk 167

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова 169

CLIMATIC CHANGES IN THE AIR TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC PRECIPITATION OVER THE TERRITORY OF RUSSIA FROM THE INSTRUMENTAL RECORDS
G. V. Gruza and E. Ya. Rankova 169

СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СИБИРИ М. В. КАБАНОВ . 170

CONTEMPORARY CLIMATE CHANGES IN SIBERIA
M. V. Kabanov 170

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ КЛИМАТИТЕСКОЙ СИСТЕМЫ
В. Н. Крупчатников, А.И. Крылова, Ю.В. Мартынова 172

MODELLING OF SURFACE HYDROLOGY USING CLIMATE SYSTEM MODEL
V.N. Krupchatnikoff, A.I. Krylova and Yu.V. Martynova 172

АКАДЕМИК МИХАИЛ ИВАНОВИЧ БУДЫКО И ЕГО ВКЛАД В РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ О КЛИМАТЕ
Г. В. Менжулин 174

ACADEMICIAN MIKHAIL IVANOVICH BUDYKO AND HIS CONTRIBUTION TO THE MODERN SCIENCE ON CLIMATE CHANGES
G. V. Menzhulin 175

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
Ю. Г. Мотовилов 177

ESTIMATIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES
Yu. G. Motovilov 178

РЕАКЦИЯ ГОДОВОГО СТОКА СИБИРСКИХ РЕК НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
А. А. Онучин 179

THE RESPONSE OF THE ANNUAL RUNOFF OF SIBERIAN RIVERS TO CLIMATIC AND HUMAN-CAUSED CHANGES
A. A. Onuchin 180

ОТКЛИК ВОДНЫХ РЕСУРСОВ КАРЕЛИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
Н. Н. Филатов, Ю. А. Сало, Л. Е. Назарова 182

RESPONSE OF WATER RESOURCES OF KARELIA ON CLIMATE CHANGES
N.N. Filatov, Yu.A. Salo and L.E. Nazarova 182

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ....184
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS OF THE CONFERENCE....187
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ....192
AUTHOR INDEX....192
СПИСОК УЧАСТНИКОВ....194
LIST OF PARTICIPANTS....202

Предисловие

С 13 по 15 июня 2007 г. в Новосибирском Академгородке прошла Британско-Российская конференция «Гидрологические последствия изменений климата» («Hydrological Impact of Climate Change»). Конференция была проведена Институтом водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН по инициативе Британского Совета и приурочена к 50-летию Сибирского отделения РАН.

Основной целью конференции было обсуждение состояния исследований влияния климатических изменений на гидрологические процессы в реках, озерах и водохранилищах. Научная программа включала следующие вопросы: методы и результаты оценки возможных гидрологических изменений в результате изменения климата для гидрологических объектов различного типа и масштаба; влияние климатических изменений на водные ресурсы и на возникновение экстремальных гидрологических явлений, в частности, применительно к водным объектам и гидрологическим процессам в природных условиях Севера.

В конференции приняло участие 65 ведущих ученых из академических институтов РАН, СО РАН и других научных центров РАН, организаций Росгидромета и Федерального агентства по водным ресурсам МПР РФ. С британской стороны — из Университета Саутгемптона, национального Центра экологии и гидрологии и компании HR Wallingford. На конференции было заслушано 23 устных доклада и представлено 6 стендовых докладов.

Сопредседатели конференции: с российской стороны академик Олег Федорович Васильев (Институт водных и экологических проблем СО РАН), с британской – профессор Найджел Арнелл (Университет Саутгемптона). Конференция проводилась при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН, Российского фонда фундаментальных исследований, Британского Совета, Федерального агентства водных ресурсов (МПР РФ), Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

Академик О. Ф. Васильев Профессор Н. У. Арнелл

Introduction

The British-Russian Conference "Hydrological Impact of Climate Change" took place in Novosibirsk Akademgorodok in June 13–15, 2007. The Conference had been conducted by the Institute for Water and Environmental Problems of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS) by the initiative of the British Council and was dedicated to the 50th anniversary of the Siberian Branch of RAS.

The conference was aimed the discussing the investigations on the influence of climate changes on hydrological processes in rivers, lakes and reservoirs and the critical analysis and estimation of the current knowledge on the problem of forecasting the hydrological impact of climate change. The scientific program of the Conference included the following points: modern methods in the assessment of possible hydrological consequences of climate change (and variation) for hydrological objects of different types and sizes (scales); hydrological impacts as a result of global and regional climate changes or variability; climate change and water resources; influence of climate change on extreme hydrological events (river floods, low flow periods, etc.). One presentation was paid to exploring the above-mentioned issues for hydrological objects and processes in Siberia and Northern environment.

The leading scientists from the academic institutes of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch of RAS and other scientific centers of RAS as well as from organization of Water Resources Agency (Ministry of Natural Resources of the Russian Federation) and of Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring took part in the Conference. From the British side – from University of Southampton, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford and HR Wallingford. The Program of the Conference included 23 oral and 6 poster presentations. The most of the papers were presented by the authors for publishing in this issue.

Co-Chairs of the Conference: from the Russian side – Prof. O. F. Vasiliev, Academician, Institute for Water and Environmental Problems of Siberian Branch of RAS, from the British side – Prof. N. W. Arnell, University of Southampton. The Conference was supported by the SBRAS, British Council, Russian Foundation for Basic Research, Federal Water Resources Agency (Ministry of Natural Resources of the Russian Federation), Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Prof. Oleg F. Vasiliev Prof. Nigel W. ARNELL

The Implications of Climate Change for Hydrological Regimes and Water Resources: an Overview

Nigel W. Arnell

Walker Institute for Climate System Research, Department of Meteorology, University of Reading, Reading, UK
E-mail: n.w.arnell@reading.ac.uk

This paper gives a generalised overview of the implications of climate change for hydrological regimes and water resources. It explores what we do know (that climate change will have a significant impact), what we do not know (the magnitude of that impact and effects on extremes), and what this implies for research and water management practice.

Introduction

The challenges posed by climate change to water management are well known. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) summarised the conclusions of several dozens of studies (Arnell et al., 2001), and since then well over a hundred papers exploring the potential effects of climate change on hydrological regimes and water resources have been published in the international literature; many more studies have been completed and presented in reports and at conferences. The vast majority of these studies are methodological, or examine the potential effects of climate change on river flow regimes; very few explore implications for groundwater, water quality or, indeed, the management of water resources. The aim of this paper is to provide an overview of the state of knowledge of the potential implications of climate change for hydrological regimes and water resources. It addresses three questions:

(i) what do we know about the implications of climate change for hydrological regimes and water resources?

(ii) what don't we know?

(iii) and what does this imply for what we can or should do now?

There are three reasons why we are interested in the potential impacts of climate change on hydrological regimes and water resources. The first is in order to ascertain the extent of the problem: is it a real issue? The second is to inform the development of strategies to adapt to the impacts of climate change in order to lessen their adverse consequences and exploit new opportunities. The third is to help inform the develop-

ment of policies to reduce the emissions of greenhouse gases: can we identify "dangerous" water resources impacts that we want to avoid through emissions control?

The vast majority of studies have concentrated on the first reason, and have clearly demonstrated that, at all scales from catchment to global, climate change is potentially very challenging and merits further attention. Few studies have considered what this means for adaptation, which will vary between geographical and institutional settings. Even fewer studies have sought to relate water resources impacts to climate policy, and the appropriate scale for such studies is the globe. This paper focuses on the catchment scale, and on catchment-scale adaptation to climate change.

What do we know about the implications of climate change?

- *Climate change has the potential to alter substantially river flow regimes in a catchment*

Virtually all published impacts assessments show substantial changes in either the volume or timing of river flows in a catchment. For example, Figure 1 shows changes in average monthly runoff in two British catchments by the 2050s (compared to the 1961-1990 mean). The two catchments are exposed to very similar scenarios, but react in different ways. The Harper's Brook is in a dry part of eastern England, with a strong summer soil moisture deficit.

- *Climate change will be superimposed onto natural climatic variability*

It is now widely accepted that not only does weather vary from year to year, but that climate varies from decade to decade. The performance of a water management system in one decade may be quite different to its performance in another. Figure 2 shows decadal average monthly runoff for a catchment in eastern England, as a percentage difference from the 1961-1990 mean. Decadal mean runoff can easily be 50% different from the long-term average – and in some months much more. The effects of climate change will be superimposed onto this inter-decadal variability, which may either completely mask or exaggerate the climate change signal (Arnell, 2003). A consequence of this is that it may be difficult to detect a clear climate change signal for several years. However, where changes in temperature are producing changes in the timing of streamflows, climate change may be visible as early as the 2020s (Dettinger et al., 2004).

Flows in summer are very much affected by changes in soil moisture conditions in spring and autumn, both of which become drier under the scenarios considered. The Greta is in upland England. Relatively small changes in winter rainfall translate into large changes in runoff, because virtually none of the additional rainfall infiltrates as soils are saturated through winter; the higher temperatures also mean that winter precipitation falls entirely as rain, rather than as a mixture of rain and snow, and there is therefore no spring snowmelt peak. This latter effect is relatively small in temperate

Britain, but much more significant in snow-affected high latitude and mountainous areas where peak flows could occur at least a month earlier.

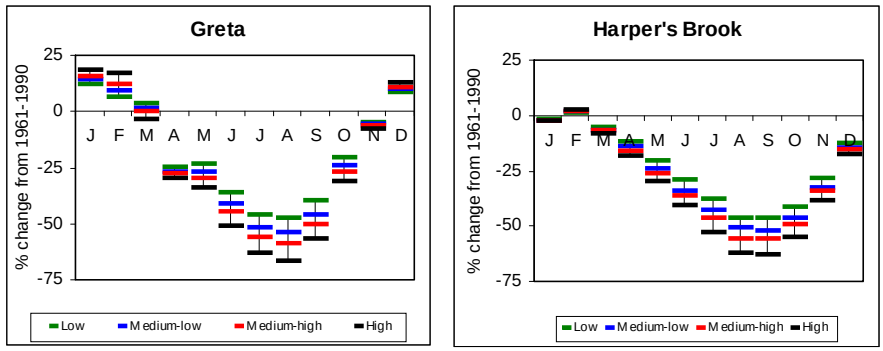


Fig. 1. Change in mean monthly runoff in two British catchments by the 2050s: UKCIP02 scenarios

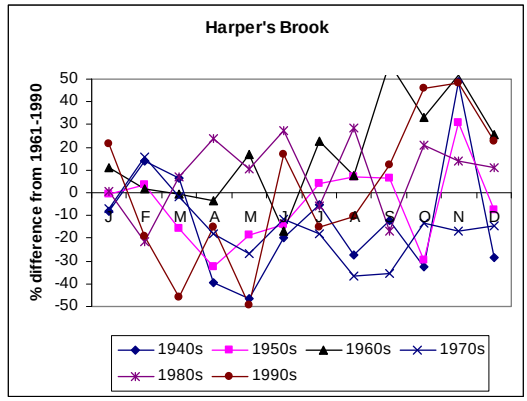


Fig. 2. Average monthly runoff by decade in the Harper's Brook catchment, as a percentage departure from the 1961-1990 mean

- *Changes in river flows and recharge may affect water resources over management time scales*

Different aspects of water management operate over different time scales. In general terms, alterations to water or effluent treatment infrastructure or procedures can take place relatively rapidly: lead times are short. Alterations to flood defence standards can in many instances be implemented quickly, but their long design life may mean that their reliability will change. Some water supply enhancement measures may be implemented rapidly, but most require long planning times and, like structural flood defences, have long design lives. Climate change will impact upon the planning

and performance of such measures. A series of studies in the US demonstrated how climate change would affect the reliability of hydropower generation, water supply and the maintenance of environmental standards within the next few years (e.g. Hayhoe et al., 2004), and in England, calculations suggested that in some resource zones reliable yield could be reduced by between 6 and 11% by 2025 (Arnell & Delaney, 2006).

What don't we know about the implications of climate change?

- *We do not know the precise magnitude of the effect of climate change at the catchment scale*

Unfortunately, however, the potential magnitude of the effect of climate change on hydrological regimes and water resources reliability in a catchment is uncertain. We do not know precisely the rate of future emissions, the sensitivity of climate to increased greenhouse gas emissions, or the spatial and temporal pattern of changes in rainfall and temperature associated with changes in greenhouse gas concentrations. We may also be uncertain about how a given change in climate translates into a change in runoff, although these uncertainties are small compared to the uncertainties deriving from the unknown future climate.

Fiure 3 shows, for the same two catchments as in Figure 1, changes in mean monthly runoff by the 2050s under five climate scenarios. The range between the scenarios is large, and in many months mean runoff can either increase or decrease. The uncertainty in the magnitudes of future streamflows is largely due to uncertainty in the global climate model used to create scenarios for future climates. It is also possible to produce different scenarios from the same driving climate model, by using different techniques to downscale coarse-resolution climate model output to the finer temporal and spatial resolution required by catchment-scale models. Nawaz & Adeloye (2006), for example, simulated changes in reliable yield by the 2050s for a reservoir system in Yorkshire, England, of -3 to 5%, 1-10% and -7 to -14% under three climate models respectively and different ways of representing scenario output.

The vast majority of hydrological impacts assessments assume that climate change does not alter hydrological processes in the catchment. Conceivably, changes in climate might lead to changes in soil structure which result in altered flow pathways, but this is highly uncertain. Rather more likely is that higher CO2 concentrations will affect transpiration – but again the precise quantitative effects at the catchment scale remain uncertain.

- *We are not confident about potential changes in extreme hydrological behaviour*

Many water management systems are designed to cope with extremes either of flood or drought. Virtually all climate change impact assessments have assumed change in mean monthly climate, and whilst it is possible to infer changes in flow extremes from such scenarios, they do not take into account the potential effects of changes in year-to-year variability or changes in the frequency distribution of short-

term weather events (particularly rainfall). It is likely that the standard approach, using standard scenarios of change in mean climate, underestimate the potential effects of changes in extreme weather, with the effects likely to depend on catchment characteristics. The greatest effects will be seen where the catchment is most sensitive to extreme weather events. For example, changes in extreme rainfall will have a big effect in a responsive clay catchment, but little effect in a slowly-responding catchment with large volumes of storage in lakes or groundwater, where the flood response is determined by the accumulation of rainfall over long periods.

More sophisticated methods of creating scenarios for changes in extreme weather events are being developed, often based on regional climate models, but these are frequently based on the use of a small number of climate models and therefore do not reflect the full range of climate uncertainty.

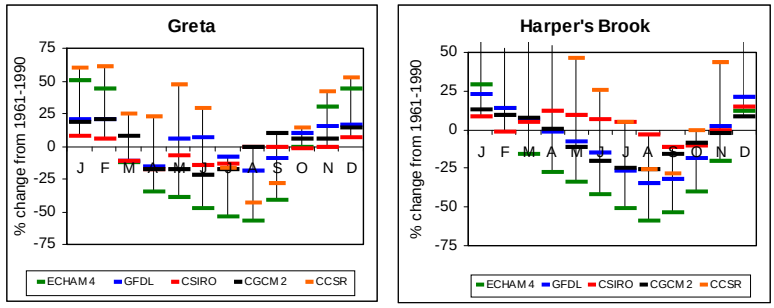


Fig. 3. Change in mean monthly runoff in two British catchments by the 2050s: different climate scenarios (compare with Figure 1)

- *We know very little about the implications of climate change for groundwater recharge* and water quality

Very few studies have been conducted into the effects of climate change on groundwater recharge, and there is considerable uncertainty over the extent to which changes in the length of the recharge season interact with changes in the volume of rainfall, and possible changes in recharge processes, to alter recharge rates to aquifers: studies have shown both increases and decreases, with very similar scenarios. Similarly, there have been few studies into the effects of climate change on river and groundwater quality, which may seriously impact upon the quality of ecosystems and use of water resources. Water quality will be affected by higher water temperatures, with different biochemical processes responding at different rates, but will also be affected by changes in the volume and timing of flows, and by changes in chemical processes in the soil. These process changes may occur at very fine spatial and temporal scales, well below credible scales of climate scenarios.

- *We are not sure how climate change will interact with other pressures to affect resource reliability*

Climate change is not the only driver affecting resource reliability. Land use change may have an effect, as will changes in competing demands for resources. Across much of southern England, for example, changes in the reliability of supplies over the next few years will be driven by changes in the demand for water, and in many catchments these will outweigh the effects of climate change (Arnell & Delaney, 2006). Also, the attitudes and approaches adopted by water managers, and expectations of users will evolve over time.

How does this affect how we can adapt to climate change?

It is clear that climate change will have an impact on water resources and their management, but that we cannot predict precisely their impact at the catchment scale. This challenges water management, and there are three broad areas for attention.

- *More research into ways of creating credible catchment-scale scenarios*

This is the traditional response to uncertainty. Improved scenarios, particularly concentrating on weather extremes, will enable clearer insights into potential changes in hydrological extremes and their management, and into possible small-scale process changes that might affect sensitive ecosystems or flow pathways. However, some uncertainty will always remain, not least because the future emissions of greenhouse gases remain uncertain and different climate models give different regional responses to increased forcings.

- *Develop a formalised approach to dealing with uncertainty*

It is therefore necessary to develop assessment procedures which recognise climate change uncertainty: there will never be one prediction of future conditions. Such an approach may specify "standard" scenarios to be used in strategic level impact assessments, as is done in the UK (the water companies in England and Wales, for example, use a formalised procedure based on the UKCIP02 scenarios to estimate the potential effects of climate change on yields: Arnell & Delaney, 2006). An extension to this approach at the project planning level would seek to use a large number of scenarios to construct probability distributions of possible future hydrological and water resources conditions, although this requires assumptions to be made about the uncertainty ranges of key drivers. Rather less clear is how managers cope with different projections of the future when making investment decisions: should managers adopt a risk-averse approach, or one that maximises expected benefits, or some other approach? Although circumstances will vary between sectors and catchments, sound water management clearly requires agreed guidance on methods.

- *Develop robust adaptation strategies and actions which are resilient to uncertainty*

An alternative approach in the face of uncertainty is to develop robust procedures that are not dependent on precise quantitative estimates of future hydrological regimes, or that reduce exposure to hydrological volatility. Adaptive management measures can be readily altered as more information becomes available, through changes to operating practices or incremental changes in scheme design, for example (Clark, 2002). Measures that require the future to be fixed within well-defined limits in order to remain effective (technically or financially) are not robust adaptation measures.

Concluding comments

This paper has provided a very broad conceptual overview of the state of knowledge of climate change, hydrological regimes and water management. The key general conclusion is that we are confident that climate change will affect water management policies and practices, but we do not know exactly how. Improved techniques for generating and applying climate scenarios will help, but we must recognise that uncertainty will continue. We therefore need to develop methods for characterising and representing this uncertainty in forms relevant to water resources managers, and develop adaptive management measures that are robust to uncertainty.

References

Arnell, N.W., 2003. Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain. *Journal of Hydrology*, 270(3-4): 195-213.

Arnell, N.W. and Delaney, E.K., 2006. Adapting to climate change: Public water supply in England and Wales. *Climatic Change*, 78(2-4): 227-255.

Arnell, N.W. et al., 2001. Hydrology and water resources. In: J. McCarthy and O. Canziani (Editors), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Clark, M.J., 2002. Dealing with uncertainty: adaptive approaches to sustainable river management. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 12(4): 347-363.

Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M. and Jeton, A.E., 2004. Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099. *Climatic Change*, 62(1-3): 283-317.

Hayhoe, K. et al., 2004. Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(34): 12422-12427.

Nawaz, N.R. and Adeloye, A.J., 2006. Monte Carlo assessment of sampling uncertainty of climate change impacts on water resources yield in Yorkshire, England. *Climatic Change*, 78(2-4): 257-292.

Studies Exploring the Processes that Affect Runoff Generation in the Arctic

E. Blyth

Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, OXON, OX10 8BB, UK
E-mail: emb@ceh.ac.uk

This paper explores the processes that affect runoff generation in Arctic regions. The peak flow in these regions is during the snow-melt season in the spring. The snow cover and snow melt is therefore an important process. The state of the soil during the snow melt period is also important since a frozen or saturated soil will not absorb the melt water, while an unfrozen, unsaturated soil will. This paper describes some studies which looked at these phenomena in detail.

Key words: runoff generation, frozen soil, soil hydraulics, soil heat flow.

Model

In order to model these, we use a land surface model called JULES (www.jchmr.org/jules). The model is described in (Cox et al., 1999).

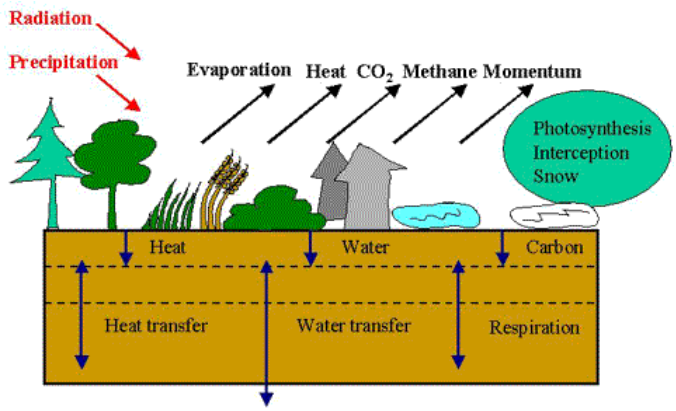


Fig. 1

A summary of the soil physics used to calculate soil water and temperature in the scheme which is relevant to this study and the processes are outlined below.

The diffusive heat fluxes in the vertical, G (W m^{-2})

$$G = \lambda \frac{\delta T}{\delta z} \tag{1}$$

where λ (W m^{-1} K^{-1}) is the local soil thermal conductivity, T is the soil temperature (K) and z is the depth below the surface (m).

The net heat flux advected between soil layers by the moisture flux, J (W m^{-3}) is determined by:

$$J = c_w W \frac{\delta T}{\delta z} \tag{2}$$

where W (kg m^{-2} s^{-1}) is the diffusive vertical water flux for each layer, given by the Darcy equation:

$$W = K\left(\frac{\delta \psi}{\delta z} + 1\right) \tag{3}$$

where K (kg m^{-2} s^{-1}) is the hydraulic conductivity and ψ (m) is the soil water suction. These are determined by:

$$K = K_{sat}\left(\frac{\theta_u}{\theta_{sat}}\right)^{2b+3} \tag{4}$$

and

$$\psi = \psi_{sat}\left(\frac{\theta_u}{\theta_{sat}}\right)^{-b} \tag{5}$$

where K_{sat} is the saturated hydraulic conductivity, ψ_{sat} is the saturated soil water suction, θ_u and θ_{sat} are the unfrozen volumetric soil water and saturated volumetric soil water fractions and b is an empirical exponent.

The relationship between unfrozen soil water concentration and temperature when ice is present is described in terms of the soil water suction (Miller, 1965; Black, Tice, 1989). The maximum volumetric fraction of unfrozen soil water that can exist at temperature T, where $T < T_m$ is calculated by:

$$\frac{\theta_u^{\max}}{\theta_{sat}} = \left[-k\frac{\rho_i L_f (T - T_m)}{\rho_w T_m g \psi_{sat}}\right] \tag{6}$$

where T_m (K) is the freezing point of pure water at atmospheric pressure, g (m s^{-2}) is the acceleration due to gravity and k is a dimensionless constant that depends on the soil. The k constant is a measure of the degree to which the adsorption of the soil

dominates over the capillarity and is used as a correction factor. This typically equals 1 for clay rich soils and 2.2 for granular soils. However, for organic soils, the value of the constant is uncertain.

The actual value of θ_u, the unfrozen volumetric fraction, is limited by the total water content of the soil:

$$\theta_u = \min(\theta_u^{\max}, \theta) \tag{7}$$

where θ is the "liquid" total volumetric concentration.

Case Study: Soil Thermodynamics

Hall et al (2003) studied a mire in Finland. The soil temperature in the mire evolved as follows:

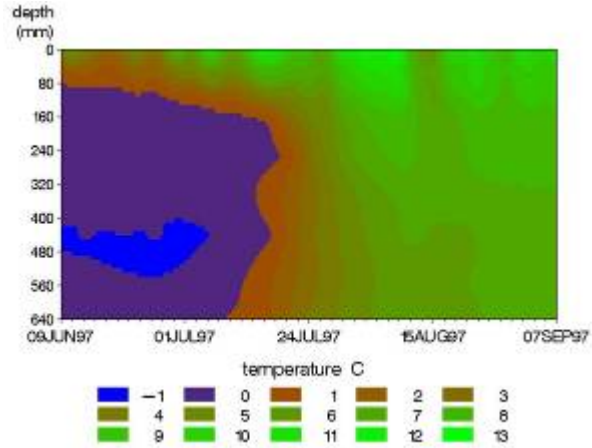


Fig. 2

Default parameters which represented mineral soils meant that the JULES model soil temperature evolved thus:

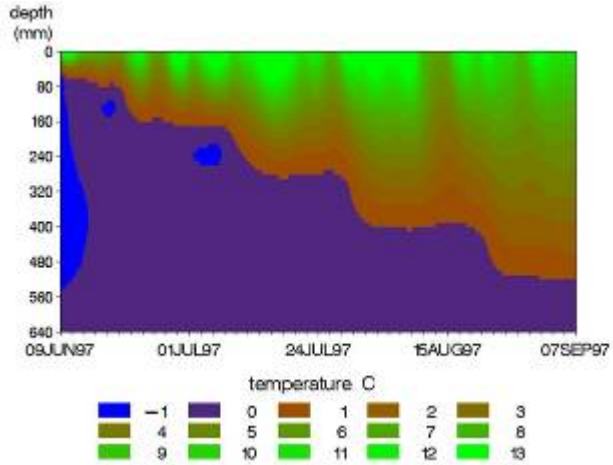


Fig. 3

It was clear the heat conductivity was too great. After calibrating the soil parameters to better represent organic peaty soils, the model was able to reproduce the observed data, thus:

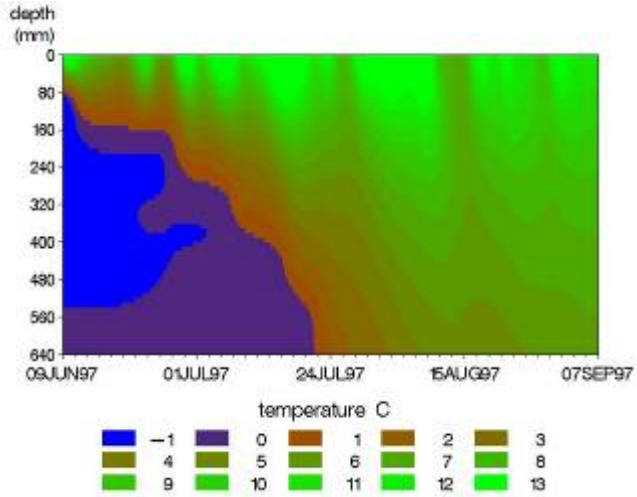


Fig. 4

The paper describing this work (Hall et al., 2003) obtained new soil heat parameters for organic soils for JULES.

Case Study: impact of frozen soil on Soil Hydraulics

To study the impact of soil freezing on soil hydraulic properties, a hillslope in Sweden was studied by Sayer (2007).

When soil water freezes, many things happen to the properties of that soil/water/ice mix.

1. Water becomes solid so cannot move.
2. Ice Crystals further impede water flow.
3. Frozen water gathers round soil particles which increases conductivity of soil (?).

These affect the porosity, the tension and the hydraulic conductivity of the soil. However, the data from Sayer's work (2007) suggested that there was a redistribution of the snow melt water since the soil was frozen under the snow pack at a point. Other researchers have found that, at the larger scale, the water does in fact enter the soil matrix, albeit at a different location from where the water fell (or melted). The landscape processes need to be treated in a different way to the point processes. This was recognised by Snelgrove (2002) and by Niu and Yang (2006) who proposed new ways to adapt the Darcy Richards equations to take account of this. In the following equations, k_1 is the original equation used in JULES, k_2 is proposed by Niu and Yang and k_3 by Snelgrove.

$$k_1 = k_s \left(\frac{\theta_u}{\theta_s} \right)^{2b+3};$$

$$k_2 = k_s \left(\frac{\theta_u + \theta_f}{\theta_s} \right)^{2b+3} * \left[1 - \exp\left(-\alpha * \left(1 - \theta_f \middle/ \theta_s \right) \right) - \exp(-\alpha) \right];$$

$$k_3 = k_s \left(\frac{\theta_u}{\theta_s - \theta_f} \right)^{2b+3}.$$

These can dramatically alter the hydraulic conductivity of the soil. A graph showing how the hydraulic conductivity is reduced compared to an unfrozen soil when the soil moisture is at 75 % of saturation (0.5 m^3 m^{-3}) is shown below (Fig. 5). This is an example which shows the shape of the curves. The value for α in Equation 3 is assumed to be 3 (as quoted in the Niu and Yang paper). This is a 'scale-dependent factor and will be studied further.

Effect on Water Balance

A series of hypothetical scenarios can be used to explore how the model behaves compared to the circumstantial evidence provided by the data. The driving data from the Swedish site was used to drive JULES. In the first half of the time period, there was no rainfall. In the second half of the period, the snow was assumed to melt. The various formulae suggested above were applied in JULES were applied. The results showed that the melt water was absorbed in the cases *k2* and *k3*, and none of the

melt water was absorbed in the *k1*. This suggests that a representation of heterogeneity is necessary.

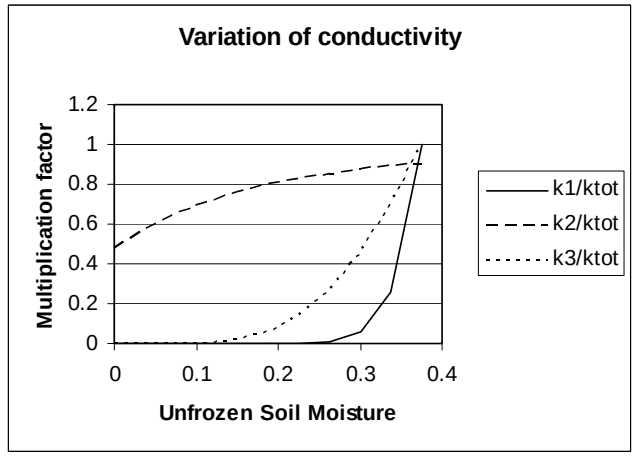


Fig. 5

Snow Cover

In addition to soil processes we also aim to model snow cover. An experiment was held in Svalbard to measure the snow melt across a hill slope where the snow depth was very variable.

Snow depth measurements were taken every day. The JULES model was then run with the observed initial snow depths to see if the snow melt progressed in the same way as the observed.

The model simulation showed that there was negligible advection of heat from non-snow patches to snow patches and that each patch could be treated independently. The issue for snow modelling is then to identify the distribution of snow depths in order to calculate the speed of melt. Essery et al. (2003) showed that a statistical distribution could be used. Three years of data from Svalbard demonstrated that there was a year-to-year variation in the parameters of the distribution that was not possible to explain.

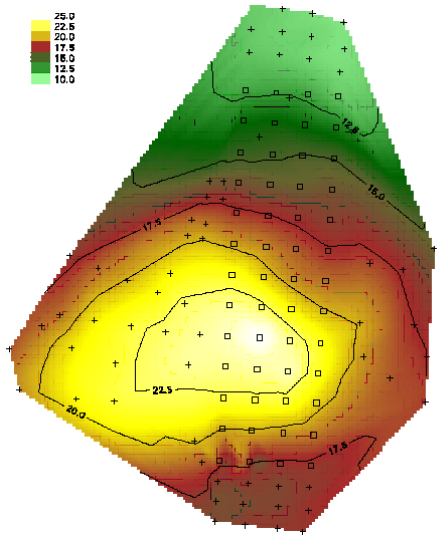


Fig. 6

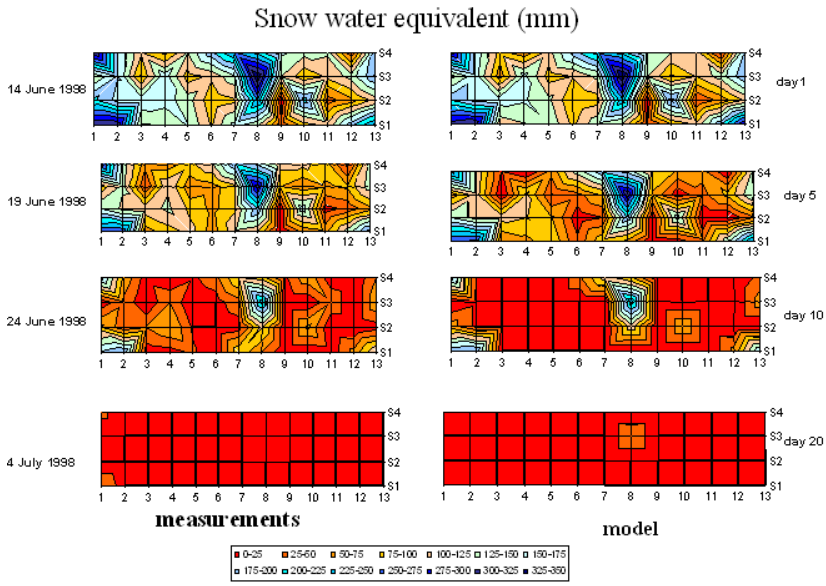


Fig. 7

Conclusions

If the snow melt can be correctly modelled and the soil processes correctly modelled with a good representation of soil freezing and its effect on soil hydraulic behaviour, then it may be possible to model the river flow of this region.

References

Black P. B., Tice A. R. 1989. Comparison of Soil Freezing Curve and Soil Water Curve Data for Windsor Sandy Loam. US army cold regions research and engineering report. 88, 16.

Cox P. M., Betts R. A., Bunton C. B., Essery R. L. H., Rowntree P. R., Smith J. 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity // Climate Dynamics. 15. P. 183–203.

Essery R., Blyth E. M., Harding R. J., Lloyd C. R. 2005. Modelling albedo and distributed snowmelt across a low hill in Svalbard // Nordic Hydrology. 36. P. 207–218.

Hall R. L., Huntingford C., Harding R. J., Lloyd C. R., Cox P. M. 2003. An improved description of soil hydraulic and thermal properties of arctic peatland for use in a GCM // Hydrological Processes. 17. P. 2611–2628.

Miller R. 1965. Phase equilibria and soil freezing. Permafrost: proceedings of the second international conference. National Research Council publ. 1287. Washington D.C. National Academy of Science. P. 193–197.

Niu G.-Y., Yang Z.-L. 2006. Effects of Frozen Soil on Snowmelt Runoff and Soil Water Storage at a Continental Scale // J. of Hydrometeorology. 7. P. 937–952 .

Sayer D. R. 2007. On the spatial and temporal distribution of near surface soil moisture across a low-arctic tundra hillslope. PhD thesis. Durham Univ.

Snelgrove K. 2002. Modeling Mackenzie Basin Surface Water Balance by coupling CLASS with WATFLOOD. PhD. Canada: Waterloo Univ.

Extreme Rainfall and Flood response in a Changing Climate

R. J. Moore, S. J. Cole and V. A. Bell

Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, OXON, OX10 8BB, UK
E-mail: rm@ceh.ac.uk

Regional climate model predictions suggest that extreme rainfall will become more frequent and amplified across parts of the world. This implies that historical records will not embrace the storm extremities of the future and floods will occur at locations not previously inundated. Flood management measures need to be planned for now, guided by methodology that can identify future flood-prone locations.

A methodological framework is developed that employs historical extreme storms, and amplified forms of them, in conjunction with a distributed hydrological model. The model is configured using spatial datasets on terrain features, augmented by soil, geology and land cover properties where needed. Its structure is capable of reflecting the genesis of a flood over space and time as shaped by storm and landscape controls. The result is a framework that is capable of exposing flood-sensitive locations, in response to extreme storms beyond the historical experience.

The relevance of this framework to guide flood warning and other flood management practices, both now and in the future, is discussed through two case study experiments.

Key words: storm, flood, hydrological model, climate change.

Introduction

Managing future flood risk in a changing climate presents a formidable scientific challenge. Floods will occur at locations not previously inundated and this will demand that flood defence measures (policy, structural and warning) be planned in a timely manner. Whilst the value of historical records in planning will remain high, there is an increased need to understand and model the changing nature of storms along with the physical shaping of floods by the landscape.

This paper outlines a methodology that can help identify areas at risk of flooding in the future under a changing climate. Central to this methodology are prototype forms of area-wide hydrological model presently under development (Moore et al., 2006b, 2007). Such models can shape a flood from a given storm according to controls from topography, soils, geology and land cover. The predicted space-time pattern of flood response over the model domain serves to expose locations that are most vulnerable. It also provides an understanding of the controlling factors of flood generation as a function of storm and landscape properties.

Methodological framework

The overall methodological framework used for identifying future flood-prone locations is presented in Fig. 1. At the heart of the methodological framework is a distributed hydrological model that employs gridded space-time storm rainfall as its dynamic input. Static datasets on terrain and, where appropriate, soil, geology and land-cover properties are used within the model structure to represent the shaping by the landscape of the storm rainfall over the modelled domain.

Provision of storm rainfall within the framework aims to have a physical basis by using actual historical extreme storms of convective, orographic or frontal origin. These storms may derive from the area to be modelled or be transposed to an area where changing flood risk is of interest. The choice of extreme storm to use would bear in mind which of the three storm types is most relevant for a particular location, season and future climate.

Whilst choosing historical extreme storms helps ensure a physically realistic representation of storm rainfall, it does nothing to create storms that are more extreme and of the kind that might arise in the future. To this end, a 'Rainfall Transformation Tool' (Moore et al., 2006a) is employed that amplifies the historical storm to have a longer return period (assessed in terms of the current climate) over the catchment of interest. The transformations available include space-time relocation, turning in space, and changing the velocity, amount and size of the storm. A procedure based on Flood Estimation Handbook (FEH) methods (Institute of Hydrology, 1999) is used to assess the return period of the storm from its depth and duration over the target catchment area. FEH methods are also used to assess the return period of modelled flows deriving from the amplified storm at target locations of interest. Gridded areal rainfall estimates for input to the distributed hydrological model are obtained using integrated multiquadric surface fitting methods, applied to raingauge data alone or as a gauge-adjustment to radar rainfall values (Moore *et al.*, 2006a; Cole and Moore, 2008).

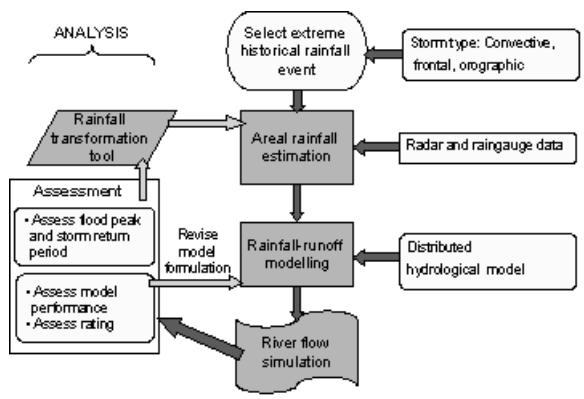


Fig. 1. Methodological framework for identifying future flood-prone locations

The distributed hydrological model

The distributed hydrological model at the heart of the framework is a grid-based physical-conceptual model called the Grid-to-Grid model or G2G (Fig. 2). This model is being developed as a toolkit of distributed model functions of differing complexity and requirements for spatial configuration data. The form used here, suitable for upland basins with a simple flood response, requires only digital terrain model (DTM) data for configuration of the runoff production and flow routing components of the model. A more complex form employs soil physics principles to make use of spatial datasets on soil properties, along with land cover and geology information (Moore *et al.*, 2006b, 2007).

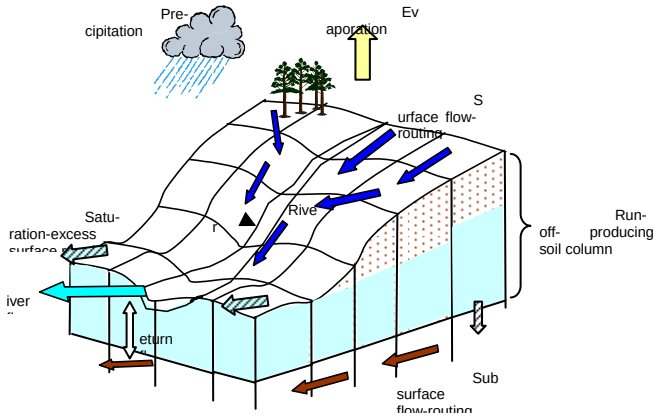


Fig. 2. The Grid-to-Grid Hydrological Model

Here, terrain slope is used as a surrogate for water absorption capacity (of the soil, canopy and surface depressions) through a simple linkage function. Variation of slope and hence capacity within a grid-square is accommodated through a theoretical relation between a power distribution of slope and a Pareto distribution of capacity, with the total capacity of a grid-square and the Pareto shape parameter being related to the mean and maximum slopes (Bell and Moore, 1988). Thus, the spatial variation of capacity is specified via slope information obtained from a DTM, leaving only a small number of regional parameters to estimate by model fitting to gauged river flows. The probability-distributed model theory (Moore, 1985, 2007) provides equations for calculating the surface runoff, change in soil moisture and drainage to groundwater, allowing for evaporation losses.

Terrain is used to delineate the flow paths through the landscape in two dimensions from grid cell to grid cell, both above and below ground. Flow path length together with a velocity (treated as a parameter) is used in a simple kinematic wave routing formulation to represent the shaping of the surface and subsurface runoff by the landscape. Different velocities are assigned to hillslope and river paths, both in the

surface and subsurface pathways; a return flow between these pathways represents surface-subsurface interactions as a function of water stored in the subsurface path.

Sensitivity of flood response to climate change

Climate change may impact on the storm rainfall experienced over an area in a variety of ways. A change in weather pattern may cause a shift in the location of storm tracks and the ensuing flood response may be affected by the orientation of this relative to the alignment of drainage paths.

This may be investigated within the framework presented here. For example, an extreme convective storm experienced over northeast England had a trajectory aligned to the prevailing northeasterly flow, moving so rapidly that it failed to produce catchment flooding, only local pluvial flooding. The Carlton-in-Cleveland storm on 10 August 2003 recorded a 15 minute total of 49.1 mm, assessed to have a point return period of circa 600 years.

A climate change investigation of flood risk focussed on the Kent basin in northwest England might suggest this kind of storm as a future possibility but with a changed north-south track and a slower velocity. Figure 3 shows the Grid-to-Grid model response for two scenarios, the first with the storm tracking up-valley and the second down-valley (as indicated by arrows). The latter results in a significant heightening and sharpening of the hydrograph flood peak. The transposed and modified storms both have return periods of 15 years for their catchment average rainfalls.

Climate change may cause storms to be located preferentially over a part of a catchment or to be altered in coverage area. The flood risk impact of such a change can again be investigated through the methodological framework. In this case, we will take as the extreme historical storm event the Boscastle storm of 16 August 2004. The storm caused devastating flash flood damage and received international press coverage, although no lives were lost. A raingauge recording this convective storm gave a 4 hour total of 181 mm, assessed to have a return period of circa 4500 years.

A climate change flood risk assessment for the Darwen catchment, encompassing the town of Blackburn in northwest England, might see this type of storm as a possibility in the future and of even greater magnitude (setting aside the rather particular genesis of this storm). Transposing the Boscastle storm over the Darwen catchment to have its storm centre first over the lower part of the catchment and then over the upper part, and also stretched to give a catchment-wide storm, results in the storm totals shown in the left half of Fig. 4. The storms have also been scaled up in magnitude to have a return period over the catchment area of 100 years for a 4 hour rainfall.

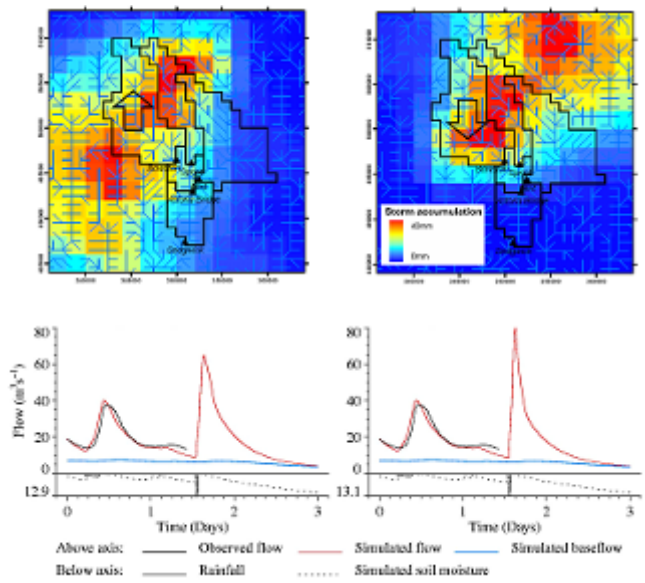


Fig. 3. Sensitivity of flood response to alignment of storm track

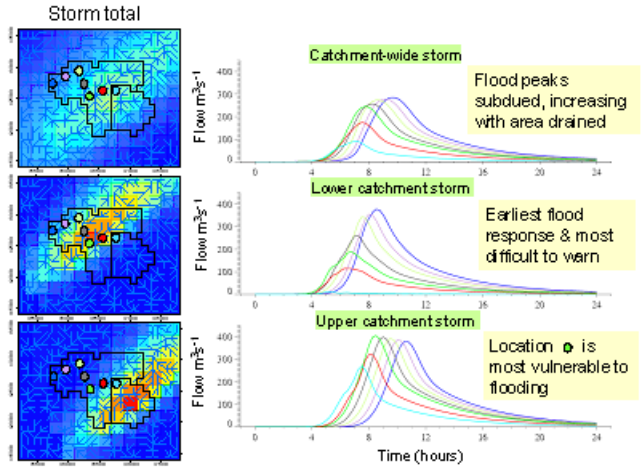


Fig. 4. Sensitivity of flood response to storm position

The Grid-to-Grid modelled flood response is shown as hydrographs in the right half of Fig. 4 for the outlet location at Blue Bridge and at six internal ungauged locations (indicated by circles). The flood response of the catchment-wide storm is sub-

dued and the peaks increase with area drained. In contrast, when the storm is located over the lower catchment the flood peaks are earlier making flood warning difficult. Locating the storm over the upper catchment produces the most interesting response. Whilst the peak flow is similar, it is now experienced at the upstream location: with a smaller channel capacity to contain it, the site is most vulnerable to flood inundation. This insight gained from modelling might lead to priority consideration being given to flood management plans for locations of this kind.

Concluding remarks

The methodological framework presented here involves six basic steps: (i) selection of historical extreme storms, (ii) forming grid-based areal estimates of rainfall using gauge and (if available) radar data, (iii) applying the "Rainfall Transformation Tool" in keeping with climate change impact scenarios, (iv) running the Grid-to-Grid hydrological model configured to use spatial data on landscape properties, especially terrain, (v) assessment of storm properties and flood response, and (vi) identification of flood prone locations and development of appropriate flood management plans.

Regional climate model (RCM) studies of future climate scenarios are likely to provide useful guidance on storm selection and choice of appropriate transformations to use. Less formally based scenarios of future extreme storms may be necessitated in their absence. The availability of realistic and high resolution regional climate model outputs might be seen to reduce or obviate the need for using transformed historical storms. Of relevance here is the continuous simulation approach to flood risk assessment, embracing the Grid-to-Grid model and using high resolution RCM outputs, and currently being trialled for application in the UK and across Europe (Bell et al., 2007).

However, it is still not practical to run RCMs with a structure and resolution capable of faithfully representing the convective storm events that have been used for illustration here. Thus, the approach based on transformation of historical storms and use of a physical-conceptual grid-based model can be seen as a complement to RCM approaches. The approach can be used to gain a detailed understanding of flood response to changing weather patterns as shaped by landscape controls, helping guide flood management practice for future climates.

References

Bell, V.A. and Moore, R.J. 1988. A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data. Part 1 Formulation. Hydrol. Earth System Sci., 2(2-3), 265-281.

Bell, V.A., Kay, A.L., Jones, R.G. and Moore, R.J. 2007. Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk. Int. J. Climatology, 27, 1657-1671.

Cole, S.J. and Moore, R.J. 2008. Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall. J. Hydrol., submitted.

Institute of Hydrology. 1999. Flood Estimation Handbook, Wallingford, UK.

Moore, R.J. 1985. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. Hydrol. Sci. J., 30(2), 273-297.

Moore, R.J. 2007. The PDM rainfall-runoff model. Hydrol. Earth System Sci., 11(1), 483-499.

Moore, R.J., Bell, V.A., Cole, S.J. and Jones, D.A. 2006a. Spatio-temporal rainfall datasets and their use in evaluating the extreme event performance of hydrological models. Extreme Event Recognition Phase 2. R&D Project Report FD2208/PR, Joint Defra/EA Flood and Coastal Erosion Risk Management, Research Contractor: CEH Wallingford, 257pp. http://sciencesearch.defra.gov.uk/

Moore, R.J., Bell, V.A., Cole, S.J. and Jones, D.A. 2007. Rainfall-runoff and other modelling for ungauged/low-benefit locations. Science Report – SC030227/SR1, Research Contractor: CEH Wallingford, Environment Agency, Bristol, UK, 249pp. http://publications.environment-agency.gov.uk/epages/eapublications.storefront

Moore, R.J., Cole, S.J., Bell, V.A. and Jones, D.A. 2006b. Issues in flood forecasting: ungauged basins, extreme floods and uncertainty. In: I. Tchiguirinskaia, K. N. N. Thein & P. Hubert (eds.), Frontiers in Flood Research, 8th Kovacs Colloquium, UNESCO, Paris, June/July 2006, IAHS Publ. 305, 103-122.

Continuous Flow Simulation Modelling Incorporating Climate Change

C. Prudhomme

Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, OXON, OX10 8BB, UK
E-mail: C.Prudhomme@ceh.ac.uk

This paper summarises some of the research undertaken at CEH Wallingford on the study of the impact of climate change on hydrology and highlights the different aspects of climate change impact studies. It builds from work of the Risk Analysis and Modelling group, and in particular V. Bell, S. Crooks, S. Dadson, H. Davies, A. Kay and N. Reynard.

The paper is divided in three parts: continuous rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation, climate change scenarios, and uncertainty linked to climate change impact studies. Examples from various research projects illustrate the paper.

Key words: climate change, rainfall-runoff model, hydrology, impact.

Continuous flow modelling

Two main approaches for flood frequency estimation have been developed at CEH: statistical method, that uses long flood series (peak-over-threshold or annual maxima series) and computes statistical relationships between magnitude and frequency of floods; and continuous flow simulation method, that aims to generate discharge series from climate data and catchment characteristics. In the context of non-stationnarity, the second approach is recommended.

The principle of the continuous simulation approach for climate change impact studies on flood flows is summarised in Fig. 1. The runoff models can be calibrated on observed time series, but their parameter sets can also be generalised based on catchment properties. When long rainfall time series are inputted, e.g. series that incorporate projections of the impact of greenhouse gases emissions, long river flow time series can be simulated, and flood frequency estimates made that incorporate the same assumption of climatic change.

At CEH, we have developed several conceptual rainfall-runoff models including the lumped models Probability Distributed Model PDM (Moore, 2007) and TATE (Calver, 1996), the semi-distributed model CLASSIC (Crooks, Naden, 2007) and the distributed, grid-based model Grid-to-Grid (Bell et al., 2007). They allow the simulation of discharge time series for catchments of area ranging from several square kilometres to several thousand square kilometres.

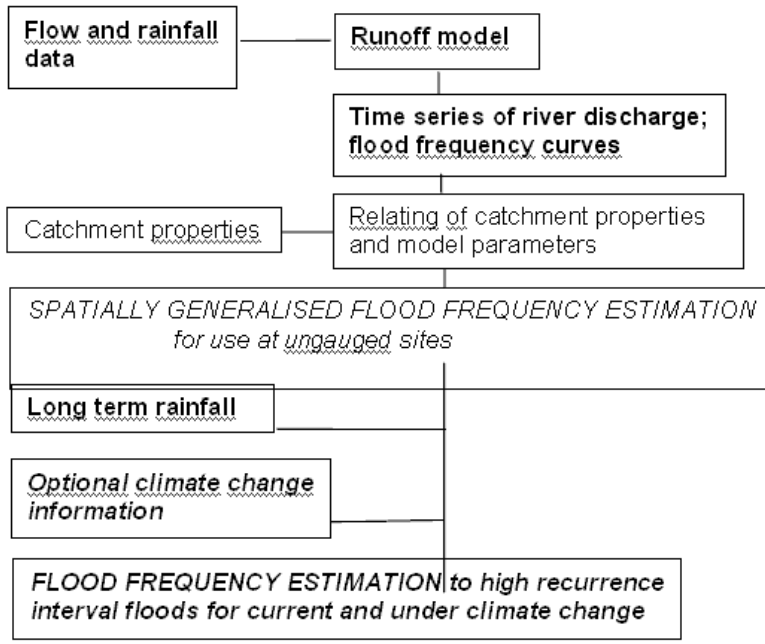


Fig. 1. Principle of continuous simulation approach for climate change impact studies

These conceptual models are all relatively undemanding in terms of data. CLASSIC and G2G require soil, land use and topography maps at the model's grid size, while the PDM only needs catchment characteristics for its parameters estimation when used on ungauged catchment. Input time series are rainfall and potential evapotranspition (PE) representative of the catchment or grid for G2G, with additional temperature data when a snow melt module is added. The time step of the simulation depends on the area of the catchment to model. While hourly time series are necessary for small catchments, a daily time step is considered as a good compromise between data availability and accuracy of flood estimation for catchments over 50 km^2 (Calver et al., 2005).

From the simulated time series, statistical analysis can be conducted, such as extracting the flow duration curve or fitting a flood frequency curve. An example is given in Fig. 2, for the simulation of the flow time series of the river Severn at Bewdley (catchment area of 4,325 km^2) modelled by CLASSIC.

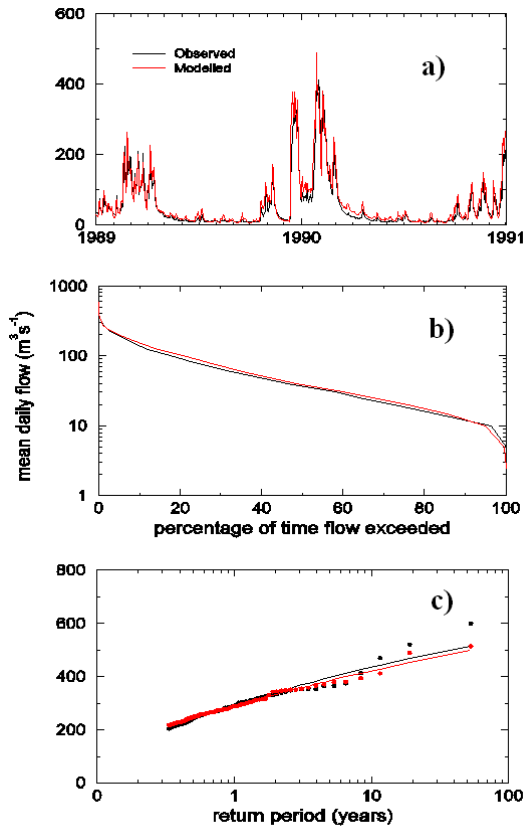


Fig. 2. Daily river flow of the Severn at Bewdley observed (black) and simulated by CLASSIC (a) and associated flow duration (b) and flood frequency curves (c)

Climate change scenarios

The quantification of the impact of greenhouse gases concentration in the atmosphere on the climate (from anthropogenic or natural sources) is a large research area involving research institutes all over the world. Future projections depend on assumptions made such as the amount of greenhouse gases to be emitted in the atmosphere for the next decades, these are summarised in a set of emission scenarios by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (IPCC, 2000). Each scenario assumes a particular evolution of the world, in terms of economical development, environmental concern, demography etc… and defines the associated level of greenhouse gases emission. They are then used within the GCM, and for each emission scenario, a different climate outcome will be produced. Because at the moment it is very difficult to predict how the world may change in the future, all emission scenarios are consid-

ered equally plausible. It is thus recommended to undertake climate change impact studies using projections made from different emission scenarios to avoid a bias towards a particular assumption.

When undertaking a climate change impact study, the river flow models, established for a given catchment for the baseline climate, are used with climate input time series that are representative of future projections. These future time series must be of the same temporal resolution as the rainfall-runoff models, i.e. daily (or hourly for the smallest catchments). This can be a problem as most Global Climate Models (GCM), that are the primary tools for understanding and simulating the climate's response to different radiative forcing (e.g. due to the increase of the greenhouse gases concentration in the atmosphere) (Solomon et al., 2007), provide future climate time series at a monthly time step. A second problem is the spatial resolution of the GCM that is too coarse compared to the size of UK catchments. Typically, a GCM cell (i.e. for which a single projected climate time series is generated) has a side length of several degrees, which is, for mid-latitudes, between 150 and 400 km side. By comparison, the largest catchment of the UK is the Thames, with an area of just over 10,000 km^2 near its estuary. This coarse spatial resolution also impacts on the quality of the projection for some atmospheric variables, such as rainfall, that could be influenced by local orographical features not represented by GCM topography.

From these limitations came the need to reduce the scale (both spatial and temporal) of GCM projected time series: this is known as downscaling. There are two main groups of downscaling techniques. The first one uses physically-based models that take as initial and limit conditions GCM projections: they are commonly known as Regional Climate Models (or RCMs). RCM grid scale is much finer than GCMs (down to 25-km side for the Hadley Centre's HadRM3), and as they only run on a region of the earth rather than the whole globe, outputs are usually saved at a daily time step. The second type relies on statistical relationships between large scale atmospheric variables (as described by re-analysis) and local features, such as catchment rainfall. By fitting a statistical model able to reproduce local rainfall from re-analysis time series, some of the biases in GCM climate are corrected. Models such as the Statistical DownScaling Model SDSM that uses linear multiple regression technique (Wilby et al., 2002) or the GLIMCLIM, based on generalised linear regression (Chandler, Wheater, 2002), provide such tools. Finally, the simplest technique that has been widely used exploits the changes in, for example, monthly precipitation averages as simulated by a given GCM for two different time slices (e.g. 1961–1990 and 2071–2100). In expressing these changes as a percentage of the baseline, monthly factors can be constructed, and applied to observed time series to provide climate change scenarios.

Uncertainty

As we have seen, there are many techniques that can be applied to downscale GCM future projections to provide daily time series necessary as input to rainfall-

runoff models. In addition, there are also many GCMs to choose from; the IPCC Data Distribution Centre (www.ipcc-data.org) provides to date future scenarios from up to 16 different GCMs.

Depending which GCM projection is considered, and which downscaling method is used, changes in the hydrological regime (mean flows, flood peaks etc…) may be different. Fig. shows an example of how the mean annual flow of the Thrushel at Tinday (113 km^2, as simulated by PDM validated on observed time series) is projected to change compared to the 1961–1990 simulated mean annual flow (Prudhomme, Davies, 2007). Each symbol represents the spread of mean annual flow obtained by simulating river flow time series using as input of PDM 100 climate time series representative of the baseline climate (left hand side of the graph) or of the 2080s time slice. The boxes represent the 25–75 % percentile, while the bars show the range of the 5–95th percentiles. In order to quantify the variation in the mean annual flow estimation due to natural climate variability alone, a bootstrapping technique has been used to generate 100 precipitation and PE series of the same length of the observed series, in Fig. represented by Nat Var. The median of the sample is the reference mean annual flow.

The bias in GCM and downscaling techniques in reproducing the baseline climate, and by extension, the mean annual flow, is visible from the left part of the graphs, where all three considered GCM (HadCM3, CCCGCM and CSIRO) fail to reproduce the baseline natural variability (their mean annual flow range is different from that due to natural variability). For this particular catchment, the dynamical downscaling technique appears to be biased towards an overestimation of the mean annual flow, but this is not necessarily the case everywhere. On the right hand side of the graph, projections for the 2080s time slices are shown, with most of the scenarios projecting a slight decrease of the mean annual flow. Note that it is important to consider the bias in the reproduction of baseline climate when interpreting future projections, as for example shown by the HadRM3 2080s projections, that could be interpreted as a significant increase in the mean annual flow (positive change compared to the reference value) but in fact, that show a slight decrease from the HadRM3 baseline values.

Results must always be interpreted with caution, especially if a single future run is considered when changes are assessed. This is illustrated with results obtained from one RCM run which, for the baseline, has a large intensity rainfall event producing a very large flood. No equivalent exists in the future RCM run, thus no large flood is produced for the future. When baseline flood frequency curve is derived from the time series including the large flood, resulting baseline flood quantiles are high. Future flood quantiles being smaller, the comparison indicates a potential decrease (left hand side of Fig. 4). If this outlier event is removed for the flood frequency estimation of the baseline, then, 50-year flood peak is estimated as increasing (right hand side of Fig. 4).

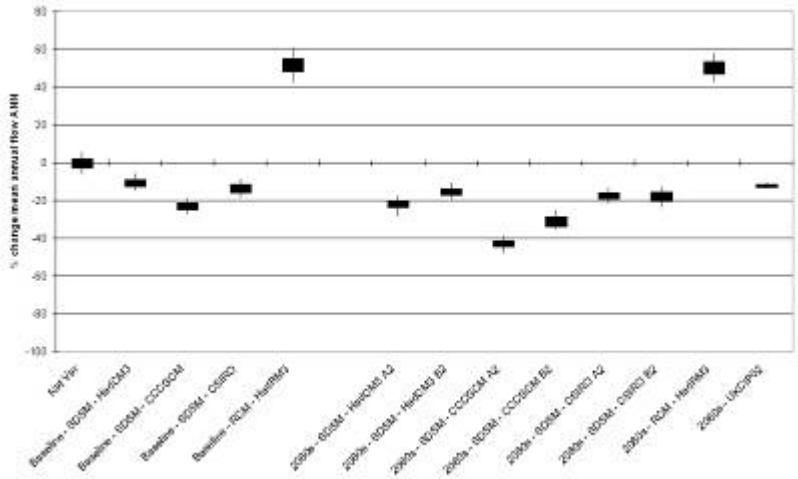


Fig. 3. Changes in mean annual flow for the Thrushel at Tinday using input precipitation and PE scenarios for the baseline (left) 2080s (right) generated from different GCM and downscaling techniques

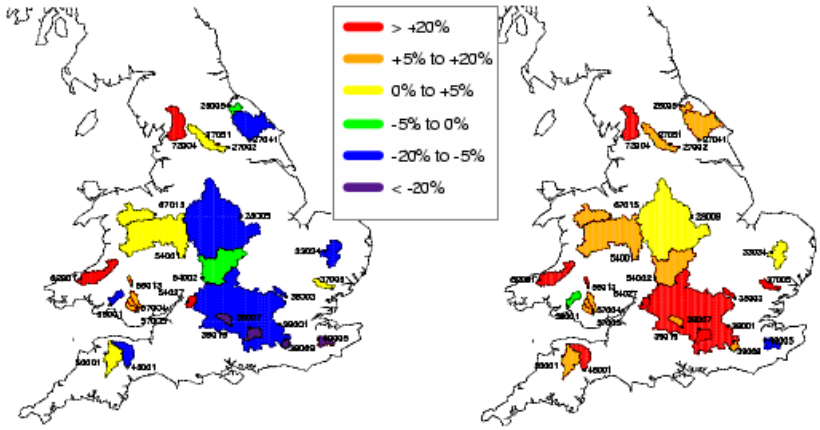


Fig. 4. Changes in 50-year return peak flows by the 2080s from HadRCM3 calculated as departure from baseline peak flows estimated from a run including a very large event (left) or when the run was removed (left). From (Kay et al., submitted)

This illustrates two uncertainties: the first one is due to the flood frequency method used to estimate a 50-year quantile from a limited (30-year) time series. The second is due to the use of one single RCM run to assess the impact of climate change. Unfortunately, GCM and RCM are extremely computational demanding, and gener-

ally a single run for the baseline (control run) and a single run for the future (for a given emission scenario) is produced. Resampling techniques to provide confidence bands around the flood frequency curves, both for baseline and future would help reducing the uncertainty.

Quantifying the different uncertainties that can exist when undertaking a climate change impact studies is not easy. Work done on the UK on the relative size of the uncertainty bands around 50-years return period future floods peaks showed that GCM uncertainty has the largest range while uncertainty due to hydrological model parameters has the smallest (Kay et al., submitted). Table summarises some results obtained for the river Beult at Stile Bridge (277 km^2), where different sources of uncertainty were assessed in running climate time series generated from different GCM and downscaling techniques, using different emission scenarios assumptions on a given hydrological model. The different sources of uncertainty were not combined, i.e. only one hydrological model was used with different climate time series to quantify the climate uncertainty, while the same observed time series was run with different hydrological models and different model parameters to quantify hydrological uncertainty.

Table 1. Range of possible changes for the 50-year return period flood peak of the Beult at Stile Bridge according to different sources of uncertainties. Projections are for the 2080s time slice

Source of uncertainty	Lower limit	Higher limit
Natural variability	–34	+17
Emissions	–14	–9
Global Climate Model structure	–13	+41
GCM initial conditions	–25	–5
Downscaling	–22	–8
RCM structure	–5	+8
Hydro' model structure	–45	–22
Hydro' model parameters	+1	+7

Conclusion

This paper summarised some of the research done at CEH on assessing the impact of climate change on hydrology. Conceptual rainfall-runoff models, that simulate river flow time series from climatic information, are practical tools able to simulate future river flow series from which indicators of changes can be derived.

However, there is much uncertainty in climate change assessment, not least because it is not possible to foresee the societal and economical evolutions of the world triggering greenhouse gases emissions. Other uncertainties are due to the modelling of the climate and in particular of rainfall, at a scale that is compatible with hydrological modelling. Because of these uncertainties, it is necessary, when undertaking a climate change study, to consider many future projections from many GCMs, downscaled at

the catchment scale using different techniques, and assuming different emission scenarios. This would allow uncertainty bands to be defined around the indicators of climate change.

Reference

Bell V. A., Kay A. L., Jones R. G., Moore R. J. 2007. Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output // Hydrology and Earth System Sciences. 11(1). P. 532–549.

Calver A. 1996. Development and experience of the TATE rainfall-runoff model // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Energy. 101. P. 31–36.

Calver A., Crooks S. M., Jones D. A., Kay A., Kjeldsen T., Reynard N. S. 2005. National river catchment flood frequency method using continuous simulation, Final report FD2106; Defra and the Environment Agency Flood and Coastal Management R&D Programme, CEH, 136 p.

Chandler R. E., Wheater H. S. 2002. Analysis of rainfall variability using generalized linear models: a case study from the west of Ireland // Water Resources Research. 38(10): 1192, doi:10.1029/2001WR000906.

Crooks S. M., Naden P. 2007. CLASSIC: a semi-distributed rainfall-runoff modelling system // Hydrology and Earth System Sciences. 11(1). P. 516–531.

IPCC. 2000. Special report on emissions scenarios (SRES): A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 599 p.

Kay A., Davies H., Bell V., submitted. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in the UK // Climatic Change.

Moore R. J. 2007. The PDM rainfall-runoff model // Hydrology and Earth System Sciences. 11(1). P. 483–499.

Prudhomme C., Davies H. 2007. Comparison of different sources of uncertainty in climate change impact studies in Great Britain. IHP-VI // Technical Documents in Hydrology. 80. P. 183–190.

Solomon S. et al. 2007. Technical summary. In: S. Solomon et al. (Editors), Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 996 p.

Wilby R. L., Dawson C. W., Barrow E. M. 2002. SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts // Environmental Modelling & Software. 17(2). P. 145–157.

Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС

Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, В. В. Ветрова

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
Иркутск, 664033, ул. Лермонтова, 130
E-mail: berejn@isem.sei.irk.ru, nva@isem.sei.irk.ru

Impact of Arctic Warming on the Water Inflow to the Reservoirs of the Angara HPP Cascade and Lake Baikal

N. V. Abasov, T. V. Berezhnykh and V. V. Vetrova

L. A. Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
Lermontova Str., 130, Irkutsk 664033, Russia

Представлены исследования изменения притока воды в водохранилища Ангарского каскада ГЭС и озеро Байкал, связанные с глобальным потеплением. Приведены карты различных проявлений изменения климата по давлению и температурам между 1948–1977 и 1978–2006 гг. Исследуется изменчивость корреляционных связей между отдельными притоками в водохранилища Ангарского каскада ГЭС и площадью льдов Арктики. Отмечены направления адаптации информационно-прогностической системы ГИПСАР, включающей множество различных методов прогнозирования, к изменяющимся условиям регионального климата.

Ключевые слова: долгосрочное прогнозирование, изменчивость корреляционных связей, площадь льдов Арктики, приток воды, глобальное потепление, озеро Байкал, система прогнозирования ГИПСАР.

Изменчивость гидроэнергетического потенциала Ангарского каскада ГЭС

Гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС (рис. 1) определяется полезным притоком воды в озеро Байкал и боковыми притоками в Братское и Усть-Илимское водохранилища. Среднегодовой вес отдельных притоков в гидроэнергетическом потенциале каскада примерно составляет: 66,3 % – полезный приток в озеро Байкал; 30 % – боковой приток в Братское водохранилище; 3,7 % – боковой приток в Усть-Илимское водохранилище. Доли II и III кварталов в среднегодовом притоке соответственно составляют: 38,5 %, 52,8 % для озера Байкал и 34,9 %, 48,2 % для Братского водохранилища. Поскольку прито-

ки III квартала существенно нестационарны, то их прогнозирование с большой заблаговременностью затруднительно.

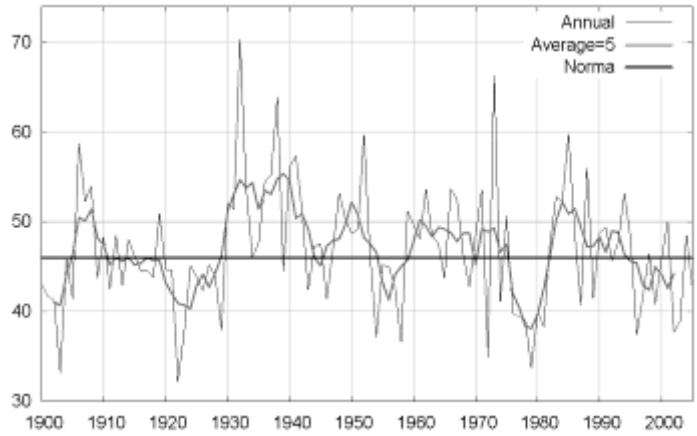


Рис. 1. Гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС (млрд кВт·ч)

Полезный приток в озеро Байкал (см. гидрографы на рис. 2) характеризуется длительными маловодными периодами с редкими экстремально высокими проявлениями.

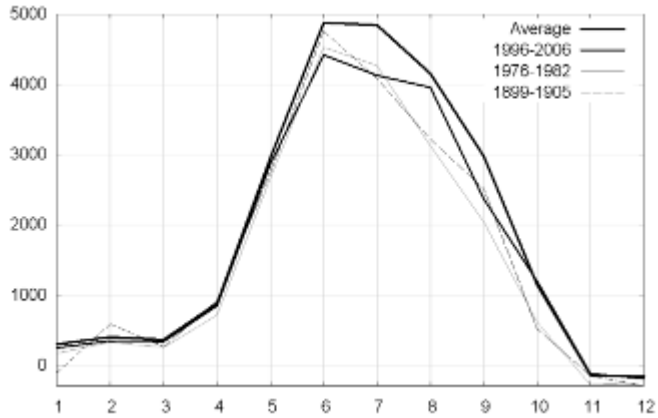


Рис. 2. Гидрографы полезного притока ($м^3/с$) в озеро Байкал за многолетний (1899–2006) и маловодные периоды

Маловодные периоды определяются в основном притоком воды с 6-го по 9-й месяцы. Для 1996–2006 гг. было отмечено повышенное его значение (почти

норма) для августа, что существенно снизило энергетические риски, несмотря на 11-летнюю его продолжительность.

Система исследований глобального и регионального климата ГИПСАР

Разработанная в ИСЭМ СО РАН система долгосрочного прогнозирования ГИПСАР (Абасов и др., 2000; Berezhnykh, Abasov, 2003) включает множество различных методов прогнозирования (аппроксимативных, нейросетевых, вероятностных) с различными алгоритмами уточнения прогностических распределений и комплексирования. На ее основе успешно спрогнозированы показатели маловодного периода на Байкале (1996–2006). Для Братского водохранилища ошибки прогнозов были значительно выше в связи с существенным изменением корреляционных связей с притоком в озеро Байкал и различными глобальными индексами, например, со средней площадью морского льда в Арктике.

Для повышения надежности прогнозов в условиях глобального изменения климата, когда начали меняться найденные ранее статистические связи между исследуемыми процессами, создана база данных нескольких метеорологических параметров (температуры воздуха, осадки, давление, показатели циркуляции и др.) с равномерной сеткой (2,5°) по всему земному шару. На ее основе разработан инструментарий по формированию различных индексов и их визуализации на картах разных масштабов (Абасов, Ветрова, 2007). Включение компонентов формирования аналогов по некоторой мере близости для различных индексов (с увеличенными коэффициентами значимости для исследуемого региона) позволило выдвигать новые гипотезы по влиянию глобального потепления Арктики на приток воды в исследуемые водохранилища для более тонкой настройки параметров прогностических методов или создания новых.

Изменение глобального и регионального климата

На рис. 3 показаны графики отклонений среднегодовых приземных температур воздуха для всей Земли, северной и южной полярных областей, полученные с помощью специальных компонентов обработки пространственных данных системы ГИПСАР. Для Арктики характерно увеличение тренда в температурах начиная примерно с 1996 г.

На рис. 4 приведены карты изменений глобального климата для Северного полушария по температурам и давлению. Зимние температуры значительно возросли как для Арктики, так и для Сибири, включая бассейн озера Байкал, а летние практически не изменились. Зимнее давление значительно понизилось до 50-х широт, а летняя депрессия Сибирского антициклона уменьшилась.

Исследование изменчивости связей

Изменчивость коэффициента вариации $C_v(t)$, построенного по скользящим 60-летним выборкам для среднегодовых притоков в Байкал и Братское водохранилище, представлена на рис. 5. Для озера Байкал характерно понижение коэффициента до 1970 г., повышение до 1981 г. с сохранением повышенных значений до 1989 г., понижением к 2001 г. до экстремально низких значений с их незначительным повышением к 2006 г. Для Братского водохранилища характерно значительное повышение с 2000 г.

Изменчивость корреляционной связи (для 30-летней скользящей выборки) между притоком в Байкал и Братское водохранилище представлена на рис. 6. Эта связь усиливалась (значение более 0,6) в 1930-х и в середине 1980-х, к 2006 г. она ослабла (до 0,26, в 1950-х 0,36). Для III квартала изменения еще более значительные.

На рис. 7–8 показаны аналогичные корреляционные связи между притоками в озеро Байкал и Братское водохранилище со средней площадью льдов Арктики (Захаров, 2003). В 1938–1940-х гг. эта связь для среднегодового притока в озеро Байкал характеризовалась отрицательным значением коэффициента корреляции (чуть выше –0,5). Для III квартала притока в Байкал характерно повышение коэффициента корреляции к 1959 г. до 0,52 и его постепенное снижение с переходом в отрицательные значения в 1979 г. Для Братского водохранилища связь притока II квартала подобна связи притока III квартала в озеро Байкал, в то время как среднегодовые и III квартала корреляционные связи значительно отличаются (они не перешли в отрицательные значения). Хотя данные по площадям льдов Арктики в настоящее время можно получить из различных источников, в том числе и просто проинтегрировать по суточным картам ледовых покрытий (http://iup.physik.uni-bremen.de:8084/archive.html), такие исследования не будут корректными в связи со значительным уменьшением толщины льдов Арктики и их температур за последние годы.

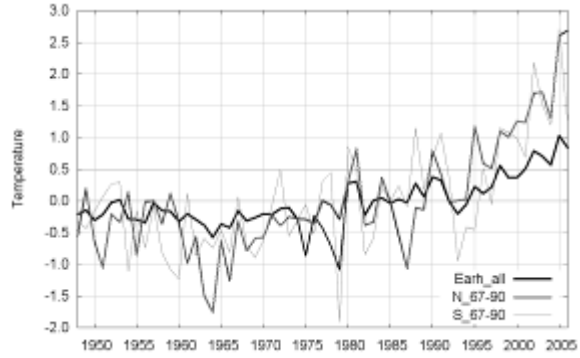


Рис. 3. Глобальное изменение температур воздуха (°С) в целом по Земному шару (Earth) и по широтам (67–90° с. ш., 67–90° ю. ш.)

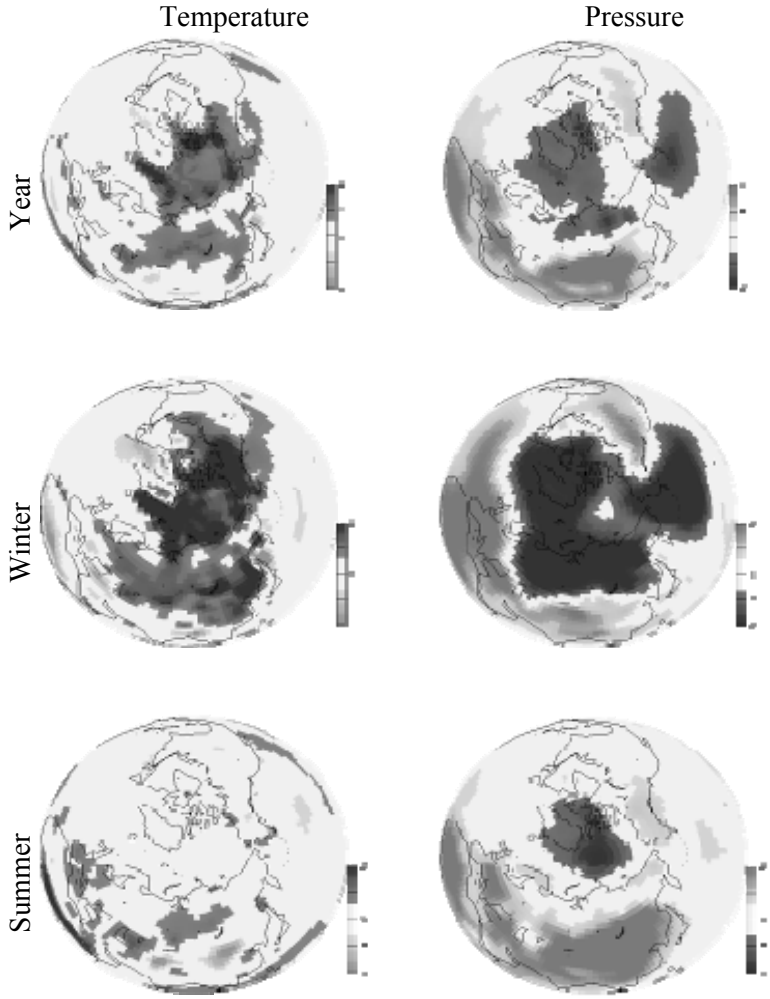


Рис. 4. Карты изменения климатических показателей
между 1948–1977 и 1978–2006 гг.

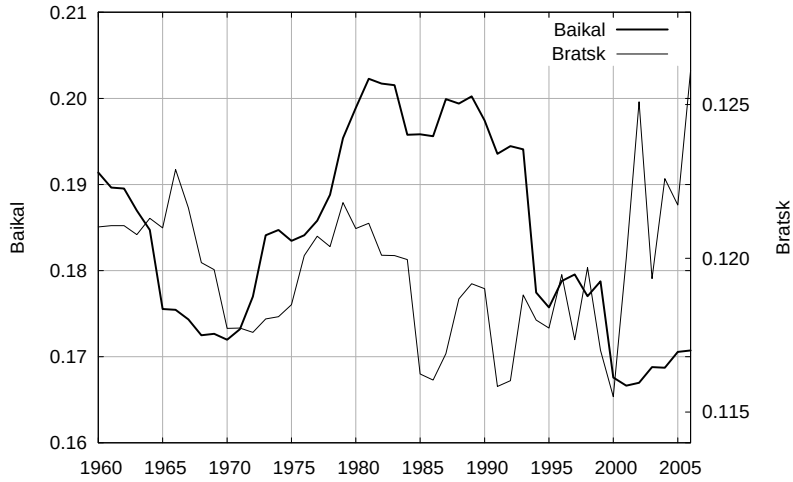


Рис. 5. Изменчивость коэффициента вариации $C_v(t)$ для полезного притока в озеро Байкал и бокового притока в Братское водохранилище

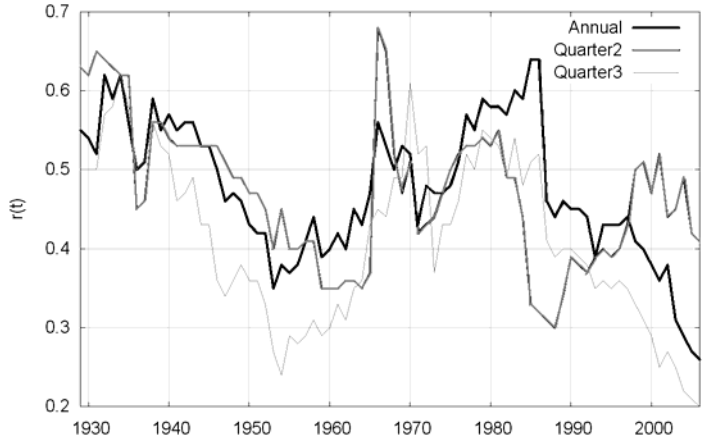


Рис. 6. Изменчивость корреляционной связи $r(t)$ между боковым притоком в Братское водохранилище и полезным притоком в озеро Байкал

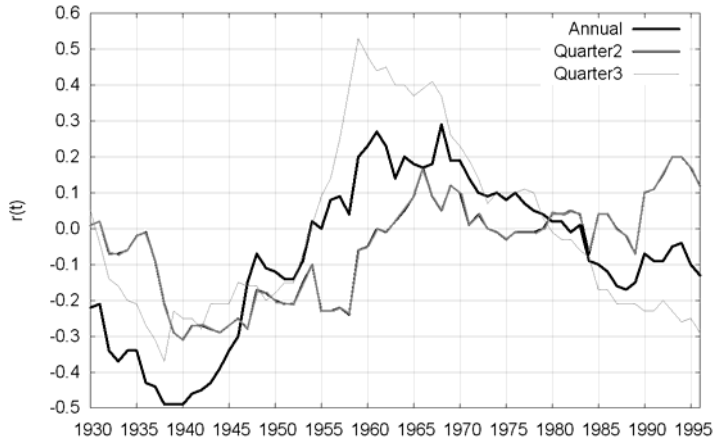


Рис. 7. Связь полезного притока в озеро Байкал с площадью льдов в Арктике

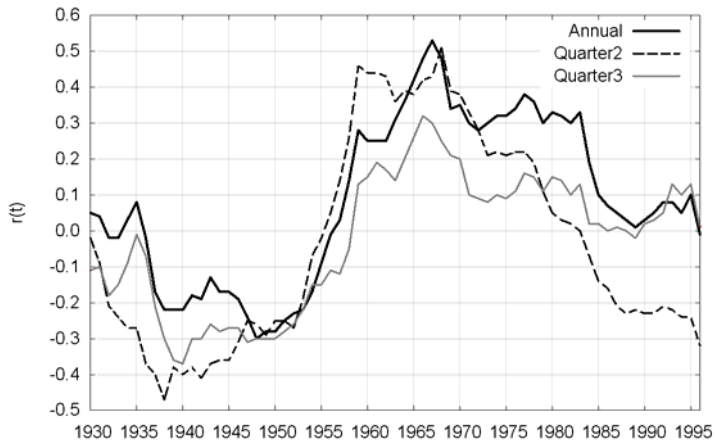


Рис. 8. Связь притока в Братское водохранилище с площадью льдов в Арктике

О развитии прогностической системы ГИПСАР

Использование распределенных компонентов пространственного анализа в системе ГИПСАР позволяет включать в нее различные методики поиска предикторов для исследуемых процессов. Найденные статистические связи между притоком воды в водохранилища Ангарского каскада ГЭС, средней площадью льдов Арктики и изменяющимися показателями Сибирского антициклона (его мощность и пространственное расположение) позволяют создавать новые про-

гностические методы с заблаговременностью в сезон, год и несколько лет для включения в систему ГИПСАР, благодаря чему значительно повышается надежность таких прогнозов.

Summary

The paper presents an approach to the study of hydroelectric potential of the Angarsk Hydroelectric Plant cascade on the basis of "GIPSAR" information-forecasting software with consideration of long-term low-water periods on Lake Baikal. The software employs the components of interaction with the base of spatial data with a uniform grid (2.5°) for the whole globe (air temperature, pressure, precipitation and other indices which make it possible to analyze regional changes in the climate and their interrelations with the global changes). These data were used to present changes in the average annual, winter, and summer temperatures and value of pressure between the periods of 1948–1977 and 1978–2006.

The diagrams of change in the variation coefficient and correlation coefficients between the useful inflow to Lake Baikal and the lateral inflow to Bratsk reservoir are presented. A considerable decrease in the correlations is observed.

The change in the correlation relationship between the studied processes and average area of Arctic ice is described on the basis of the data obtained in 1996. The data indicate their high values that were higher than 0.5 at the end of the 1950s and gradual decrease to the negative values for Lake Baikal and close-to-zero values for Bratsk reservoir.

The found correlations and changing characteristics of the Siberian anticyclone make it possible to develop more advanced long-term forecasting methods.

Список литературы

Berezhnykh T., Abasov N. 2003. The increasing role of long-term forecasting of natural factors in energy system management // Intern. J. of Global Energy Issues. Vol. 20. № 4. P. 353–363.

Абасов Н. В., Бережных Т. В., Резников А. П. 2000. Долгосрочный прогноз природообусловленных факторов энергетики в информационно-прогностической системе ГИПСАР // Изв. РАН. Энергетика. № 6. С. 22–30.

Абасов Н. В., Ветрова В. В. 2007. Технология обработки геоклиматических данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Тр. XII Междунар. конф. Ч. II. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. С. 85–91.

Захаров В. Ф. 2003. Изменения в распространении морских арктических льдов в XX веке // Метеорология и гидрология. № 5. С. 75–86.

Региональные особенности гидроклиматических изменений на юге Восточной Сибири

А. Н. Антипов, Н. Н. Густокашина, Н. В. Кичигина, А. С. Балыбина

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
Иркутск, 664033, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: nadya@irigs.irk.ru

Regional Features of Hydroclimatic Changes in the South of Eastern Siberia

A. N. Antipov, N. N. Gustokashina, N. V. Kichigina and A. S. Balybina

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
Ulan-Batorskaya Str., 1, Irkutsk 664033, Russia

Проблема последствий изменения климата привлекает к себе пристальное внимание исследователей и находится в ряду важнейших естественнонаучных вопросов. По данным за 1951–1995 гг. оценено изменение основных климатических показателей на территории юга Восточной Сибири. Вклад в эти изменения глобальных и региональных факторов в течение года различен. Более детальный анализ для Предбайкалья показал, что на большей части территории наблюдается повышение средней годовой температуры воздуха при понижении годовых сумм атмосферных осадков и уменьшении прихода коротковолновой солнечной радиации. Распределение интенсивности изменений рассматриваемых климатических элементов различно.

Анализ рядов максимального стока половодий и паводков показал, что на территории юга Восточной Сибири наблюдается тенденция уменьшения максимального стока весеннего половодья (коэффициенты регрессии в основном отрицательные). При использовании дендроклиматической информации с помощью регрессионной модели восстановлены ряды некоторых метеорологических и гидрологических характеристик.

Ключевые слова: гидроклиматические изменения, речной сток, температура, осадки, Сибирь.

Проблема изменения климата привлекает к себе пристальное внимание исследователей и находится в ряду важнейших естественнонаучных вопросов. В настоящее время она перестала быть сугубо академической, интересной лишь специалистам-климатологам. Непривычные климатические явления последних лет: от небывалой летней жары и мощнейших наводнений в Европе, рекордного количества торнадо в США до сильнейших пожаров в Индонезии и Австралии,

начинают в той или иной мере затрагивать каждого, оказывая влияние на все стороны человеческой жизнедеятельности. Эти экстремальные погодные явления, как правило, связывают с изменением климата. Достоверно доказано, что на протяжении геологической истории Земли (4,65 млрд лет) вместе со всей земной природой менялись состав атмосферы, ее масса, менялся и климат.

Один из основных показателей климата – температура воздуха, поэтому особенности ее годовой ритмики, векового тренда и межгодовой изменчивости хорошо изучены. Современные данные показывают, что глобальная приземная температура воздуха в течение XX в. увеличилась на 0,6 °С. Наибольшие положительные тренды температуры воздуха наблюдаются в основном в континентальной части материка – до 0,5 °С/10 лет. Основной вклад в повышение среднегодовых величин вносят зимние месяцы.

Анализ трендов рядов максимального стока половодий и паводков по 74 гидропостам на территории юга Восточной Сибири (рассматриваются реки в бассейнах верхней Лены, верхнего Енисея, Ангары и озера Байкал) за 1958–1992 гг. показал, что на большей части территории наблюдается тенденция уменьшения максимального стока весеннего половодья (тренды рядов в основном отрицательные). Для рядов максимального паводочного стока количество положительных и отрицательных трендов примерно одинаково. Причем наиболее явно такая тенденция проявляется в бассейнах Ангары и Енисея (см. таблицу). При этом в пространственном отношении прослеживается следующая закономерность. Наибольшие положительные тренды максимального стока весеннего половодья наблюдаются на Витиме, а наибольшие отрицательные тренды на створах, расположенных на равнинной территории, – в среднем и нижнем течении Ангары. Наибольшие отрицательные тренды паводочного стока наблюдаются на реках, стекающих с горных сооружений Хабар-Дабана и Восточного Саяна, а наибольшие положительные тренды – в Забайкалье и в бассейне верхнего Енисея. В среднем по территории юга Восточной Сибири за рассматриваемый период величины максимального стока половодья и паводков изменялись каждые 10 лет на 5–10 % от среднемноголетнего максимума.

Для Предбайкалья, по сравнению с остальными районами юга Восточной Сибири, на настоящий момент у нас имеется наиболее полная база данных, включающая информацию за отдельные месяцы о гидроклиматических параметрах с начала инструментальных наблюдений до 2000 г.

На большей части территории в 1960–2000 гг. наблюдается повышение средней годовой температуры воздуха при понижении годовых сумм атмосферных осадков и уменьшении прихода коротковолновой солнечной радиации. Распределение интенсивности изменений рассматриваемых климатических элементов различно (Густокашина, 2003).

Табл. 1. Количество отрицательных и положительных трендов рядов максимального стока половодий и паводков за 1958–2000 гг.

Бассейн	Процент трендов от их общего количества			
	Половодья		Паводки	
	Отрица-тельных	Положи-тельных	Отрица-тельных	Положи-тельных
Ангары	88	12	44	56
Байкала	73	27	69	31
Лены	60	40	50	50
Енисея	87	13	54	46

На примере бассейна Ангары выполнен анализ трендов рядов среднемесячных атмосферных осадков, температуры воздуха, минимальных и среднемесячных расходов воды с мая по сентябрь за 1958–2000 гг. Среднемесячные расходы мая имеют тенденцию к уменьшению. В июне тренды рядов среднемесячных расходов как положительные, так и отрицательные. В июле, августе и сентябре они в основном положительные. В большинстве случаев минимальные из среднемесячных расходов (за пять рассматриваемых месяцев) в бассейне р. Ангары наблюдались в мае и сентябре (32 и 30 % соответственно). Анализируя тенденции изменения минимальных месячных расходов с мая по сентябрь в бассейне Ангары, можно замтить, что в мае и июне тренды рядов минимальных месячных расходов как положительные, так и отрицательные. Минимальные месячные расходы июля, августа и сентября в основном возрастают (Рис. 1).

В целом с 1958 по 2000 г. в бассейне р. Ангары наблюдается следующее внутригодовое перераспределение гидроклиматических характеристик. В мае происходит уменьшение осадков и стока при повышении температуры воздуха. В июне температура воздуха уменьшается, количество осадков увеличивается, тенденция изменения стока неоднозначна. В июле, августе и сентябре наблюдается повышение температуры воздуха и количества осадков. Отмечается незначительное увеличение стока июля и августа и четкая тенденция увеличения стока в сентябре.

Изучение гидроклиматических процессов на основе анализа только инструментальных данных невозможно ввиду их ограниченности во времени и пространстве. Исследование динамики природных процессов за период, превышающий период инструментальных наблюдений, возможно только на основе так называемых косвенных индикаторов. К ним относится ряд объектов живой и неживой природы с ярко выраженной слоистой структурой, сформировавшейся в результате периодического воздействия на них сезонных изменений тепло- и влагообеспеченности за промежутки времени от года до сотен тысяч лет.

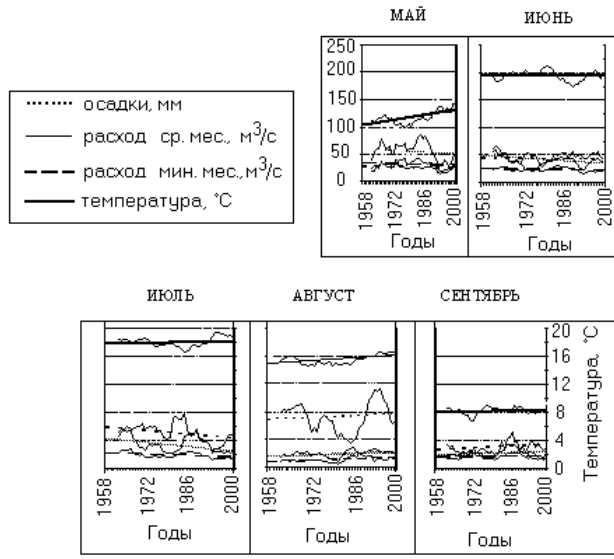


Рис. 1. Тренды гидроклиматических характеристик по месяцам с 1958 по 2000 г. (метеостанция г. Зима – гидропост р. Зима – с. Зилумай; метеостанция г. Иркутск – гидропост р. Куда –с. Грановщина)

Самым чувствительным из природных индикаторов является ширина годичного кольца деревьев. Достоинство дендрохронологического метода еще и в том, что он (единственный из существующих в настоящее время) позволяет датировать события с точностью до года.

Наиболее удобными древесными породами для дендрогидроклиматического анализа в исследуемом регионе являются сосна обыкновенная и лиственница сибирская. По отобранным образцам после измерения ширины годичных колец были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии, проведен анализ взаимосвязи дендрохронологических рядов с гидроклиматическими параметрами. Высокие межсериальные коэффициенты корреляции (до 0,7–0,9) показывают синхронность в ответе отдельных деревьев на изменение климатических и гидрологических условий (температуры воздуха, атмосферных осадков, составляющих теплового баланса).

Цикличность динамики прироста годичных колец обусловлена ритмами атмосферной циркуляции, которая является комплексным гидроклиматическим показателем, интегрирующим режим температуры воздуха и атмосферных осадков (Балыбина, Караханян, 2007).

С 2003 г. и по настоящее время в Институте географии реализуются палеоландшафтные исследования. Одной из ведущих задач этих исследований является выявление пространственно-временных закономерностей ландшафтно-климатических изменений позднего голоцена в Восточной Сибири. Основные

принципы работ заключаются в следующем: интеграция методов изучения палеоклиматических сигналов, пространственное сопряжение и генетическая общность объектов исследований, ландшафтная репрезентативность исследуемых территорий.

В ходе исследований получены материалы, подтверждающие, что тепло- и влагообеспеченность являются основными факторами, влияющими на преобразование ландшафтов Восточной Сибири в голоцене как на региональном, так и на локальном уровне. Наиболее четко и контрастно изменения тепло- и влагообеспеченности проявляются в характере биопродукционных процессов и в развитии биоты. В частности, изменение скорости процесса торфонакопления демонстрирует отчетливую связь этого процесса не только с теплообеспеченностью, но и влагообеспеченностью в геосистемах Западного Прибайкалья (Кузьмин и др., 2005).

Программа изучения ландшафтно-климатических изменений предусматривает сравнительный анализ разновременных рядов климатических параметров, реконструированных, главным образом, на основе дендрохронологических и биостратиграфических, в том числе и палинологических, данных. Особое внимание при этом предполагается уделить анализу синхронности и сопряженности длительных изменений температуры и влажности в различных ландшафтах, а также установлению амплитуд колебаний и экстремальных величин температуры воздуха и атмосферных осадков. Итоговым результатом должна стать интегральная пространственная модель изменений климата позднего голоцена Восточной Сибири.

Для описания взаимосвязи между гидроклиматическими параметрами (средние и экстремальные характеристики температуры воздуха, атмосферных осадков, речного стока и др.) и косвенными индикаторами их изменения (прирост ширины годичных колец деревьев, изотопы углерода и кислорода и др.) используется математический аппарат – вероятностная модель связи, основанная на оценке совместного распределения вероятностей. В общем виде многомерные нелинейные связи определяются в следующей последовательности:

1. Поиск для функции списка таких аргументов, чтобы их комбинация определяла эту функцию лучше всего.
2. Генерация возможных комбинаций.
3. Сравнение этих комбинаций по формальным (статистическим) критериям, выбор наиболее значительных.
4. Содержательный анализ – определение связей причинного характера (генетических связей).
5. Подбор параметров регрессии, сравнение характера связи с теоретическими представлениями.

Выбрав гипотезу, мы можем использовать ее для восстановления рядов, реконструкции, прогноза.

Нами реконструированы некоторые гидрологические характеристики водных объектов Восточной Сибири – озера Байкал и реки Куда (приток Ангары). Реконструкции погодичных данных не показали удовлетворительных результатов, однако лучшие результаты были получены при корреляции реконструированных и фактических, но сглаженных по 5-летиям. Возможно, это не дает информации за каждый год, но представляет цикличность колебаний параметров за период реконструкции.

Выводы

Цикличность динамики прироста годичных колец обусловлена ритмами атмосферной циркуляции, которая является комплексным гидроклиматическим показателем, интегрирующим режим температуры воздуха и атмосферных осадков.

За период реконструкции структура циклических колебаний гидроклиматических параметров не претерпела существенных изменений.

В ближайшие два года планируется расширить сеть дендрохронологического мониторинга на юге Восточной Сибири, выбрав объекты исследований в различных функциональных гидрологических зонах, что позволит уточнить региональные особенности ритмики природных процессов.

На изменение стока влияет комплекс факторов как природного, так и антропогенного происхождения. На внутригодовое перераспределение в большей степени действуют антропогенные изменения, а климатические изменения влияют на годовую величину стока. Имеет значение, в какой зоне происходят изменения тепло- и влагообеспеченности – в зоне формирования, трансформации или дренажа стока. Предполагается разработка различных сценариев бассейнового стокоформирования с последующим выходом на бассейновый менеджмент – управление выходным сигналом на замыкающем створе через гидроклиматические изменения на бассейне.

Summary

The problem of climate change consequences draws steadfast attention of researchers and is one of the major problems of natural science. The change in the basic climatic parameters in the south of Eastern Siberia is estimated by the data obtained for 1951–1995. The contribution to this change in global and regional factors is different within a year. The detailed analysis carried out for Prebaikalia shows that an increase in the average annual air temperature in the greater part of the territory is observed with decreasing annual precipitation and reducing short-wave solar radiation. Intensity distribution of considered climatic elements change is various.

The analysis of snow melting and rainfall maximum runoff series testify to the tendency of snow melting maximum runoff reduction in the south of Eastern Siberia, for the period of 1958–1992 the regression coefficients are mainly negative (watersheds of the Upper Lena, Upper Yenisei, Angara and Lake Baikal are investigated).

For the rainfall maximum runoff series the values of positive and negative trends are approximately equal. On the average the values of the spring snow melting and rainfall maximum runoff on the territory changed by 5–10 % every 10 years for the considered period as compared with average perennial maximum. Using the dendroclimatic information and the regression model, the series of some meteorological and hydrological characteristics are reconstructed.

Список литературы

Балыбина А. С., Караханян А. А. 2007. Циркуляционные факторы динамики радиального прироста хвойных на юге Восточной Сибири во второй половине XX века // Географические исследования в начале XXI века. Иркутск. С. 79–80.

Густокашина Н. Н. 2003. Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. Иркутск. 108 с.

Кузьмин С. Б., Безрукова Е. В., Данько Л. В. 2005. Палеогеографические события Прибайкалья в познем плейстоцене и голоцене // Структура, функционирование и эволюция горных ландшафтов Западного Прибайкалья. Иркутск: Изд-во ИГ им. В. Б. Сочавы СО РАН. С. 64–76.

Моделирование гидрологических и гидрофизических процессов в озерах и водохранилищах

О. Ф. Васильев, А. Т. Зиновьев, Т. Э. Овчинникова, А. Н. Семчуков

Институт водных и экологических проблем СО РАН
Новосибирск, 630090, Морской пр., 2
E-mail: vasiliev@ad-sbras.nsc.ru

Modelling hydrologic and hydrophysical processes in lakes and reservoirs

O. F. Vasiliev, A. T. Zinoviev, T. E. Ovchinnikova and A. N. Semchukov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS
Morskoy Pr., 2, Novosibirsk 630090, Russia

Математическое моделирование является главным средством оценки влияния климатических изменений на гидрологический и гидротермический режимы озер и водохранилищ. Необходимость рассмотрения этих изменений для годичных гидрологических циклов при различных сценариях изменений климата делает целесообразным использование наиболее простых математических моделей.

Для моделирования процессов, протекающих как в пресных, так и в минерализованных водоемах, в ИВЭП СО РАН разработаны две модели: объемная (нульмерная) и вертикальная одномерная. Обе модели основаны на уравнениях водного, теплового и солевого балансов и позволяют описывать ход основных гидрологических процессов в водоеме. При этом вертикальная одномерная модель учитывает определяющее влияние турбулентности и плотностной стратификации на процессы вертикального тепломассообмена и описывает вертикальные распределения температуры и минерализации в водной среде. Турбулентный обмен описывается с помощью двухпараметрической e–ε-модели. Учитываются такие важные гидрометеорологические факторы, как тепло- и влагообмен с атмосферой и формирование ледового покрова. Термодинамическое уравнение состояния воды отражает зависимость ее плотности от температуры и минерализации. При высокой минерализации принимается во внимание также ее влияние на температуру замерзания воды и интенсивность испарения.

В настоящей работе описана одномерная вертикальная модель и опыт ее использования в условиях реальных водоемов.

Ключевые слова: математическое моделирование, турбулентный обмен, минерализованные водоемы.

Одномерная вертикальная модель

Основными уравнениями модели (Bocharov et al., 1991; Зиновьев и др., 1995) являются уравнения сохранения массы, неразрывности, переноса тепла и солености:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\int_0^H (q_{in} - q_{out})dz}{\Omega_{surf}} - \tilde{q}_{ev}$$

$$\frac{\partial(\Omega w)}{\partial z} = q_{in} - q_{out},$$

$$\frac{\partial(\Omega T)}{\partial t} + \frac{\partial(\Omega\, wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega\, K_T \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_{in}T_{in} - q_{out}T,$$

$$\frac{\partial(\Omega\, S)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\Omega\, wS) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega\, K_S \frac{\partial S}{\partial z}\right) + q_{in}S_{in} - q_{out}S.$$

Здесь t – время; $H = H(t)$ – глубина; ось z направлена вверх; $\Omega = \Omega(z)$ – площадь горизонтального сечения водоема; $\Omega_{surf} = \Omega(H)$ – площадь свободной поверхности водоема; w – вертикальная компонента скорости; q_{in}, q_{out} – удельный расход притока и оттока (на единицу глубины); $\tilde{q}_{ev}$ – удельный (на единицу площади) отток воды, связанный с испарением и образованием льда; $T = T(t,z)$, $S = S(t,z)$ – температура и соленость воды в водоеме; T_{in}, S_{in} – температура и соленость втекающей воды; $K_T = \chi + \alpha\nu_t$ – коэффициент температуропроводности; χ – коэффициент молекулярной температуропроводности; K_S – коэффициент диффузии (здесь полагается $K_S = K$); $K = \nu + \nu_t$ – коэффициент вязкости; ν, ν_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости; $\alpha = 0.7$.

Краевые условия задаются следующим образом. На дне ($z = 0$):

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0,\ \frac{\partial S}{\partial z} = 0,\ w = 0.$$

На свободной поверхности ($z = H$):

$$\rho c_w K_T \frac{\partial T}{\partial z} = -\Phi,\ K_S \frac{\partial S}{\partial z} = (q_{ev} - q_{pr})S.$$

Здесь c_w – удельная теплоемкость воды; Φ – поток тепла на границе раздела вода – атмосфера (вода – лед); $\tilde{q}_{pr}$ – удельный (на единицу площади) приток воды, связанный с жидкими осадками и таянием льда.

Параметры $\tilde{q}_{ev}$, $\tilde{q}_{pr}$ определяются с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = v_{bi} + v_{pi} - v_{ei} - v_{ti};$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = v_{ps} - v_{es} - v_{ts}.$$

где v_{bi} – скорость нарастания или таяния льда снизу; v_{ti} – скорость таяния льда сверху; v_{ts} – скорость таяния снега сверху; v_{pi} – скорость приращения толщины льда вследствие атмосферных осадков; v_{ps} – скорость приращения толщины снега вследствие атмосферных осадков; v_{ei} – скорость изменения толщины льда вследствие испарения или конденсации; v_{es} – скорость изменения толщины снега вследствие испарения. Эти величины определяются на основе эмпирических соотношений (Wake, 1979).

Моделирование турбулентного обмена

Для определения коэффициента турбулентной вязкости ν_t в настоящей работе используется двухпараметрическая модель *e–ε* (Зиновьев и др., 1995; Васильев, 1999), описывающая перенос кинетической энергии турбулентности *e* и скорости ее диссипации *ε*. В модели учитывается генерация турбулентности за счет вертикального сдвига скорости и конвективной неустойчивости. Для моделирования горизонтальных компонент скорости используются следующие уравнения.

$$\frac{\partial(\Omega u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\Omega wu) - f\,\Omega v = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K \frac{\partial u}{\partial z}\right) - g\,\Omega\left\langle\frac{\partial H}{\partial x}\right\rangle,$$

$$\frac{\partial(\Omega v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\Omega wv) + f\,\Omega u = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K \frac{\partial v}{\partial z}\right) - g\,\Omega\left\langle\frac{\partial H}{\partial y}\right\rangle.$$

Здесь u, v – горизонтальные компоненты скорости течения; $f = 2\omega\sin\varphi$ – параметр Кориолиса; ω, φ – угловая скорость вращения Земли и широта; $\left\langle\frac{\partial H}{\partial x}\right\rangle, \left\langle\frac{\partial H}{\partial y}\right\rangle$ – средние уклоны свободной поверхности в направлении осей x, y соответственно.

Для определения средних уклонов свободной поверхности задаются дополнительные кинематические условия для горизонтальных компонент скорости:

$$\left.\begin{aligned}\int_{z_0}^{H} u(t,z)B(z)dz = Q\\ \int_{z_0}^{H} v(t,z)L(z)dz = 0\end{aligned}\right\},$$

где $B(z)$, $L(z)$ – ширина и длина водоема соответственно;

$Q = \frac{1}{2}\int_{z_0}^{H}(q_{in} + q_{out})\,dz$ – средний расход.

Уравнения e–ε-модели имеют вид:

$$\frac{\partial(\Omega e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\Omega we) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K_e \frac{\partial e}{\partial z}\right) + \Omega(P - \varepsilon),$$

$$\frac{\partial(\Omega \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\Omega w\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\Omega K_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) + \Omega \frac{\varepsilon}{e}(C_1 P - C_2 \varepsilon),$$

где $P = \nu_t\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \frac{\alpha_T}{\rho^*} g \frac{\partial \rho}{\partial z}\right]$; $K_e = \nu + \alpha_e \nu_t$; $K_\varepsilon = \nu + \alpha_\varepsilon \nu_t$; $\nu_t = C_\mu e^2/\varepsilon$;

ρ и ρ^* – плотность и средняя плотность воды.

Эмпирические коэффициенты $\alpha_T = 0{,}8$; $\alpha_e = 1$; $\alpha_\varepsilon = 0{,}77$; $C_\mu = 0{,}09$; $C_1 = 1{,}55$; $C_2 = 1{,}92$ (Orlob, 1983; Rodi, 1980).

Граничные условия для уравнений e–ε-модели записываются в следующем виде (Orlob, 1983; Rodi, 1980; Каменкович, 1973). На дне ($z = 0$):

$$\frac{\partial e}{\partial z} = 0,\ \varepsilon = C_\varepsilon \frac{e^{3/2}}{l_0},\ K\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = k_b |\bar{u}| \cdot \bar{u}.$$

На свободной поверхности ($z = H$):

$$\frac{\partial e}{\partial z} = K_\tau \left|\frac{\bar{\tau}}{\rho}\right|^{3/2},\ \varepsilon = C_\varepsilon \frac{e^{3/2}}{l^0},\ K\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{\bar{\tau}}{\rho}.$$

Здесь $\bar{u} = (u, v)$ – вектор горизонтальной скорости; $\bar{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$ – напряжение трения ветра; $k_b = 0.014$ – коэффициент донного трения; l_0, l^0 – масштабы турбулентности у дна и у свободной поверхности соответственно. Эмпирические коэффициенты полагаются равными $C_\varepsilon = 0{,}314$; $K_\tau = 2{,}5$ (Orlob, 1983; Rodi, 1980).

Моделирование гидрологических и гидрофизических процессов в западной части Аральского моря

В сотрудничестве с гидрологами Научно-информационного центра Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии (НИЦ МКВК) и гидробиологами Академии наук Узбекистана была выполнена работа по изучению возможности реабилитации экосистемы наиболее глу-

бокой западной части Большого Арала (Васильев и др., 2006). Задача предполагает изменение гидрологических условий рассматриваемого водоема. Возможным решением является прямая подача части остаточного стока р. Амударьи в его южную часть.

Рис. 1. Схема Аральского моря

На рис. 1 показана схема Арала в 1957 г. и его настоящее состояние с указанием места предполагаемой подачи воды в юго-западной части моря. В табл. 1 приведены параметры рассматриваемого водоема.

Для прогнозирования изменения уровня воды и солености в западной части моря НИЦ МКВК было разработано 12 сценариев расчета, предусматривающих подачу вод Амударьи в этот водоем. Они основывались на двух вариантах водохозяйственной деятельности в дельте р. Амударьи и трех сценариях ее стока (национальное видение, сохранение существующих тенденций, оптимистичный сценарий). Для каждого сценария стока имелась минимальная и максимальная оценка. Кроме того, изучался случай полного отсутствия поступления воды в водоем, что соответствует существующей ситуации в дельте Амударьи. Для каждого сценария задавалась и минерализация притока. Средняя годовая подача воды в этих сценариях менялась от 1,7 км^3 в наименее благоприятном варианте до 9,94 км^3 в оптимистичном.

При расчетах в качестве метеоданных использовались климатические (средние многолетние) данные с усреднением по месяцам. Используемая модель учитывает возможность перетока воды из западной части моря в восточную.

В табл. 2 приведены объемы поступления воды в условиях водохозяйственного варианта, предусматривающего наибольшую водоподачу в западную часть моря (с максимальной оценкой стока).

Таблица 1. Западная часть Большого Арала

Максимальная глубина	Объем	Площадь поверхности
46 м	63 км^3	4730 км^2

Таблица 2. Некоторые сценарии подачи воды

Сценарий	Средняя годовая подача воды, км^3
1. Национальное видение	5,00
2. Сохранение существующих тенденций	5,47
3. Оптимистичный	8,94

Расчеты, выполненные с использованием вертикальной одномерной модели, показали, что при периодической подаче достаточно больших объемов речной воды (что возможно в годы повышенной водности Амударьи) можно осуществить опреснение вод рассматриваемой части моря (с «вымывом» избытка солей путем сброса части подаваемой воды в восточную часть). Предварительные расчетные оценки показывают, что через 10–15 лет (с момента начала подачи речной воды) соленость вод рассматриваемой глубокой части моря можно снизить до экологически приемлемого уровня.

На рис. 2 показана динамика распреснения морской воды для сценариев, приведенных в табл. 2.

Годовой режим изменения солености и температуры проанализирован на примере наиболее многоводного года из расчетного периода для «оптимистичного» сценария. Выявлены следующие особенности: с начала ноября и до начала апреля (пять месяцев) в водоеме наблюдается состояние гомохалинности, причем величина солености медленно понижается, так как имеет место превышение объема осадков над испарением, а небольшой объем воды подается почти все время. С начала апреля и до начала июля происходит некоторое опреснение приповерхностных вод, которые к началу августа (т.е. приблизительно через три месяца) распространяются в придонные слои. В этот период максимальные различия между концентрациями соли у поверхности и дна достигаются в апреле и составляют около 2 г/л.

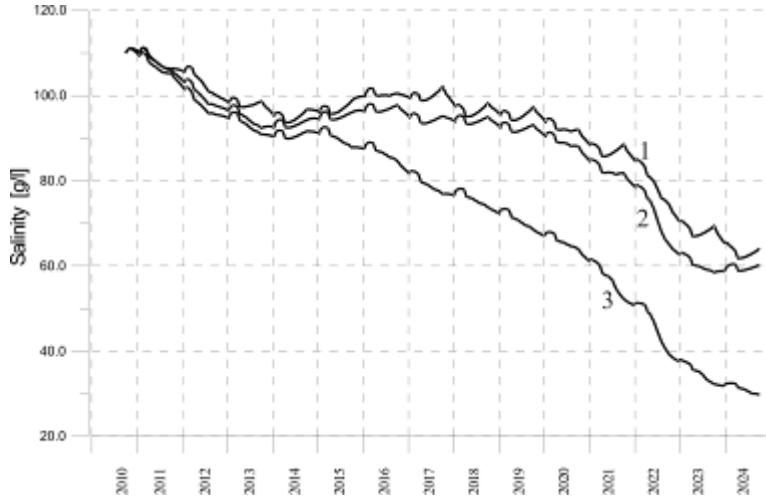


Рис. 2. Многолетняя динамика средней солености, полученная по сценариям из табл. 2

В температурном режиме для рассматриваемого периода при тех же исходных условиях выявлены следующие особенности: с декабря по март (т.е. около четырех месяцев в году) наблюдается состояние гомотермии с температурой примерно от +2 °С (в начале декабря) до –7 °С (в начале марта). К началу апреля верхние слои воды уже начинают прогреваться, в то время как нижние все еще имеют температуру около –7 °С. С апреля по август температура верхних слоев воды постепенно растет за счет прогревания и перемешивания с более теплыми водами, подаваемыми в водоем. К началу августа температура у поверхности воды достигает приблизительно 24 °С, а затем начинает постепенно понижаться. В то же время температура у дна в области наибольших глубин с января по начало сентября остается отрицательной. В начале сентября разница с поверхностной температурой – примерно 21 °С. Диапазон изменения придонной температуры составляет примерно 14 °С (в интервале от –7 до +7 °С), а у поверхности этот диапазон – около 30 °С (в интервале от –7 до +23 °С).

На рис. 3 показаны вертикальные распределения температуры и солености, полученные в этом расчете.

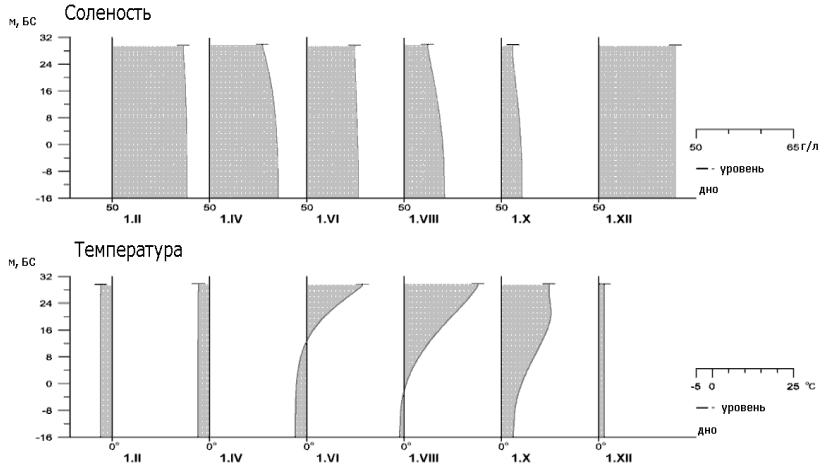


Рис. 3. Характерные вертикальные распределения температуры и солености в различные периоды года

Моделирование гидрофизического режима Телецкого озера

Телецкое озеро – уникальный пресный природный водоем на юге Западной Сибири. Длина озера 77,8 км, максимальные ширина 5,2 км, глубина 325 м. В озеро впадает около 70 рек. Основная часть стока в озеро поступает через р. Чулышман (70–75 %) в южном его конце и вытекает в противоположном через р. Бия.

Наиболее полная натурная информация о термическом режиме Телецкого озера дана в работе (Селегей и др., 1978), где отмечается, что Телецкое озеро является димиктическим водоемом с двукратным перемешиванием в течение года. Изолинии температуры, построенные по результатам расчетов с использованием одномерной вертикальной модели (рис. 4) демонстрируют, что в озере два раза в год при температуре максимальной плотности воды возникает термическая неустойчивость и развивается вертикальная циркуляция. Модель удовлетворительно воспроизводит развитие температурной стратификации в летне-осенний период (глубину стратификации и длительность ее состояния), ход температуры поверхности озера. Сравнение расчетных распределений температуры с натурными данными показывает хорошее количественное согласие в сроках смены гидрологических сезонов и качественное совпадение по виду температурных профилей.

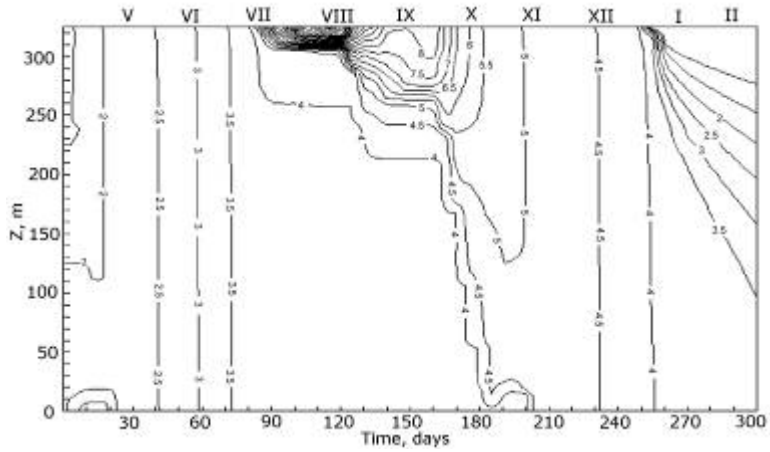


Рис. 4. Сезонный ход изотерм Телецкого озера (начало расчета – 20 апреля)

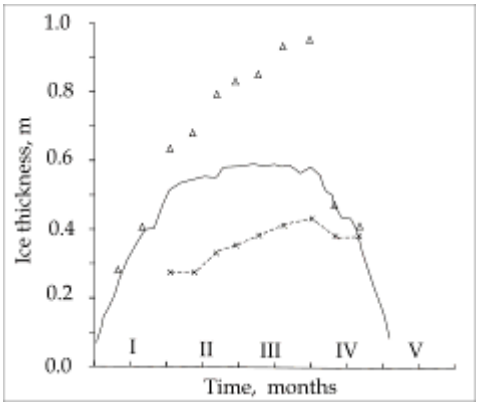


Рис. 5. Динамика толщины ледового покрова (сплошная линия – результаты расчета, пунктирная линия – средние значения, треугольники – максимальные значения толщины льда за 1954–1975 гг. около поселка Яйлю)

Результаты расчетов показывают, что в конце декабря – начале января температура поверхностных слоев воды опускается до 0 °С, и на озере начинает формироваться ледяной покров. Сплошная линия на рис. 5 иллюстрирует рассчитанную динамику роста-таяния льда озера. Отметим, что данная зависимость получена без учета снежного покрова на поверхности льда, поэтому вычисленные значения толщины льда должны быть больше натурных величин.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 06-05-65076) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16 (проект № 7).

Summary

Mathematical modelling is the main method of estimation of climate changes effect on hydrological and hydrothermal regimes of lakes and reservoirs. A necessity of considering these changes for annual hydrological circles under various scenarios of climate changes makes expedient the use of the simplest mathematical models. The models considered below are used as an example.

Two models are developed for the simulation of processes both in fresh and mineralized water bodies: 0-D (zero-dimensional) and 1-D vertical. Both models are based on equations of water-, heat- and salt balances and make it possible to describe the main hydrological processes in a water body. The 1-D vertical model considers the determining influence of turbulence and density stratification on vertical heat-and-mass transfer processes and describes vertical distributions of water temperature and mineralization. The two-parameter model e-ε is based on concepts of turbulence kinematic energy e and its dissipation rate ε. Turbulence is connected with induced horizontal shear flows caused by wind. Such important hydrometeorological factors as heat-and-moisture exchange and formation of ice cover are also taken into account. The thermodynamic equation of water state used in modeling represents the dependence of water density on temperature and mineralization. Under high values of mineralization its influence on freezing point and evaporation intensity is also considered.

The given models are applied for studying hydrological and hydrophysical processes in the southwestern part of the Aral Sea. The possibility of ecosystem rehabilitation in this deepest part of the Aral Sea is studied in cooperation with hydrologists from the Scientific-Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination of Central Asia (SIC ICWC) and hydrobiologists from the Academy of Sciences of Uzbekistan. For this purpose, it is required to reconstruct environmentally acceptable hydrophysical conditions in that part, which can be done only by water delivery of Amu-Darya residual runoff to the southern part of that water body.

Calculations carried out using the 1-D vertical model show that water in the sea site under study can be desalinated at the periodical transfer of sufficiently great amount of freshwater from Amu-Darya due to washing out of the excess of salt by the discharge of the delivered water to the eastern part. The preliminary calculations indicate that the water salinity in the deep part of the sea under study can be reduced to the environmentally sound level in 10–15 years after the delivery of freshwater will be started.

The 1-D vertical model is applied for modelling of hydrothermal regime of Teletskoe Lake in Altai. The results of calculations show good quantitative agreement in periods of changes of hydrological seasons and qualitative coincidence in the form of temperature profiles.

Список литературы

Bocharov O. B., Vasiliev O. F., Zinoviev A. T. 1991. Mathematical modelling of hydrothermal processes of deep-water reservoirs // Proc. of XXIV Congr. of IAHR, Madrid. Vol. C. P. 467–476.

Chen C. T., Millero F. J. 1986. Precise Thermodynamic Properties for Natural Waters Covering Only the Limnological Range // Limnol. Oceanogr. Vol. 31, № 3. P. 657–662.

Orlob G. T. 1983. One-dimensional Models for Simulation of Water Quality in Lakes and Reservoirs // Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs. IIASA. P. 227–273.

Rodi W. 1980. Turbulence Models and their Applications in Hydraulics. A State of the Art Review / Intern. Association for Hydraulics Research, Delft. P. 227–322.

Wake A., Rumer R. R. Modeling ice regime of lake Eria. J. of the Hydr. Division, 1979, vol. 105, № HY7. P. 824-844.

Васильев О. Ф. 1999. Математическое моделирование гидравлических и гидрологических процессов в водоемах и водотоках (обзор работ, выполненных в Сибирском отделении Российской академии наук) // Водные ресурсы. Т. 25, № 5. С. 600–611.

Васильев О. Ф., Овчинникова Т. Э., Семчуков А. Н., Прокопьев С. И., Иевлев К. В., Коробкина Е. А. 2006. Моделирование гидрологических и гидрофизических процессов в западной части Аральского моря // Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе: Тр. Междунар. конф. Москва. С. 34–38.

Зиновьев А. Т., Копылов Ю. Н., Кузьмин А. А. 1995. Одномерная вертикальная модель процесса седиментации в глубоком водохранилище // Водные ресурсы. Т. 22, № 6. С. 676–683.

Каменкович В. М. 1973. Основы динамики океана. Л.: Гидрометеоиздат. 240 с.

Мамаев О. И. 1987. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат. 296 с.

Селегей В. В., Селегей Т. С. 1978. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеоиздат. 142 с.

Применение ядерной оценки многомерного распределения вероятностей для исследования связи климатических и гидрологических параметров

А. В. Игнатов

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
Иркутск, 664033, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: ignatov@irigs.irk.ru

Using the Nuclear Estimate of Multidimensional Probability Distribution in Investigating the Connection of Climatic and Hydrologic Parameters

A. V. Ignatov

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
Ulan-Batorskaya St., 1, Irkutsk 664033, Russia

Для поиска и изучения многофакторных статистических связей гидрологических и климатических характеристик использована ядерная оценка совместной многомерной плотности распределения вероятности. Для поддержки решения задачи разработана компьютерная программа, реализующая алгоритмы генерации, проверки и отбора лучших гипотез. Для анализа характера стохастических зависимостей применена графическая визуализация их регрессий в виде кусочно-линейных аппроксимаций. Выявляемые в результате исследования наиболее устойчивые соотношения между гидрологическими и климатическими параметрами дают информацию для обсуждения закономерностей их динамики и могут быть использованы в задачах приближенной реконструкции и прогноза их временных рядов.

Ключевые слова: статистическая зависимость, совместное распределение, регрессия, поиск взаимосвязей между переменными.

В настоящее время не потеряла своей актуальности давняя проблема выявления закономерностей по данным измерений совместных значений достаточно большого числа переменных. Несмотря на то, что этой задаче уже уделялось много внимания, гигантское разнообразие возможных вариантов ее постановки и решения оставляет широкое поле для новых попыток.

Описание метода

Реальные данные часто имеют различную точность и достоверность. Учесть точность можно, описав приближенную оценку с помощью плотности распределения вероятности $r_i(x)$ того, что значение переменной в i-й реализации равняется x. Достоверность описывается с помощью вероятностной меры доверия p_i к информации о значении переменной, содержащейся в оценке $r_i(x)$.

Функцию $r_i(x)$ удобно назвать функцией оценки значения переменной x или просто функцией значения. В теории нечетких множеств (Аверкин, 1986) подобные функции принято именовать функциями принадлежности. Когда значения контролируемых характеристик измерены точно, функция $r_i(x)$ обращается в дельта-функцию Дирака. Если данные достоверны, то p_i =1. Когда вид распределения $r_i(x)$ неизвестен, но есть некоторая информация о поведении ошибки измерения, то функция значения может быть аппроксимирована подходящей функцией известной математической структуры. Наиболее часто встречающимся приближенным описанием данных измерений непрерывно изменяющихся переменных является их интервальное ($x = x_i \pm \Delta x_i$) представление (Великанов, 1962). Оно эквивалентно использованию равномерной плотности распределения на заданном интервале в качестве функции значения переменной. Другим распространенным описанием значений переменных является использование информации о математическом ожидании значения переменной и дисперсии (или стандартного отклонения) ошибки ее измерения. Такой подход информационно эквивалентен (Вентцель, 1962) применению нормального распределения в качестве функции значения. Во многих ситуациях дифференцированный учет точности и достоверности исходных материалов позволяет получать на малых выборках более надежные статистические выводы (Гаскаров, Шаповалов, 1978). Игнорирование же этой информации может приводить к противоречивым или даже абсурдным выводам.

Решая задачу поиска устойчивых взаимосвязей между переменными в данных о значениях совместных реализаций достаточно большого числа исследуемых характеристик, целесообразно перейти к такой форме представления имеющейся эмпирической информации, при которой процесс выявления закономерностей становится алгоритмически достаточно простым. Опыт исследований (Чавчанидзе, Кумсишвили, 1961; Березин, 1965; Schuster, 1969; Добровидов, 1971; Гаскаров, Шаповалов, 1978) показывает, что подобной формой математического описания данных наблюдений может выступать ядерная оценка (Parzen, 1962) совместного распределения вероятностей. На основании достоверных материалов приближенных измерений такая оценка может быть представлена в виде (Игнатов, 1986, 1996):

$$f(\bar{z}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{k} r_{ij}(z_j), \qquad (1)$$

где n – число совместных реализаций; k – число переменных; $r_{ij}(z_j)$ – функция плотности вероятности, описывающая приближенное значение и ошибку i-го измерения j-й переменной.

Поправку на возможную недостоверность данных можно ввести, увеличив соответствующим образом энтропию оценок значений $r_{ij}(z_j)$. Это можно сделать (Игнатов, 2000), объединив, например, две оценки:

$$r^*_{ij}(z_j) = \left(p_{ij} \cdot r_{ij}(z_j) + r_0(z_j)\right) / \left(1 + p_{ij}\right),$$

где $r_0(z_j)$ – практически достоверная, но чаще всего очень неопределенная оценка значения переменной; p_{ij} – вероятностная мера доверия к исходной оценке $r_{ij}(z_j)$; $r^*_{ij}(z_j)$ – объединенная, менее определенная, но уже более достоверная оценка.

Так как в соответствии с одним из основных положений теории вероятности совместное распределение полностью описывает взаимозависимость между переменными, то его оценка в форме (1) может выступать в качестве математической основы моделирования как стохастических, так и детерминированных взаимосвязей между исследуемыми параметрами. Формула (1), как и таблица данных о совместных значениях, описывает оценку взаимосвязи между переменными в неявной форме, но, в отличие от последней, позволяет найти явную оценку зависимости любой из переменных в виде условного распределения:

$$f(y/\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n} r^*_i(y) \prod_{j=1}^{m} r^*_{ij}(x_j) \Bigg/ \sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{m} r^*_{ij}(x_j), \qquad (2)$$

где y – произвольная компонента вектора $\vec{z}$, рассматриваемая как зависимая переменная; $\vec{x}$ – вектор размерности $m < k$, образованный компонентами x_j, рассматриваемыми как аргументы функции y.

При исследовании взаимосвязи между переменными важно выявить закономерное отклонение $f(y/\vec{x})$ от $f(y)$, обусловленное зависимостью $y(\vec{x})$. Сложность решения этой задачи связана с двумя проблемами. Первая заключается в том, что при оценивании $f(y/\vec{x})$ по реальным данным их часто оказывается недостаточно для установления значимых различий между оценками $f(y/\vec{x})$ и $f(y)$. Вторая связана с тем, что наличие закономерности выражается через совершенно определенный, но неизвестный список аргументов стохастической функции y.

Первым приемом, позволяющим повысить статистическую достоверность оценки $f(y/\vec{x})$, является уменьшение точности задания многомерного аргумента $\vec{x}$. Это информационная плата за такое повышение. Чтобы на одной и той же выборке данных более точно оценить функцию $f(y/\vec{x})$, необходимо менее точно задать значение $\vec{x}$. Это можно сделать с помощью специальных функций $v(x_j)$, приближенно задающих значение $\vec{x}$. С их использованием формула для вычисления оценки $f(y/\vec{x})$ преобразуется к виду:

$$f(y/\approx \vec{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i(y) \prod_{j=1}^{m} \int_{X_j} v(x_j)\, r^*_{ij}(x_j)\, dx_j}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{m} \int_{X_j} v(x_j)\, r^*_{ij}(x_j)\, dx_j}, \qquad (3)$$

где X_j – область изменчивости соответствующего аргумента. Второй прием заключается в огрублении оценки $f(y/\vec{x})$, выполняемой путем замены ее менее подробным описанием, например, средним значением и дисперсией или гистограммой с небольшим числом классов.

Особенности реализации метода на компьютере

При анализе многомерных взаимосвязей между переменными для каждой из них естественной представляется задача нахождения списка аргументов, при котором выбранный критерий оценки силы связи достигает соответствующего экстремума. На первый взгляд решение этой задачи могло бы быть найдено при полном переборе всех возможных комбинаций аргументов. Однако этот способ требует, как правило, слишком больших вычислительных затрат. Известен ряд подходов к ограничению множества проверяемых пробных моделей (Дрейпер, Смит, 1973; Ивахненко, 1975; Бруссиловский, Розенберг, 1983). Автором для решения этой задачи был реализован модифицированный метод последовательного подключения аргументов. Его суть заключается в том, что сначала экспертом формулируется класс проверяемых гипотез. Он задается списком всех рассматриваемых как возможные аргументы данной функции переменных, максимальным числом аргументов многофакторных зависимостей и способом постепенного усложнения пробных моделей. После этого компьютерной программой выполняется полный перебор и проверка всех однофакторных моделей, и все аргументы ранжируются по величине критерия предсказательной способности соответствующих моделей. Затем проверяются все двухфакторные модели, включающие в список предикторов в обязательном порядке заданное число выбранных на первом шаге аргументов в качестве наиболее подходящих; потом – все трехфакторные, включающие заданное число наилучших пар, и т.д. Наиболее вероятным по формальному критерию считается список аргументов, при котором достигается максимальная точность предсказания значений зависимой переменной. Весь процесс его поиска протоколируется, и протокол подвергается экспертом дополнительному контролю. При необходимости класс проверяемых гипотез изменяется, в частности, некоторые переменные могут быть принудительно включены в наиболее вероятный список, и процесс поиска оптимальной модели повторяется.

При интерпретации многомерных моделей статистической зависимости переменных очень важно иметь возможность получения информации о топологическом характере этой зависимости в наглядной для исследователя форме. Удобной визуализацией случайной функции одного аргумента является график ее условного среднего, а двух аргументов – семейство соответствующих графиков. Многомерная зависимость визуализируется множеством ее одно- или двумерных сечений. При визуализации условных средних удобно использовать их кусочно-линейную аппроксимацию, соединяя прямыми линиями точки, определяемые соответствующими средними значениями аргумента и функции. При та-

кой аппроксимации, управляя числом степеней свободы и способом разбиения на части пространства аргументов, можно, практически не навязывая форму кривых, обеспечить их достаточную гладкость. Вывод на экран компьютера последовательности одно- или двумерных сечений и подбор их желаемой гладкости позволяет получить достаточно подробное представление о характере исследуемой многомерной зависимости.

Результаты приложения к гидрометеорологическим данным

На рис. 1–4 показаны некоторые результаты применения описанной технологии к исследованию гидрологических и метеорологических данных. В классической задаче формирования гидрографа выбор наиболее значимых метеорологических факторов, определяющих значения гидрологических параметров, и оценка характера их взаимосвязи (рис. 1) помогают лучше понять генезис и закономерности формирования стока в замыкающем створе водосбора. Другим актуальным направлением статистических исследований является исследование реакции региональных географических характеристик на изменения глобальных параметров климата Земли. Пример оценки таких связей показан на рис. 2. В задаче восстановления исторической динамики гидрологических и климатических переменных часто требуется найти отклик на их изменения, записанный в значениях параметров древесных колец, слоев ледовых кернов и донных отложений и т.д. На рис. 3 показаны некоторые особенности совместного поведения подобных характеристик в Байкальском регионе, выявленные с помощью разработанных программных средств. Еще одна практически важная область применения вероятностного моделирования связей на основе данных наблюдений – гидрологические прогнозы. Наиболее эффективные результаты получаются при совместном прогнозировании группы взаимосвязанных характеристик. Пример прогноза, построенного по одной из таких моделей, приведен на рис. 4.

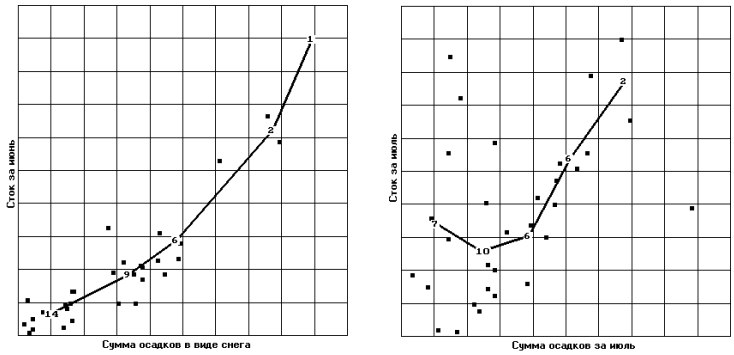


Рис. 1. Оценка зависимости месячного стока в замыкающем створе от величины осадков, выпадающих на водосбор

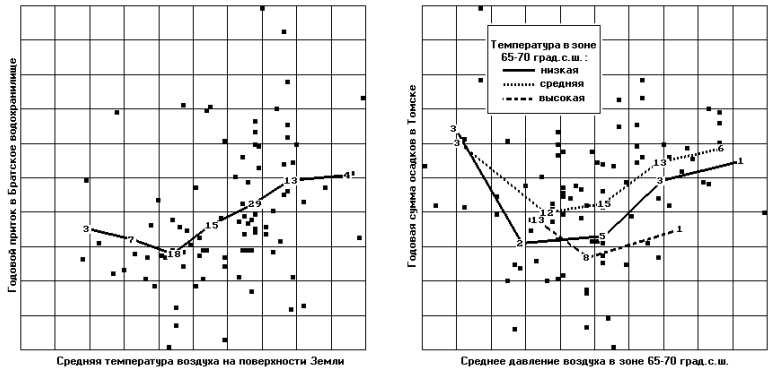


Рис. 2. Взаимосвязи региональных и глобальных гидрометеорологических характеристик

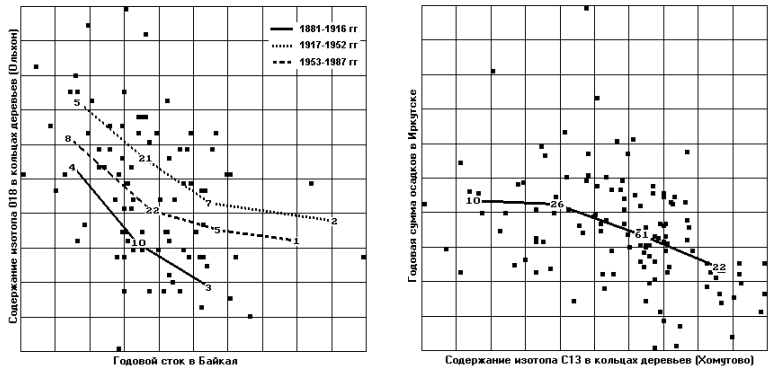


Рис. 3. Статистическая связь между параметрами древесных колец и гидрометеорологическими характеристиками

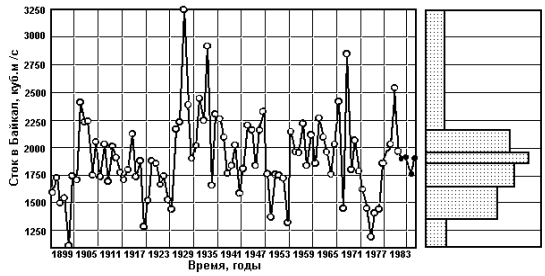


Рис. 4. Построение вероятностного прогноза среднегодового стока в озеро Байкал с использованием модели совместной динамики группы гидрометеорологических характеристик

Summary

A statistical characteristic satisfying the condition of obtaining information on variability and interrelation of some parameters contained in their values measured can be constructed. The characteristic is the kernel estimate of joint multidimensional density of probability distribution. Such estimate is convenient for studying the statistical dependence on several factors. In this case, the initial data should be represented as a table of parameter values. The advantage of the method is particularly obvious, when the initial data have different accuracy and reliability.

The developed approach makes it possible to construct the adapted formulas and algorithms for calculating joint probability density under the condition of limited measurements quantity. They provide investigation into the nonlinear regressions from many factors based on real data. Dependencies hidden in observation data can be found by formulating, testing and selecting the best hypotheses on the interrelation of parameters. Visualization of regressions is used in investigating the character of dependencies. The resulting steady connections between the parameters provide information for discussing the regularities of their dynamics and can be used in tasks of approximate reconstruction and forecasting of their time-series.

The method was applied in tasks of searching of and studying interrelation between annual values of local and regional hydrological and climatic characteristics, their connection with global climatic characteristics and content of the O^{18} isotope in tree rings. It is also used in prognostic tasks. The efficiency of the method is proved by the obtained results.

Список литературы

Parzen E. 1962. On estimation of a probability density function and mode // Annu. Math. Stat. Vol. 33, № 3. P. 1065–1066.

Schuster E. F. 1969. Estimation of probability density function and its derivatives // Annu. Math. Stat. Vol. 40. P. 1187–1195.

Аверкин А. Н. 1986. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука. 312 с.

Березин О. П. 1965. Определение законов распределения малых выборок методом прямоугольных вкладов // Докл. к науч.-техн. конф. по надежности судового электрооборудования. С. 190–198.

Бруссиловский П. М., Розенберг Г. С. 1983. Модельный штурм при исследовании экологических систем // Журн. общей биологии. Т. 44, № 2. 254–262.

Великанов М. А. 1962. Ошибки измерения и эмпирические зависимости. Л.: Гидрометеоиздат. 302 с.

Вентцель Е. С. 1962. Теория вероятностей. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 564 с.

Гаскаров Д. В., Шаповалов В. И. 1978. Малая выборка. М.: Статистика. 248 с.

Добровидов А. В. 1971. Об одном алгоритме непараметрической оценки случайных многомерных сигналов // Автоматика и телемеханика. № 2. С. 88–89.

Дрейпер Н., Смит Г. 1973. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика. 392 с.

Ивахненко А. Г. 1975. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника. 310 с.

Игнатов А. В. 1986. Оценка полной экспериментальной информации о связи показателей состояния природных объектов // Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем. Новосибирск: Наука. С. 55–60.

Игнатов А. В. 1996. Опыт вероятностного моделирования и анализа взаимозависимости многомерных географических данных // География и природные ресурсы. № 4. С. 149–158.

Игнатов А. В. 2000. Модели и оптимизационные задачи в проблемах природопользования в Байкальском регионе. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 207 с.

Чавчанидзе В. В., Кумсишвили В. А. 1961. Об определении законов распределения на основе малого числа наблюдений // Применение вычислительной техники для автоматизации производства. М.: Машгиз. С. 71–75.

Возможные изменения стока на водосборе Ладожского озера и его фосфорного режима в результате изменения климатических параметров

С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова

Институт озероведения РАН
Санкт-Петербург, 196105, ул. Севастьянова, 9
E-mail: Kondratyev@limno.org.ru

Estimation of Changes of Runoff in Lake Ladoga Catchment and its Phosphorus Regime as a Result of Possible Climate Changes

S. A. Kondratyev and M. V. Shmakova

Institute of Limnology RAS
Sevastyanova, 9, St.-Petersburg 196105, Russia

За основу оценки изменений стока с водосбора Ладожского озера и его фосфорного режима в результате возможных изменений климата принят сценарий ECHAM4/OPYC3. Для адаптации сценария к условиям изучаемого водосбора использован метод корректировки значений среднемесячных модельных климатических параметров с учетом особенностей метеорологии рассматриваемого водосбора. Результаты расчетов стока с водосбора позволяют предположить, что к концу XXI в. произойдет смещение максимальных расходов весеннего половодья в более ранний период. Увеличение испарения в теплый период года, возможно, приведет к снижению меженных расходов воды в притоках, летнего увлажнения водосбора и суммарного годового стока. Соответствующее увеличение концентрации общего фосфора в озере не превысит 4 % по отношению к современному значению.

Ключевые слова: климатические параметры, сток, общий фосфор.

Ладожское озеро площадью 18000 км^2 с объемом водной массы около 900 км^3 и суммарной площадью водосбора около 280000 км^2 является крупнейшим озером Европы. Водосборный бассейн озера расположен на территории трех государств – России (80 % от общей площади), Финляндии (19,9 %) и Белоруссии (0,1 %). Сток из Ладожского озера происходит по реке Неве, впадающей в Невскую губу Финского залива. Ладожское озеро является безальтернативным источником питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга с его почти 5-миллионным населением. Одна из основных экологических проблем Ладожского озера – эвтрофирование, причина которого заключается в обогащении вод фосфором как природного, так и антропогенного происхождения. В результате интенсивной хозяйственной деятельности и неудовлетворительного качества очистки сточных вод в середине 1980-х гг. трофический статус Ладожского озе-

ра вплотную приблизился к эвтрофному. Последующий экономический спад и соответствующее снижение нагрузки на озеро способствовали постепенному улучшению его состояния. Тем не менее угроза эвтрофирования Ладожского озера под влиянием различных природных и антропогенных факторов продолжает волновать специалистов и в настоящее время.

Целью данного исследования является прогностическая оценка возможных изменений стока с водосбора Ладожского озера и его фосфорного режима в результате предполагаемых изменений климата в XXI в.

В качестве инструмента для расчетов стока с водосбора Ладожского озера при изменяющихся климатических параметрах использовалась гидрологическая модель, разработанная в Институте озероведения и верифицированная на ряде водосборов бассейна Ладожского озера (Кондратьев, 1990; Кондратьев, Шмакова, 2005). Модель позволяет выполнять расчеты характеристик формирования снежного покрова, снеготаяния, увлажнения почв зоны аэрации, суммарного испарения, формирования водного стока (с разделением на быструю и медленную составляющие) в зависимости от осадков (R), температуры воздуха (T), характеристик подстилающей поверхности.

Баланс общего фосфора ($P_{общ}$) в Ладожском озере оценивался по результатам расчета нагрузки $P_{общ}$ на поверхностные водные ресурсы бассейна, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, фосфороудерживающей способности водных объектов водосбора и основных водоемов, внутренней нагрузки и атмосферных выпадений $P_{общ}$, а также выноса $P_{общ}$ из озера со стоком реки Невы (Kondratyev, 2005).

Основой для проведения расчетов по моделям и создания прогностической оценки возможных изменений стока с водосбора Ладожского озера и его фосфорного режима в XXI в. выбран сценарий изменений климатических параметров ECHAM4/OPYC3, рассчитанный по модели общей циркуляции атмосферы и океана для условий водосбора Ладожского озера с 1861 по 2100 г. (Арпе и др., 2000; Голицын и др., 2001). Общая тенденция изменения R и T в соответствии с указанным выше сценарием проиллюстрирована в табл. 1.

Приведенные данные свидетельствуют о возможном повышении годового слоя осадков и среднегодовой температуры на изучаемой территории соответственно на 60 мм/год и 3,3 °С во второй половине XXI в.

Выбранный сценарий достаточно адекватно описывает динамику среднегодовых значений климатических параметров R и T за период наблюдений. Однако значения среднемесячных измеренных слоев осадков на водосборе Ладожского озера существенно отличаются от результатов расчета по модели общей циркуляции атмосферы для того же периода (рис. 1). Поэтому нельзя сравнивать результаты расчетов по гидрологической модели, выполненные по данным измерений и по сценарным оценкам климатических параметров, так как в этом случае различия в исходных данных являются основной причиной различия между результатами моделирования.

Таблица 1. Осредненные значения осадков и температуры воздуха за период наблюдений и рассчитанные на перспективу

Интервал времени	1951–2000	2001–2050	2051–2100
R, мм/год	619	647	679
T, °C	5,0	6,7	8,3

Для адаптации сценария к условиям изучаемого водосбора использован метод корректировки среднемесячных значений модельных климатических параметров с учетом особенностей гидрометеорологии рассматриваемого водосбора. Метод основан на использовании соотношений, связывающих значения измеренных климатических параметров и рассчитанных по модели общей циркуляции атмосферы (Кондратьев, Бовыкин, 2003). Откорректированная прогностическая оценка возможного будущего изменения осадков представляет собой внутригодовое изменение измеренных слоев осадков, трансформированное с учетом основных смоделированных тенденций.

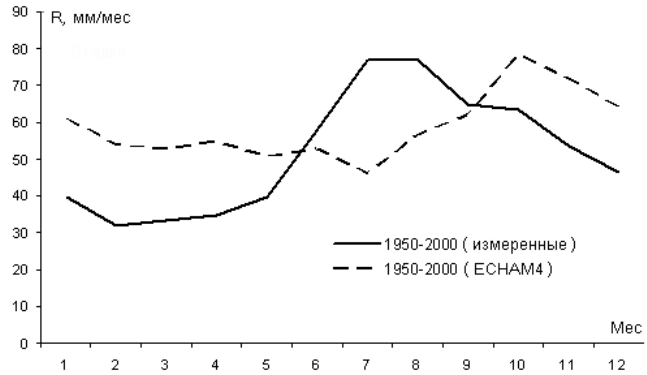


Рис. 1. Среднемесячные значения осадков для водосбора Ладожского озера по данным измерений в соответствии со сценарием ECHAM4/OPYC3, осредненные за 1950-2000 гг.

На рис. 2 и 3 приведены откорректированные прогностические оценки внутригодового распределения *R* и *T*, полученные с учетом данных измерений с наложением смоделированного тренда их изменений в XXI в. и осредненные для 1950–2000, 2001–2050 и 2051–2100 гг. Указанные данные использовались в качестве входной информации при моделировании стока с водосбора Ладожского озера, а затем и его фосфорного баланса.

Для адаптации сценария к условиям изучаемого водосбора использован метод корректировки среднемесячных значений модельных климатических параметров с учетом особенностей гидрометеорологии рассматриваемого водосбора. Метод основан на использовании соотношений, связывающих значения измеренных климатических параметров и рассчитанных по модели общей цир-

куляции атмосферы (Кондратьев, Бовыкин, 2003). Откорректированная прогностическая оценка возможного будущего изменения осадков представляет собой внутригодовое изменение измеренных слоев осадков, трансформированное с учетом основных смоделированных тенденций.

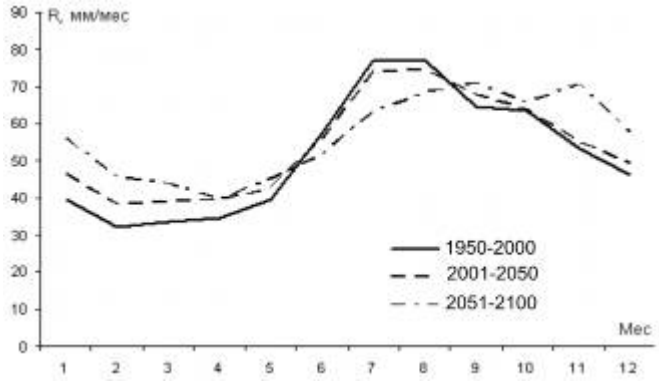


Рис. 2. Среднемесячные откорректированные значения осадков для водосбора Ладожского озера, осредненные за рассматриваемые интервалы времени

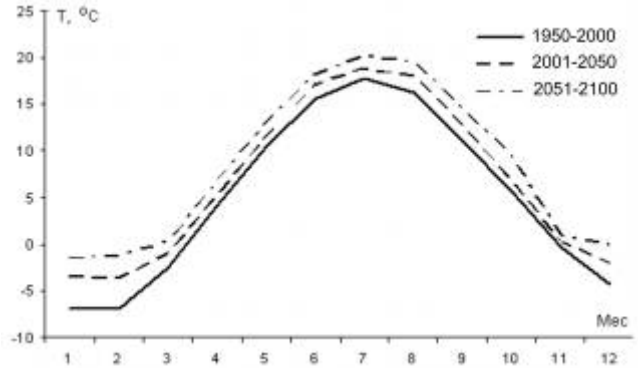


Рис. 3. Среднемесячные откорректированные значения температуры воздуха для водосбора Ладожского озера, осредненные за рассматриваемые интервалы времени

Результаты расчетов стока с водосбора и притока в Ладожское озеро с водосбора с месячным шагом по времени приведены на рис. 4. Можно предположить, что к концу XXI в. произойдет смещение максимальных расходов весеннего половодья в более ранний период за счет предполагаемого потепления, проиллюстрированного на рис. 3. Увеличение испарения в теплый период года (рис. 5) приведет к снижению меженных расходов и, возможно, к небольшому снижению суммарного годового стока на изучаемой территории.

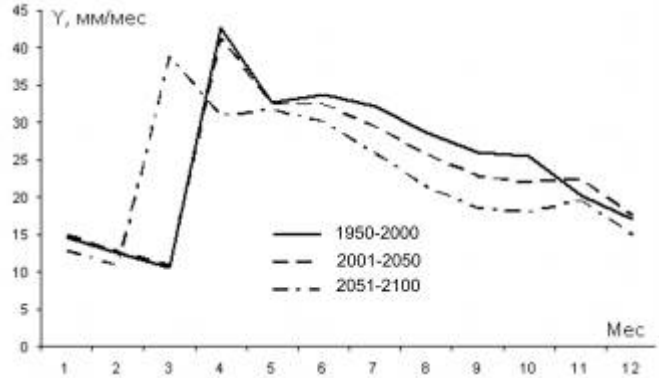


Рис. 4. Слой стока с водосбора Ладожского озера, рассчитанный по осредненным данным об осадках и температуре воздуха

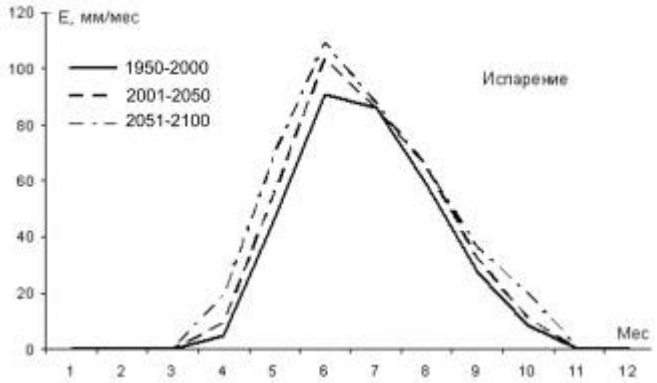


Рис. 5. Суммарное испарение с поверхности водосбора рассчитанное по осредненным данным об осадках и температуре воздуха

Возникновение положительных температур воздуха в ноябре, возможно, приведет к тому, что выпадающие осадки не будут формировать снежный покров, как это было в период тестирования модели, а пойдут на увлажнение почвы и формирование стока, что будет способствовать возрастанию осенне-зимнего увлажнения водосбора на 7–8 %. Снижение летних осадков в совокупности с возрастанием температуры воздуха приведет к снижению значений влажности почв в летний период на 10–18 % по отношению к исходному интервалу времени. Внутригодовая динамика увлажнения почв зоны аэрации, имеющей глубину L (1,5 м), приведена на рис. 6.

Внутригодовое перераспределение притока в озеро соответствующим образом скажется на динамике уровня Ладожского озера и его проточности. Изме-

нения перечисленных характеристик должны оказать влияние на фосфорный режим водоема. Однако изменения среднегодовых концентраций $P_{общ}$ в Ладожском озере не столь динамичны из-за значительной водной массы озера. Расчеты, выполненные по модели фосфорного баланса Ладожского озера при задании нагрузки $P_{общ}$ на уровне 2005 г., показали следующее. При сохранении характеристик притока в озеро на уровне измеренных данных 1950–2000 гг. установившееся значение концентрации $P_{общ}$ (т.е. значение, установившееся к 40-му расчетному году при постоянных значениях входных величин и параметров) составит 11,9 мкг/л. Изменения притока в соответствии с выполненной сценарной оценкой возможных климатических изменений приведут к некоторому увеличению установившегося значения концентрации $P_{общ}$ до 12,3 мкг/л во второй половине XXI в.

Кроме того, проведена серия расчетов установившихся значений концентрации $P_{общ}$ в Ладожском озере в зависимости от годового слоя стока с водосбора. Результаты расчетов представлены на рис. 7 в интервале значений слоя стока с водосбора от 200 до 400 мм/год. Полученная графическая зависимость может быть использована для ориентировочной оценки характеристик фосфорного режима озера и при других сценарных оценках будущего изменения слоя стока с водосбора.

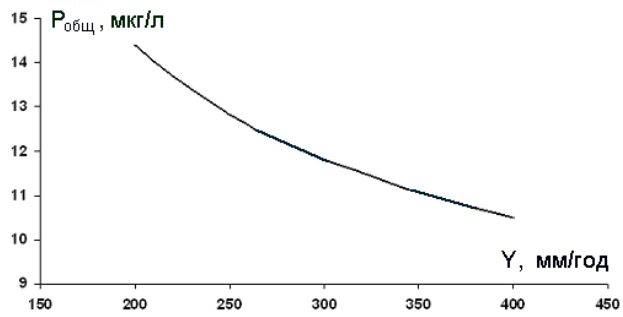


Рис. 6. Влажность почв зоны аэрации *W*, рассчитанная по осредненным данным об осадках и температуре воздуха

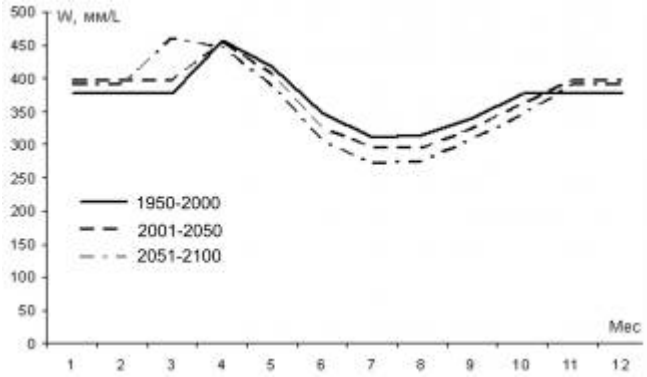


Рис. 7. Зависимость концентраций $P_{общ}$ в Ладожское озеро от слоя стока с водосбора (по результатам расчета)

Результирующая оценка возможных изменений годового слоя стока с водосбора Y, суммарного испарения E, летнего увлажнения почв зоны аэрации W_s, а также среднего содержания $P_{общ}$ в озере в результате предполагаемых изменений климата в XXI в. приведена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики стока с водосбора Ладожского озера и его фосфорного режима, рассчитанные в предположении о реализации сценария ECHAM4/OPYC3

Интервал времени	1951–2000	2001–2050	2051–2100
Y, мм/год	297	285	274
E, мм/год	322	362	405
W_s, мм/л	311	296	272
$P_{общ}$, мкг/л	11,9	12,1	12,3

Таким образом, на основе анализа полученных результатов моделирования можно заключить, что предполагаемое увеличение осадков в изучаемом регионе не приведет к увеличению стока. Причиной является увеличение суммарного испарения в результате потепления. Возможно существенное внутригодовое перераспределение стока за счет смещения весеннего половодья в более ранний период и снижение меженного стока, а также увеличение осенне-зимнего и уменьшение летнего увлажнения водосбора. Содержание $P_{общ}$ в Ладожском озере в результате предполагаемого изменения его проточности и стока с водосбора увеличится на 3–4 % по отношению к современным условиям.

Summary

ECHAM4/OPYC3 scenario is put in a basis of the estimation of changes in run-off in Lake Ladoga catchment and its phosphorus regime as a result of possible changes in the climate. For the adaptation of the scenario to conditions of the investi-

gated catchment, the method of recalculation of average monthly modelling climatic parameters is used with respect to features of meteorology of the catchment in question. According to the results of runoff calculations the maximum discharges of spring high water can be shifted to the earlier period in the end of the 21st centuries. The increase in evaporation in the warm period of year will probably result in decrease in low-water flows, summer moistening of catchement, and the annual runoff in the investigated area. The corresponding increase in total phosphorus concentration in Lake Ladoga will not exceed 4 % of the present value.

Список литературы

Kondratyev S. 2005. Land cover assessment and phosphorus balance modeling for large freshwater systems – EcoSys // Beiträge zur Ökosystemforschung. № 11. P. 6–12.

Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С., Ефимова Л. К., Мохов И. И., Семенов В. В., Хон В. Ч. 2000. Анализ изменений гидрологического режима на водосборе Ладожского озера и стока Невы в XX и XXI веках с помощью глобальной климатической модели // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5–13.

Голицын Г. С., Ефимова Л. К., Мохов И. И., Семенов В. В., Хон В. Ч. 2001. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. // Известия Рус. геогр. о-ва. Т. 134, вып. 6. С. 80–87.

Кондратьев С. А. 1990. Оценка возможных антропогенных изменений стока и выноса биогенных элементов с малых водосборов лесной зоны на основе математической модели // Водные ресурсы. Т. 17, № 3. С. 24–32.

Кондратьев С. А., Бовыкин И. А. 2003. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор – озеро // Метеорология и гидрология. № 10. С. 86–96.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. 2005. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) // Тр. XII съезда Рус. геогр. о-ва. Т. 6. С. 99–104.

Изменения климата и их математическое моделирование

В. Н. Лыкосов

Институт вычислительной математики РАН
Москва, 119333, ул. Губкина, 8
E-mail: lykossov@inm.ras.ru

Climate Change and Mathematical Modelling of Climate

V. N. Lykosov

Institute for Numerical Mathematics RAS
Gubkina Str., 8, Moscow 119333, Russia

Рассматриваются особенности климатической системы как физического объекта и обсуждаются вопросы построения математических моделей климата. Особое внимание уделено проблеме параметризации процессов взаимодействия атмосферы с деятельным слоем суши в глобальных климатических моделях для условий холодного климата и наличия большого количества внутренних водоемов на земной поверхности.

Ключевые слова: климат, изменения климата, гидрология суши, деятельный слой суши, водоемы, параметризация, математическое моделирование.

Диагностические исследования климатических характеристик показывают, что за последние 30–40 лет наблюдаются их заметные изменения, в частности, осредненной за десятилетия поверхностной температуры воздуха: произошло ее повыш ение (Climate Change, 2001). Решение задачи о том, обусловлены ли эти изменения собственными колебаниями параметров климатической системы (под которой понимается система, объединяющая атмосферу, океан, криосферу, сушу и биосферу) или это есть следствие антропогенных воздействий, связанных, например, с увеличением концентрации парниковых газов, является центральной проблемой современной теории климата.

В силу специфических особенностей климатической системы (в частности, крайне ограниченных возможностей лабораторного моделирования, коротких рядов данных наблюдений и лишь об отдельных ее компонентах, невозможности целенаправленного физического эксперимента) эта проблема не может быть решена традиционными методами, многократно опробованными в естественных науках. В настоящее время главной методологической основой решения данной задачи является математическое (численное) моделирование с помощью моделей, базирующихся на глобальных гидродинамических моделях общей циркуляции атмосферы и океана. При этом к числу фундаментальных проблем принадлежит решение задачи о том, какие характеристики и с какой точностью

должна воспроизводить климатическая модель, чтобы ее чувствительность к различным малым внешним воздействиям была близка к чувствительности реальной климатической системы (Дымников и др., 2006).

Математические модели климата

При разработке современных моделей климата принимается, что для описания динамики атмосферы и океана можно использовать уравнения Навье – Стокса для сжимаемой жидкости, осредненные (в силу, главным образом, все еще ограниченных вычислительных возможностей) по некоторым пространственным и временным масштабам. При этом считается, что существует принципиальная возможность их замыкания. Процедура замыкания предполагает, что эффекты процессов подсеточных масштабов (меньших, чем масштаб осреднения) могут быть выражены через характеристики процессов крупных масштабов. К этим процессам относятся, например, процессы на поверхности суши и в ее деятельном слое. Уравнения гидротермодинамики атмосферы и океана, тепловлагопереноса в почве и снежном покрове, замыкания процессов подсеточных масштабов и другие аспекты климатического моделирования подробно рассмотрены в работе (Дымников и др., 2005).

При моделировании глобального климата требуется воспроизвести не только средние характеристики, но и его изменчивость на различных временных масштабах. К числу приоритетных задач относится моделирование регионального климата для расчета с высокой степенью детализации его характеристик, в частности, особенностей гидрологических процессов и оценки последствий (в том числе опасных) климатических изменений для окружающей среды. Изучению этих и других важных вопросов посвящена долговременная международная программа AMIP по сравнению атмосферных моделей, в результате выполнения которой выявлены многие ключевые механизмы, ответственные за формирование климата (см. Интернет-сайт http://www-pcmdi.llnl.gov/amip).

Сравнение моделей общей циркуляции атмосферы, проведенное в рамках проекта AMIP-II, показало, что самые совершенные из них способны воспроизводить основные черты наблюдаемой атмосферной циркуляции. Ошибка воспроизведения такими моделями многих климатических величин уже сопоставима с неопределенностью, с которой эти величины известны из наблюдений. Наиболее полный анализ результатов AMIP-II можно найти в Интернете по указанному выше адресу.

Развитием этого проекта явилась программа сравнения совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP. В ходе ее выполнения основное внимание было обращено на воспроизведение поверхностной температуры и распределения морских льдов, поскольку в экспериментах AMIP эти характеристики считались заданными внешними параметрами. Климатическая модель, разработанная в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН и подробно описанная в публикации (Дымников и др., 2005), является представителем Рос-

сии в международных программах по моделированию изменений климата, наблюдавшихся в XIX–XX веках, и по прогнозу вероятных изменений климата в XXI–XXII столетиях.

По данным моделирования проведен анализ возможных будущих климатических изменений, в том числе возникновения экстремальных климатических ситуаций. Результаты численных экспериментов с климатической моделью ИВМ РАН вошли в четвертый доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (http://ipcc-wg1.ucar.edu) и доступны в Интернете по адресу http://ksv.inm.ras.ru. Показано, в частности, что наблюдаемое в настоящее время климатическое потепление носит выраженный «очаговый» характер, проявляясь наиболее ярко в отдельных географических регионах, в частности Сибири и Арктике.

Согласно результатам численного моделирования климата, эта тенденция сохранится и в будущем, что может привести к деградации вечной мерзлоты и поставить под угрозу разрушения нефтегазодобывающую и транспортную инфраструктуру Сибирского региона. Вместе с тем оценки будущих изменений климата, полученные с помощью различных климатических моделей, хотя качественно и согласуются, но в значительной степени отличаются количественно даже в рамках одного сценария будущей эмиссии парниковых газов. Такая неопределенность обусловлена особенностями описания протекающих в климатической системе процессов, в частности, степенью физической полноты их представления.

В связи с этим актуальной задачей развития математических моделей климата является все более точное описание всех физических процессов, участвующих в его формировании. Рассмотрим эту проблему в приложении к задаче параметризации взаимодействия атмосферы и суши.

Параметризация процессов взаимодействия атмосферы с деятельным слоем суши

В первых глобальных трехмерных климатических моделях процессы тепловлагообмена между атмосферой и поверхностью суши рассматривались весьма упрощенно на основе энергобалансового подхода (Будыко, 1956). Испарение выражалось в виде простой функции от потенциально доступного для растительности влагосодержания и некоторого коэффициента, отражающего термическое состояние почвы. Доступное влагосодержание задавалось явно и варьировалось в пределах от значения, характерного для точки завядания, до величины полевой влагоемкости. Любое превышение полевой влагоемкости интерпретировалось как составляющая стока. Такой подход был превалирующим на первом этапе выполнения проекта по сравнению атмосферных моделей (AMIP-I).

Дирдорф (Deardorff, 1978) предложил альтернативный подход. Им впервые учтены различия между транспирацией, испарением с кроны растительности и с оголенной почвы. Он также ввел многослойное представление почвы, позволившее рассчитывать вертикальные профили температуры и влажности.

Дальнейшее развитие этого подхода было связано с рассмотрением различных физических состояний влаги в почве и снежном покрове с учетом их фазовых переходов и расчетом составляющих гидрологического стока. В частности, было установлено (Володин, Лыкосов, 1998; Володина и др., 2000; Мачульская, Лыкосов, 2002), что:

1) пренебрежение фазовыми переходами влаги в почве приводит к чрезмерному (в сравнении с данными наблюдений) ее выхолаживанию;

2) инфильтрация осадков и талой воды в почву существенным образом определяет процесс ее промерзания;

3) пренебрежение просачиванием сквозь снежный покров талой воды и дождя и связанными с этим процессами фазового перехода приводит к слишком раннему сходу снежного покрова;

4) это сказывается на эволюции влажности почвы не только в зимне-весенний период, но и в последующие сезоны;

5) учет уплотнения снега под действием метаморфизма и силы тяжести существенно улучшает воспроизведение толщины снежного покрова и термического режима активного слоя вечной мерзлоты.

Существенное улучшение результатов воспроизведения современного климата в рамках проектов AMIP-II и CMIP в значительной степени достигнуто благодаря совершенствованию описания процессов на поверхности суши, в частности, в условиях холодного климата.

Взаимодействие атмосферы с гидрологически неоднородной подстилающей поверхностью

Прогресс в конструировании вычислительной техники и разработке систем параллельного программирования позволяет на современном этапе развития математических моделей климатической системы значительно улучшить их пространственное разрешение. Это, однако, порождает новые проблемы в детализации описания процессов подсеточных масштабов, среди которых важное место занимает взаимодействие атмосферы с различными типами подстилающей поверхности.

В моделях для каждого типа поверхности рассчитываются свои характеристики (например, потоки тепла, влаги и импульса), причем зачастую атмосферное воздействие (набор значений метеорологических величин в приземном слое, таких как температура, влажность, скорость ветра, суммарная солнечная радиация и встречное излучение атмосферы) принимается одним и тем же для всех типов. Затем используется процедура агрегирования, согласно которой средние по ячейке значения потоков вычисляются с весами, отражающими вклад того или иного сегмента поверхности в общую площадь ячейки.

Одним из ключевых вопросов здесь является описание процессов взаимодействия атмосферы с плотной сетью гидрологических объектов, важнейшую часть которой составляют небольшие озера и болота. Это особенно важно для

северных территорий Евразии (Западно-Сибирская низменность, Карелия, Финляндия) и Северной Америки (большая часть территории Канады), где, как показывают эксперименты с климатическими моделями, региональные температурные изменения в связи с глобальным потеплением проявляются наиболее ярко. Пример такой неоднородности для участка территории Западной Сибири с координатами (54,5–58,6° с. ш., 63,1–66,6° в. д.) представлен на рисунке.

Для адекватной параметризации процессов взаимодействия атмосферы и суши в этих условиях необходимо, чтобы соответствующий блок климатической модели учитывал эффекты «гидрологической неоднородности» подстилающей поверхности, особенно в связи с тем, что при улучшении горизонтального разрешения моделей некоторые из водоемов перестают быть подсеточными объектами.

В большинстве моделей прогноза погоды и в климатических моделях эффекты, связанные со сравнительно небольшими и мелкими озерами, либо совсем не учитываются, либо параметризуются грубо, например, в предположении, что водоем хорошо перемешан по глубине. Это фактически означает, что озеро рассматривается как элемент подстилающей поверхности. В реальности же озера умеренных и высоких широт бóльшую часть года вертикально стратифицированы по плотности (Mironov et al., 1991).

В работе (Степаненко и др., 2006) с помощью негидростатической трехмерной атмосферной модели продемонстрированы характеристики мезомасштабных циркуляций бризовой природы, возникающих над гидрологически неоднородной поверхностью. В этой модели использована параметризация (Степаненко, Лыкосов, 2005) термодинамических процессов в теле водоема, взаимодействующего с приземным слоем атмосферы (в том числе при наличии снежного и растительного покрова) и нижележащим грунтом (в частности, в условиях вечной мерзлоты). На основе анализа результатов численных экспериментов установлено, что процедура агрегирования потоков дает хорошее совпадение с результатами их прямого осреднения по результатам расчетов с помощью мезомасштабной модели. Таким образом, перспективным представляется использование двухкомпонентного подхода к учету эффектов внутренних вод в глобальных моделях: параметризация на основе метода агрегирования для подсеточных водных объектов и прямой расчет вертикального температурного профиля (с учетом образования снежного и ледового покрова) – для явно представленных в модели водоемов.

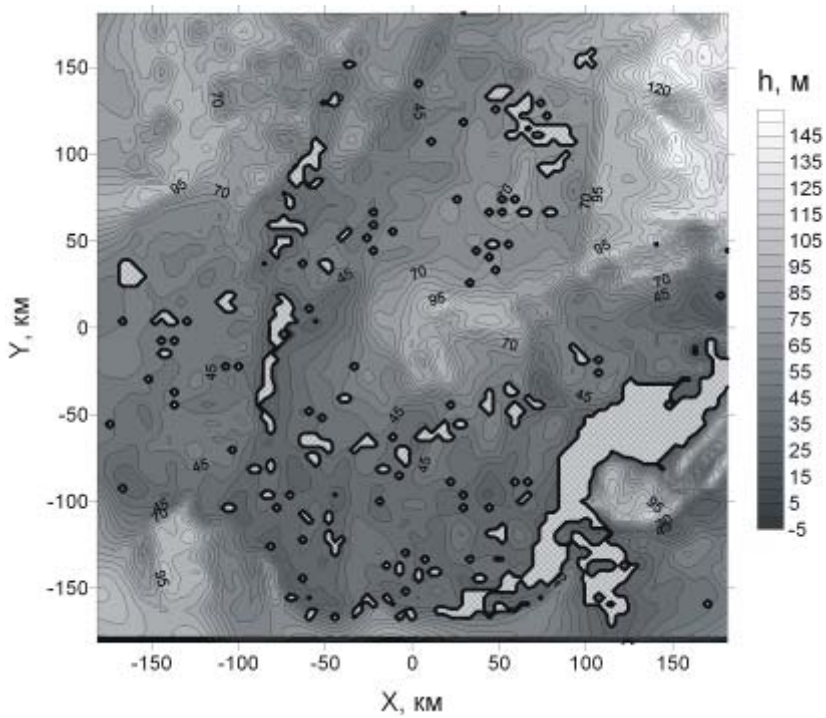


Рис. 1. Пример гидрологической неоднородности для Западной Сибири. Шкалой показаны абсолютные высоты рельефа, заштрихованные области – водоемы и переувлажненные территории

Автор благодарен В. П. Дымникову, Е. М. Володину, Е. Е. Мачульской и В. М. Степаненко за плодотворное сотрудничество, О. Ф. Васильеву – за полезные обсуждения проблемы параметризации гидрологических процессов на поверхности суши. Исследования, представленные в данной работе, выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04-05-64898, 06-05-64331, 07-05-00200).

Summary

Diagnostic studies indicate that for the last 30–40 years the climate characteristics have markedly changed, in particular, the surface temperature of the air averaged over decades has increased. The central problem of the modern theory of climate is whether these changes are caused by natural variations of climate system's parameters or result from anthropogenic impacts associated with increasing concentration of greenhouse gases, for example. At present, this problem is solved using climate models in mathematical (numerical) modelling of the climate system, which is the principal methodological solving basis. In this paper, the problems of constructing mathematical models of climate are discussed. Special attention is paid to the problem of parameterization of hydrologic processes at the underlying surface in global climate

models, in particular, for conditions of the cold climate (snow and soil ice, permafrost) and in the presence of water bodies (lakes, rivers, wetlands, etc.) at the land surface.

Current development of climate models is characterized by the permanent increase in spatial resolution. This tendency causes new problems in the parameterization of subgrid-scale processes. Among those problems one of crucial importance is the interaction between the atmosphere and the hydrologically heterogeneous land which is the territory covered by a dense network of inland waters in the significant part of the total area (for example, the territory of Western Siberia). A two-component way approach can be employed to solve this problem: an aggregation for subgrid-scale water bodies and the direct calculation of vertical temperature profile for the reservoirs clearly represented as models, taking into account the formed snow and ice cover.

Список литературы

Climate Change. 2001. The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Gridds et al. Cambridge. 881 p.

Deardorff J. W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation // J. Geophys. Res. Vol. 83. P. 1889–1903.

Mironov D. V., Golosov S. D., Zilitinkevich S. S., Kreiman K. D., Terzhevik A. Yu. 1991. Seasonal changes of temperature and mixing conditions in a lake / Ed. S. S. Zilitinkevich // Modelling Air – Lake Interaction. Physical Background. Berlin: Springer – Verlag. P. 74–90.

Будыко М. И. 1956. Тепловой баланс поверхности Земли. Л.: Гидрометеоиздат. 255 с.

Володин Е. М., Лыкосов В. Н. 1998. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 34. С. 453–465.

Володина Е. Е., Бенгтссон Л., Лыкосов В. Н. 2000. Параметризация процессов тепловлагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // Метеорология и гидрология. № 5. С. 5–14.

Дымников В. П., Лыкосов В. Н., Володин Е. М. 2006. Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 42. С. 618–636.

Дымников В. П., Лыкосов В. Н., Володин Е. М., Галин В. Я., Глазунов А. В., Грицун А. С., Дианский Н. А., Толстых М. А., Чавро А. И. 2005. Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. М.: Наука. Т. 2. С. 38–175.

Мачульская Е. Е., Лыкосов В. Н. 2002. Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 38. С. 20–33.

Степаненко В. М., Лыкосов В. Н. 2005. Численное моделирование процессов тепловлагопереноса в системе водоем – грунт // Метеорология и гидрология. № 3. С. 95–104.

Степаненко В. М., Миранда П. М., Лыкосов В. Н. 2006. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши // Вычислительные технологии. Т. 11, ч. 3. С. 118–127.

Анализ структуры временных рядов многолетних колебаний речного стока

А. А. Любушин*, М. В. Болгов**

*Институт физики земли РАН
Москва, 123995, Бол. Грузинская, 10
**Институт водных проблем РАН
Москва, 119333, ул. Губкина, 3
E-mail: bolgovmv@mail.ru

Time Series Structure Analysis for Annual Rivers Runoff Variations

A. A. Liubushin* and M. V. Bolgov**

*O. Yu. Schmidt Joint Institute of Lithosphere Physics
Russian Academy of Sciences
Bolshaya Gruzinskaya Str., 10, Moscow 123995, Russia
**Water Problems Institute Russian Academy of Sciences
Gubkina Str., 3, Moscow 119333, Russia

Наиболее интересным и важным в анализе колебаний стока является случай «глобальной» перестройки гидрометеорологических процессов в бассейне. За эпоху инструментальных наблюдений таких случаев было два: в 1930-е и 1980-е гг. Попытки оценить вероятность таких событий, основываясь на распространенных в те годы (да и сегодня тоже) марковских моделях многолетней изменчивости, приводили авторов к очень малым частотам возникновения этих событий. Так, В. Е. Привальский оценил вероятность маловодья в 1930-е гг. как возможное в среднем один раз в 2000 лет.

По-видимому, модели многолетней изменчивости стока сложнее, чем широко распространенное представление об их марковости. Собственно говоря, ни из каких физических соображений гипотеза о преобладании марковского свойства во временных гидрометеорологических рядах и не следует, не считая простейших рассуждений типа воздействия белого шума на линейный водосбор. Доводы о предпочтении марковской модели были получены многими авторами путем обобщения вида выборочных оценок автокорреляционных функций по многим рекам. Действительно, осредненные по большому числу рек выборочные оценки автоковариационной функции (АКФ) близки к экспоненте (с учетом их выборочного смещения). Но здесь надо отметить два обстоятельства. Если мы будем усреднять оценки АКФ только в пределах гидрологически однородных районов, то получим и достаточно большой доверительный интервал, и достаточно разнообразные очертания корреляционных функций. Второе обстоятельство состоит в том, что, усредняя оценки АКФ, полученные по рядам одной и той же продолжительности, но относящиеся к различным календарным периодам, мы усредним тем самым и все «немарковские» особенности процесса стока.

Это вовсе не означает необходимости отказа в гидрологии от использования теории марковских процессов. Имеется много практических задач, решаемых с приемлемой точностью в марковском приближении. Однако рассмотрение изменчивости гидрологических процессов требует более тщательного анализа так называемых долгопериодных составляющих, поскольку их наличие существенным образом влияет на прогнозные оценки. Такие долгопериодные составляющие плохо воспроизводятся при реализации марковского подхода, и поэтому необходимо обсуждать более сложные модели.

Реки, являясь «продуктом климата», отражают глобальные климатические изменения, однако механизм формирования стока достаточно сложен, и в какой мере климатическая составляющая изменчивости стока преобладает, сказать трудно. Обработка стоковых рядов не показывает наличия сильных трендов или каких-то явных изменений, которые можно было бы увязать с глобальными климатическими изменениями. Например, значительное количество работ в конце прошлого столетия было посвящено возможностям спектральных методов оценивания для выделения долгопериодных составляющих. Но ограниченность имеющихся рядов и идеология, базировавшаяся на стационарности исследуемых процессов, не позволили получить каких-либо устойчивых результатов в этой области. В то же время многомерный анализ, основанный на выделении общих когерентных составляющих во временных рядах среднемесячных стоков, показал, что имеется заметная когерентность сезонных (годовых) колебаний стока на значительных территориях, причем изменения характера (степени) этой когерентности имеют период порядка 40–50 лет. Выделить статистически достоверно такие периоды на коротких рядах среднегодовых расходов воды невозможно, поэтому сегодня можно пытаться обсуждать проблему выделения периодов, на которых исследуемый процесс ведет себя более или менее однородно.

В климатологии и гидрологии в последние десятилетия применяется подход, основанный на так называемом вейвлет-анализе данных, позволяющий выделять в рядах наблюдений временные масштабы (периоды) с различными свойствами. Исследованию изменчивости стока р. Волги методами вейвлет-анализа и посвящена данная работа.

Временные ряды, встречающиеся в гидрологии и метеорологии, обычно имеют «серое» поведение, которое трудно охарактеризовать наличием либо каких-то амплитудных или частотных аномалий («событий»), либо регулярными периодическими составляющими. Для подобных сигналов характерно увеличение спектра мощности с уменьшением частоты по степенному закону и самоподобный тип поведения при рассмотрении на различных временных масштабах. Трудность анализа таких временных рядов состоит в сложности формализации понятия временных точек смены «моды поведения» сигнала (критических точек).

Одной из проблем анализа временных рядов является выделение точек разладки, т.е. таких моментов времени, которые характеризуются сменой типа

поведения сигнала. Другая проблема – нахождение стационарных точек сигнала, соответствующих локальным минимальным или максимальным значениям. Очевидно, что тип поведения сигнала зависит от величины временного масштаба, на котором рассматривается поведение, т.е. перед анализом сигнал должен быть определенным образом сглажен (усреднен). Очевидно, что свойства сглаженного сигнала зависят от масштаба сглаживания. Например, если производится обычное сглаживание путем вычисления арифметического среднего в скользящем временном окне, то таким масштабом является радиус скользящего временного окна. Далее мы будем использовать ядерное сглаживание с гауссовским ядром усреднения. Временные точки локальных минимумов и максимумов сглаженного сигнала, а также точки локального максимума модуля производной от сглаженного сигнала задают естественную фрагментацию поведения исходного сигнала для рассматриваемого масштаба времени. Назовем вышеперечисленные точки масштабно-зависимыми экстремальными точками сигнала.

Для большей части временных рядов, встречающихся на практике, сглаженный сигнал обладает большим числом экстремальных точек для малых масштабов усреднения, но с ростом масштаба число таких точек быстро уменьшается. При плавном увеличении масштаба усреднения возможно объединение экстремальных точек различного типа в цепи отдельно для точек минимума или максимума сглаженного сигнала и для точек максимальных значений модуля первой производной, причем отдельно для отрицательных и отдельно для положительных производных. Таким образом, получается четыре типа цепей экстремальных точек на плоскости «масштаб – время». Большая часть этих цепей прерывается с ростом масштаба, но некоторые из них «выживают» и достигают значительной длины, вплоть до максимально допустимых к рассмотрению масштабов (последнее значение зависит от длины реализации сигнала).

Процедура, качественно изложенная выше, известна в непрерывном вейвлет-анализе как выделение точек скелета вейвлет-преобразований (WTMM – wavelet transform modulus maxima). Точки скелета используются в анализе образов (для выделения границ и формализации понятия фоновой структуры). В исследовании турбулентности и финансовых временных рядов производится анализ мультифрактального спектра WTMM-точек, объединенных в цепи, при стремлении масштаба к нулю (так называемый спектр сингулярности).

В то же время индивидуальные особенности поведения сигнала определяются именно длинными цепями скелета. Поэтому в настоящем исследовании сделан акцент на анализа только длинных цепей. Моменты времени, соответствующие началу длинных цепей (для минимальных значений масштабов, принятых к рассмотрению), мы будем расценивать как особые точки поведения исследуемого сигнала 1-го типа. Ко 2-му типу особых точек мы отнесем точки соединения длинных цепей локальных минимумов и максимумов усредненного сигнала. Из соображений непрерывности сглаженного сигнала вытекает, что такие длинные цепи могут либо соединиться для некоторого достаточно большого

масштаба, либо «уйти на бесконечность», что практически означает выход цепи на некоторое ограничение по величине масштаба, вытекающее из ограниченной длины реализации сигнала. Точки соединения длинных цепей локальных максимумов и локальных минимумов сглаженного сигнала назовем точками бифуркации. Из смысла этих точек следует, что в их окрестности исследуемый сигнал ведет себя примерно как константа на временном масштабе, соответствующем точке соединения цепей.

Целью данной работы является попытка количественно охарактеризовать поведение временных рядов годового стока рек в бассейне Волги и некоторых ближайших водосборов с помощью длинных цепей скелета их вейвлет-преобразований и оценить приемлемость существующих подходов.

Метод выделения особенностей временного ряда

Пусть $x(t)$ – анализируемый сигнал. Масштабно-зависимое сглаживание сигнала с помощью некоторого ядра усреднения дается формулой:

$$\overline{x}(t,a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+av)\cdot\psi_0(v)\,dv \Big/ \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0(v)\,dv, \qquad (1)$$

где $a > 0$ – масштаб; $\psi_0(t)$ – некоторая быстро затухающая функция. В дальнейшем мы будем использовать гауссовское ядро: $\psi_0(t) = \exp(-t^2)$. Определим ядро непрерывного вейвлет-преобразования:

$$\psi_n(t) = (-1)^n \cdot \frac{d^n\psi_0(t)}{dt^n} \equiv (-1)^n \cdot \psi_0^{(n)}(t). \qquad (2)$$

Используя формулу интегрирования по частям и свойство быстрого затухания функции $\psi_0(t)$, можно получить следующую формулу для производной заданного порядка n от сглаженной функции (1), деленной на $n!$ (коэффициент Тейлора):

$$c_n(t,a) \equiv \frac{1}{n!}\frac{d^n\overline{x}(t,a)}{dt^n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+av)\cdot\psi_n(v)\,dv \Big/ a^n \int_{-\infty}^{+\infty} v^n\cdot\psi_n(v)\,dv. \qquad (3)$$

Заметим, что формула (1) является частным случаем формулы (3) для $n = 0$.

Точка максимума модуля вейвлет-преобразования (WTMM-точка) (t, a) для $n \geq 1$ определяется как точка локального максимума величин $|c_n(t,a)|$ по отношению к изменениям времени t для заданного масштаба a. Что же касается $n = 0$, то для этого случая определим WTMM-точки как точки локальных экстремумов (как минимумов, так и максимумов) сглаженного сигнала $c_0(t, a)$. WTMM-точки могут быть объединены в цепи, а множество всех цепей из таких

точек образуют скелет непрерывного вейвлет-преобразования сигнала. Если $\psi_0(t)$ является гауссовским ядром усреднения, то цепи скелета вейвлет-преобразований являются непрерывными при стремлении масштаба $a \to 0$. WTMM-точки для первой производной $c_1(t, a)$ выделяют моменты времени максимальных масштабно-зависимых трендов (как положительных, так и отрицательных) сглаженного сигнала $c_0(t, a)$ для заданного значения a.

Пусть сигнал $x(t)$ задан на интервале времени $t \in [0, T]$. Если момент времени t близок к началу или концу интервала [0, T], то сглаживающее преобразование (3) испытывает отсутствие информации о поведении сигнала $x(t)$ для $t < 0$ или для $t > T$. Обычно это затруднение преодолевается путем рассмотрения сигнала на кольце, т.е. полагая значения сигнала вне интервала [0, T] по правилу: если $t < 0$, то $x(t) = x(T + t)$; если $t > T$, то $x(t) = x(t + T)$. Это продолжение сигнала на кольцо дает возможность вычислять преобразование (3) для всех моментов времени $t \in [0, T]$ и является полезным с точки зрения использования быстрого преобразования Фурье для вычислений (3). Но значения (3) искажены на концах интервала [0, T], и более корректный подход – введение некоторых масштабно-зависимых «мертвых интервалов», примыкающих к началу и к концу отрезка времени [0, T], таких что значения вейвлет-преобразований (3) исключаются из анализа для моментов времени, принадлежащих «мертвым интервалам». Для гуассовского ядра усреднения $\psi_n(t) \approx 0$ при $|t| \geq 3$. Следовательно, можно ввести следующее правило:

если $0 \leq t \leq 3a$ или $T - 3a \leq t \leq T$, то $c_n(t, a)$ исключаются из анализа. (4)

Из правила (4) следует, что максимально возможное значение масштаба $a_{\max}$, пригодное для анализа, определяется условием: $a_{\max} = T/6$, причем для этого значения преобразование (3) может быть вычислено лишь в единственной точке $t = T/2$. Правые концы «мертвых интервалов», примыкающих к точке $t = 0$, а также левые концы этих интервалов, примыкающих к $t = T$, образуют куполообразную область допустимых к рассмотрению точек (t, a) на двухмерной плоскости значений (t, lg(a)).

Для временных рядов с шагом по времени Δt минимальным масштабом, допустимым к рассмотрению, будем считать период Найквиста $a_{\min} = 2 \cdot \Delta t$. Введем критерий: цепь скелета непрерывного вейвлет-преобразования считается длинной, если значения масштаба вдоль этой цепи, начинающейся при $a = a_{\min}$, превосходят пороговое значение масштаба $a_* = \gamma \cdot a_{\max} = \gamma \cdot (T/6)$, где $a_{\min} / a_{\max} \equiv \gamma_{\min} \leq \gamma < 1$ – параметр метода. Чем ближе величина параметра γ к 1, тем меньше число «длинных» цепей. Для $\gamma = \gamma_{\min}$ все цепи формально являются «длинными».

Длинные цепи локальных экстремумов (минимумов и максимумов) значений $c_0(t, a) = \bar{x}(t, a)$ и максимумов абсолютных значений 1-й производной $c_1(t, a)$

представляют особый интерес для выделения главных характеристик поведения сигнала, поскольку они дают своеобразный «отпечаток пальца» временного ряда. Рассматривая цепи максимумов модуля первой производной $|c_1(t, a)|$, мы будем различать их по знаку, т.е. выделять отдельно цепи максимальных масштабно-зависимых негативных ($c_1(t, a) < 0$) и позитивных ($c_1(t, a) > 0$) трендов. Далее вышеизложенная техника применяется к временным рядам среднегодового стока рек.

Данные и результаты обработки

К сожалению, имеющаяся статистика по расходам воды в реках характеризуется небольшой длительностью измерений и продолжительными перерывами в наблюдениях, связанных, в основном с военными действиями, поэтому мы вынуждены были брать лишь часть имеющихся временных рядов. Далее ряды усреднялись и прореживались в 12 раз, т.е. осуществлялся переход к среднегодовым расходам. Необходимость перехода от среднемесячных к среднегодовым значениям связана с поставленной во введении целью: анализ долгопериодных закономерностей стока.

Отметим, что мы получили совокупность рядов, имеющих сравнительно малую длительность – не более 100 годовых отсчетов. Малая длительность временного ряда является существенным ограничением для выделения критических точек его поведения традиционными методами спектрального анализа, основанными на сравнении спектрального состава слева и справа от тестируемого момента времени. Использование масштабно-зависимых экстремальных точек сигнала позволяет, по нашему мнению, до некоторой степени обойти эту трудность.

Одним из анализируемых временных рядов является сток со всего бассейна р. Волги. На рис. 1 представлены графики длинных цепей локальных экстремумов усредненного сигнала (вместе с точками бифуркации) и локальных максимумов абсолютных значений его 1-й производной (с различением отрицательных и положительных трендов) для временного ряда среднегодовых значений стока Волги у Волгограда за 1879–1989 гг. Параметр γ, определяющий длинные цепи, был выбран равным 0,2. Отметим, что из непрерывности усредненного сигнала следует, что для каждого данного значения масштаба усреднения a (см. рис. 1а) точки длинных цепей локальных экстремумов сглаженного сигнала должны перемежаться друг с другом и заканчиваться либо на куполообразной линии, ограничивающей сверху максимальные значения масштабов усреднения, либо в точке бифуркации. Но для длинных цепей максимальных отрицательных и положительных трендов (см. рис. 1б) перемежаемость цепей разного типа вовсе не обязательно должна соблюдаться, поскольку эти цепи состоят из точек локальных максимумов абсолютных значений производной.

Помимо Волги аналогичные оценки длинных цепей скелетов вейвлет-преобразований были проведены еще для 10 участков Волжского бассейна. На рис. 2 приведена информация об этих временных рядах.

Диаграммы, подобные представленным на рис. 1а,б, были построены для всех временных рядов. В результате таких оценок получается совокупность временных точек 5 различных типов: начала длинных цепей локальных минимумов, максимумов, отрицательных и положительных трендов и точек бифуркации. На значения этих временных точек оказывают влияния ошибки измерений и частично шум, внесенный процедурой восполнения пропусков. Поэтому возникает идея получить более устойчивые оценки характеристических моментов времени поведения водного режима бассейна Волги путем анализа гистограмм распределения значений этих точек для всей совокупности пунктов наблюдений. На рис. 3 изображены такие гистограммы. При этом значение числа моментов времени того или иного типа, попавших во временной интервал длиной 1 год, делилось на общее число моментов времени, вследствие чего эти графики являются гистограммными оценками плотности распределения вероятности моментов времени разного типа.

Следует отметить расположение графиков гистограмм: сначала идет гистограмма моментов времен начал длинных цепей локальных минимумов, потом – максимальных положительных производных, далее – максимумов и максимальных отрицательных производных. Этот порядок выбран не случайно. Так он соответствует «естественному циклическому порядку»: после минимума – рост до максимума, а затем – спад до минимума и т.д. Визуальный анализ графиков на рис. 3 позволяет легко заметить, что примерно до 1940–1950 гг. максимумы гистограмм расположены именно в таком «естественном циклическом порядке», но затем этот порядок нарушается и в конце интервала наблюдений максимумы гистограмм возникают некоррелированно с максимумами гистограмм моментов времени других типов, т.е. наступает хаос.

В результате анализа длинных цепей масштабно-зависимых экстремальных точек рядов стока для рек бассейна Волги можно сделать следующий вывод: определены характерные периоды 4,5–7,5 лет и 12–13 лет для гидрологического режима бассейна Волги, причем выделены интервалы 1920–1940 и 1950–1970 гг. перестройки режима. В первом случае перестройка имеет характер возникновения новой цикличности 12–13 лет и миграции 7,5-годовой цикличности к 4,5-годовой. Во втором случае возникает хаотический режим, не имеющий четко выраженных периодичностей. Выделены интервалы времени 1907–1912 гг. и 1927–1932 гг. интенсивных изменений режима на временных масштабах от 3 до 18 лет.

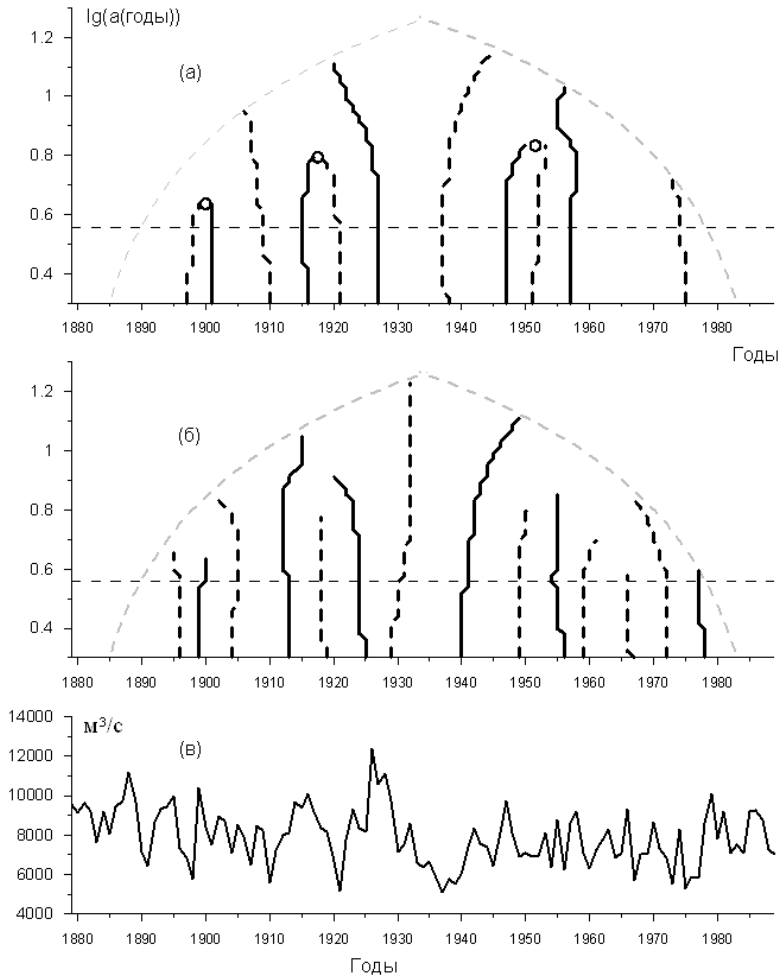


Рис. 1. Среднегодовые расходы р. Волги (в) и графики цепей локальных экстремумов усредненного сигнала (а) и его первой производной (б)

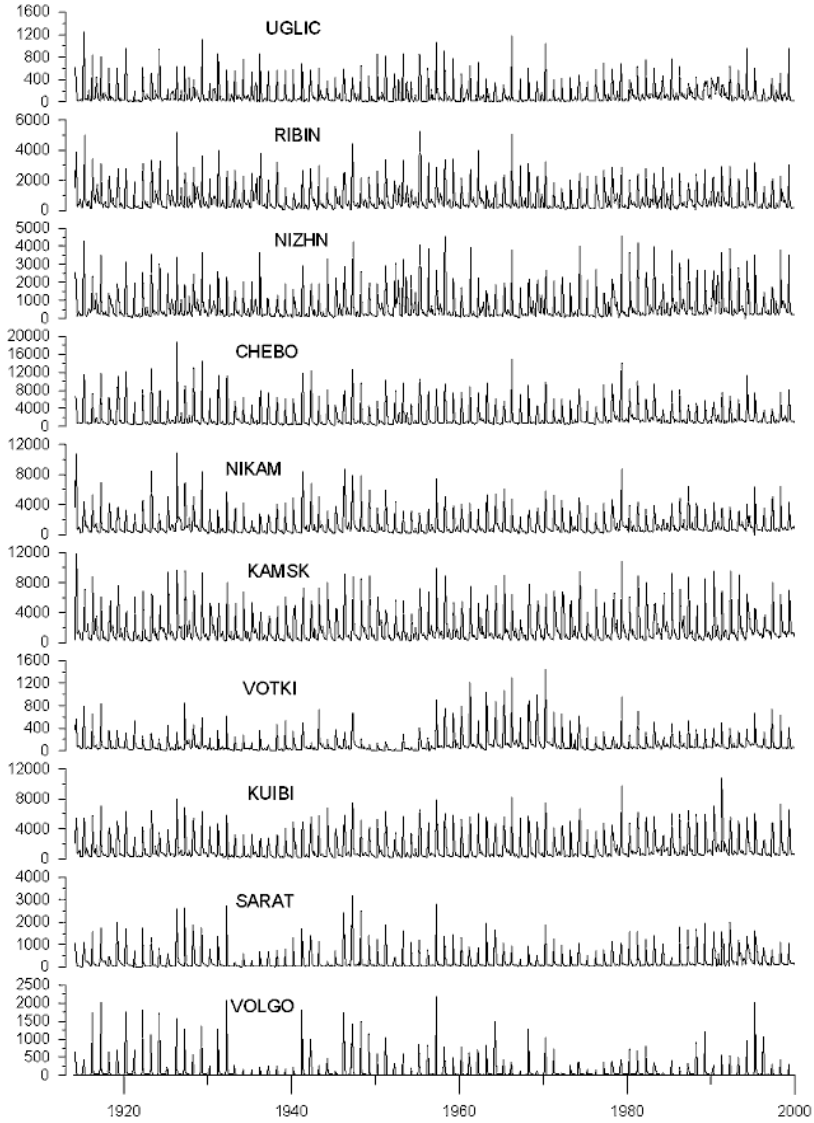


Рис. 2. Среднегодовые расходы воды боковой приточности к водохранилищам Волжско-Камского каскада

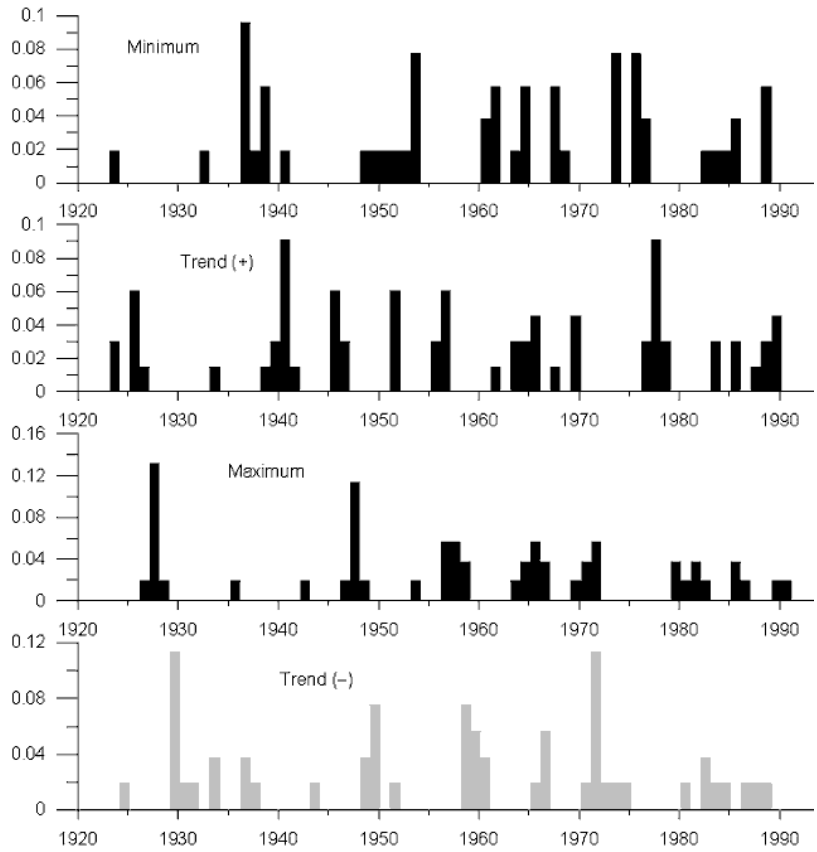


Рис. 3. Гистограммы моментов времени «отпечатков пальцев» для временных рядов ежегодных расходов воды в 10 пунктах бассейна р. Волги (нормальный цикл: Min Trend (+) Max Trend (–) Min)

Результаты исследования указывают на наличие ряда особенностей, требующих усложнения существующих в гидрологии моделей многолетней изменчивости стока, по крайней мере, применительно к решению задачи вероятностного прогнозирования уровня замкнутого водоема.

Summary

One of the problems of time series analysis is detecting of change points, i.e. those time moments which correspond to rapid changing of the signal to be analyzed. Another problem is seeking for the stationary time points, i.e. time moments, corresponding to local extremes (minimums or maximums). It is obvious that the type of the behavior of the signal depends on the time scale at which the signal is analyzed. The last means that the signal must be averaged within certain moving time window before

analyzing. Thus, the properties of the averaged signal depend on the radius of the averaging moving time window or when using other methods of smoothing – on the efficient radius of "influence" of smoothing kernel function. This radius of smoothing is nothing else as the time scale of the signal analysis. The time points of local minimums, maximums and minimum and maximum values of the 1st derivative of the smoothed signal provide natural fragmenting of the signal's behavior at the given time scale. Let us call these time points as the scale-dependent extreme points of the signal.

For the most of natural time series when the scale value is small the averaged signal possesses a lot of extreme points but with scale increasing this number decreases. When the scale value is increasing gradually we can perform the chaining of the extreme points of the smoothed signal of the same type i.e. separately points of local minimums, local maximums, points of maximums of the 1st derivative (maximum positive trends) and points of minimums the derivative (maximum negative trends). Thus, we have four types of chains of extreme points on the plane of time-scale values. The most of these chains abort with scale increasing rather rapidly but some of them have a very large length and propagate from minimum scale values up to maximum possible scale values which are admitted for the analysis taking into account the finite volume of the time series sample.

The procedure described above is known in the wavelet analysis as wavelet transform modulus maximums (WTMM) analysis and the set of chains of WTMM-points is called the WTMM-skeleton. Skeleton of WTMM-points are used for image analysis (detecting of boundaries and textures of the patterns). In the turbulence and financial researches multi-fractal spectrums of WTMM-points at the limit of scale values tending to zero (spectrum of singularity) are used.

At the same time an individual pattern of the signal is formed by longest chains of WTMM-skeleton, i.e. for scale values which are comparable with the length of time interval where the signal is defined. That is why let us leave for the analysis the longest chains of scale-dependent extreme points only. These longest chains form a characteristic pattern of the time series behavior which could be regarded as its "fingerprint". The long WTMM-chains present the evolution of scale-dependent extreme points in time and in scale simultaneously. The time moments corresponding to the beginnings of long chains (for the smallest scale value) indicate the most significant extreme points among all others within the smallest scale level. Another interesting class of points is formed by the final points of the long chains of the local extremes which became close to each other on some rather big scale level. Let us call these points as bifurcation points. At the vicinity of bifurcation time point the smoothed signal behaves approximately as a constant. From continuity of the smoothed curves it follows that long chains of local extreme points of these curves could either connect with opposite type of extremes (minimum with maximums) in the bifurcation points or "come to infinity", i.e. go to some upper limit of possible scale values.

The purpose of this paper is an effort to characterize quantitatively the general behavior of the group of annual rivers runoff time series using their long WTMM-chains.

The problem of extracting time intervals with trend or stationary behavior of hydrological regime of 16 annual river's runoff time series of Volga, Don and Dnepr basins is investigated using analysis of long continuous wavelet transform modulus maximum chains. Characteristic periods 4.5-7.5 and 12-13 years are detected and time intervals of transient hydrological regime behavior are extracted. Cyclic behavior with periods 12-13 years started and migration of 7.5-years periodicity to the 4.5-years took place at 1920-1940 whereas a chaotic regime without explicit periodicity has been occurred at 1950-1970.

Time intervals 1903-1912 and 1923-1937 are characterized by the most intensive regime changes at time scales 3-18 years.

Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима на основе глобальных климатических моделей

И. И. Мохов

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН
Москва, 119017, Пыжевский пер., 3
E-mail: mokhov@ifaran.ru

Estimates of Possible Regional Hydrological Regime Changes in the 21st Century Based on Global Climate Models

I. I. Mokhov

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS
Pyzhevsky per., 3, Moscow 119017, Russia

Оцениваются региональные изменения гидрологического цикла, в частности осадки и речной сток, по расчетам с климатическими моделями в сравнении с данными наблюдений. Используются как климатические модели общей циркуляции, так и глобальная климатическая модель промежуточной сложности при разных антропогенных сценариях для XXI в. Особое внимание уделяется оценкам возможных изменений для бассейнов Волги, Оби, Енисея, Лены. Анализируются разные характеристики осадков, включая их средние и экстремальные значения, интенсивность и вероятность. Обсуждаются особенности моделирования изменений речного стока в регионах с вечной мерзлотой. Климатические аномалии типа засух и пожаров также анализируются с использованием региональных модельных расчетов.

Ключевые слова: изменения климата, осадки, речной сток.

Глобальные и региональные изменения температурного режима в последние десятилетия сопровождаются значительными вариациями характеристик гидрологического цикла, например в регионах Евразии. Отмечена тенденция усиления экстремальных осадков в различных регионах, в частности, над сушей средних и высоких широт в Северном полушарии. Для оценок возможных изменений в будущем, связанных с естественными и антропогенными причинами, используются глобальные модели климата, в том числе наиболее детальные климатические модели общей циркуляции (КМОЦ) атмосферы и океана с описанием динамики морского льда и процессов в деятельном слое суши с учетом биосферных эффектов. Согласно модельным расчетам при глобальном потеплении в XXI в. следует ожидать значительных изменений гидрологического режи-

ма и, в частности, дальнейшего усиления тенденции экстремальности осадков и проявления ее над многими регионами (IPCC-2001a,b; IPCC-2007a,b). Широко используются климатические модели промежуточной сложности (Claussen et al., 2002; Petoukhov et al., 2005). Для более детального анализа наряду с глобальными климатическими моделями используются региональные модели.

Модельные и диагностические исследования региональных гидрологических режимов и их изменений проведены, например, для бассейнов Волги и Каспийского моря (Арпе и др., 1999; Голицын и др., 2000а; Мелешко и др., 1998; Arpe et al., 2000), Невы и Ладожского озера (Арпе и др., 2000; Голицын и др., 2000б, 2001а,б, 2002, 2004), для водосборов крупнейших сибирских рек (Мохов, Хон, 2000, 2002а,б; Мохов, 2002).

Разносторонний анализ возможных изменений глобального климата и для российских регионов при разных сценариях антропогенных воздействий в XXI в. проведен в работе (Мелешко и др., 2004) с использованием численных расчетов для ансамбля климатических моделей. В частности, на основе КМОЦ получены региональные оценки при двух антропогенных сценариях SRES-A2 и SRES-B2. В том числе проведен анализ важных характеристик климата для водосборов крупных речных бассейнов в европейской и азиатской частях России: бассейнов Волги и Урала, Оби, Енисея, Лены, Печоры, Северной Двины, Дона, Кубани и др.

Среднегодовое количество осадков для Земли в целом по модельным оценкам (Мелешко и др., 2004) увеличивается к середине и к концу XXI в. соответственно примерно на 2 и 3 %, а общее увеличение количества осадков на территории России значительно превышает средние глобальные изменения. Согласно модельным расчетам на многих российских водосборах в высоких и средних широтах количество осадков возрастает не только зимой, но и летом. Однако в теплое время года увеличение количества осадков заметно меньше и проявляется в основном в северных регионах.

В южных регионах европейской части России летом по модельным расчетам следует ожидать уменьшения количества осадков (Мохов и др., 2003; Мелешко и др., 2004). Зимой на европейской части России и в ее южных регионах увеличивается доля жидких осадков, а в Восточной Сибири и на Чукотке возрастает количество твердых. Результатом этого является уменьшение массы накопленного за зиму снега на западе и юге России и, соответственно, дополнительное накопление снега в Центральной и Восточной Сибири.

С увеличением количества осадков при потеплении связано заметное увеличение стока на большинстве водосборов российских рек (Мелешко и др., 2004) (см. также (Мохов и др., 2003; Мохов, Елисеев, Демченко и др., 2005; Khon et al., 2007; Mokhov et al., 2007)), за исключением водосборов южных рек (Дона, в частности), для которых годовой сток в XXI в. в целом убывает. Наиболее значимое увеличение стока в XXI в. по модельным оценкам отмечено для северных

рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, в том числе для Лены, Енисея, Печоры и Северной Двины.

Изменения максимального (весеннего) стока рек зависят от изменений скорости таяния снега и накопленной за зиму массы снега. Модельные оценки свидетельствуют об уменьшении весеннего максимума стока и его более раннем наступлении в XXI в. на водосборах Дона, Волги, Урала, что связано с уменьшением накопленной массы снега. На водосборах северных рек, в том числе Печоры, Северной Двины, Оби, несмотря на некоторое уменьшение массы снега к началу весны, сток заметно возрастает к середине XXI в. из-за более быстрого таяния снега. При этом к концу XXI в. сток на этих водосборах уменьшается, что связано с убыванием накопленной массы снега. В то же время в Центральной и Восточной Сибири на водосборах Енисея и Лены при потеплении климата масса снега зимой увеличивается с существенным ростом стока при весеннем снеготаянии. Значимый рост весеннего стока за счет растаявшего снега по модельным расчетам уже для первой половины XXI в. на водосборах Енисея и Лены свидетельствует об увеличении вероятности крупных весенних паводков на этих водосборах (Мелешко и др., 2004).

Значительные изменения согласно полученным оценкам следует ожидать для стока Лены. Для Енисея и Оби модельные расчеты также однозначно указывают на общий рост стока в XXI в., хотя уровень значимости этого роста в разных моделях сильно различается. Для Волги получены изменения разного знака, хотя доминируют положительные тренды, что отразилось и в среднем по ансамблю моделей росте стока (сравнительно слабом).

Данные наблюдений свидетельствуют не только о продолжении общего потепления, но и об его ускорении в последние годы (Мохов, 2006; IPCC-2007a). Современные модели способны адекватно описывать не только основные глобальные и региональные особенности земной климатической системы, но и их изменения. Согласно (IPCC-2001a,b; IPCC-2007a,b) при глобальном потеплении в XXI в. следует ожидать существенных изменений экстремальных режимов осадков, приводящих к наводнениям или засушливым и пожароопасным режимам. В работах (Мохов, Рекнер, Семенов, Хон, 2005, 2006; Khon et al., 2007) сделаны оценки возможных изменений различных характеристик осадков, в том числе их количества, интенсивности, вероятности дней с осадками и их экстремальных режимов для разных регионов Северной Евразии в XXI в. При анализе использовались расчеты с КМОЦ ECHAM5/MPI-OM и глобальной климатической модели Института физики атмосферы РАН (КМ ИФА РАН) (Мохов и др., 2002; Мохов, Елисеев, Демченко и др., 2005) при сценариях SRES-A2 и SRES-B1 антропогенных эмиссий парниковых газов в атмосферу. Для более детального анализа были выбраны бассейны крупнейших сибирских рек, Волги, а также регион Кавказа. Для бассейнов Волги, Оби, Енисея и Лены общее количество зимних осадков, их интенсивность и вероятность, а также экстремальные осадки по расчетам с ECHAM5/MPI-OM в XXI в. при сценариях SRES-B1 и SRES-A2 уве-

личиваются. Летом тренды для интенсивности и экстремальных осадков в XXI в. также положительные, хотя и в целом менее значимые, чем зимой. Принципиально отличаются от зимних летние тренды для вероятности осадков – они отрицательные для всех четырех речных бассейнов. При этом тенденции изменения общего количества летних осадков незначимые и могут изменяться в зависимости от антропогенного сценария, как, например, для бассейна Волги. Существенные особенности отмечены для Кавказского региона.

Оценки возможных изменений в настоящее время чаще, в том числе и в работах (IPCC-2001a,b; IPCC-2007a,b), делаются без учета в климатических моделях взаимодействия с углеродным циклом. В работе (Мохов, Дюфрен, Ле Трет и др., 2005) получены оценки возможных изменений в XXI в. экстремальных климатических режимов и биосферных эффектов в регионах Северной Евразии, в частности для российских регионов, по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом при антропогенных воздействиях (см. также (Мохов и др., 2006а,б; Елисеев и др., 2007)). При этом учитывалось влияние не только антропогенных воздействий на климатический режим, включая биосферу, но и биосферных изменений на климатические характеристики. Акцент сделан на анализе влияния засух на изменения биопродуктивности наземных экосистем в средних широтах. Для анализа использовались результаты расчетов с КМОЦ с углеродным циклом ISPL-CM2. В численных расчетах задавалась антропогенная эмиссия углекислого газа в атмосферу по данным наблюдений для 1860–1990 гг. и в соответствии со сценарием SRES-A2 для 1991–2100 гг. В результате включения в глобальную климатическую модель взаимодействия с углеродным циклом ее чувствительность к увеличению содержания углекислого газа в атмосфере увеличивается. Это свидетельствует о соответствующей положительной обратной связи. Близкие результаты получены в численных расчетах с глобальной климатической моделью ИФА РАН с блоком углеродного цикла (Мохов и др., 2006а,б; Елисеев и др., 2007).

В соответствии с модельными расчетами следует ожидать увеличения в XXI в. по сравнению с XX в. вероятности распространения весенне-летних засух в среднеширотных регионах Евразии (Мохов, Дюфрен, Ле Трет и др., 2005). При этом анализ связи характеристик углеродного обмена и биопродуктивности наземных экосистем с режимами засух выявил заметное уменьшение первичной биопродуктивности, в частности в европейской части России, с увеличением индекса засушливости в XX в., тогда как для XXI в. их значимой связи не отмечено. Общий рост по расчетам для XXI в. значений первичной биопродуктивности и чистой биопродуктивности экосистем в анализировавшихся регионах связан с интенсификацией фотосинтеза при росте содержания CO_2 в атмосфере, даже несмотря на неблагоприятные изменения регионального климата, в частности увеличение вероятности засух. При этом согласно модельным результатам тип региональных засух при глобальном потеплении меняется. Отмечено усиление

связи биопродуктивности в климатической модели с влагосодержанием почвы, сопровождающееся ослаблением связи биопродуктивности с осадками.

Следует отметить существенные проблемы моделирования изменений гидрологического режима, в частности речного стока, в условиях вечной мерзлоты. В работе (Аржанов и др., 2007) проведены численные расчеты изменений стока крупнейших сибирских рек при изменениях климата с учетом влияния деградации вечной мерзлоты на влагоемкость почвы и запас талой влаги в системе для второй половины XX в. Отмечено, что для адекватного стока Оби необходимо учитывать обширные заболоченные территории в Западной Сибири.

Более адекватному описанию процессов формирования региональных аномалий гидрологического режима и катастрофических явлений должно способствовать развитие наряду с глобальными моделями общей циркуляции более детальных региональных моделей климата с анализом функций распределения климатических характеристик на основе ансамблей численных реализаций. В работах (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006; Mokhov et al., 2007) для российских регионов при изменениях климата на основе расчетов с региональной моделью климата сделаны оценки риска засух и лесных пожаров, зависящие от аномалий осадков и температуры. Для анализа использовались результаты расчетов с применением региональной модели ГГО с горизонтальным разрешением 50 км при антропогенных сценариях SRES-B2 и SRES-A2 для XXI в. Для оценки пожароопасности использовался индекс Нестерова и его модификации. Принято разбивать значения потенциала пожароопасности на пять диапазонов: не пожароопасный режим (I), а также режимы с малым (II), умеренным (III), высоким (IV) и экстремально высоким (V) уровнем пожароопасности.

В работе (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006) представлено распределение значений среднего летнего индекса пожароопасности для 1991–2000 гг. Более южные широты в целом характеризуются экстремальными значениями индекса пожароопасности. Южная граница областей с наличием лесов в средних широтах Европейской территории России находится в режиме (III) с умеренными значениями потенциала пожароопасности (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006). В средних и высоких широтах Европейской территории России, а также в западной части азиатской территории России леса существуют главным образом в условиях слабой пожароопасности (режим (II)). Только для относительно небольшой территории с лесами климатические условия соответствуют нижнему диапазону режима (III).

Анализ возможных изменений пожароопасности в XXI в. относительно XX в. по расчетам с использованием региональной модели при антропогенном сценарии SRES-B2 выявил значительную пространственную неоднородность. В работе (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006) приведены изменения нормированного среднего летнего индекса пожароопасности относительно конца XX в. (1991–2000 гг.): к середине XXI в. (2041–2050 гг.) и к концу XXI в. (2091–2100 гг.). Согласно этим оценкам для изменений к середине XXI в. (относительно

последнего десятилетия XX в.) летней пожароопасности наряду с увеличением риска пожаров в южных широтах, в частности, в бассейне Волги вблизи Каспия и прикавказских регионах, а также на северо-западе России, можно ожидать уменьшения пожароопасности на значительной части Европейской территории России. Последнее можно объяснить увеличением в модели количества осадков в средних и высоких широтах при относительно небольшом летнем потеплении в случае антропогенного сценария SRES-B2. На юге России по модельным оценкам ожидается уменьшение летних осадков, что в сочетании с ростом температуры способствует увеличению вероятности засух и пожаров.

Изменения летней пожароопасности к концу XXI в. существенно отличаются от соответствующих изменений к середине XXI в. (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006). В большей степени проявляются межширотные различия. При этом относительно конца XX в. заметно увеличивается риск пожаров в южных и средних широтах. В более высоких широтах регионы с ростом пожароопасности чередуются с регионами с уменьшением риска пожаров. Заметно увеличивается индекс пожароопасности в бассейне Волги. В то же время значения индекса пожароопасности на северо-западе России к концу XXI в. в целом уменьшаются по сравнению с серединой XXI в.

Аналогичный анализ был проведен для Европейской территории России также при более «агрессивном» антропогенном сценарии SRES-A2 и для азиатской территории России (Мохов, Чернокульский, Школьник, 2006; Mokhov et al., 2007). Согласно расчетам высокий уровень пожароопасности для современного климатического режима характерен для регионов к востоку от Байкала. Модельные оценки свидетельствуют о дальнейшем росте риска пожаров в этих регионах в XXI в.

Полученные результаты доказывают, что возможные в XXI в. гидрологические изменения существенно различаются в разных регионах, что связано с большой широтно-долготной протяженностью России. В том числе качественно различаются тенденции изменения осадков и речного стока в северных, особенно северо-восточных, и в южных, в частности юго-западных, регионах России. При этом гидрологические изменения нелинейные и существенно зависят от сезонов, скорости и общего уровня глобального и регионального потепления.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, программ РАН и Минобрнауки (контракт 02.515.11.5031), Научной программы НАТО (Collaborative Linkage Grant 982423).

Summary

Regional changes in the hydrologic cycle, particularly precipitation and river runoff, are determined using climate models as compared with the observation data. Both general circulation climate models and a global climate model of intermediate complexity are used under different anthropogenic scenarios for the 21st century. Spe-

cial attention is given to the estimates of possible changes in the Volga, Ob, Yenisei and Lena rivers basins. Different characteristics of precipitation, including their average and extreme values, intensity, and probability are analyzed. Peculiarities of modelling of river runoff change in permafrost regions are discussed. Climatic anomalies such as droughts and fires are also analyzed using regional model calculations.

Список литературы

Arpe K., Bengtsson L., Golitsyn G. S. et al. 2000. Connection between Caspian Sea level variability and ENSO // Geophys. Res. Lett. Vol. 27, № 17. P. 2693–2699.

Claussen M., Mysak L. A., Weaver A. J. et al. 2002. Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models // Clim. Dyn. Vol. 18. P. 579–586.

IPCC-2001a: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergov. Panel on Climate Change / J. T. Houghton et al. (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 881 p.

IPCC-2001b: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergov. Panel on Climate Change / J. J. McCarthy et al. (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1032 p.

IPCC-2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the Intergov. Panel on Climate Change / S. Solomon et al. (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 996 p.

IPCC-2007b: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of WG II to the Fourth Assessment Report of the Intergov. Panel on Climate Change / M. L. Parry et al. (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1000 p.

Khon V. Ch., Mokhov I. I., Roeckner E., Semenov V. A. 2007. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model // Global and Planetary Change. Vol. 57. P. 118–123.

Mokhov I. I., Chernokulsky A. V., Shkolnik I. M., Tikhonov V. A. 2007. Extreme dry and fire conditions for mid-latitudinal regions of Northern Eurasia: Analysis of observations, reanalyses and model simulations // Proc. Intern. Symp. on Atmos. Phys. and Chem. Qufu, China. P. 95–97.

Petoukhov V., Claussen M., Berger A. et al. 2005. EMIC Intercomparison Project (EMIP-CO_2): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO_2 doubling // Clim. Dyn. Vol. 25, № 4. P. 363–385.

Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф. и др. 2007. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана (в печати).

Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С. и др. 1999. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Докл. РАН. Т. 366, № 2. С. 248–252.

Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г. С. и др. 2000. Анализ изменений гидрологического режима на водосборе Ладожского озера и стока Невы в XX и XXI веках с помощью глобальной климатической модели // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5–13.

Голицын Г. С. , Мохов И. И., Хон В. Ч. 2000а. Диагностика и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря в XX и XXI веках / Российская академия наук; Национальная академия наук США // Экологические проблемы Каспия. М.; Киров. С. 28–37.

Голицын Г. С. и др. 2000б. Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 36, № 4. С. 435–445.

Голицын Г. С. и др. 2001а. Анализ многолетних данных для компонентов водного баланса Ладожского озера // Изв. Рус. геогр. о-ва. Т. 133, вып. 6. С. 61–67.

Голицын Г. С. и др. 2001б. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. // Изв. Рус. геогр. о-ва. Т. 134, вып. 6. С. 80–87.

Голицын Г. С. и др. 2002. Гидрологические режимы Ладожского и Онежского озер и их изменения // Водные ресурсы. Т. 29. С. 168–173.

Голицын Г. С. и др. 2004. Долгопериодные изменения температурного режима и осадков в Санкт-Петербурге по эмпирическим данным и модельные оценки региональных изменений в прошлом и будущем // Метеорология и гидрология. № 8. С. 5–17.

Елисеев А. В., Мохов И. И., Карпенко А. А. 2007. Вариации климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. С. 3–17.

Мелешко В. П., Голицын Г. С., Володин Е. М. и др. 1998. Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 34, № 4. С. 591–599.

Мелешко В. П., Голицын Г. С., Говоркова В. А. и др. 2004. Возможные антропогенные изменения климата России в 21-м веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. № 4. С. 38–49.

Мохов И. И., Хон В. Ч. 2000. Диагностика и моделирование изменений гидрологического режима в бассейнах сибирских рек в XX и XXI веке // Экология пойм сибирских рек. Томск: SST. С. 8–16.

Мохов И. И., Хон В. Ч. 2002а. Модельные сценарии изменений стока сибирских рек в XXI веке // Докл. АН. Т. 383, № 5. С. 684–687.

Мохов И. И., Хон В. Ч. 2002б. Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные оценки изменений в XXI веке // Метеорология и гидрология. № 8. С. 77–93.

Мохов И. И. 2002. Сток сибирских рек в XXI веке // Земля и Вселенная. № 6. С. 3–10.

Мохов И. И., Демченко П. Ф., Елисеев А. В. и др. 2002. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 38, № 5. С. 629–642.

Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч. 2003. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 39, № 2. С. 150–165.

Мохов И. И., Рекнер Э., Семенов В. А., Хон В. Ч. 2005. Экстремальные режимы осадков в регионах северной Евразии в XX веке и их возможные изменения в XXI веке // Докл. РАН. Т. 402, № 6. С. 818–821.

Мохов И. И., Елисеев А. В., Демченко П. Ф. и др. 2005. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Докл. РАН. Т. 402, № 2. С. 591–595.

Мохов И. И., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э. и др. 2005. Изменения режимов засух и биопродуктивности наземных экосистем в регионах Северной Евразии по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом // Докл. РАН. Т. 405, № 6. С. 810–814.

Мохов И. И. 2006. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке в сопоставлении с климатическими изменениями в прошлом и настоящем // Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий: проблема Киотского протокола: Материалы Совета-семинара при Президенте РАН. М.: Наука. С. 75–93.

Мохов И. И., Елисеев А. В., Карпенко А. А. 2006а. Чувствиительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // Докл. РАН. Т. 407, № 3. С. 400–404.

Мохов И. И., Елисеев А. В., Карпенко А. А. 2006б. Взаимодействие климата и углеродного цикла в XX–XXI веках по расчетам с глобальной климатической моделью // Вычислительные технологии. Т. 11, ч. 2. С. 156–165.

Мохов И. И., Рекнер Э., Семенов В. А., Хон В. Ч. 2006. Возможные региональные изменения режимов осадков в Северной Евразии в XXI веке // Водные ресурсы. Т. 33, № 6. С. 754–762.

Мохов И. И., Чернокульский А. В., Школьник И. М. 2006. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. РАН. Т. 411, № 6. С. 808–811.

Выявление главных факторов и исследование изменчивости климатической системы в глобальном и региональном масштабах

В. В. Пененко, Е. А. Цветова

Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 6
E-mail: penenko@sscc.ru

Revealing Principle Factors and a Study of Climatic System Variability in Regional and Global Scales

V.V. Penenko and E.A. Tsvetova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics
SB RAS
Pr. Lavrentyeva, 6, Novosibirsk 630090, Russia

Представлены результаты исследования многолетних рядов данных, описывающих поведение климатической системы Земли и ее частей. Анализируется пространственно-временная динамика полей различных характеристик циркуляционной системы атмосферы: температуры, геопотенциала, компонент скорости ветра, составляющих гидрологического цикла и др. как для каждого элемента по отдельности, так и для их комбинаций. Для этих целей разработана эффективная методика обобщенного количественного представления поведения нелинейной динамической системы в фазовых пространствах. Теоретическую основу методики составляют принципы ортогональной декомпозиции многомерных многокомпонентных полей в базах данных. Последние могут быть получены любым способом: в результате математического моделирования, обработки результатов мониторинга, усвоения данных и т.д. Аппарат выделения ортогональных подпространств является удобным инструментом для анализа поведения климатической системы. В частности, с его помощью можно выделить центры действия, типичные и экстремальные ситуации. Из подпространств можно составить базис для построения детерминированно-стохастических сценариев эволюции поведения атмосферы как несущей среды при решении задач природоохранного прогнозирования, проектирования, оценки экологических рисков/уязвимости регионов, и в том числе для оценки возможных изменений гидрологического режима в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий.

Ключевые слова: климатическая система, модели и базы данных, ортогональные подпространства, принципиальные компоненты и главные факторы, детерминированно-стохастические сценарии динамики атмосферы.

Основная концепция

В связи с изменяющимися климатическими условиями в настоящее время происходит постепенное смещение исследований в сторону поиска параметров, имеющих ключевое значение для функционирования климатической системы и ее частей, и изучения чувствительности конкретных показателей состояния системы, в том числе и качества природной среды, к изменениям этих параметров. В соответствии с целями таких исследований развиваются и формулировки математических моделей. Кроме постановок прямых начально-краевых задач, в которых выполняется расчет функций состояния в возрастающем времени, ставятся также различные обратные задачи, позволяющие найти неизвестные параметры или уточнить их априорные оценки, исследовать чувствительность моделей и функционалов к вариациям входных данных и источников возмущений, поправить начальное приближение с тем, чтобы получить лучшие результаты при диагностике и прогнозировании и т.д. Для этих целей предлагаются специальные методики, одна из которых разрабатывается в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Марчук, 1982; Пененко, 1975, 1981, 2003). Она основана на применении вариационных принципов и теории чувствительности. Необходимыми элементами для реализации методики прямого и обратного моделирования являются целевые функционалы и данные наблюдений, которые используются как для улучшения результатов с помощью усвоения данных, так и для оценки качества моделей и прогнозов. Типы данных, которые все в большем количестве становятся доступными для использования, весьма разнообразны – это и спутниковые данные, и данные наземного зондирования со стационарных и передвижных систем мониторинга. Результаты наблюдений аккумулируются в базах данных, объем которых непрерывно растет. Поэтому при работе с данными закономерно поставить в качестве цели извлечение наиболее содержательной части информации, которая бы в достаточной степени характеризовала наблюдаемую изменчивость природных процессов.

С нашей точки зрения, эту цель можно достичь с помощью алгоритмов ортогональной декомпозиции, позволяющей выделить из набора данных совокупность ортогональных подпространств, ранжированных по масштабам возмущений. Идея ортогональных разложений не нова. Эта идеология возникла во второй половине XIX в. и в различных модификациях появлялась в приложениях механики, физики, экономики и т.д. (см., например, список литературы и обзоры в монографиях (Harman, 1976; Preisendorfer, 1988)). Известно множество примеров использования этого подхода в климатологии, метеорологии, океанологии (Мещерская и др., 1970; Preisendorfer, 1988).

Вариант алгоритма ортогональных разложений, предложенный нами, отличается от традиционных подходов тем, что при работе с базой данных учитываются взаимосвязи между различными компонентами этой базы с точки зрения математической модели, которая используется для интерпретации поведения динамической системы. Здесь предполагается, что и функциональные поля из

базы данных, и математическая модель представляют описание поведения одной и той же динамической системы.

Структурирование баз данных

Мы вводим специальную структуризацию базы данных в соответствии с определением скалярных произведений, порождаемых энергетическими характеристиками математической модели и соотношениями теории чувствительности для функционалов, выражающих обобщенные моделируемые характеристики процессов.

Набор векторов обозначим следующим образом:

$$\left\{\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x},\mathrm{t},\mathbf{Y})\in \mathrm{Q}(\mathrm{D_t});(\mathbf{x},\mathrm{t})\in \mathrm{D_t};\mathbf{Y}(\mathbf{x},\mathrm{t})\in \mathrm{R}(\mathrm{D_t})\right\}, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{\varphi}$ – исследуемые функции, $\mathbf{Y}$ – параметры моделей. Для организации алгоритмов базу данных упорядочим в виде матрицы блочной структуры. Алгоритмы имеют универсальный характер, а индивидуальность каждой задачи определяется структурой матрицы данных и формой скалярных произведений. Для обеспечения эффективности работы этих алгоритмов целесообразно блочную структуру матрицы формировать в зависимости от конкретных целей исследования. Для описания блоков введем две группы независимых переменных – индексов. Первая группа описывает внешнюю структуру данных – число блоков и их порядок в общей иерархии. Вторая группа описывает нумерацию и расположение компонент внутри блока. Таким образом, векторы можно представить в блочном виде:

$$\varphi=\left\{\varphi_i(k)\right\},\ \varphi_i(k)\in R_N,\ i=\overline{1,n},\ n\geq 1,\ k\in K \qquad (2)$$

(n – число блоков во внешней структуре, K – множество значений мультииндексов k компонент внутренней структуры каждого блока). Общее количество элементов во внутренней структуре обозначим через N. Здесь и в дальнейшем все операции будем проводить в вещественных векторных пространствах R_N, R_n и $R_n \times R_N$ с соответствующими скалярными произведениями.

Например, если в качестве базовой модели использовать модель гидродинамики атмосферы в квазистатическом приближении совместно с моделями переноса различных субстанций (Пененко, 1981; Пененко, Цветова, 1999), то энергетическое скалярное произведение для функций состояния можно выбрать в виде

$$\left(\varphi,\varphi^*\right)_{Q(D_t)}=\int_{D_t}\left\{uu^*+vv^*+\sigma_0\left[TT^*+\left(\gamma(p)/\tilde{R}^2\right)HH^*\right]\right\}dDdt+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\int_{D_t}\beta_i\varphi_i\varphi_i^*\,dDdt, \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{\varphi} = (u, v, T, H, \varphi_i,\ i = \overline{1, nf})$ – вектор-функция переменных состояния, u, v – горизонтальные составляющие вектора скорости, T – температура, H – геопотенциал, φ_i – функции, описывающие компоненты гидрологического цикла и концентрации примесей в газовом и аэрозольном состояниях, nf – общее число субстанций, $\widetilde{R}$ – универсальная газовая постоянная, σ_0, $\gamma(p)$, β_i – весовые множители, выбранные таким образом, чтобы при $\boldsymbol{\varphi}^* = \boldsymbol{\varphi}$ операции сложения составляющих с разнородными компонентами функции состояния имели смысл.

Введем трансформацию переменных состояния типа $\mathbf{Z}_i = C^{1/2}\boldsymbol{\varphi}_i$, где матрица C выбирается таким образом, чтобы компоненты новых векторов имели одинаковые «физические» размерности и сохранялись энергетические свойства и размерности скалярного произведения типа (3) и нормы. Окончательно представим базу данных для решения задачи в виде $(n \times N)$-матрицы $Z = [\mathbf{Z}_i],\ i = \overline{1,n}$, где n – число векторов-столбцов, причем каждый столбец содержит всю внутреннюю структуру с общим числом компонент N. Величины n, N и структура множества мультииндексов K являются входными параметрами для структурирования базы данных Z и формирования скалярного произведения.

Матрицу данных Z можно рассматривать как совокупность n векторов-столбцов размерности N из R_N и как совокупность N векторов-строк размерности n из R_n, поэтому можно использовать соответственно две матрицы Грама: $(n \times n)$-матрицу $\Gamma = Z^{\mathrm{T}}Z$ и $(N \times N)$-матрицу $M = ZZ^{\mathrm{T}}$ (верхний индекс T означает операцию транспонирования). Учитывая, что $r \equiv \operatorname{rank}(\Gamma) = \operatorname{rank}(M) \le \min(n, N)$, для эффективности алгоритмов всегда будем структурировать исходную базу данных таким образом, чтобы выполнялось неравенство $n \le N$, и организовывать основную схему вычислений с $(n \times n)$-матрицей Γ. В этом случае значение параметра n может лимитироваться только возможностями процедур решения полной спектральной проблемы для симметричной неотрицательно определенной $(n \times n)$-матрицы Γ. Размерность N векторов внутренней структуры может быть сколь угодно большой.

Результатом декомпозиции являются две совокупности ортогональных подпространств: принципиальные компоненты для представления векторов базы данных Z в R_n и ортогональные базисные векторы $\boldsymbol{\Psi}_p$, которые можно интерпретировать как естественные или эмпирические функции для представления векторов базы данных Z в R_N. Модификации алгоритмов построения совокупностей ортогональных подпространств для различных приложений приведены в работах (Пененко, 1981; Penenko, Tsvetova, 2006, 2007).

Построение ортогональных подпространств на примере базы данных реанализа

Для применения климатической информации в целях экологического прогнозирования подходит любая база данных, имеющая в своем составе характеристики за длительный период. Мы используем базу данных реанализа (Kalnay et al., 1996), представляющую собой хорошо структурированную информационную систему универсального назначения, содержащую основной набор характеристик атмосферы глобальной климатической системы. В численных экспериментах использованы данные за 56 лет: с 1950-го по 2005-й г. Выбранный временной интервал превышает принятый в климатологических оценках период осреднения.

Исследуем многолетний ход глобальной климатической системы с выделением годичных и сезонных проявлений и детальным представлением различных элементов циркуляционных систем в пространственно-временной области декомпозированно по масштабам возмущений на уровне ортогональных подпространств.

С учетом содержания целевых функционалов скалярных произведений типа (3) для расчета матриц Грама подбирается «физический» состав компонент. Для характеристики каждого элемента базы данных (1), (2) имеем семь параметров: номер года, номер месяца, номер поля данных по физическому содержанию и четыре параметра пространственно-временного представления данных в четырехмерной глобальной области D_t на сфере или на ее части. Первые два параметра определяют внешнюю структуру базы данных и соответственно векторов-строк в представлении ее в виде матрицы Z, а остальные пять – внутреннюю структуру. В качестве ведущей переменной внешней структуры задачи зададим номер года. В терминах (2) это индекс-параметр $i = \overline{1,n}$. Номер месяца зададим как входной параметр алгоритма.

Общая структура рабочей базы данных (той, с которой проводятся численные эксперименты) и искомых базисных подпространств организуется с учетом многолетнего годового, сезонного и суточного хода процессов. Для учета сезонного хода исходная база разбивается на 12 частей (по числу календарных месяцев). Годовой и суточный ходы описываются двумя временными шкалами: внешней – в глобальном времени, общей продолжительностью $n = 56$ лет с дискретностью 1 год и внутренней – продолжительностью 1 месяц с дискретностью, задаваемой параметрически в зависимости от возможностей базы данных. В данной работе принята 12-часовая дискретность. Таким образом, получается 12 наборов факторных пространств (по числу месяцев в году); для каждого месячного набора строится базисный комплект, состоящий из 56 ортогональных элементов-подпространств (по числу лет).

Рассмотрим пример анализа поведения климатической системы за 56 лет (1950–2005 гг.). На рисунке представлен один из 62-х фрагментов по времени первого (лидирующего) январского базисного вектора, отвечающего полям гео-

потенциала на уровне, соответствующем давлению 500 гПа. По оси ординат Южному полюсу соответствует 0°, а Северному – 180°. По оси абсцисс отсчитывается долгота от Гринвичского меридиана. Информативность этого базисного вектора составляет 26,34 % в долях следа матрицы Грама для всей совокупности данных. Климатически значимыми, т.е. отвечающими собственным значениям больше 1, являются 12 векторов из 56. На рисунке хорошо видны типичные циркуляционные структуры, характеризующие центры действия глобальной климатической системы. В течение месяца лидирующее подпространство имеет квазистационарный характер, т.е. основные циркуляционные структуры достаточно устойчиво локализуются в пространстве.

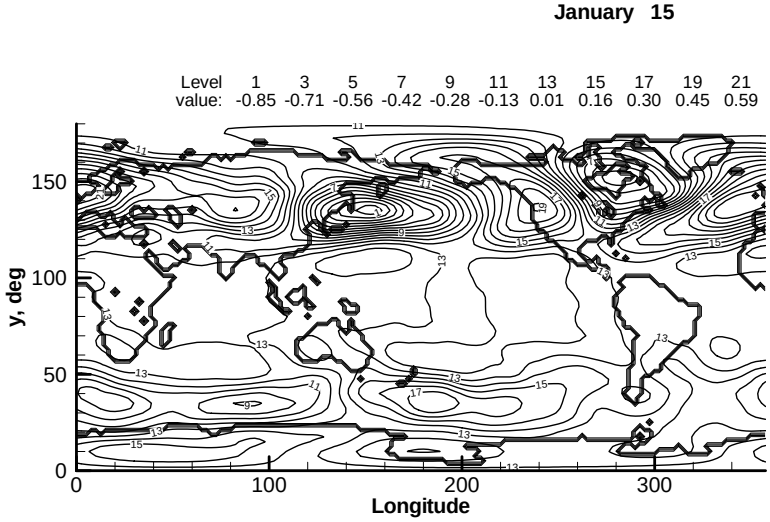


Рис. 1. Фрагмент лидирующего ортогонального подпространства для совокупности январских полей геопотенциала за 1950–2005 гг. (уровень 500 гПа, 15 января)

С помощью ортогональных подпространств эффективно решаются следующие задачи: малокомпонентное представление исходной совокупности векторов с заданной степенью информативности; выделение центров действия климатической системы, идентификация их пространственного расположения и изучение их изменчивости; типизация многолетней динамики исследуемой системы в соответствии с интенсивностью факторных нагрузок относительно подмножества лидирующих базисных векторов; формирование информативных базовых подпространств для организации детерминированно-стохастических сценариев на базе моделей гидродинамики и переноса примесей.

Заметки о возможных экологических последствиях гидрологических изменений в Сибири

В качестве заключительных замечаний приведем некоторые выводы, полученные в результате исследований, выполненных по программе изучения климато-экологических условий Сибири. В частности, в междисциплинарном проекте СО РАН, посвященном изучению Большого Васюганского болота, мы пришли к заключению о возможности возникновения в приземном слое атмосферы экологически неблагоприятных ситуаций в результате увеличения эмиссии метана (Пененко, Цветова, 2002). Увеличение эмиссии метана является реакцией болотных систем на повышение температуры. Известно, что повышение температуры на один градус приводит к увеличению эмиссии на 10 % (Bazhin, 1993). В результате действия механизмов трансформации в цепочке превращений появляются продукты неполного окисления метана, такие как угарный газ, формальдегид, метанол, метиперекись, муравьиная кислота и др. (Пененко, Алоян, 1985). В присутствии окислов азота образуются метилнитрат, метилпероксинитрат и другие азотсодержащие производные метана. Практически все эти вещества являются токсичными. Появление в воздухе промышленных районов таких веществ, не характерных для чистой атмосферы, может способствовать возникновению смога и создавать ситуации с повышенной экологической опасностью в регионе.

Таким образом, используя результаты ортогональной декомпозиции, можно целенаправленно формировать сценарии по заданным критериям для решения диагностических и прогностических задач и осуществлять качественный и количественный анализ поведения сложных динамических систем.

Представленный цикл исследований выполняется по Программе фундаментальных исследований СО РАН и поддержан Программами фундаментальных исследований № 16 Президиума РАН и № 3 Отделения математических наук РАН, проектом РФФИ 07-05-00673 и контрактом Европейской Комиссии № 013427.

Summary

The results of investigations into long-term series of data describing the behavior of the global climate system and its parts are presented. Space-time dynamics for fields of different characteristics of atmospheric circulation is analyzed, including temperature, geopotential, wind velocity components, hydrology cycle elements, for each element separately and for element combinations. For these purposes, an effective procedure is developed for generalized quantification of the behavior of nonlinear dynamic system in phase spaces. The theory of the procedure is based on principles of orthogonal decomposition of multi-component multi-dimensional fields in data bases that can be obtained by all means: in mathematical modelling, during the analysis of monitoring results and data assimilation, etc.

In the report the Reanalysis data base of NCEP/NCAR for 1950–2005 is taken as an example. Decomposition is carried out in such a way that the sets of orthogonal subspaces are formed by given informativity criterion. The subspaces are ranged with respect to the scales of perturbations from global one to "weather noises". The quantitative characteristics of informativeness of subspaces and scales of processes are eigenvalues of Gram matrix. The matrix is constructed on the vectors of input data base under given structure of the inner product in the space of the analyzed set of state functions. The elements of orthogonal decomposition like principle factors and main components corresponding their eigenvalues, are considered as measures of temporal and spatial variability.

The procedure of producing the orthogonal subspaces is convenient for the analysis of the climate system behavior. In particular, activity centers, typical and extreme situations can be found by this procedure. Subspaces can form the basis for the construction of deterministic-stochastic evolution scenarios of behavior of the atmosphere as a carrying medium in solving problems of environmental prognosis, design, estimation of ecological risk/vulnerability of regions, including estimation of possible changes in hydrology regime under conditions of changing climate and man-made influence.

In conclusion we report on possible consequences of temperature and hydrology changes under specific Siberian conditions. The fact is that the wetlands cover the vast territory of Siberian region. Increasing methane emission due to temperature changes may put not only as "greenhouse" gas in climate change but also in deterioration of the atmosphere in ecological sense even within short time periods.

Список литературы

Bazhin N. M. 1993. Methane source and sinks in the atmosphere // Chemistry Sustainable Development. Vol. 1. P. 381.

Harman H. H. 1976. Modern Factor Analysis. Chicago: Univ. of Chicago Press. 406 p.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. Vol. 77. P. 437–471.

Penenko V. V., Tsvetova E. A. 2006. Methods of sensitivity theory and orthogonal decomposition for studying climate dynamics and pollution // Proc. SPIE. Vol. 6522, 652223. P. 1–8.

Penenko V. V., Tsvetova E. A. 2007. Mathematical models of environmental forecasting // J. of Appl. Mech. and Tech. Physics. Vol. 48, № 3. P. 428–436.

Preisendorfer R. W. 1988. Principal component analysis in meteorology and oceanography. Amsterdam; N.Y.; Tokyo: Elsevier. 425 p.

Марчук Г. И. 1982. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука. 319 с.

Мещерская А. В., Руховец Л. В., Юдин М. И., Яковлева Н. И. 1970. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат. 199 с.

Пененко В. В. 1975. Вычислительные аспекты моделирования динамики атмосферных процессов и оценки влияния различных факторов на динамику атмосферы // Некоторые проблемы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука. С. 61–77.

Пененко В. В. 1981. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат. 352 с.

Пененко В. В., Алоян А. Е. 1985. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука. 158 с.

Пененко В. В., Цветова Е. А. 1999. Математические модели для исследования взаимодействий в системе озеро Байкал – атмосфера региона // ПМТФ. Т. 40, № 2. С. 137–147.

Пененко В. В., Цветова Е. А. 2002. Математическое моделирование Большого Васюганского болота как источника и рецептора возмущений в климатической системе / Ред. М. В. Кабанов // Большое Васюганское болото. Томск: Изд. ИОА СО РАН. С. 88–97.

Пененко В. В. 2003. Методы обратного моделирования и оценки экологических рисков от антропогенных воздействий // Обозрение прикладной и пром. математики. Т. 10, вып. 1. С. 26–38.

О связи цикличности климата и водных режимов болот и морей

Ю. И. Прейс, А. И. Кусков

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
Томск, 634055, Академический пр., 10/3
E-mail: preisyui@rambler.ru, arcus1309@rambler.ru

About Connection of Cyclicity of Water Objects and the Climate

Yu. I. Preis and A. I. Kuskov

Institute of Monitoring of Climatic
and Ecological Systems Siberian Branch SB RAS
Akademichesky Pr., 10/3, Tomsk 634055, Russia

Приведены результаты определения количественных характеристик природных циклов и их связи с помощью методов наименьших квадратов и главных компонент на примере водных палеорежимов водораздельного болота и климата голоцена юго-востока Западной Сибири и палеоуровней Каспийского моря. На типовом спектре восьми исследуемых параметров выявлены циклы с максимумами около 3150, 2250, 1700, 1350, 1000, 870 и 770 лет. Установленные существенные корреляционные зависимости спектров всех параметров с типовым спектром (0,76–0,96) свидетельствуют о синхронности изменений водных режимов двух природных объектов гумидной зоны Евразии в голоцене, несмотря на их удаленность, и об определяющем влиянии на них климата.

Ключевые слова: циклы, водный палеорежим, Каспий, болото, климат голоцена, Западная Сибирь, Восточная Европа.

Введение

Цикличность является неотъемлемым свойством всех природных процессов. Качественные прогнозы изменения водных режимов болот и внутриматериковых морей и озер возможны лишь с учетом ритмики климатических изменений, а также региональных и зональных особенностей отклика на них. Однако вопросы о синхронности климатических изменений в различных регионах Голарктики и о влиянии их на водные режимы внутриматериковых ландшафтов до настоящего времени остаются открытыми. Недостаточно разработаны и методы определения количественных характеристик циклов и установления связи между циклами различных процессов.

Цель работы – выявить связь между голоценовыми циклами водного режима болот и климата южной тайги Западной Сибири и внутренних морей на примере Каспия.

Объекты исследования

Для выполнения работы были привлечены послойные интегрированные характеристики водного палеорежима олиготрофной топи Иксинского болота возрастом 7370 лет (южная тайга Западной Сибири), реконструированные по данным детальных комплексных исследований (ИМКЭС СО РАН), а именно: индекс влажности, рассчитанный по ботаническому составу торфа (Елина, Юрковская, 1992), удельная масса и скорость аккумуляции органического вещества торфа; а также уровни Каспия в голоцене (Лаврушин и др., 2001) и характеристики палеоклимата голоцена юго-востока Западной Сибири (отклонения от современных) (Бляхарчук, 1989), включающие температуры января и июля, среднегодовые температуры и суммы годовых осадков (рис. 1).

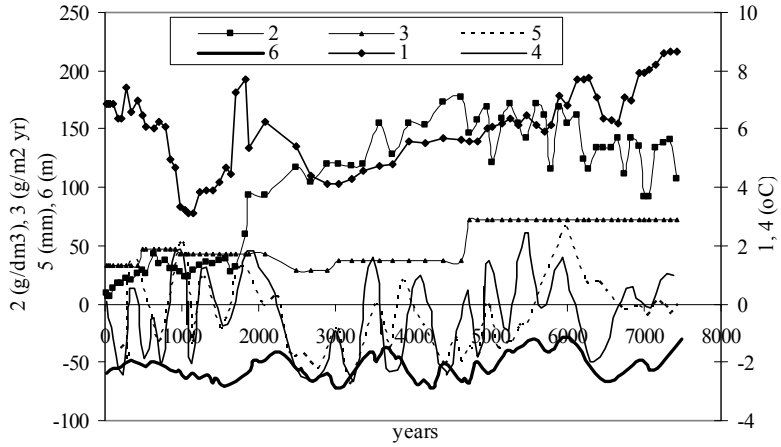


Рис. 1. Изменение интегрированных показателей водного палеорежима Иксинского болота, климата юго-востока Западной Сибири и уровня Каспийского моря в голоцене: 1 – индекс влажности; 2 – удельная масса торфа (г/дм^3); 3 – скорость аккумуляции органического вещества торфа (г/м^2 год); 4 – отклонения среднегодовой температуры от современной (°С); 5 – отклонения суммы годовых осадков от современной (мм); 6 – уровни Каспия (м)

Методы исследования

Для выявления количественных характеристик циклов используются методы, основанные на преобразовании Фурье. Одно из достоинств этих методов – некоррелируемость полученных гармоник между собой, недостатки – зависимость периода гармоники от длины временного ряда, высокая вероятность потери некоторых циклов, особенно внутри низкочастотного диапазона.

Для выявления природных циклов нами предлагается использовать подход, основанный на методе наименьших квадратов. Сущность метода – в аппроксимации временного ряда гармоническими функциями с заданным периодом.

$$F_{\omega}(t) = a\sin[\omega(t-1)] + b\cos[\omega(t-1)], \quad (1)$$

где $F_{\omega}(t)$ – аппроксимирующая гармоническая функция; a, b – составляющие амплитуды гармонического колебания с круговой частотой ω; t – время.

Круговая частота соотносится с периодом гармонического колебания (T) как $T = 1/\omega$. Для определения амплитуды гармонического колебания используется выражение $A = \sqrt{a^2 + b^2}$.

$$a = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i \sin\left[\frac{\pi}{6}(i-1)\right]; \quad b = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i \cos\left[\frac{\pi}{6}(i-1)\right], \quad (2)$$

Для выявления зависимости амплитуды от продолжительности периода колебаний $T = T_{\min},...,T_{\max}$ строится временной ряд $A(T)$. $T_{\min}, T_{\max}$ – нижняя и верхняя границы продолжительности периода, которые задаются произвольно, в зависимости от задачи. В данной работе период задавался в интервале от 40 до 7370 лет с шагом 10 лет.

Для каждого из выбранных параметров был построен спектр, отражающий зависимость амплитуды колебаний гармоники с заданным периодом от продолжительности периода. На рис. 2 для примера приведен один из спектров.

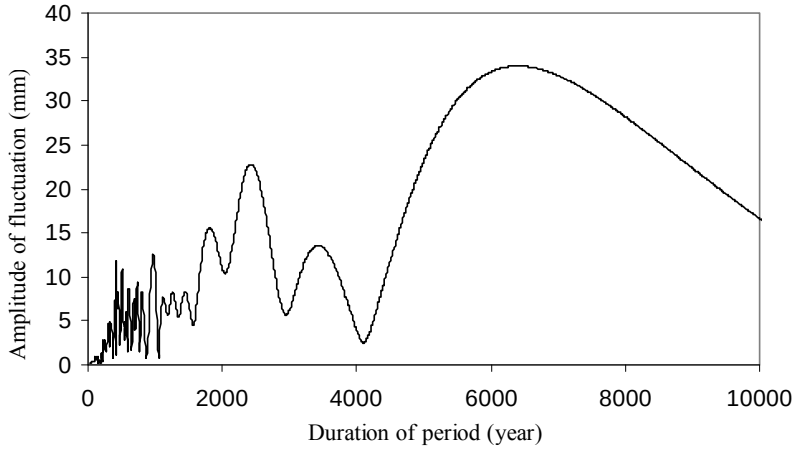


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебания отклонений годовой суммы палеоосадков от современной от продолжительности периода

Из рис. 2 следует наличие трех спектральных диапазонов: низко-, средне- и высокочастотного. Низкочастотная составляющая колебаний начинается с периода в 4150 лет и достигает максимума в 6500 лет при амплитуде колебаний 34 мм. В среднечастотном диапазоне выделяются два цикла с диапазонами

3000–4150 и 1580–3000 лет с максимумами в 3500 и 2500 лет и амплитудами колебаний 13 и 22 мм. Амплитуды гармоник высокочастотной составляющей в 2 и более раз меньше среднечастотной.

Для выявления пространственно-временной общности спектров выбранных параметров нами использовался метод главных компонент, который предполагает получение линейных комбинаций значений составляющих

$$Y_1 = \sum_{j=1}^{n} a_{1,j} T_j, \quad Y_k = \sum_{j=1}^{n} a_{k,j} T_j , \tag{3}$$

где $Y_1,\ldots,Y_p$ – главные компоненты; $a_{1,j},\ldots,a_{k,j}$ – собственные векторы; j – номер параметра; k – номер главной компоненты. В выражении (3) опущен индекс, обозначающий номер реализации.

Обратный переход от главных компонент к исходным временным рядам осуществляется так:

$$T_1 = \overline{T}_1 + \sum_{k=1}^{p} a_{1,k} Y_k, \quad T_j = \overline{T}_j + \sum_{k=1}^{p} a_{j,k} Y_k , \tag{4}$$

где p – число главных компонент; k – номер главной компоненты.

Связь между временными рядами и главными компонентами определялась расчетом коэффициента корреляции по формуле:

$$corr(T_j, Y_k) = \left[a_{k,j} \sqrt{V(Y_k)} \right] / \sigma_j^2 , \tag{5}$$

где $V(Y_k)$ – собственное число k-й главной компоненты; σ_j^2 – дисперсия составляющей временного ряда параметра на j-м объекте.

Сопряженность исследуемых параметров

Используя компонентный анализ, была выявлена связь между спектрами выбранных параметров и получены две компоненты типового спектра, имеющие общие черты всех восьми параметров (рис. 3), а также коэффициенты пропорциональности (собственные векторы α_1, α_2) и количественная характеристика связи между типовым спектром и фактическими спектрами выбранных параметров (коэффициенты корреляции R_1, R_2) (см. таблицу).

Из рис. 3 видно, что как нижние границы низкочастотной составляющей двух компонент типовых спектров (1-я компонента – 3650 лет, 2-я – 3600 лет), так и верхние границы их высокочастотной составляющей (1-я компонента – 1500 лет, 2-я – 1570 лет) практически совпадают. Практически совпадают и границы среднечастотной области.

В среднечастотном диапазоне можно выделить три цикла: 1 – 1500–1900 лет (с максимумом около 1700 лет), 2 – 1900–2600 (2250), 3 – 2600–3650 (3150). Высокочастотная часть спектра начинается с периода в 1500 лет и состоит из множества мелких циклов. Среди них выделяются циклы с максимумами и про-

должительностью соответственно: 1350 и 420; 1000 и 140; 870 и 120; 770 лет и 130 лет.

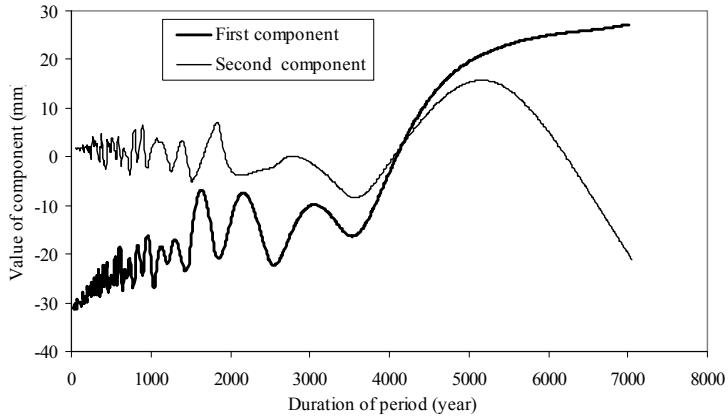


Рис. 3. Первая и вторая компоненты типового спектра для диапазона 40–7370 лет

На рис. 4 приведена высокочастотная часть спектра для более точной и подробной детализации.

Из таблицы видно, что первая компонента описывает 81 %, а вторая – 14,6 % суммарной дисперсии, т.е. вместе объясняют 95,6 % изменчивости, что позволяет с высокой точностью восстановить фактические спектры выбранных параметров. Учитывая ведущую роль первой компоненты (коэффициент корреляции первой компоненты спектра и фактических спектров колеблется в интервале 0,76–0,96), второй компонентой можно пренебречь.

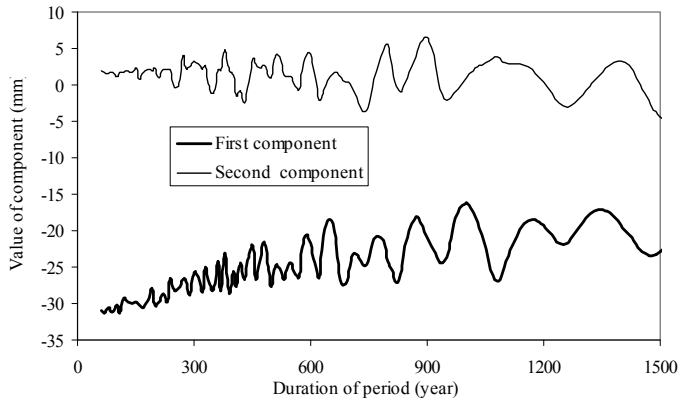


Рис. 4. Первая и вторая компоненты типового спектра для диапазона 40–1500 лет

Табл. 1. Характеристики связности типового спектра с фактическими спектрами выбранных параметров

Параметр	Первая компонента		Вторая компонента	
	α_1	R_1	α_2	R_2
Индекс влажности	0,421	0,93	0,362	0,34
Удельная масса торфа	0,473	0,81	–0,78	–0,57
Скорость аккумуляции органического вещества торфа	0,455	0,96	0,304	0,27
Уровень Каспия	0,06	0,76	0,086	0,46
Температура в январе, отклонение от современной	0,018	0,91	–0,002	–0,05
Температура в июле, отклонение от современной	0,016	0,94	–0,004	–0,11
Среднегодовая температура, отклонение от современной	0,017	0,92	–0,003	–0,06
Сумма годовых осадков, отклонение от современной	0,458	0,91	–0,17	–0,14
Собственное значение (%)	81,0		14,6	

Наименее тесная связь выявлена между первой компонентой типового спектра и спектрами временных рядов палеоуровней Каспийского моря ($R_1 = 0{,}76$) и удельной массы органического вещества торфа Иксинского болота ($R_1 = 0{,}81$). Это объясняется тем, что эти спектры содержат свойства как первой, так и второй компонент. Однако и она достаточно тесная, чтобы утверждать об их высоком сходстве. В то же время для этих двух параметров выявление границ циклов внутри средне- и высокочастотного диапазона является проблематичным в связи с ошибками, возникающими при ретроспективном восстановлении временных рядов.

Установлена тесная связь между первой компонентой типового спектра и спектрами временных рядов палеоклиматических параметров голоцена юго-востока Западной Сибири ($R_1 = 0{,}91$–$0{,}94$), индекса влажности ($R_1 = 0{,}93$) и скорости аккумуляции органического вещества торфа Иксинского болота ($R_1 = 0{,}96$). Выявление роли температуры и осадков в изменении характеристик водного палеорежима болота показало существование совместного цикла с максимумом 1700 лет.

Основные выводы

Изменения параметров системы «водные режимы болот и внутриматериковых морей – климат» происходят практически синхронно. Изменение климатических параметров оказывает сильное влияние на изменение характеристик водных объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы № 16 Президиума РАН (проект 5).

Summary

The purpose of the work is to reveal connection between changes in the water regime of bogs and internal seas and lakes with long-term climate changes.

To perform the work, level-by-level integrated characteristics of water paleoregime of Iksinskoe oligotropic bog (a southern taiga of Western Siberia), that has existed for 7370 years, were reconstructed by the data of detailed complex investigations using the humidity index calculated by botanical composition of pit (Elina, Yurkovskaya, 1992), the specific weight and the accumulation rate of pit organic substance, as well as Caspian levels at Holocene (Lavrushin, et al. 2001) and paleoclimate characteristics of the southeast of Western Siberia at Holocene (fluctuations from the present characteristics) (Blyakharchuk, 1989) including temperature in January and June, average annual temperatures and annual precipitation. The method of least squares was used to obtain empirical functions of distribution of amplitude of fluctuations (spectra) depending on the period duration and to reveal the cycles determining changes in the above-specified parameters. The assigned period ranged from 40 to 7370 years at a 10-year interval. The component analysis is used to determine a typical spectrum, connections between it and spectra of each characteristic and also to reveal the relationships between changes in parameters.

The analysis of a typical spectrum shows that a mid-frequency range includes three cycles with maximums at about 3150, 2250, and 1700 years, in a high-frequency range there are many small cycles with maximums at about 1350, 1000, 870, 770 years et al.

The received typical spectrum indicates high correlation dependences between spectra of separate parameters. The correlation factor is equal to 0,76–0,96 (0,76 for Caspian level). It testifies to the presence of uniform mechanisms that determine the water regime not only for inland seas and lakes, but also for bogs.

Changes in system parameters of water regimes of bogs and seas occur practically synchronously. The change in climatic parameters exerts a determining influence on the change in characteristics of water bodies.

Список литературы

Бляхарчук Т. А. 1989. История растительности юго-востока Западной Сибири в голоцене: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Томск. 19 с.

Елина Г. А., Юрковская Т. К. 1992. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Ботан. журн. Т. 77, № 7. С. 120–124.

Лаврушин Ю. А., Леонов Ю. Г., Лилиенберг Д. А. 2001. Направление и результаты изучения влияния геологических факторов на колебания уровня Каспийского моря // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео». С. 105–130.

Осадки и водные ресурсы

С. М. Семенов

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Москва, 107258, ул. Глебовская, 20Б
E-mail: Serguei.Semenov@mtu-net.ru

Precipitation and Water Resources

S. M. Semenov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS
Glebovskaya Str., 20B, Moscow 107258, Russia

Изменения в глобальной климатической системе, произошедшие в XX в., привели к изменению климата в Северной Евразии, в том числе на территории России. Они выявляются при анализе данных гидрометеорологических наблюдений, прежде всего в отношении температуры в приповерхностном слое атмосферы и суммы осадков. Эти изменения имеют, вообще говоря, различные знаки для разных регионов и сезонов. В 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг. практически повсеместно произошло увеличение средней годовой суммы осадков. Это также характерно для зимы (декабрь – февраль) и весны (март – май). Осенью (сентябрь – ноябрь) и особенно летом (июнь – август) наряду с увеличением суммы осадков наблюдалось также ее уменьшение в региональном масштабе на значительных территориях. Такие изменения суммы осадков согласуются с наблюдаемыми тенденциями изменения речного стока на территории России. Кроме отдельных регионов, речной сток повсеместно увеличился во второй половине XX в., особенно в холодный период года. Судя по материалам Четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в XXI в. на большей части Северной Евразии сумма осадков возрастет, особенно на севере. Однако эти изменения будут весьма неоднородными в пространстве. Типично осадки уменьшатся там, где сейчас наблюдается их недостаток в экологическом и хозяйственном аспектах. Эта же тенденция характерна для речного стока.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, речной сток, территория России.

Данные и методы

На территории стран СНГ и Балтии (до 1991 г. – территория СССР) существует сеть из 223 станций, результаты наблюдений которых передаются в Глобальную систему телесвязи (ГСТ) в телеграммах СИНОП (код FM_12-VII_SYNOP). Данные метеорологических наблюдений на этих станциях охваты-

вают в целом XX век, иногда – несколько меньший или же больший период. Ряды суточных данных по температуре (минимальной, средней и максимальной) и осадкам, полученных на этих станциях, были организованы Всероссийским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета) в виде базы данных. Эта информация депонирована в сети Интернет для свободного использования в некоммерческих целях (http://www.meteo.ru). В наибольшей степени представлены данные за 1936–2005 гг.

Для каждой из станций и выбранной переменной (одной из четырех, упомянутых выше) можно организовать частный массив данных $V = (v_{ij})$. Здесь i – порядковый номер года (i = 1, 2,..., I, годы занумерованы по возрастанию); j – порядковый номер суток в календарном году (j = 1, 2,..., J); v_{ij} – значение изучаемой переменной в j-е сутки i-го года. Условно считается, что всегда J = 366. Частный массив V может содержать данные не за все годы, которые имелись в исходном массиве, а представлять заданный исследователем отрезок времени [t_1, t_2] от года t_1 до года t_2. Таким образом, $t_1 \le Y(1) < Y(2) <... < Y(I) \le t_2$, где $Y(i)$ – год, имеющий порядковый номер i.

Кроме матрицы $V = (v_{ij})$, т.е. собственно массива данных, рассматривается матрица $G = (g_{ij})$, элементы которой характеризуют наличие или же отсутствие данного на соответствующем месте в матрице V: $g_{ij} = 1$, если данное v_{ij} в наличии, и $g_{ij} = 0$, если оно отсутствует. Заметим, что $g_{i\,366}$ всегда равно нулю, кроме високосных лет.

Данные в исходном массиве снабжены признаками качества. При статистической обработке использовались лишь те данные, которые имеют наивысшее значение этого признака. Остальные данные считались «отсутствующими». Однако анализ данных проводился лишь в том случае, если приведенная выше матрица была достаточно заполнена данными.

Использовалась следующая гипотеза о свойствах данных:

$$v_{ij} = a_i + b_j + \theta_{ij},$$

где a_1,..., a_i и b_1,..., b_j – неизвестные параметры; θ_{ij} – случайные уклонения (реализации центрированных случайных величин).

Оценки неизвестных параметров $\hat{a}_1, \hat{a}_2, ..., \hat{a}_I$, $\hat{b}_1, \hat{b}_2, ..., \hat{b}_J$ находились методом наименьших квадратов, т.е. посредством минимизации функционала

$$\Phi(a_1, a_2, ..., a_I; b_1, b_2, ..., b_J) = \sum_{\substack{i=1,2,...,I;\\ j=1,2,...,J;\\ g_{ij}=1}} (v_{ij} - (a_i + b_j))^2.$$

При этом использовалось условие $\sum_{j=1}^{J}\hat{b}_j = 0$. В этом случае переменные a будут иметь смысл среднегодовых значений, а переменные b – центрированного годового хода суточных значений.

В соответствии с климатологической традицией для оценки климатических характеристик следует использовать данные за достаточно большой отрезок времени – 30 последовательных лет или более. Однако если говорить о среднесуточных значениях температуры и в особенности о суточной сумме осадков, то осреднение за 30 лет не избавляет от «шума» – случайных отклонений в результатах оценки. Таким образом, в оценках $\hat{b}_1, \hat{b}_2, ..., \hat{b}_J$, кроме искомого «сигнала» – центрированного годового хода суточных значений температуры или же осадков – будет присутствовать статистический «шум», который следует отфильтровать. Для этого полученная последовательность $\hat{b}_1, \hat{b}_2, ..., \hat{b}_J$ разлагалась по гармоникам, а затем гармоники с периодом менее 1/4 года отбрасывались.

Полученные таким способом оценки a и b можно использовать как для вычисления обычных климатических параметров (годовых и сезонных средних температур и сумм осадков), так и прикладных климатических индексов (сумм эффективных и активных температур и т.д.).

Результаты и обсуждение

Данные и метод, описанные выше, позволили получить некоторые оценки тенденций изменения климата в XX в. – начале XXI в..

В 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг. на территории России произошли заметные изменения сезонных значений температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы и суммы осадков (Семенов, Гельвер, 2003; Семенов и др., 2006). Пространственное распределение изменений оказалось специфичным для сезонов (календарные весна, лето, осень, зима).

Осенью, зимой и весной преобладает потепление, особенно весной. Однако осенью и зимой на севере Европейской территории России (ЕТР), а также на обширных территориях на севере Западной и Восточной Сибири похолодало. Весной на ЕТР потеплело повсеместно, причем преобладает потепление более чем на 1 °С. В России территории, где летом наблюдается потепление и похолодание сравнимы по площади. Диапазон изменений от –0,5 до +0,5 °С, причем на европейской части изучаемой территории практически повсеместно похолодало.

Значения изменения суммы осадков за сезон (календарные весна, лето, осень, зима) составляют не менее –40 мм и, в основном, не более 40 мм. Для «холодного» периода календарного года – осень, зима, весна – на большей части рассматриваемой территории произошло увеличение суммы осадков, особенно в зимние месяцы (декабрь – февраль), а ее уменьшение имело место на несравнимо меньшей части территории. Для июня –августа территории, где произошло

увеличение и уменьшение суммы осадков, оказались соизмеримы, хотя превалирует все же увеличение, особенно в Европе.

При практически повсеместном увеличении годовой суммы осадков доля суток с суммой осадков, превышающих 0,1 мм, на обширных территориях уменьшилась (рис. 1). Таким образом, на этих территориях больше осадков стало выпадать за меньшее число суток, что косвенно указывает на усиление экстремальности режима увлажнения (Семенов и др., 2006).

Изменения суммы осадков и температуры оказали влияние на характер стока рек на территории России, что обнаруживается при анализе данных сети станций гидрологических наблюдений. Так, суммарный сток шести крупнейших рек Северной Евразии (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена, Колыма) в Северный Ледовитый океан возрос на 7 % за 1936–1999 гг. (Peterson et al., 2002). Текущее значение суммарного годового стока превышает значение на начало периода наблюдений на 128 км^3. Тренд составил 2,0 ± 0,7 км^3 год$^{-1}$. За последние 20–25 лет меженный сток, в особенности зимний, на большей части территории России увеличился, иногда весьма существенно – на 60–90 % (Шикломанов, Георгиевский, 2003). В северной и северо-восточной частях бассейна Волги увеличение составило от 20 до 30 %. Установлено также, что к концу XX в. суммы осадков на Кавказе, а также сток рек, для которых доминирует его естественная составляющая (Белая, Черек, Сулак, Лаба, Мзымта), возросли (Лурье, Панов, 2003). Положительный тренд составил 0,015–0,121 м^3·с$^{-1}$·год$^{-1}$.

Судя по последним документам Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК (Climate Change 2007; Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. 2007), наблюдаемые в XX в. тенденции сохранятся в XXI в. При этом осадки и речной сток будут возрастать в основном там, где их современные значения «избыточны» в экологическом и хозяйственном смыслах, и убывать там, где ощущается их «недостаток».

На рис. 2а и 2б приведены значения тренда средней температуры воздуха и суммы осадков за апрель – июнь в 1976–2005 гг., а на рис. 3а и 3б – то же для сезона ноябрь – март.

На рис. 2б можно заметить, что сумма осадков апреля – июня уменьшалась в 1976–2005 гг. на значительных территориях (в частности, на юге Украины и в Молдове, на Кавказе, в бассейне Лены, в Забайкалье и Приамурье, на севере Дальнего Востока). При этом температура на этих территориях в апреле –июне практически везде увеличилась (см. рис. 2а).

Увеличение количества осадков ноября – марта (см. рис. 3б) на территориях, расположенных на Кавказе, в бассейне Лены, на Среднем Урале, на фоне

практически повсеместного потепления этого периода года создало предпосылки для увеличения стока в этот период.

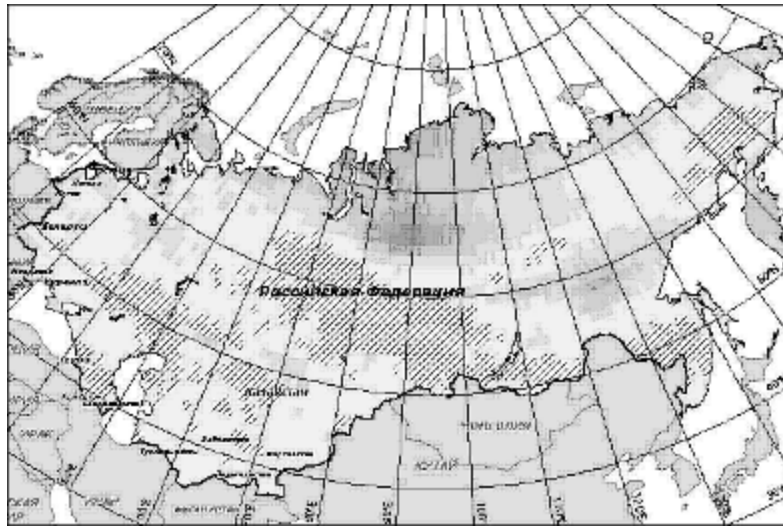
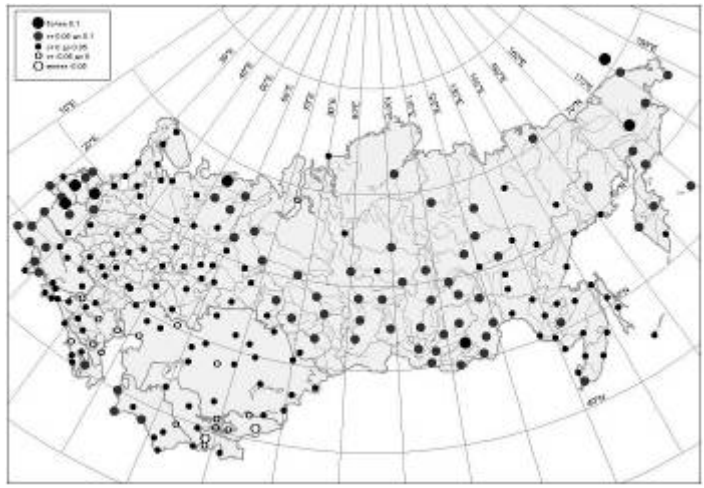


Рис. 1. Изменение доли суток с суммой осадков более 0,1 мм в 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг. на территории стран СНГ и Балтии: тушевка – увеличение, штриховка – уменьшение

а



б

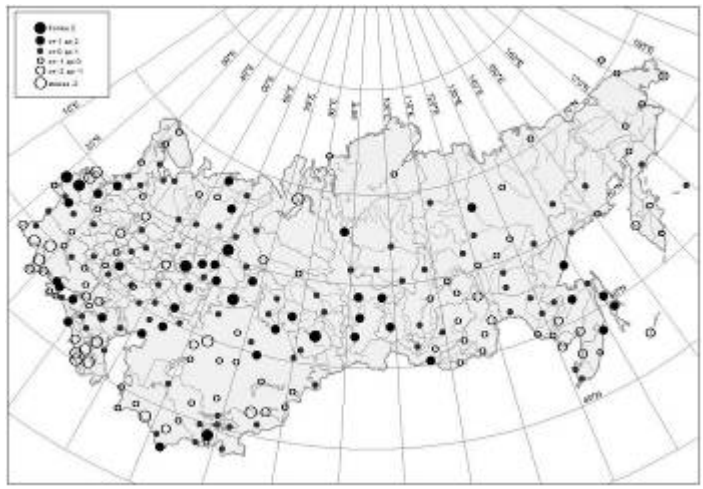
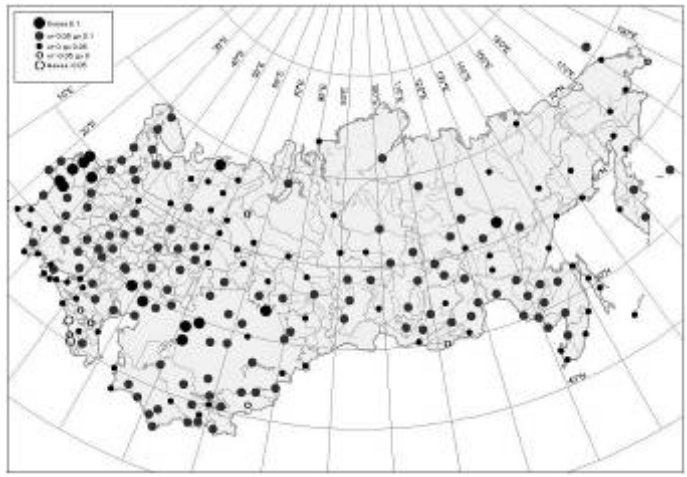


Рис. 2. Тренд в 1976–2005 гг. (апреля – июня):
а – средней температуры воздуха (°С·год$^{-1}$); б – суммы осадков (мм·год$^{-1}$)

а



б

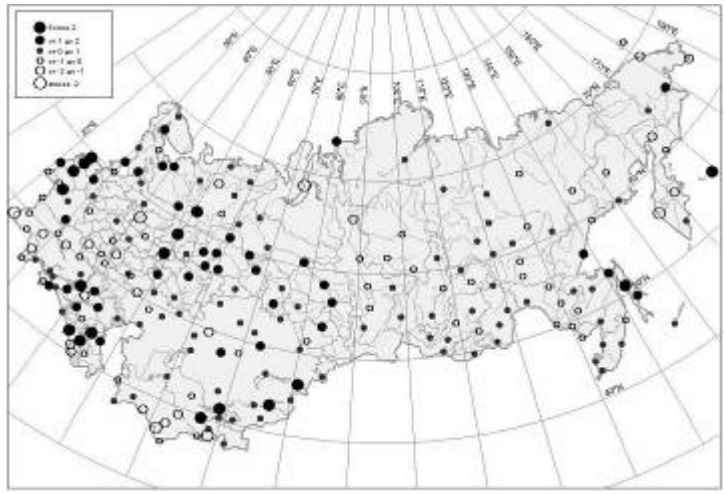


Рис. 3. Тренд в 1976–2005 гг. (ноября – марта):
а – средней температуры воздуха (°С·год$^{-1}$); б – суммы осадков (мм·год$^{-1}$)

Summary

Changes in the global climate system in the 20th century modified the climate in the Northern Eurasia, including the territory of Russia. They are revealed when analyzing hydro-meteorological observational data, first of all, near-surface temperature of the atmosphere and total precipitation.

In general, the changes have different signs in different regions and seasons. In 1966–1995 as compared with 1936–1965 the average annual total precipitation increased almost everywhere. This was also typical of the values of winter (December – February) and spring (March – May). Along with increase, the total precipitation decreased in autumn (September – November) and especially in summer (June – August) in the regional scale in the great territory.

Such changes in total precipitation conform with the observed tendencies in the river runoff in Russia. For example, the international research group, including Russian experts I. A. Shiklomanov and A. I. Shiklomanov calculated that the annual runoff of the six largest Eurasian rivers (Severnaya Dvina, Pechora, Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma) to the Arctic Ocean increased by 7 % in 1999 as compared with 1936. The rise was especially evident in the cold season, and the season warming might have also contributed to the effect.

According to the Fourth Assessment Report made by the Intergovernmental Panel on Climate Change, the global tendency towards strengthening the hydrological cycle will be kept in the 21st century. Total precipitation will increase in the greater part of the Northern Eurasia, especially in the north.

However, such changes will be quite not uniform over a distance. It is typical that precipitation decreases in the regions where it is not enough in ecological and economic aspects. This is also typical of the river runoff.

Список литературы

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 18 p.; http://www.ipcc.ch/

Peterson B. J., Holmes R. M., McClelland J. W., Vörösmarty C. J., Lammers R. B., Shiklomanov A. I., Shiklomanov I. A., Rahmstorf S. 2002. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. Vol. 298. P. 13.

Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Climate Change 2007. Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability // Summary for Policymakers. 2007. 23 p.; http://www.ipcc.ch/

Лурье П. М., Панов В. Д. 2003. Речной сток Кавказа в условиях современного изменения климата // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент. – 3 окт. 2003 г. С. 256.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2003. Климатические изменения годовой суммы осадков и частоты измеренных осадков на территории России и соседних стран в XX веке // Докл. АН. Т. 393, № 6. С. 818–821.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. Изд. центр «Метеорология и гидрология». 325 с.

Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. 2003. Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим рек России // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент. – 3 окт. 2003 г. С. 250.

Методы оценки изменений гидрологического режима под воздействием климатических изменений

В. Ч. Хон

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН
Москва, 119017, Пыжевский пер., 3
E-mail: khon@ifaran.ru

Estimate Methods of Hydrological Regime Changes under the Influence Climatic Changes

V. Ch. Khon

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS
Pyzhevsky per., 3, Moscow 119017, Russia

Выполнена оценка способности современных моделей климата воспроизводить региональные гидрологические характеристики в бассейнах крупнейших рек Северной Евразии. Представлены оценки возможных климатических изменений характеристик гидрологического режима для регионов северной Евразии в XXI в. Акцент сделан на анализе изменений режимов речного стока и осадков (в том числе их экстремальных режимов) на крупнейших водосборах Евразии, включая бассейны Волги и крупнейших сибирских рек Оби, Енисея и Лены. Для анализа использовались результаты расчетов, полученные с помощью ансамбля климатических моделей IPCC (Межправительственной группы экспертов по изменению климата) при антропогенных сценариях с увеличением содержания в атмосфере парниковых газов.

Ключевые слова: изменения климата, осадки, речной сток.

Для оценок возможных гидрологических изменений в будущем, связанных с естественными и антропогенными причинами, используются глобальные модели климата, в том числе наиболее детальные климатические модели общей циркуляции (КМОЦ) атмосферы и океана с описанием динамики морского льда и процессов в деятельном слое суши с учетом биосферных эффектов. Согласно результатам численных экспериментов с современными КМОЦ при глобальном потеплении в XXI в. следует ожидать значительных изменений гидрологического режима и, в частности, дальнейшего усиления тенденции экстремальности осадков и проявления ее над многими регионами (IPCC, 2001, 2007; Semenov, Bengtsson, 2002; Voss et al., 2002).

В данной работе сделаны оценки возможных изменений речного стока и различных характеристик осадков (их количества, интенсивности и вероятности) для регионов Северной Евразии в XXI в. (Мохов и др., 2003, 2005; Khon et al.,

2007). Для анализа использовались расчеты с ансамблем КМОЦ при антропогенных эмиссиях парниковых газов в атмосферу согласно умеренному сценарию SRES-A1B (IPCC, 2001).

Для детального анализа были выбраны бассейны Волги и крупнейших сибирских рек Оби, Енисея и Лены (рис. 1). Для сопоставления с модельными результатами использовались данные наблюдений за речным стоком (GRDC) и осадками CRU (Университета Восточной Англии) (New et al., 2000). Также приняты к сведению данные реанализа ERA-40 (Uppala et al., 2005) для 1958–2001 гг.

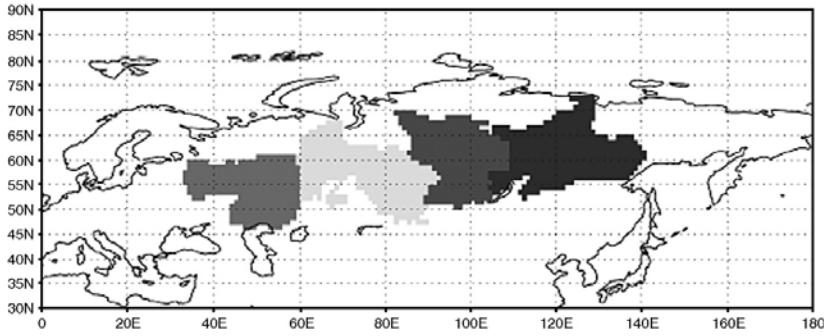


Рис. 1. Водосборы рек Волги, Оби, Енисея и Лены

На рис. 2 приведены распределения общего количества зимних (a, c, e) и летних (b, d, f) осадков (мм/сут) по данным наблюдений CRU (a, b), реанализа ERA-40 (c, d) и по расчетам с КМОЦ ECHAM5/MPI-OM (e, f) для базового 30-летнего периода 1961–1990 гг. В целом модельные расчеты достаточно хорошо воспроизводят количество осадков в различных регионах, в частности в бассейнах российских рек.

На рис. 3 изображены средние годовые значения стока Волги, Оби, Енисея и Лены, полученные по модельным расчетам в сопоставлении с данными наблюдений для 1961–1990 гг. В целом модели удовлетворительно воспроизводят средний климатический режим стока для речных водосборов. Средние по ансамблю моделей климатологические значения стока Волги, Оби, Енисея и Лены достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений.

Рис. 4 демонстрирует возможные изменения стока Волги, Оби, Енисея и Лены к концу XXI в. согласно антропогенному сценарию SRES-A1B. Все модели показывают рост годового стока сибирских рек, в то время как тенденции изменения стока Волги противоречивы. Наибольшее увеличение стока в XXI в. проявляется для Лены, с большей долей бассейна в высоких широтах.

На рис. 5 приведены осредненные по ансамблю моделей изменения общего количества, интенсивности и вероятности осадков на водосборах Волги, Оби, Енисея и Лены к концу XXI в. согласно сценарию SRES-A1B.

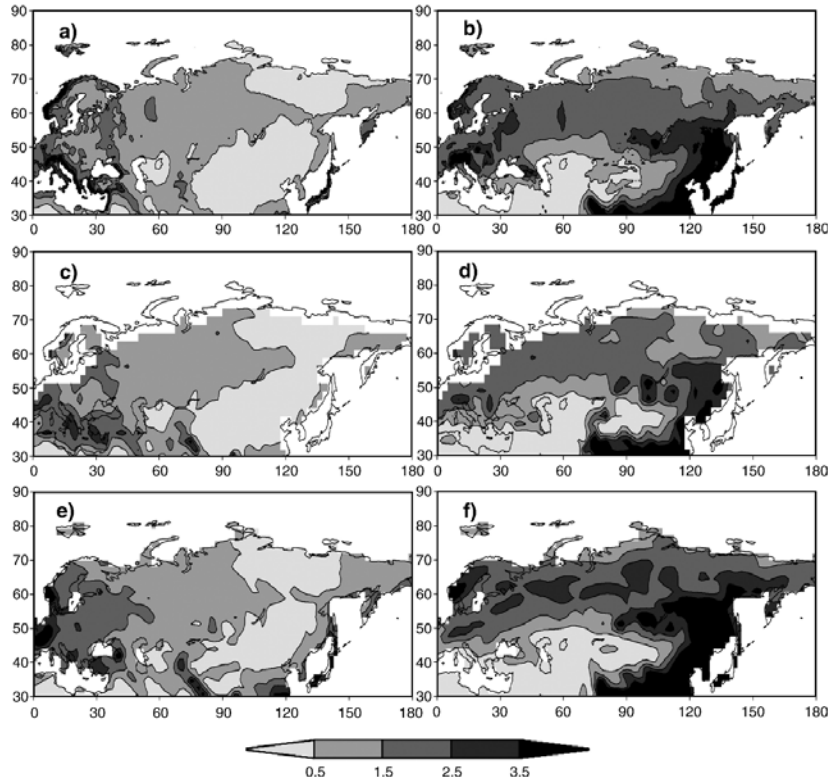


Рис. 2. Пространственное распределение количества зимних (a, c, e) и летних (b, d, f) осадков (мм/сут) в северной Евразии по данным метеонаблюдений CRU (a, b), реанализа ERA-40 (c, d) и по расчетам с КМОЦ ECHAM5/MPI-OM (e, f) для 30-летнего периода 1961–1990 гг.

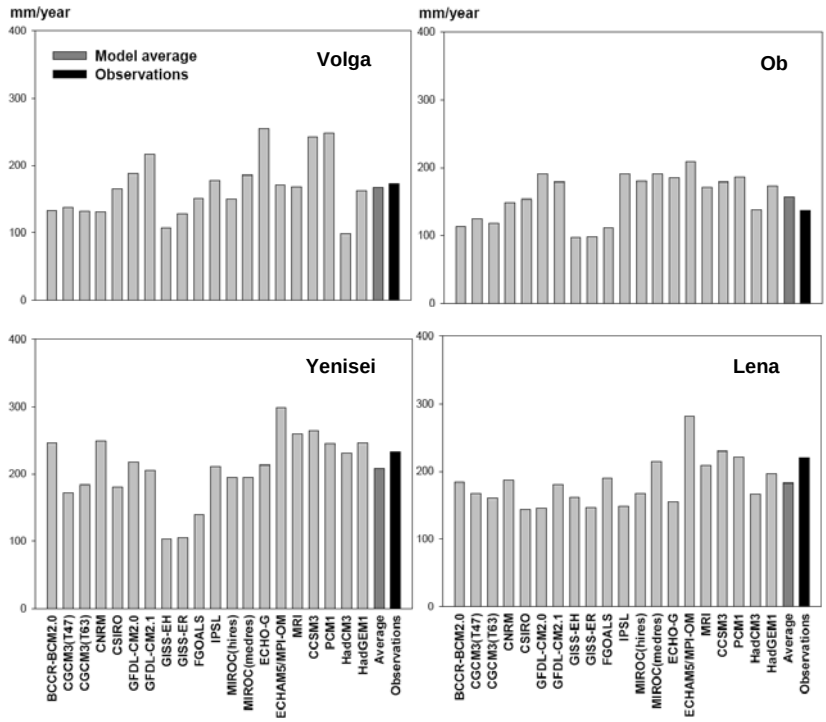


Рис. 3. Средний годовой сток (мм/год) Волги, Оби, Енисея и Лены по расчетам с ансамблем моделей в сопоставлении с данными наблюдений для 30-летнего периода 1961–1990 гг.

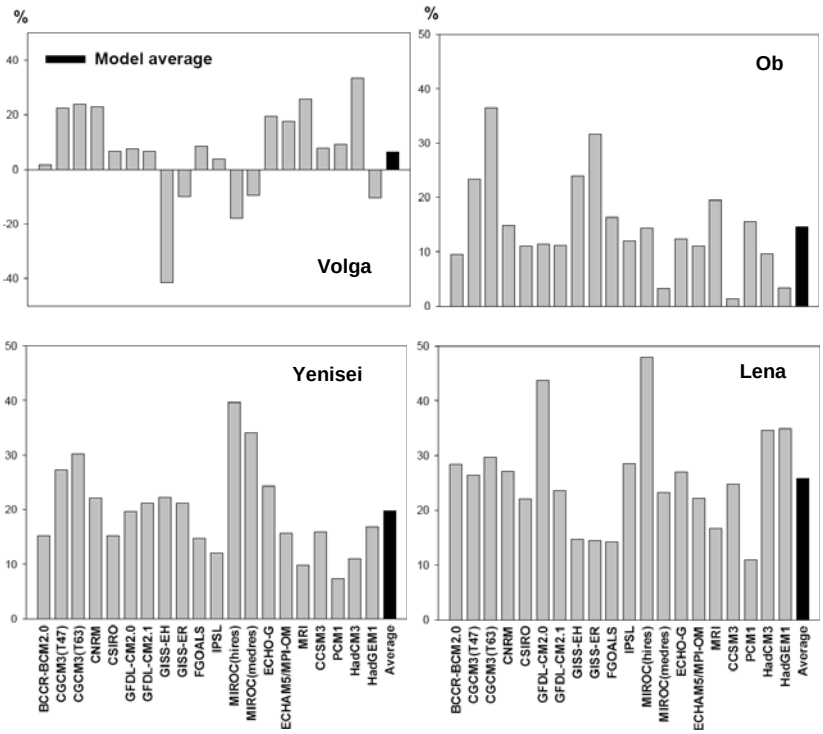


Рис. 4. Изменения годового стока (%) Волги, Оби, Енисея и Лены
для последнего 20-летия XXI в. (относительно 1981–2000 гг.)
при антропогенном сценарии SRES-A1B по расчетам с ансамблем КМОЦ

Согласно модельным расчетам наибольшее увеличение количества осадков можно ожидать в зимний период для всех водосборов, с наибольшим усилением в более северных регионах. В летний период изменения общего количества осадков незначительны. В переходные периоды (весной и осенью) также в целом проявляются положительные тенденции, но они менее значимы, чем для зимнего сезона. Интенсивность осадков на водосборах Волги, Оби, Енисея и Лены растет для всех сезонов, с максимальным усилением в зимний период. При этом зимой наибольшее увеличение отмечено и для вероятности осадков на всех водосборах. Принципиально отличаются от зимних летние тренды для вероятности осадков – они отрицательные для всех четырех речных бассейнов. Таким образом, зимой осадков становится больше, они более интенсивные и чаще выпадают (с наибольшими значениями для Енисея и Лены). Летом общее количество осадков изменяется слабо, но при этом они становятся более интенсивными и редкими.

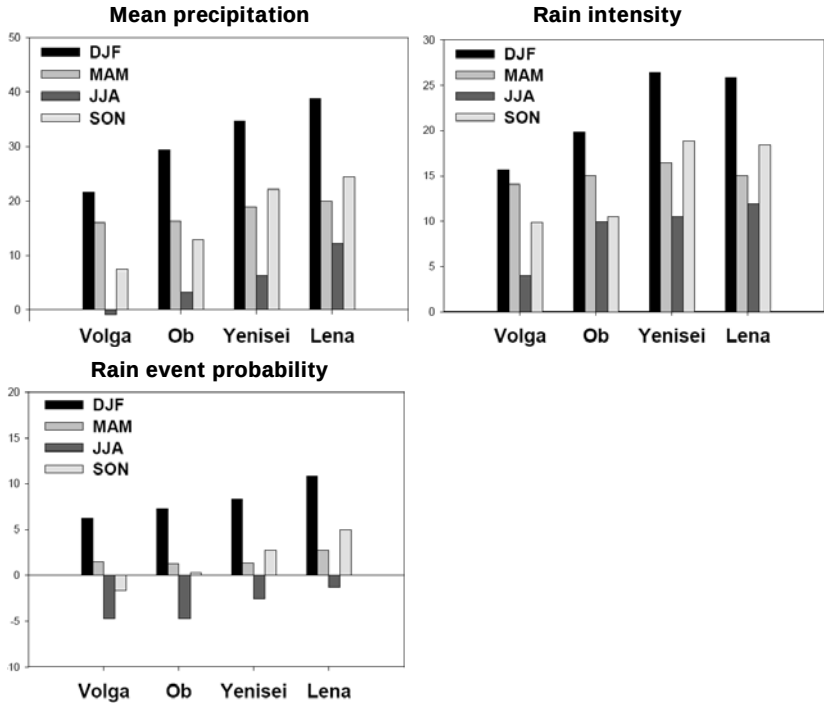


Рис. 5. Изменения (средние по ансамблю моделей) характеристик сезонных осадков (общего количества, интенсивности и вероятности, %) для последнего 20-летия XXI в. (относительно 1981–2000 гг.) при антропогенном сценарии SRES-A1B для бассейнов Волги, Оби, Енисея и Лены

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, программ РАН и Минобрнауки (контракт Роснауки 02.515.11.5031), Научной программы НАТО (Collaborative Linkage Grant 982423) и INTAS (06-1000014-6556).

Summary

A probability of modern climate models to simulate regional hydrological characteristics in the basins of the largest rivers of the northern Eurasia is estimated. The evaluations of possible climate changes in the characteristics of hydrologic regime for the regions of the Northern Eurasia in the 21st century are presented. The special attention is paid to the analysis of changes in river runoff and precipitation regimes, including their extreme regimes, for the major Eurasian watersheds including the basins of the Volga river and the largest Siberian rivers: Ob, Yenisei and Lena.

The results of calculations based on a set of global climate models of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) under anthropogenic scenarios with increasing content of greenhouse gases in the atmosphere are used for the analysis.

On the whole, the models satisfactorily simulate a medium climate regime of river runoffs. Mean climatological values in the set for the runoffs of Volga, Ob, Yenisei and Lena rather well conform with the observational data for the 20th century. All the models show an increase for the runoffs of Ob, Yenisei and Lena rivers for the 21st century. The simulated changes of the Volga river runoff are more contradictory for the 21st century.

The characteristics of precipitation including mean precipitation, rain intensity, rain event probability and the index of extreme events obtained from different global climate model simulations are analyzed. The simulations with the set of global climate models are compared to the observational data and the data of ERA-40 reanalysis. The simulations based on a set of global climate models for the 21st century demonstrate an increase in precipitation during winter, precipitation intensity and rain event probability as well as heavy precipitation in the catchment areas of Volga, Ob, Yenisei and Lena rivers. The trends for the spring and autumn rain intensity and heavy precipitation are also positive but less significant than for the winter trends. This is in contrast to the summer rain event probability, which has a negative trend for all analyzed river basins.

Список литературы

GRDC. 1996. Global Runoff Data Centre. Second Interim report on the Arctic river database for Arctic Climate System Study (ACSYS) // Tech. Rep. 12. FIH. Koblenz. 48 p.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basic / Houghton J. T. et al. (Ed.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 881 p.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Solomon S. et al. (Ed.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 940 p.

Khon V. Ch., Mokhov I. I., Roeckner E., Semenov V. A. 2007. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model // Global and Planetary Change. 57. P. 118–123.

New M., Hulme M., Jones P. 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate // J. Clim. 13. P. 2217–2238.

Semenov V., Bengtsson L. 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // Climate Dynamics. 19. P. 123–140.

Uppala S. M., Kållberg P. W., Simmons A. J. et al. 2005. The ERA-40 reanalysis // Quart. J. R. Meteorol. Soc. 131. P. 2961–3012.

Voss R., May W., Roeckner E. 2002. Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: Changes in extremes of the hydrological cycle // Intern. J. Climatol. 22. P. 755–777.

Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч. 2003. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 39, № 2. С. 150–165.

Мохов И. И., Рекнер Э., Семенов В. А., Хон В. Ч. 2005. Экстремальные режимы осадков в регионах северной Евразии в XX веке и их возможные изменения в XXI веке // Докл. АН. Т. 402, № 6. С. 818–821.

Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России

И. А. Шикломанов, В. Ю. Георгиевский

Государственный гидрологический институт
Санкт-Петербург, 199053, Васильевский остров, 2-я линия, 23
E-mail: ggi2@mailbox.alkor.ru

Influence of Climate Changes on the Hydrological Regime and Water Resources of the Russian Rivers

I. A. Shiklomanov and V. Yu. Georgievsky

State Hydrological Institute
Line 2 at Island Vas., 23, St.-Petersburg 199053, Russia

В результате проведенных исследований установлено, что основной особенностью современных климатообусловленных изменений водного режима рек на преобладающей части территории страны является существенное увеличение водности в меженные периоды, особенно в зимние месяцы. В пределах крупных регионов России для большинства рассмотренных рек отмечаются значимые положительные тренды стока зимней и летне-осенней межени.

На преобладающей части территории страны годовой сток рек в последние десятилетия превысил норму. Вместе с тем результаты статистических расчетов свидетельствуют о том, что происходящие изменения водных ресурсов находятся в пределах естественной изменчивости.

С учетом наблюдающихся изменений водности рек на фоне современного потепления климата и результатов моделирования стока, выполненного авторами и другими исследователями при различных климатических сценариях, наиболее вероятным в ближайшие десятилетия является увеличение годового стока рек бассейна Северного Ледовитого океана и бассейна Волги.

Ключевые слова: реки России, изменения климата, изменения гидрологического режима, современные, перспективные.

В отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2007) было установлено, что средняя годовая глобальная температура приземного воздуха повысилась на 0,76 °С с середины XIX в., при этом наиболее интенсивное потепление отмечается в последние десятилетия. В соответствии с данными специалистов Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН в среднем для территории России потепление в 1976–2005 гг. со-

ставило 1,34 °С. Для России потепление более заметно зимой и весной, в теплый же период года рост температуры менее выражен.

Представляет большой теоретический и практический интерес выявление реакции на это потепление стока рек на территории России. В связи с этим в ГГИ для количественной оценки происходящих климатообусловленных изменений водных ресурсов и водного режима рек России, выявления особенностей этих изменений в различных физико-географических зонах и их причин, а также районирования территории страны по их направленности и интенсивности был разработан и реализован методический подход, основой которого является комплексный статистический анализ годового, сезонного и месячного стока трехсот средних по размерам водосбора рек с естественным (не нарушенным влиянием хозяйственной деятельности) водным режимом и периодом наблюдений за стоком не менее 55 лет.

Выполненные исследования позволили установить, что основной особенностью современных климатообусловленных изменений сезонного стока рек является увеличение в последние десятилетия их водности в зимний сезон практически на всей территории страны. Наиболее четко рост зимнего стока прослеживается на ЕТР. В качестве примера на рис. 1 представлена динамика зимнего стока ряда рек, расположенных в различных природных зонах. В этом регионе водность рек в холодный сезон года в 1978–2005 гг. на 50–120 % была выше, чем за предшествующий многолетний период. Здесь для большинства рек выявлены положительные тренды зимнего стока, которые являются значимыми при доверительной вероятности 95 %.

На азиатской территории страны значимые тренды увеличения зимнего стока отмечаются на левобережных притоках Иртыша и Тобола, где его рост составляет 40–70 %. На 10–30 % в последние 20–25 лет сток зимней межени превысил норму в бассейне Лены (реки Витим, Олекма, Алдан, Амга).

Как и для зимнего стока, увеличение летне-осеннего стока в 1978–2005 гг. отмечается для значительной части РФ. Наиболее существенный рост стока летне-осенней межени наблюдался в лесостепной и степной зонах ЕТР, где для большинства рек получены значимые положительные тренды. В этих природных зонах сток рек за летне-осенние месяцы был выше, чем в предшествующий многолетний период на 40–100 %. Также вырос летне-осенний сток рек, расположенных в лесной зоне ЕТР южнее 60° северной широты. Здесь увеличение стока на большинстве рек составило 30–50 %. Севернее, в верхней части бассейна Северной Двины, это увеличение равно 20–25 %.

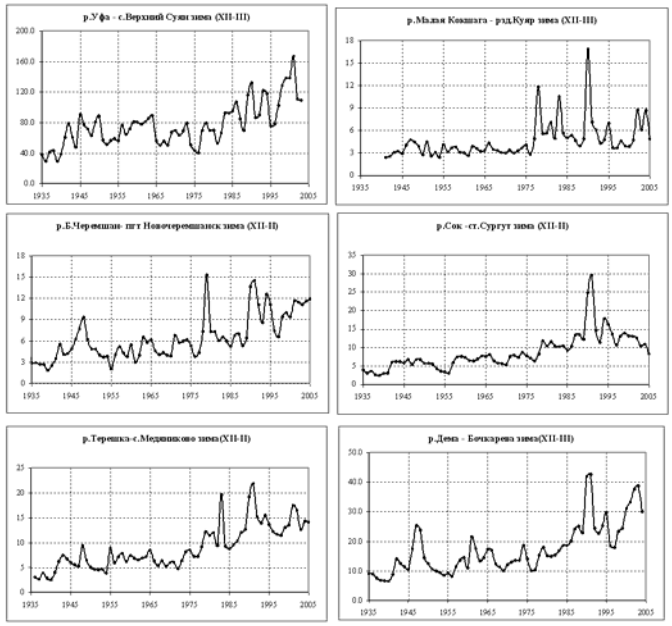


Рис. 1. Динамика зимнего стока рек ЕТР, расположенных в различных природных зонах

Для азиатской территории страны наиболее существенное увеличение летне-осеннего стока (на 25–50 %) произошло на реках, где наблюдалось и значительное повышение зимнего стока – это левобережные притоки Иртыша и Тобола, а также реки бассейна Лены (Витим, Олекма, Амга), где сток увеличился на 10–20 %, и реки северо-востока (бассейны рек Оленек, Яна, Индигирка) – на 15–30 %.

Рост меженного стока обусловил увеличение водных ресурсов даже в бассейнах рек, где произошло снижение стока весеннего половодья (юго-западная часть ЕТР). Анализ данных наблюдений за последние 100 лет позволил сделать вывод о том, что такая ситуация сложилась впервые, так как ранее все значительные многоводные и маловодные фазы определялись прежде всего величиной стока весеннего половодья. Увеличение доли меженного стока в годовом свидетельствует о существенном изменении условий его формирования в результате роста подземной и снижения поверхностной составляющих, а также о значительном повышении естественной зарегулированности стока.

На преобладающей части территории страны годовой сток рек в последние десятилетия превысил норму. Наиболее значительное увеличение (на 15–40 %) наблюдалось на реках западной части ЕТР, левобережных притоках Волги, большей части бассейна Камы, а также на реках, сток которых формируется на восточных склонах Уральских гор (притоки Тобола и Иртыша). Повышенная водность отмечалась также и на значительной части бассейна Лены, особенно в

последнее десятилетие XX столетия. Вместе с тем на территории РФ выделяется регион, где в последние десятилетия наблюдалось существенное снижение водности – это бассейны верхней Оби и Иртыша. Годовой сток Оби у г. Колпашево уменьшился на 18 %, а водность притоков Оби выше г. Колпашево – на 5–22 %. Незначительное уменьшение стока (~ 5 %) произошло в этот период и в бассейне верхнего Енисея.

Результаты оценок однородности рядов годового стока рек, оценок значимости их трендов за различные периоды не дают оснований говорить о наличии направленных изменений в многолетних колебаниях возобновляемых водных ресурсов. Хотя на фоне наблюдающегося со второй половины 1970-х гг. потепления на большей части страны произошло увеличение водности, а для отдельных крупных регионов весьма значительное, все эти изменения пока не противоречат гипотезе стационарности временных изменений рядов годового стока.

Для выявления причин современных изменений водного режима рек ЕТР и детального анализа особенностей процессов гидрологического цикла были использованы данные семи воднобалансовых станций (ВБС). По всем ВБС со второй половины 1970-х гг. отмечается значительное увеличение годовых сумм осадков. Увеличение увлажненности происходило на фоне существенного потепления зимнего и весеннего сезонов. В результате повышения температуры воздуха холодного сезона участились зимние оттепели, а промерзаемость почв стала меньше. Это явилось причиной того, что значительная часть сформировавшейся во время оттепелей и весеннего снеготаяния воды пошла на увеличение влажности деятельного слоя почвы. В сложившейся со второй половины 1970-х гг. гидрометеорологической ситуации были созданы благоприятные условия для инфильтрационного питания подземных вод, в результате чего четко обозначилась тенденция к повышению их уровня. Увеличение запасов подземных вод привело к возрастанию подземного питания рек и значительному росту их меженного стока. Следует особо подчеркнуть, что эти выводы относятся к стоку рек, дренирующих основные водоносные горизонты.

В результате анализа динамики годового стока основных рек страны в их замыкающих створах (для рек, сток которых существенно нарушен влиянием хозяйственной деятельности, использовались его восстановленные значения) было установлено, что на большинстве рек водные ресурсы в 1978–2005 гг. были выше нормы. Наиболее значительно в этот период увеличилась водность Нарвы (на 37 %), Западной Двины (на 22 %), Волги (на 14 %). Имеет место тренд увеличения водных ресурсов крупнейших российских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан (СЛО). На рис. 2 показана динамика годового притока этих рек в СЛО, а на рис. 3 – его отклонения в 1978–2006 гг. от среднего за предшествующий многолетний период (1936–1977). Как следует из этих данных, за 1978–2006 гг. только в четырех годах приток был меньше, чем в среднем за предшествующий период, а в течение последних 19 лет он превышал норму.

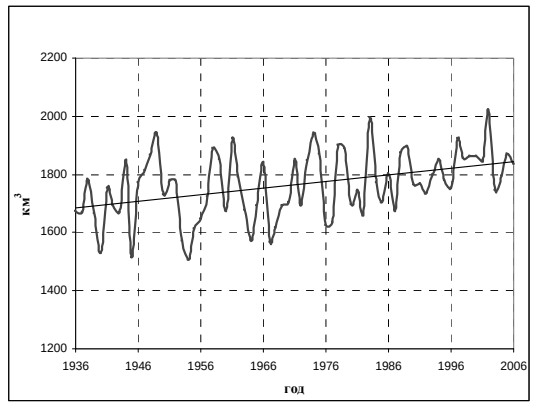


Рис. 2. Динамика суммарного стока крупнейших российских рек бассейна СЛО

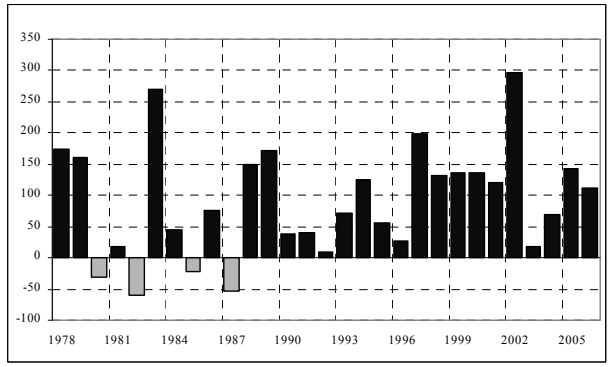


Рис. 3. Отклонения притока российских рек в СЛО в 1978–2006 гг. от среднего за предшествующий многолетний период (км^3/год)

В соответствии с имеющимися к настоящему времени оценками (МГЭИК, 2007) в первой половине XXI столетия наиболее вероятно дальнейшее существенное изменение климатических условий в результате дальнейшего роста концентрации парниковых газов в атмосфере. Климатические сценарии будущего разрабатываются с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). При наличии климатических сценариев для оценки возможных изменений водных ресурсов и водного режима рек в настоящее время применяются различные методические подходы.

В основу реализованного в ГГИ методического подхода положен следующий основной принцип – оценка влияния возможных изменений климата на водные ресурсы и водный режим должна базироваться на результатах диагноза происходящих на фоне современного потепления климата региональных изме-

нений стока рек и результатах расчетов стока и основных составляющих водного баланса при вероятных климатических сценариях будущего, полученных с использованием МОЦАО. Для таких расчетов в ГГИ была разработана воднобалансовая модель с декадным расчетным интервалом времени (Георгиевский и др., 1996).

При применении гидрологических моделей для оценки последствий климатических изменений принципиальное значение имеет оценка их адекватности, которая производилась следующим образом. Поскольку со второй половины 1970-х гг. на значительной части территории страны происходят существенные климатообусловленные изменения водного режима рек, то в качестве опорного периода, по которому производилась калибровка параметров модели, был выбран период с 1946 по 1970–77 гг. Данные за последующие годы использовались для проверки на независимом материале.

На первом этапе проверка адекватности модели и ее отдельных блоков производилась путем расчетов всех основных элементов гидрологического цикла применительно к водосборам ВБС. Выполненные расчеты показали, что модельные ряды элементов гидрологического цикла адекватно отражают наблюдающиеся и, что очень важно, не имеющие аналогов в прошлом их современные изменения – увеличение запасов подземных вод и рост меженного стока.

На последующем этапе исследований оценка адекватности модели производилась для водосборов преимущественно средних рек, расположенных в различных физико-географических условиях. Применительно к этим водосборам, ввиду отсутствия специализированных наблюдений за элементами водного баланса водосборов, проверка модели осуществлялась по сопоставлению рассчитанных и наблюденных величин месячного и годового стока.

Отсутствие систематических погрешностей модельных расчетов стока и их существенная корреляция с наблюденными значениями позволили сделать вывод о применимости данной модели для оценки изменения водного режима рек при климатических условиях, отличающихся от современных. С использованием разработанной модели применительно к территории России оценки возможных изменений водных ресурсов и водного режима были выполнены для водосборов средних рек, расположенных в различных физико-географических зонах страны, а затем обобщались для бассейнов больших рек. В качестве возможных климатических условий будущего использовались климатические сценарии, полученные по МОЦАО (ECHAM4, GFDL-R15, CGCM1, HadCM2, HadCM3).

Анализ выполненных по модели численных экспериментов позволил сделать вывод о том, что для большей части территории РФ в первой половине текущего столетия следует ожидать увеличения водных ресурсов. В качестве иллюстрации этого вывода в таблице приведены результаты расчетов изменения годового стока по сценарию HadCM3/A2 на уровень 2010–2039 гг. Отметим, что согласно результатам анализа, выполненного в работе (Менжулин и др., 2005),

модель HadCM3/A2 (наряду с моделью ECHAM4) наиболее адекватно воспроизводит нормы среднемесячных значений температуры приземного воздуха и суммы атмосферных осадков для территории России.

В соответствии с этим сценарием на европейской части страны наибольшее увеличение стока ожидается на Волге и Урале (9–10 %), а также на северных реках (4–8 %). На реках бассейна Балтийского моря увеличение стока незначительно. Снижение стока до 3 % ожидается на реках юго-западной части ЕТР. Для внутригодового распределения стока характерно повсеместное возрастание зимнего стока, а также смещение пика половодья не более ранние сроки.

Табл. 1.Изменения годового стока рек России на уровень 2010–2039 гг. при климатическом сценарии HadCM3/A2

Река	Норма стока, мм	Изменение стока	
		мм	%
Печора	404	34	8
Мезень	355	19	5
Северная Дви-	305	12	4
Нева	279	5	2
Луга	227	3	1
Днепр*	136	–2	–1
Десна*	124	–4	–3
Дон*	72	–2	–3
Волга	183	17	9
Урал*	43	4	10
Обь	135	4	3
Енисей	244	16	6
Лена	214	24	11
Оленек	169	15	9
Яна	129	11	8
Индигирка	149	16	11
Колыма	197	15	8

* Российская часть бассейна.

На азиатской части страны для рассматриваемого климатического сценария ожидается увеличение годового стока арктических рек на 3–11 %. Наибольшее относительное увеличение стока ожидается на Лене и Индигирке, а наименьшее – на Оби. В среднем по рекам Сибири ожидается возрастание стока на 7 %.

Полученные результаты указывают также на большую чувствительность внутригодового распределения стока к изменениям температуры и осадков. При этом очень важна не только величина этих изменений, но и то, в какие сезоны и месяцы они происходят. В зависимости от этого определяющую роль могут иг-

рать как осадки, так и температура воздуха. Ожидаемое существенное потепление в холодный период года приведет к повышению на значительной части территории страны зимнего стока в результате увеличения частоты и интенсивности оттепелей.Изменения максимального стока определяются целым комплексом факторов – величиной снегозапасов к моменту устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С, промерзанием и влажностью почвы к началу снеготаяния, количеством осадков в период половодья и др. В зависимости от сочетания этих факторов в используемых климатических сценариях наибольшие месячные расходы воды в период весеннего половодья могут как увеличиваться, так и уменьшаться.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод: в первой половине текущего столетия нет оснований ожидать какого-либо ухудшения водообеспеченности населения и экономики на преобладающей части территории России.Вместе с тем на основе анализа результатов моделирования был выявлены регионы, где отмечается очень большая неопределенность в оценках возможных в перспективе изменений стока. Это относится к юго-западной части ЕТР, включающей бассейн Дона и российскую часть бассейна Днепра, а также к верховьям Иртыша и Оби. По ряду сценариев здесь при повышении температуры воздуха ожидается уменьшение водных ресурсов.

Выводы

Основной особенностью современных климатообусловленных изменений водного режима рек на преобладающей части территории страны является существенное увеличение в последние 25–30 лет водности в меженные периоды, особенно в зимние месяцы. В пределах крупных регионов России для большинства рассмотренных рек отмечаются значимые (при уровне значимости 95 %) положительные тренды увеличения стока зимней и летне-осенней межени. Наблюдающаяся для обширных территорий «синхронизация» изменений меженного стока (особенно зимнего) и масштабы этих изменений являются неординарными и не имеют аналогов в XX столетии.

Для рек юго-западного региона ЕТР и примыкающей к нему части бассейна Волги происходили изменения в генезисе их питания, обусловленные уменьшением весеннего стока и увеличением меженного. Это привело к значительному увеличению естественной зарегулированности стока, по своему масштабу сопоставимому с влиянием водохранилищ сезонного регулирования. На преобладающей части территории страны годовой сток рек в последние десятилетия превысил норму. Вместе с тем выявленные для отдельных крупных регионов существенные положительные аномалии годового стока рек пока не дают основания делать вывод о направленных систематических изменениях в многолетних колебаниях их водных ресурсов. Результаты статистических расчетов свидетельствуют о том, что происходящие изменения находятся в пределах естественной изменчивости.

С учетом наблюдающихся изменений водности рек на фоне современного потепления климата и результатов моделирования стока, выполненных при различных климатических сценариях, наиболее вероятным в ближайшие десятилетия является увеличение годового стока рек бассейна Северного Ледовитого океана и бассейна Волги. Вместе с тем выявлен наиболее проблемный, с точки зрения перспективной водообеспеченности, регион – юго-западная часть ЕТР (бассейн Дона и российская часть бассейна Днепра). Выполненные расчеты показали, что для ряда климатических сценариев в первой половине XXI в. здесь может произойти существенное снижение водности. Весьма вероятно, учитывая современные тенденции водности, и уменьшение в ближайшие десятилетия водных ресурсов в верхних частях бассейнов Оби и Иртыша.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-12085-офи).

Summary

The results of studies carried out indicate that the essential increase in the water content in low-flow periods, especially in wintertime is the basic feature of modern climate-dependent changes in water regime of the rivers in the most part of Russia. The significant positive trends of winter and summer-autumn runoffs are observed for the majority of the considered rivers in the big regions of Russia.

The annual river runoff has exceeded the standard rate in the greater part of the country for the last decades. At the same time the statistical results testify that changes occurring in water resources are within the range of natural variability.

In view of the changes observed in the river runoff during modern climate warming and the results of runoff modelling done by the authors and other researchers under various climatic scenarios, the increase in the annual river runoff is most likely to happen in the basins of the Arctic Ocean and the Volga river in the nearest decades.

Список литературы

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. United Kingdom and New York, USA.

Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л., Шикломанов И. А., Шикломанов А. И. 1996. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. № 11. С. 89–99.

Менжулин Г. В., Шамшурин В. И., Савватеев С. П. 2005. К оценке точности модельных сценариев изменений климата, рекомендованных комиссией IPCC для расчетов последствий глобального потепления // Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. СПб.: Наука. С. 55–85.

Тенденции гидрологических процессов на Байкале в условиях изменения климата: обзор

М. Н. Шимараев

Лимнологический институт СО РАН
Иркутск, 664033, ул. Улан-Баторская, 3
E-mail: shimarae@lin.irk.ru

Tendencies of Hydrological Processes Occurring in Lake Baikal under Climate Changes: Review

M. N. Shimaraev

Limnological Institute SB RAS
Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk 664033, Russia

Ключевые слова: Байкал, глобальное потепление, температура воды и воздуха, ледовые процессы, речной приток, ожидаемые изменения в XXI столетии, климат и динамика растворенного кремния.

Байкал, расположенный на 456 м над уровнем моря в Восточной Сибири, – самое глубокое (1642 м) и наибольшее по объему вод (23615 км^3) пресноводное озеро на Земле. Озеро простирается на 636 км с юго-запада к северо-востоку, его средняя ширина 49 км. Подводные поднятия дна разделяют котловину на три главных бассейна: южный (максимальная глубина 1461 м), центральный (1642 м) и северный (904 м) (см. таблицу). Большая термическая инерция водных масс оказывает умеряющее влияние на местный климат. В 1996 г. Байкал был объявлен Организацией Объединенных Наций участком Мирового наследия.

Глобальное потепление в XX столетии (IPCC, 1995) сопровождалось изменениями гидрологических условий в некоторых больших озерах Европы и Северной Америки (Magnusson et al., 1997; Филатов, 1998; Gronskaya et al., 2002). Ранее для различных временных интервалов были выявлены существенные изменения климата и отдельных гидрологических характеристик для озера Байкал, расположенного почти в центре Евразии (Верболов и др., 1965; Афанасьев, 1967; Shimaraev et al., 1994). Данные инструментальных наблюдений за температурой воздуха (с 1896) и ледовыми явлениями в Южном Байкале (с 1868) так же, как информация о ежегодном водном притоке в озеро Байкал (с 1901), позволяют рассматривать климатическое влияние на гидрологические процессы на протяжении последних 100 лет (Шимараев и др., 1994, 2002а,б).

Табл. 1. Новые морфометрические данные озера Байкал (Sherstyankin et al., 2003)

	Южный бассейн	Центральный бассейн	Северный бассейн	Все озеро
Максимальная глубина, м	1461	1642	904	1642
Средняя глубина, м	853,4	856,7	598,4	744,4
Площадь поверхности, км^2	7432	10600	13690	31722
Объем, км^3	6342,7	9080,6	8192,1	23615,4

Общий характер изменения температуры воздуха на Байкале соответствовал ходу глобальной температуры (рис. 1), с увеличением с конца 1910-х до середины столетия, уменьшением к началу 1970-х и наиболее существенным повышением к концу столетия. Тренд годовых температур в районе озера (+1,2 °С/100 лет) был вдвое выше среднего для Земли тренда (+0,6 °С/100 лет). Статистический анализ показал наличие кроме кратковременных (2–7 лет) также длительных внутривековых (около 20 лет) циклов, с выраженными фазами увеличения и уменьшения. В XX веке выделяются два полных цикла (1912–1936 и 1937–1969) и фазы двух неполных циклов (уменьшение от 1896 к 1911 и увеличение после 1970). Фаза увеличения в конце столетия отличалась аномально большой продолжительностью (25 лет) и ростом температуры воздуха (на 2,1 °С).

Статистически значимая тенденция повышения температуры воздуха в XX столетии была характерна для большинства сезонов на Байкале (рис. 2). Ее значения зимой, весной и летом были равны соответственно 2,0; 1,4 и 0,8 °С за 100 лет. Слабая положительная тенденция в течение осени (0,5 °С) оказалась статистически ненадежной. Среди отдельных месяцев максимальное повышение температуры воздуха за столетие (2,2–2,3 °С) приходилось на декабрь и январь, минимальное (0,2–0,4 °С) – на август, сентябрь и октябрь.

Внутривековая цикличность отмечена во все сезоны года, но близость характеристик циклов (границы и продолжительности циклов и их фаз) сохранялась только для годовых, весенних и летних температур. С начала 1970-х до середины 1990-х гг. температура воздуха повышалась заметно во все сезоны года: в среднем на 3,5 °С зимой (на 4 °С в январе и феврале) и на 1,3; 1,5 и 1,0 °С соответственно весной, летом и осенью. Потепление в зимние месяцы в течение этого периода, как и на протяжении всего столетия, вносило наиболее заметный вклад в увеличение средней годовой температуры воздуха. Можно предположить, что фаза роста температуры в последнем внутривековом цикле сменилась с середины 1990-х фазой ее понижения. Такая тенденция заметна в изменении годовой температуры и температуры осенью и зимой. В течение теплых сезонов (весна и лето) температурное повышение сохранялось до 2004 г. (см. рис. 2).

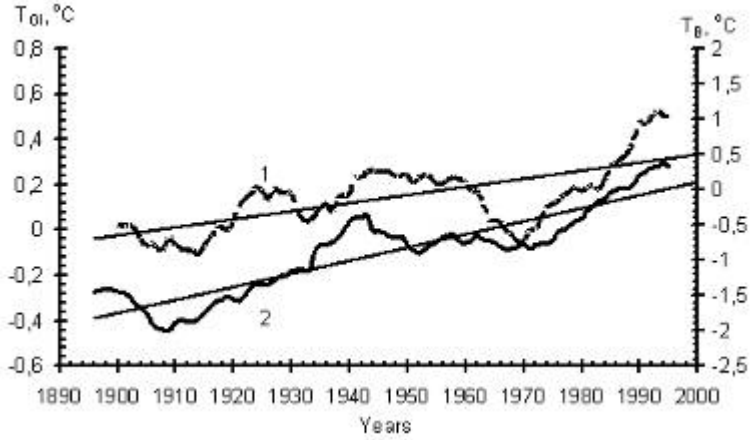


Рис. 1. 10-летние скользящие значения и тренд годовой температуры воздуха в Южном Байкале (T_B, 1) и глобальной температуры (T_G, 2)

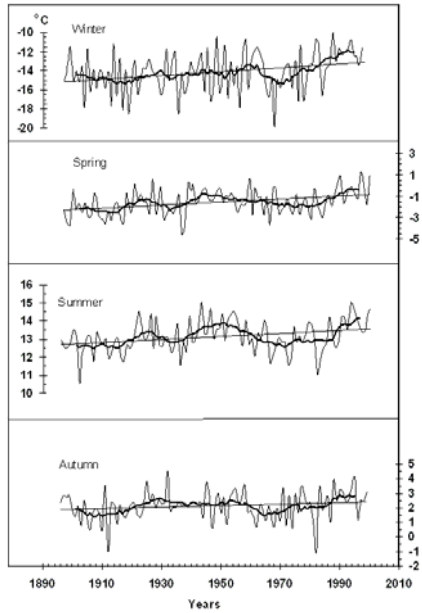


Рис. 2. 10-летние сглаженные значения и тренд температуры воздуха на станции Бабушкин в отдельные климатические сезоны года

Следствием глобального потепления в XX столетии было повышение температуры поверхностных слоев воды, тесно связанное с изменением температуры воздуха (Шимараев, Домышева, 2002; Троицкая и др., 2003). За последние 50 лет средняя за май – сентябрь температура поверхности воды сначала незна-

чительно понижалась от 1950-х к 1970-м годам, а затем резко возрастала к середине 1990-х гг. Повышение температуры воды в 1970–1995 гг. в средней и северной частях озера происходило быстрее, чем в южной (соответственно на 0,54–0,60 и 0,25–0,35 °С за 10 лет). Температура последнего, самого теплого десятилетия в XX столетии превысила температуру в 1964–1975 гг. на 0,9–1,5 °С в южной и на 1,8–2 °С в средней и северной частях озера.

Различие механизмов передачи тепла определяет разную реакцию верхнего (до глубины 300 м) и глубинного слоев воды озера Байкал на климатические изменения (Шимараев, 1996). Температурная конвекция в верхней зоне и динамические процессы обеспечивают относительно быстрый теплообмен его вод, и поэтому межгодовые изменения средней за теплый период (май – сентябрь) температуры воды на поверхности и в слое 0–300 м оказываются близки. Соотношение между средней температурой слоя 0–300 м и T_B хорошо описывается эмпирической моделью В. И. Верболова (Верболов и др., 1965). Применение этой модели и зависимости между T_B и температурой воздуха позволяет восстанавливать тепловые характеристики Байкала за годы отсутствия регулярных измерений температуры воды (до 1940 г.). Результаты таких реконструкций (рис. 3) указывают на положительную долгосрочную тенденцию в изменении температуры воды в теплую часть года в Южном Байкале до глубины 300 м, а возможно, и 500.

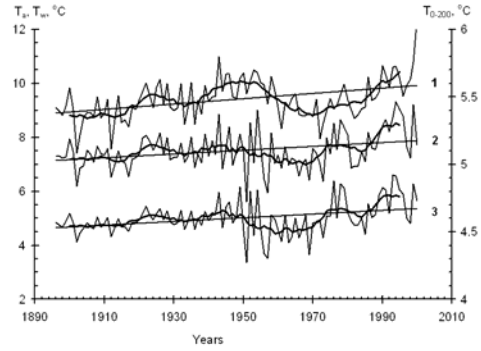


Рис. 3. Средняя за май – октябрь температура воздуха (1), поверхности воды (2) и слоя 0–200 м (3, рассчитанные значения) в Южном Байкале

Температура воды глубинной зоны (ниже 300–500 м) изменяется главным образом под влиянием двух процессов: турбулентной передачи тепла от верхних слоев и глубинной температурной конвекции весной и в начале зимы, которая ведет к охлаждению ее вод (Шимараев, Гранин, 1991). Активность этих разных по направлению потоков тепла слабо связана с теплообменом на поверхности и зависит в основном от динамического воздействия атмосферы на водную толщу. Оба потока могут отличаться по величине в разные годы, но компенсируют друг

друга в долгосрочном аспекте. Долгосрочные наблюдения (1971–1990) обнаруживают в глубинной зоне сезонные и межгодовые колебания температуры (5–7 лет) с амплитудой 0,05–0,07 ºС без тенденции более длительных изменений (Шимараев, 1996). Таким образом, результаты наблюдений и расчетов показывают постепенное увеличение водной температуры в верхних слоях Байкала в теплом полугодии на протяжении XX в. при сохранении относительной стабильности температуры в глубинной зоне озера.

Основная особенность изменений притока воды в течение столетия – его увеличение по мере потепления климата с трендом около 300 $м^3/с$ за 100 лет (рис. 4). Рост притока при повышении годовой температуры воздуха на 0,1 °С составляет ~ 1,5 % от его многолетнего значения. Эта величина близка к аналогичному коэффициенту (2 %) для суммы летних и осенних атмосферных осадков в прилегающих к озеру районах Забайкалья (Гройсман, 1981). Отношения внутривековых циклов температуры воздуха и водного притока имеют более сложный характер. Как и для температуры воздуха, в изменении притока выделяются внутривековые циклы продолжительностью 20–28 лет (1904–1929, 1930–1958 и 1959–1979) и неполный цикл, начинающийся в 1980 г. При сравнении их с циклами температуры до 1970 г. обнаруживается их явная противофазность: фазе повышения (понижения) одного из параметров соответствует противоположная по знаку фаза другого. Это явление, вероятно, вызвано внутривековой цикличностью процессов зонального западного переноса воздушных масс в теплую часть года, в которую атмосферные осадки обеспечивают приблизительно 80 % от годовой суммы притока воды в озеро. Интенсификация этих процессов увеличивает количество осадков и уменьшает температуру воздуха, в то время как ослабление усиливает континентальность климата, способствуя росту температуры и уменьшению атмосферных осадков и притока воды в озеро. Эта тенденция была нарушена в конце столетия: в течение 1980-х гг. воздушная температура и приток одновременно увеличились, вероятно, из-за изменения типа атмосферной циркуляции в регионе бассейна озера.

Потепление вызвало «смягчение» ледовой обстановки на озере Байкал (рис. 5). Начиная с середины XIX столетия замерзание наступало все позже, а вскрытие озера ото льда – раньше (Верболов и др., 1965; Magnusson et al., 2000). В 1896–2000 гг. тренд сроков замерзания (11 дней за 100 лет) превысил тренд сроков вскрытия (7 дней) из-за более активного потепления в конце осени – начале зимы (1,6 °С за 100 лет в ноябре – декабре) по сравнению со второй половиной весны (0,9 °С в апреле – мае). Продолжительность безледного периода увеличилась, а периода со льдом сократилась соответственно на 18 суток. Согласно наблюдениям 1950–2000 гг. максимальная толщина льда уменьшалась в среднем на 2,4 см за каждые 10 лет. Скорость изменения ледовых процессов возросла в период значительного потепления в 1970–1995 гг. Тренд сроков замерзания составил 4 дня, а сроков вскрытия – 6 дней за 10 лет. Продолжитель-

ность ледяного покрытия сокращалась на 10 дней за 10 лет, толщина льда уменьшалась приблизительно на 8,8 см за 10 лет.

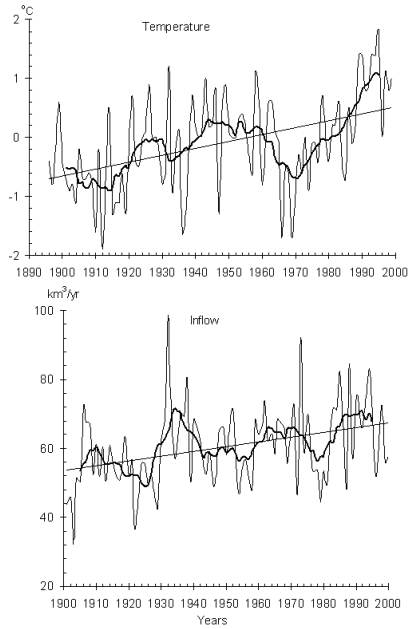


Рис. 4. 10-летние сглаженные значения годовой температуры воздуха на станции Бабушкин и суммарного годового притока воды в Байкале

Главным фактором, от которого зависят межгодовые изменения сроков замерзания ($Д_{зам}$), является температура воздуха в ноябре – декабре, влияющая на интенсивность потерь тепла с водной поверхности. Связь между 10-летними значениями этих характеристик описывается уравнением:

$$Д_{зам} = 6{,}78T_a + 94{,}6 \ (R^2 = 0{,}824, \ r = 0{,}91).$$

Температурные условия весны также влияют на процесс вскрытия ледяного покрова. Тренд изменения сроков вскрытия на Байкале в XX столетии составлял 7 дней, а температуры воздуха в апреле – мае 0,9 ºС за 100 лет. Однако корреляция между сроками вскрытия и температурой воздуха небольшая ($r \sim 0{,}4$), что было отмечено и другими исследователями (Livingston, 1999). Причиной этого является влияние на разрушение ледяного покрова весной не только теплового, но также и динамического фактора (ветер) (Kouraev et al., 2007).

Анализ последних данных о ледовом режиме Байкала вплоть до 2004 г. по наблюдениям на береговых станциях и со спутников показал развитие (с середины 1990-х гг.) тенденции к холодным зимам, с более ранним замерзанием, поздним вскрытием и возрастанием продолжительности ледового периода (Kouraev et al., 2007). Эти изменения связаны с долгопериодными циклами из-

менения температуры (потепление между 1970-ми и 1990-ми гг., сменившееся затем фазой похолодания).

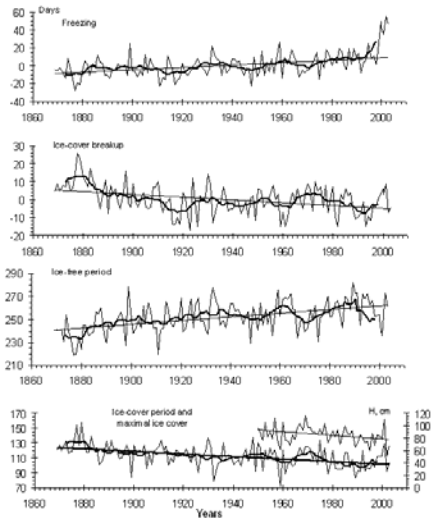


Рис. 5. Изменения времени замерзания (в днях от 1 декабря), времени разрушения ледяного покрова (в днях от 1 мая), продолжительности ледового и безледного периодов и максимальной толщины ледяного покрова (поселок Лиственичное, Южный Байкал). Текущие, 10-летние сглаженные значения и тренд

Проблема возможных изменений гидрологических условий озера в XXI веке тесно связана с проблемой глобальных изменений климата. Информация о ледовом режиме ряда озер и рек в северном полушарии (Magnusson et al., 2000) косвенно показывает, что потепление имеет место в последние 150 лет (или даже 450 лет, по наблюдениям на озере Сува в Японии). Эта тенденция, обусловленная влиянием естественных факторов, вероятно, сохранится также в XXI столетии. Эффект естественных факторов и прогрессирующего увеличения концентрации антропогенных газов в атмосфере учтен в оценке недавних и предстоящих климатических тенденций. Численное моделирование глобального климатического развития в XXI в., включая упомянутый фактор, показывает, что повышение глобальной температуры воздуха по сравнению с доиндустриальным периодом (начало XX столетия) может достигнуть 2 °C к 2025 и 4 °C к 2100 г. (Кондратьев, 1992; Костина, 1997). Однако фактический рост температуры может составить только половину этих значений из-за увеличения облачности, повышающей отражение солнечной радиации (Костина, 1997).

Примем за основу эти ориентировочные оценки, а также соотношения между ростом региональной (озеро Байкал) и глобальной температуры воздуха (2:1) и изменением длительности ледостава в зависимости от температуры (15

дней на 1 °С) в XX столетии. В этом случае можно ожидать, что годовая температура воздуха на Байкале повысится от 1900 к 2025 г. на 2 °С, к 2100 на 4 °С, продолжительность ледостава сократится соответственно на 1 и 2 месяца и к концу столетия составит в Южном и Среднем Байкале 56–60, а в Северном 76 дней. Так как межгодовые колебания длительности ледостава превышают 40–50 дней в 10 % случаев, можно ожидать в конце XXI столетия появления зим с кратковременным или неустойчивым ледоставом. Такие же оценки получаются и при использовании осредненного (по величинам приращения температуры воздуха) сценария изменения климата от 2000 к 2100 г. (рис. 6). Согласно палеоклиматическим данным и расчетам на модели общей циркуляции атмосферы, двойное увеличение концентрации CO_2 в атмосфере может привести к увеличению атмосферных осадков на широте Байкала в северном полушарии на 5–10 % (Будыко, 1986; Кондратьев, 1992). Величина приращения притока, наиболее вероятно, останется в пределах того же самого интервала 5–10 %.

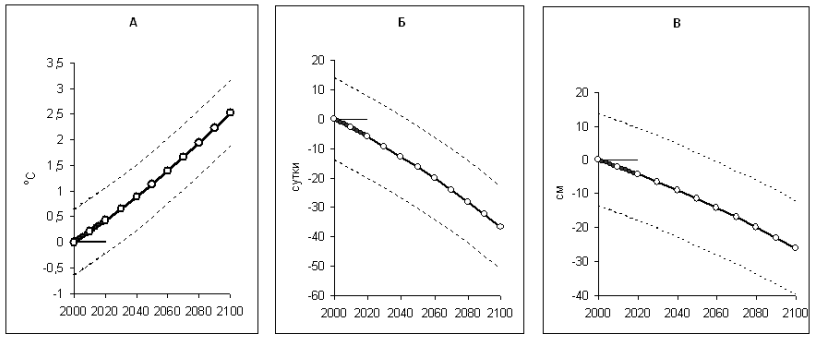


Рис. 6. Оценочный прогноз изменения годовой температуры воздуха (А), продолжительности ледового периода (Б) и толщины льда (В) в Южном Байкале от 2000 к 2020 г. и к концу XXI столетия. Пунктирная линия определяет границы изменчивости, соответствующие стандартному отклонению

При изучении воздействия климатических колебаний глубоких озер исследователи обычно обращают внимание на изменение таких абиотических параметров, как температура воды, ледовый режим и др. Между тем последствия этого воздействия могут быть более серьезными из-за влияния климата на биологические процессы и, следовательно, на содержание биогенных элементов в водной толще. Особенно интересно в этой связи поведение растворенного кремния. Роль кремния в экосистеме Байкала связана с его участием в жизнедеятельности диатомовых водорослей и формировании донных отложениях, содержащих остатки отмершего планктона. Отметим, что биогенный кремний в донных отложений рассматривается как один из главных индикаторов климатических изменений во Внутренней Азии за последние сотни тысяч и миллионы лет (Грачев и др., 1997; The Baikal Drilling Project, 1998).

Рассмотрены изменения растворенного кремния в период аномального потепления на Байкале в конце XX столетия (Домышева и др., 1998; Домышева, 2001; Шимараев и др., 1999; Шимараев, Домышева, 2002, 2004). Регулярные наблюдения на Байкале выявили большое снижение его содержания в этот период во всей водной толще озера. С 1995 до 2001 г. содержание кремния уменьшилось на 200 ± 18 г/м^2, т.е. на 28 % относительно начального запаса (~ 730 г/м^2). По данным об изменении концентрации кремния были рассчитаны средние значения его потока в верхние слои из глубинных горизонтов в 1995–2001 гг. Величина этих потоков (25–38 гSi/м^2 в год в разных частях озера) превысила в 4–5 раз приток кремния с водами рек (7,4 гSi/м^2).

Сокращение запаса кремния в Байкале в 1995–2001 гг. могло быть вызвано только активным развитием диатомовых водорослей с последующим поступлением элемента в донные отложения. Это предположение подтверждается наблюдениями. Так, значительное возрастание биомассы водорослей весной, летом и осенью в 1990–1997 гг. по сравнению с холодным периодом 1964–1974 гг. отмечено по наблюдениям у поселка Большие Коты в Южном Байкале (Изместьева и др., 2001). 1990-е годы характеризовались также более частым возникновением лет с высокой урожайностью диатомовых водорослей в открытой части озера. Это наблюдалось в 1990, 1994, 1996 и 1997, как в 1999 и 2000 гг. (Бондаренко, 1997; Bondarenko, 1999).

Полученные результаты позволяют предполагать, что климатические изменения вызывают циклические изменения содержания растворенного кремния во всей водной толще озера (Шимараев, Домышева, 2004). В годы, близкие к максимуму внутривековых циклов климата, характеризующихся значительным развитием диатомовых водорослей (как в 1990-х), количество кремния, вовлеченного в цикл экосистемы, существенно превышает его поступление с реками. В эти годы активное развитие диатомовых водорослей обеспечивается в основном за счет запасов этого элемента в водной толще. В результате запас кремния существенно уменьшается. Компенсация этих потерь за счет притока элемента с водами рек и сокращения урожайности диатомовых водорослей должна происходить в течение периодов спада и минимумов внутривековых климатических циклов. Данные о динамике растворенного кремния в озере указывают на меняющуюся скорость его накопления в донных отложениях Байкала даже в пределах коротких исторических циклов, сопоставимых с ритмами климата масштаба десятилетий.

Что касается главных компонентов ионного состава, трудно обнаружить возможные недавние изменения их концентрации в озере Байкал (Грачев, 2002), которые вызваны процессами, происходящими в его бассейне (Вотинцев, 1973). Это объясняется значительным (приблизительно в 400 раз) превышением объема водных масс озера над ежегодным речным притоком и относительно быстрым вертикальным смешением водных масс (в течение 10–30 лет) (Weiss et al., 1991; Hohmann et al., 1998; Коденев и др., 1998).

Работы поддержаны грантом РФФИ № 04-05-64839.

Summary

Historic data on ice phenomena occurring in Lake Baikal, the Angara River and some other lakes and rivers in the northern hemisphere demonstrate active warming, at least, since the mid 19th century (Mangusson et al., 2000). During the time of instrumental observations (1896–2006), the rise of air temperature caused delay of Lake Baikal freezing, as well as shortening of the period of ice cover (Shimaraev et al., 2002). The river inflow into the lake increased slowly and the temperature of upper water layers rose in summer.

Within the "secular" trend of hydrological characteristics there are observed intrasecular (10–30 years) oscillations caused by atmospheric circulation. Changes of activity of the North Atlantic oscillations (NAO) in winter provoke adequate changes in air temperature, ice regime and water temperature in spring and summer. The NAO effect became stronger in the second half of the 20th century, especially after 1970 when the intensity of high atmospheric pressure of the Siberian region weakened with the rise of NAO indices. In 1970–1995, the duration of winter ice cover shortened, and the ice thickness decreased. The water temperature was the highest in the 1990ies during the whole 20th century. In 1996–2006, with the decline NAO activity there was observed reverse changes in tendencies of these characteristics.

The following picture may be observed assuming "temperate" scenario of climate changes: by 2100 beginning from 2000, the duration of winter ice cover will shorten by 35–37 days, and the ice thickness will decrease by 25 cm. There is a probability of winters with short and even unstable ice cover. With the rise of water temperature in summer (by 1–1.5 °C) spring convention will start earlier, while autumn convection – later. Major mechanisms of exchange will be preserved which will lead to renewal of deep and near-bottom waters, their low temperature and high concentration of oxygen. The water inflow into Lake Baikal may increase by 5–10 %. However, it should be remembered that there will be a possibility of its decrease with the rise of evaporation level in the lake basin.

The effect of anomalous warming in the late 20th century on dynamics of concentration of dissolved silicon and composition of summer zooplankton was observed.

Список литературы

Bondarenko N. 1999. Floral shift in the phytoplankton of Lake Baikal, Siberia: Recent dominance of Nitzschia acicularis // Plankton Biol. Ecol. 46 (1). P. 18–23.

Gronskaya T. P., Lemeshko N. A., Arvola L., Jarvinen M. 2002. Lakes of European Russia and Finland as indicators of climate change // World resource Review. Vol. 14, № 2. P. 189–203.

Hohmann R., Hofer M., Kipfer R., Peeters F., Imboden D. M., Baur H., Shimaraev M. N. 1998. Distribution of helium and tritium in Lake Baikal // J. Geophys. Res. 103(C6). P. 12823–12838.

IPCC: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. 1996 / Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A., Maskel K. (eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press. 572 p.

Kouraev A. V., Semovski S. V., Shimaraev M. N., Mognard N. M., Legresy B., Remy F. 2007. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: Relation to air temperature, dynamical, and other factors // Limnol. Oceanogr. 52(3). P. 1268–1286.

Livingston D. M. 1999. Ice break in Southern Baikal and its relationship with local and regional air temperatures in Siberia and the North Atlantic Oscillation // Limnol. Oceanogr. 44(6). P. 1486–1497.

Magnusson J. J., Webster K. E., Assel R. A., Bowser C. J., Dillon P. J., Eaton J. G., Evans H. E., Fee E. J., Hall R. I., Mortsch L. R., Schindler D. W., Quinn F. H. 1997. Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region // Hydrological Processes. Vol. 11. P. 825–871.

Magnusson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingston D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. 2000. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere // Science. Vol. 289. P. 1743–1746.

Sherstyankin P. P., Khlystov O. M., Alekseev S. P., Dobrotvorskii A. N., Abramov A. N., Kolotilo L. G., Tarasyuk Yu. F., Khrebtov A. A., Anosov V. S., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. 2003. Electronic bathymetric map of Lake Baikal // Recent methods and means of oceanological investigations: Materials of the VIII Intern. Conf. Part I. Moscow. P. 265–273.

Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P. 1994. Physical Limnology of Lake Baikal: a review. BICER, Irkutsk; Okayama. 81 p.

The Baikal Drilling Project Group. 1998. A continuous record of climate changes for the last five million years from the bottom sediments of Lake Baikal // Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics). 39, 2. P. 139–156 (135–152).

Weiss R. F., Carmack E. C., Koropalov V. M. 1991. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. № 6311. P. 665–669.

Афанасьев А. Н. 1967. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: Наука. 231 с.

Бондаренко Н. А. 1997. Структура и продукционные характеристики фитопланктона озера Байкал: Автореф. … канд. биол. наук. Борок: Ин-т биологии внутренних вод им. Папанина. 23 с.

Будыко М. И. 1986. Антропогенное изменение климата // Природа. № 8. С. 14–21.

Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н. 1965. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.; Л.: Наука. 373 с.

Вотинцев К. К. 1973. Прогноз качества вод озера Байкал до 2000 года // Теория и методы прогноза изменений географической среды. Иркутск. С. 39–40.

Грачев М. А., Лихошвай Е. В., Воробьева С. С. и др. 1997. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика. Т. 38, № 5. С. 957–980.

Грачев М. А. 2002. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 154 с.

Гройсман П. Я. 1981. Эмпирические оценки связи процессов глобального потепления и похолодания с режимом увлажнения территории СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. № 5. С. 86–95.

Домышева В. М. 2001. Закономерности пространственного распределения и динамика кислорода и биогенных элементов в глубоководной области Байкала: Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Иркутск: Ин-т географии СО РАН. 22 с.

Домышева В. М., Шимараев М. Н., Горбунова Л. А., Голобокова Л. П., Коровякова И. В., Жданов А. А., Цехановский В. В. 1998. Кремний в озере Байкал // География и природные ресурсы. № 4. С. 73–81.

Изместьева Л. Р., Павлов Б. К., Шимараева С. В. 2001. Современное состояние экосистемы озера Байкал и тенденции его изменения // Тез. докл. VIII съезда гидробиол. о-ва РАН. Т. 1. Калининград, 16–23 сент. 2001 г. Калининград. С. 12–14.

Коденев Г. Г., Шимараев М. Н., Шишмарев А. Т. 1998. Определение времени обновления глубинных вод Байкала с использованием химических трассеров // Геология и геофизика. Т. 39, № 6. С. 842–850.

Кондратьев К. Я. 1992. Глобальный климат. СПб.: Наука. 359 с.

Костина Е. Е. 1997. Глобальное изменение климата и его возможные последствия: Обзор. Владивосток: Дальнаука. 102 с.

Троицкая Е. С. , Шимараев М. Н., Цехановский В. В. 2003. Многолетние изменения температуры поверхности воды в Байкале // География и природные ресурсы. № 2. С. 47–50.

Филатов Н. Н. 1998. Колебания уровня крупных озер Европы и изменчивость климата // ДАН. Т. 359, № 2. С. 255–257.

Шимараев М. Н., Гранин Н. Г. 1991. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. Т. 321, № 2. С. 381–385.

Шимараев М. Н. 1996. Тепло- и массообмен в Байкале: Дис. в виде науч. докл. … д-ра геогр. наук. Иркутск: Ин-т географии СО РАН. 48 с.

Шимараев М. Н., Домышева В. М., Верболов В. И., Гранин Н. Г., Жданов А. А., Гнатовский Р. Ю., Цехановский В. В., Горбунова Л. А., Семовский С. В., Коровякова И. В. 1999. Гидрофизические процессы и распределение растворенного кремния в озере Байкал // Геология и геофизика. Т. 40, № 10. С. 1502–1505.

Шимараев М. Н., Домышева В. М. 2002. О динамике содержания растворенного кремния в озере Байкал // ДАН. Т. 387, № 4. С. 541–544.

Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В. 2002а. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // ДАН. Т. 383, № 3. С. 397–400.

Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В. 2002б. Климат и гидрологические процессы в Байкале в XX столетии // Метеорология и гидрология. № 3. С. 71–78.

Шимараев М. Н., Домышева В. М. 2004. Климат и многолетняя динамика содержания кремния в озере Байкал // Геология и геофизика. Т. 45, № 3. С. 302–308.

Тезисы

Abstracts

Effects of Climate Change on River Flows and Groundwater Recharge in the Uk: Impacts on Water Resources

S. Wade* and J.-Ph. Vidal`**

*HR Wallingford, Howbery Park, Benson Lane, Crowmarsh
Wallingford, OXON, OX10 8BA, UK
Email: sdw@hrwallingford.co.uk
**Compagnie Nationale du Rhône, Engineering Office
Water and Environment Department
E-mail: j.vidal@cnr.tm.fr

This paper will provide an overview of research outputs from a UK water industry and Environment Agency research project "Effects of climate change on river flows and groundwater recharge". The research involved:

- The development of climate scenarios based on six Global Climate Models (GCMs) for the A2 emission scenario (Vidal, Wade, 2007).
- The development of methods for incorporating uncertainties related to the choice of GCM, hydrological model structure and parameters.
- Hydrological modelling of 70 UK catchments to determine the changes in monthly river flow.
- The development of simple guidelines for resource assessment to be used by water companies as part of their medium term (30 year) Water Resources Plans.

The UK temperature record shows that 2006 was the warmest year on record and the five warmest years in the UK record (since 1850) were 2006, 2003, 2004, 2002 and 2005. There is clear evidence of an upward trend in UK temperatures over the 1850 to 2006 period (see http://www.metoffice.gov.uk/ for a range of press releases and summaries for 2006) that is unlikely to be due to natural factors. However, similarly clear trends do not exist in the UK flow record and considerable uncertainty remains with regards to the impacts of climate change on future river flows, groundwater recharge and water resource availability.This research project developed monthly "flow factors" and "recharge factors" based on hydrological modelling and a regression method for estimating flow factors in ungauged catchments. The overall pattern of future changes in flow was similar to previous assessments (e. g. Arnell, 2003), with increases in winter flows and decreases in summer flows. However, the inclusion of many GCMs provided a better understanding of uncertainties related to future flows that can now be included in water resources planning, thereby building resilience into water resources and drought risk management systems.

References

Arnell N. 2003. Effects of climate change on river flows and ground water recharge: UKCIP02 Scenarios. UKWIR Report 03/CL/04/2. ISBN: 1-84057-286-8.

Vidal J.-Ph., Wade S. D. A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK // Intern. J. of Climatology (forthcoming).

Изменчивость притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада гидроузлов: природная цикличность и влияние изменений климата

С. Е. Беднарук

ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра» («Центр Регистра и Кадастра»)
Федеральное агентство водных ресурсов
Москва, 127550, ул. Прянишникова, 2а, стр. 2
E-mail: bse@waterinfo.ru

Волжский бассейн является одним из крупнейших речных бассейнов мира, занимая площадь около 1,4 млн км^2. Здесь проживает более 40 % населения Российской Федерации и производится более половины промышленной и сельскохозяйственной продукции страны. В 30–80-х гг. прошлого века на основных руслах реки Волги и ее главного притока – реки Камы были построены 11 крупных гидроузлов с водохранилищами общей полезной емкостью около 80 км^3 (при среднемноголетнем объеме стока Волги в створе замыкающего каскад Волгоградского гидроузла около 260 км^3). В результате зарегулирования стока Волги кардинальным образом изменился ее гидрологический режим. В целях частичной компенсации этих изменений для уникального природного комплекса нижней Волги (Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги) с начала эксплуатации каскада водохранилищ осуществляются так называемые специальные весенние попуски через Волгоградский гидроузел в интересах рыбного и сельского хозяйства.

В работе анализируется изменение приточности к водохранилищам каскада за весь период его существования (почти 50 лет), влияние этих изменений на параметры специальных весенних попусков и регулирование режимов работы гидроузлов каскада в целом. Особое внимание уделяется изменениям, имевшим место в последние годы, включая 2007-й.

На основе рассмотрения разностной интегральной кривой суммарного притока воды к водохранилищам каскада выделяются маловодный и многоводный периоды, в течение которых дефицит или избыток стока достигал величины двух норм годового стока. Выдвигается гипотеза о природных циклах речного стока в бассейне Волги и их параметрах.

Обсуждается изменение внутригодового стока в бассейне, отмечается явная тенденция к увеличению стока осенне-зимней межени и сокращению половодного стока и стока летней межени.

Перечисленные изменения притока к водохранилищам могут привести (и уже ведут) к необходимости существенного пересмотра правил и схем регулирования режимов работы гидроузлов и вызвать целый ряд экологических и экономических проблем. Вместе с тем накопленный до настоящего времени фактический материал не позволяет сделать уверенные выводы о влиянии как природ-

ной цикличности, так и изменений климата на изменчивость притока к водохранилищам каскада. Однако, по мнению автора, ближайшие 15–20 лет позволят получить достаточные обоснования для оценки воздействия указанных факторов на речной сток в бассейне Волги.

Variability of Water Inflow to the Reservoirs of Volga-Kama Waterworks Cascade: Natural Recurrence and Climate Change Influence

S. E. Bednaruk

Centre of Russian Waterworks Inventory and State Water Cadastre
Federal Agency of Water Resources
Pryanishnikova Str., 2a, build 2, Moscow 127550, RussiaRussia
E-mail: bse@waterinfo.ru

Volga River basin is one of the largest river basins in the world with the total watershed area of 1.4 million sq. km. More then 40 % of the Russian Federation population lives there and more than a half of the national industry and agriculture output is produced.

In the 30^{th}–80^{th} of the last century 11 large waterworks facilities have been built on the main channels of the Volga River and its main tributary – Kama River with total operational capacity of the corresponding water reservoirs about 80 cu. km (the mean annual flow at the site of the last in the cascade Volgograd dam is about 260 cu. km). As a result of Volga flow regulation its water regime changed crucially. For the partial compensation of these changes to the unique ecosystem of the Lower Volga (Volga-Akhtuba Floodplain and Volga Delta), the so called Special spring-time releases of water through Volgograd waterworks facility in the interests of the fishery and agriculture have being made annually since accomplishment of its construction.

The changes of water inflow to the cascade reservoirs are analyzed for the whole period of the cascade existence (nearly 50 years). The influence of these changes on the Special releases pattern and on the regulation of the water regimes of the whole cascade is also considered. A special attention is paid to the changes occurred in a last few years, including 2007.

Based on the analyses of the differential integral curve of total inflow to the cascade reservoirs, low and high flow periods, during which the deficit and surplus of the river flow had reached the volume of two mean annual flows, are defined. The hypothesis on the natural cycles of the Volga river flow and its parameters is put forward.

The changes of the seasonal pattern of the river runoff in the basin are discussed. The apparent trend to the increase of the winter runoff and the decrease of the spring runoff is pointed to.

The mentioned changes in the inflow to the cascade reservoirs may lead to the necessity of the deep reconsideration of the existing rules and patterns of the water-works operation and may cause a number of ecological and economic problems.

At the same time, the current level of available data is not sufficient to make a very sound conclusion on the influence of the natural recurrence as well as the climate changes on the reservoirs inflow. Still the author thinks that in the nearest 15–20 years the necessary proof can be obtained.

Климатические изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России по данным инструментальных наблюдений

Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова

ГУ Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН
Москва, 107258, ул. Глебовская, 20Б
E-mail: gruza@newmail.ru

Метеорологические наблюдения в России начаты более 250 лет тому назад. Однако для надежных оценок изменений климата имеются данные с 90-х гг. XIX в. для западной части территории России и лишь с 1936–1939 гг. для страны в целом.В докладе изменения температуры приземного воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX в. анализируются по данным инструментальных наблюдений. Изменения температуры, осредненные по территории России, сопоставляются с глобальными изменениями. Оценки особенностей климатических изменений в регионах России рассматриваются с 1936 г. В числе климатических параметров, кроме температуры и осадков, рассматриваются некоторые показатели их экстремальности. Наиболее детально анализируются тенденции изменений климатических параметров после 1975 г., когда наиболее ярко проявились изменения, связанные с влиянием антропогенного роста концентрации парниковых газов.

Climatic changes in the air temperature and atmospheric precipitation over the territory of Russia from the instrumental records

G. V. Gruza and E. Ya. Rankova

Institute of Global Climate and Ecology (IGCE) of Poshydromet and PAS
Glebovskaya Str., 20B, Moscow 107258, Russia
E-mail: gruza@newmail.ru

Meteorological observations in Russia are begun more 250 years ago. However available data enable us to receive reliable climate changes assessments only from 90th of 19th century for the western part of the Russian territory, and only from 1936–1939 for the country as a whole.Climate changes in surface air temperature and atmospheric precipitation over the territory of Russia for 20-th century are analyzed here as based on observed data. Spatial averaged temperature trends are compared to global ones. Regional assessments are considered since 1936. Among climatic variables some parameters of the temperature and precipitation extremes are considered too. Climate changes tendencies after 1975 are most in details analyzed due to anthropogenic forcing of increasing greenhouse gases concentration is most brightly shown for this period.

Современные климатические изменения в Сибири

М. В. Кабанов

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
Томск, 634055, Академический пр., 10/3
E-mail: kabanov@imces.ru

В результате статистического анализа накопленных в мировой сети инструментальных данных выявлены закономерности наблюдаемых климатических изменений в Сибирском регионе. Показано, что наблюдаемое потепление в Сибири за последний климатический (30-летний) период характеризуется неоднородной субрегиональной структурой с мезомасштабными очагами ускоренных темпов потепления до 0,5 °С/10 лет. Тренды приземного атмосферного давления за тот же период имеют менее контрастную субрегиональную структуру с уменьшением среднегодового давления до 0,2–0,4 гПа/10 лет. Во временной изменчивости климатических параметров за прошедшее столетие по результатам вейвлет-анализа выделены масштабы периодичностей в 10–12 лет и в 30–50 лет. По вейвлет-спектрам для приземной температуры Западной Сибири и индекса Северо-Атлантического колебания выявлена их корреляционная связь в 1940–1990 гг. с временным сдвигом до семи лет в отдельные годы. Этот климатический феномен объясняется возможными инерционными механизмами океанического переноса тепла. По результатам анализа наземных и аэрокосмических инструментальных наблюдений обсуждаются климатические эффекты сибирских болот (на примере Большого Васюганского болота).

Contemporary Climate Changes in Siberia

M. V. Kabanov

Institute of Monitoring of Climatic
and Ecological Systems SB RAS
Akademichesky pr., 10/3, Tomsk 634055, RussiaRussia
E-mail: kabanov@imces.ru

Applying statistical analysis to instrumented data accumulated in the world meteorological network, we revealed regularities of climatic changes observed in Siberian region. It was shown that warming, observed in Siberia over last climatic period (30 years), is characterized by inhomogeneous subregional structure with mesoscale spots having accelerated warming rates up to 0.5 °C/10 years. Trends of surface pressure for the same period have lesser contrast subregional structure with decrease of annual mean pressure down to 0.2–0.4 hPa/10 years.

Wavelet analysis applied to time variability of climatic parameters over the past century found out periodicities with the scales of 10–12 and 30–50 years. Comparing wavelet spectra of surface temperature in West Siberia and North-Atlantic Oscillation index, we revealed their correlation in 1940–1990 with time shift up to 7 years. This climatic phenomenon could be explained by possible inertia mechanisms in oceanic heat transfer.Based on results of ground and airborne and spaceborne instrumented observations, we discuss climatic influence of Siberian bogs (using Great Vasyugan Bog as an example).

Моделирование гидрологии поверхности с использованием модели климатитеской системы

В. Н. Крупчатников, А.И. Крылова, Ю.В. Мартынова

Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 6
E-mail: vkrup@ommfao1.sscc.ru

Гидрологический цикл на поверхности включает перехват воды растительностью, инфильтрацию, поверхностный сток, накопление воды в почве и в снеге. Эти процессы непосредственно связаны с биофизикой и оказывают влияние на температуру, осадки и поверхностный сток. Общий сток (поверхностный и подповерхностный дренаж) направляется вниз по течению к океанам с помощью маршрутной модели речного стока. Модель речного стока основана на идеях TOPMODEL.

Модель речного стока подключена к Модели Поверхности Земли (ИВМиМГ СО РАН) для использования в гидрологических исследованиях и для улучшенного воспроизведения взаимодействия системы океан – морской лед – поверхность земли – атмосфера в Модели Климатической Системы (ИВМ/РАН). Мы построили эту модель на сетке с разрешением 1 градус. Модель поверхности интерполирует поверхностный сток, полученный от одномерной модели гидрологии поверхности (2.8*2.8 град.) на сетку модели речного стока с 1 градусным разрешением. Здесь представлены результаты 1°x1° моделирования для бассейна реки Томь с использованием результатов глобального моделирования гидрологии поверхности (модель ИВМиМГ СО РАН). При моделировании глобального климата использовались данные AMIP с 1979 до 1993.

Modelling of Surface Hydrology Using Climate System Model

V.N. Krupchatnikoff, A.I. Krylova and Yu.V. Martynova

Institute computational mathematics
and mathematical geophysics, SB RAS
Pr. Ac. Lavrentiev, 6, Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: vkrup@ommfao1.sscc.ru

The hydrologic cycle over land includes interception of water by plant foliage and wood, throughfall and stemflow, infiltration, runoff, soil water, and snow. These are directly linked to the biogeophysics and also affect temperature, precipitation, and runoff. Total runoff (surface and sub-surface drainage) is routed downstream to oceans using a river routing model. River routing model is based on TOPMODEL ideas.

A river routing model is coupled to the Land Surface Model (ICMMG SB RAS) for hydrological applications and for improved land-ocean-sea ice-atmosphere coupling in the Climate System Model (INM/RAS). We have implemented this model on a 1-degree grid. Land model interpolates the total runoff from the column hydrology (2.8 by 2.8 degree) to the river routing 1-degree grid. Pictures we shown here are results from a regional 1° by 1° simulation (River Tom basin) using global ICMMG LSM. The model is driven with AMIP data from 1979 to 1993.

Академик Михаил Иванович Будыко и его вклад в развитие современной науки о климате

Г. В. Менжулин

Центр междисциплинарных исследований по проблемам
окружающей среды РАН
Санкт-Петербург, 191187, Набережная Кутузова, 14
E-mail: inenco@mail.neva.ru

Академик Михаил Иванович Будыко – один из наиболее крупных российских ученых 20-го столетия в области наук об окружающей среде; труды его широко известны в нашей стране и за рубежом. Исследовательская деятельность М. И. Будыко началась в 1942 году в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, где он в 1954 году он стал самым молодым директором в ее истории. В 1950-е годы, ему удалось решить одну из важнейших проблем климатологии, сформулированную в конце 19-ого столетия о составлении, как говорил А. И. Воейков, «приходно-расходной книги преобразований солнечной энергии на Земле». Эту задача была решена М. И. Будыко, опубликовавшего атласы теплового баланса Земного шара и монографию “Тепловой баланс земной поверхности”, которые, по выражению известного современного американского ученого С. Манабе, стали своеобразной «библией» для климатологов всего мира. Она переведена во многих странах и в 1958 году отмечена Ленинской премией.

Результаты исследований теплового баланса Земли и атмосферы были положены М. И. Будыко в основу нового научного направления – физической климатологии, которая стала одной из наиболее актуальных наук о Земле. С использованием ее методик, стало возможным решить важнейшие проблемы, среди которых, проблема изменений климата в прошлом, настоящем и будущем [1].

С 1975 года и до конца своих дней М. И. Будыко работал в Государственном гидрологическом институте, с конца 1990-х годов он был научным руководителем Центра междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН. Работы М. И. Будыко неоднократно отмечались высокими научными наградами, наивысшей из которых – международная премия «Голубая планета». Эта премия в области наук об окружающей среде эквивалентна Нобелевской премии [2]; ее присуждение свидетельствует о признании выдающегося вклада российского ученого, академика Михаила Ивановича Будыко в мировую климатологию и науку об окружающей среде [3].

Список литературы

Будыко М. И., Борзенкова И. И., Бютнер Э. К., Величко А. А., Винников К. Я., Голицын Г. С., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Кобак К. И., Кузьмин И. И., Легасов В. А., Менжулин Г. В. Антропогенные изменения климата. Л. Гидрометеоиздат, 1987. 407 с.

Изменения климата и их последствия. (*отв. ред. Г. В. Менжулин*). Материалы специальной сессии Ученого совета Центра международного сотрудничества по проблемам окружающей среды, посвященной награждению М. И. Будыко международной премией «Голубая Планета». СПб, Наука, 2002. 269 с.

Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. (*отв.ред. Г. В. Менжулин*). Сборник, посвященный 85-летию академика М. И. Будыко. СПб, Наука, 2005. 247 с.

Academician Mikhail Ivanovich Budyko and his Contribution to the Modern Science on Climate Changes

G. V. Menzhulin

Research Center for Interdisciplinary
Environmental Cooperation of RAS
Kutuzova Embankment, 14, St.Petersburg 191187, Russia
E-mail: inenco@mail.neva.ru

Academician Michael Ivanovich Budyko was one of the prominent Russian scientist of 20th century in environmental sciences, his works are widely known in Russia and abroad. M. I. Budyko's research activity has begun in 1942 in the A. I. Voyeykov Main Geophysical Observatory where he became in 1954 the youngest director in its history. In 1950-es, he was able to solve one of the major problems of classic climatology, which was formulated in the end of 19th century about the making up, as Voyeykov spoke, "the account book of solar energy transformations on the Earth". This problem has been solved by M. I. Budyko in 1956 when he published two atlases and monograph "The Heat Balance of the Earth's Surface". This book and atlases became, according on expression of known modern American scientist S. Manabe, the original "bible" for climatologists of all countries. It is translated into many languages and in 1958 marked off the Lenin prize, highest USSR national prize, which only once was awarded to the scientist in the field of atmospheric sciences.

Results of researches of the Earth's surface and atmosphere energy balance have been put by M. I. Budyko in a basis of a new scientific discipline – physical climatology, which became one of the most advanced and actual among other Earth sciences. With use of its methodologies and models, many important problems were began possible to solve, first of all, it is necessary to name the problem of climate changes in the past, present and future.

Since 1975 and up to the end of his life M. I. Budyko together with his disciples and colleagues worked in the State Hydrological Institute. From the end of 1990-es he was the supervisor of the Research Center for Interdisciplinary Environmental Cooperation of Russian Academy of Sciences, which from 2007 bears his name. Budyko's works in the field of climatology and atmospheric sciences were repeatedly marked by the high national and international scientific awards. His highest award is the Interna-

tional Premium “Blue Planet Prize”, which in the environmental sciences is equivalent to the Nobel Prize. This award testifies the recognition of the outstanding contribution of Academician M. I. Budyko to international climatology and environmental sciences.

References

Budyko M. I., Borzenkova I.I., Byutner E.K., Velichko A.A., Vinnikov.K.Ya., Golitsin G.S., Izrael Yu.A., Karol I.L., Kobak K.I., Kuzmin I.I., Legasov V.A.., Menzhulin G.V. Anthropogenic Climate Changes. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987. 407 p. (English Translation: Arizona University Press, 1990).

Climate Changes and their Consequences. (Ed.in Chief: G.V.Menzhulin). Materials of Special Session of Scientific Board of the Center of International Environmental Cooperation of RAS, Dedicated to Awarding of Academician M. I. Budyko with International “Blue Planet Prize”. SPb, Nauka, 2002. 269 p.

Modern Challenges of Ecological Meteorology and Climatology. (Ed.in Chief: G.V.Menzhulin). Composite Book Dedicated to 85th Anniversary of Academician M. I. Budyko. SPb, Nauka, 2005. 247 p.

Оценки изменений водных ресурсов под влиянием климатических изменений

Ю. Г. Мотовилов

ФГУП «Центр Российского регистра
гидротехнических сооружений
и государственного водного кадастра»
(«Центр Регистра и Кадастра»)
Федеральное агентство водных ресурсов
Москва, 127550, ул. Прянишникова, 2а, стр. 2
E-mail: motol@waterinfo.ru

Оценки влияния климатических изменений на водные ресурсы проводятся, главным образом, на основе математических гидрологических моделей с использованием различных сценариев климатических изменений. Анализ чувствительности гидрологических моделей к изменениям климатических характеристик позволил выявить два основных типа неопределенностей Первый из них связан с адекватностью гидрологических моделей, применяемых для различных климатических сценариев. Чтобы уменьшить эти неопределенности предлагается использовать совместный исторический и модельный подход для верификации моделей (Motovilov, 1998). Второй тип неопределенностей связан с климатическими сценариями, являющимися основой для моделирования изменений речного стока. Модели циркуляции атмосферы дают проекции климатических изменений на столетие, но точность таких прогнозов неизвестна.

К настоящему моменту проведено большое количество исследований влияния изменения климата на речной сток с использованием различных гидрологических моделей, сценариев климатических и антропогенных изменений, разных речных бассейнов в различных климатических зонах и на различных континентах. В месте с тем, сложилась парадоксальная ситуация: по многим речным бассейнам имеются оценки влияния климатических изменений на изменение водных ресурсов, порученные различными авторами на основании различных моделей, однако эти оценки у разных авторов нередко существенно отличаются, а иногда и противоречат даже по знаку тенденции изменений водных ресурсов. В связи с этим, в докладе обобщены результаты исследований (включая авторские) влияния изменения климата на речной сток, полученные с использованием различных методов и математических моделей, и выполнено сравнение этих результатов для ряда речных бассейнов страны (Волга, Дон, Днепр, Обь, Енисей, Лена).

Список литературы

Motovilov Yu. Simulation of climate change impacts on river runoff: coupling of historical and modelling approaches. Proc. of the Second Int. Conference on Climate and Water, Helsinki, August 1998, vol. 1, pp. 223-232.

Estimations of Climate Change Impacts on Water Resources

Yu. G. Motovilov

Centre of Russian Waterworks Inventory
and State Water Cadastre
Federal Agency of Water Resources
Pryanishnikova Str., 2a, build 2, Moscow 127550, Russia
E-mail: motol@waterinfo.ru

Estimations of climate changes effect on the water resources are carried out mainly on the basis of hydrological models using different climatic scenarios. Two main types of uncertainties were found by means of sensitivity analysis of hydrological models to changes of climatic characteristics. The first one depends on the adequacy of the hydrological model applied under the assumed climatic scenario. Coupled historical and modelling approaches may be used to reduce these uncertainties (Motovilov, 1998). The second type of uncertainties is connected with a climatic scenario, which forms the basis for runoff simulations. GCMs provide the climatic projections to the next century, but precision of such forecast is not known.

Many studies of climate change impact on river runoff have been carried out using different hydrological models, scenarios of climate changes, river basins, geographic zones, continents. Unfortunately we have paradox situation: estimations of climate changes impacts on the water resources developed by different scientists often differ drastically for the same river basins not only by magnitude but some times by sign of changes' trend. In this connection simulated results of climate change impact on the water resources are analysed and compared for several river basins (Volga, Don, Lena and others).

References

Motovilov Yu. Simulation of climate change impacts on river runoff: coupling of historical and modelling approaches. Proc. of the Second Int. Conference on Climate and Water, Helsinki, August 1998, vol. 1, pp. 223-232.

Реакция годового стока сибирских рек на климатические и антропогенные изменения

А. А. Онучин

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН
Красноярск, 660036, Академгородок
E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru

Характерной особенностью формирования стока северных сибирских рек является влияние на сток гидрологических условий предшествующего года. В условиях вечной мерзлоты и холодного гумидного климата определенная часть влаги, поступившая на водосборы, не успевает израсходоваться в текущем году и с наступлением отрицательных температур воздуха консервируется в переувлажненных почвогрунтах. Эта влага включается в активный влагооборот только на следующий год, принимая участие и в формировании стока. Роль атмосферных осадков и гидрологических условий предшествующего года в формирования стока возрастает с усилением черт морского климата в направлении с востока на запад и, особенно, в направлении с юга на север, а роль летних температур наоборот снижается.

Касаясь проблемы антропогенного влияния на характер формирования стока, следует отметить, что хозяйственная деятельность на водосборах является важным фактором его формирования и приводит к изменению водного баланса территорий с перераспределением расходной части как в сторону увеличения суммарного испарения и снижения стока, так и наоборот, в зависимости от характера антропогенного воздействия и геофизических условий. При интенсивном сельскохозяйственном использовании территорий, масштабных рубках главного пользования, крупных лесных пожарах антропогенное воздействие и природные нарушения лесной растительности могут стать основным фактором, определяющим условия формирования стока.

Годовой сток большинства рек Нижнего Приангарья, где масштабные рубки главного пользования начались в средине прошлого века, достоверно связан с временным фактором. Для реки Тасеева прослеживается тенденция увеличения стока со временем, начиная с 1975 г., в период, когда начали возрастать площади производных молодняков, возникших на месте сплошных вырубок $50^{х}$–$60^{х}$ годов прошлого столетия. Это связано с уменьшением перехвата твердых атмосферных осадков кронами лиственных пород по сравнению с хвойными. Аналогичная тенденция прослеживается для рек Иркинеевой, Муры и Чадобца с той лишь разницей, что она стала проявляться после 1984 и 1986 г.г., поскольку освоение лесных ресурсов в бассейнах этих рек началось позднее.

Анализ генезиса годового стока позволяет датировать начало масштабных антропогенных нарушений на водосборах. При этом изменение генезиса формирования стока может служить в качестве критерия рационального землепользо-

вания. Речной сток интегрирует изменения земного покрова на всей площади водосборов, гидрологические последствия которых могут иметь разный знак и компенсировать друг друга. В связи с этим предлагаемый метод диагностики генезиса стока предпочтительнее использовать на водосборах малых и средних рек в относительно сходных природных условиях.

Таким образом, несмотря на то, что роль климата в формировании годового стока является ведущей, неклиматические факторы (лесная растительность, почвы, размеры и геологические особенности водосборов) также имеют большое значение. Обе группы факторов влияют на сток взаимообусловлено, вследствие чего проявляются синергетические эффекты, позволяющие оценить возможности регулирования стока таежных рек посредством лесохозяйственных мероприятий с учетом фоновой погодно-климатической ситуации.

The Response of the Annual Runoff of Siberian Rivers to Climatic and Human-Caused Changes

A. A. Onuchin

V.N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru

A characteristic feature of northern Siberian river runoff is that its dependence on the hydrological conditions of the previous year. The presence of permafrost combined with humid climate results in that a certain part of the total moisture precipitated in a given catchment remains unused in the current year and stays accumulated in wet soil under below-zero air temperatures. This moisture becomes involved in active moisture cycling and contributes to river runoff only next year. The importance of the previous-year precipitation and hydrological conditions in river runoff development increases with increasing marine climate features proceeding east-westward and particularly from south to north, while the role of summer air temperatures decreases.

Regarding anthropogenic impacts on runoff development, it should be noted that human activity within river catchment can result in water changes of balance of these areas, which can be evident, depending on human activity type and geophysical conditions, either in increasing total evaporation and decreasing runoff, or vice versa.

Taseyeva river was determined to have been increasing its runoff with time since 1975, when secondary young stands began to extend on the 1950-1960s clearcut areas. This runoff increase can be attributable to a lower deciduous stand canopy capability to intercept falling snow as compared to conifers. A similar trend was exhibited by Irkenyeva, Mura, and Chadobets rivers. The results of our analysis of annual runoff genesis permit to date the start of large-scale human-caused catchment disturbances. Changes in river runoff genesis can be based upon in land use decision-making. River runoff reflects catchment land cover changes, which can be either posi-

tive, or negative and compensate each other. Therefore, the proposed method of runoff genesis analysis is more effective for catchments of small or moderately long rivers found under fairly similar environmental conditions.

While climate has the key role in annual runoff development, non-climatic factors, such as forest vegetation, soil, catchment size and geological characteristics, are also important. Climatic and non-climatic factors have a combined influence on channel runoff and, as a result, synergetic effects occur, which allow to assess possibilities of taiga channel runoff regulation by planning forestry treatments based on background weather and climatic situations.

Отклик водных ресурсов Карелии на климатические изменения

Н. Н. Филатов, Ю. А. Сало, Л. Е. Назарова

Институт водных проблем Севера КНЦ РАН
Карелия, Петрозаводск, 185030, просп. А.Невского, 50
E-mail: yuris@nwpi.krc.karelia.ru

Основная цель данного исследования – оценка изменений регионального климата и отклика на них водных экосистем крупнейших озер Европы, а также Белого моря. Исследование включало анализ продолжительных многолетних данных основных климатических характеристик (температура приземного воздуха, осадки суммарное испарение, индекс континентальности, речной сток и др.). Представлены результаты оценки изменчивости гидрологического режима как отдельных рек и озер, так и исследуемой территории в целом. В результате статистического анализа выявлены существенные изменения регионального климата, водного баланса, уровня воды крупнейших озер Европы (Ладожского и Онежского) за период с 1880 по 2004 г.г., а также притока речных вод в Белое море. Установлено, что хронологические ряды годовой температуры воздуха, осадков и суммарного испарения с территории Карелии за 120-летний период содержат значимый положительный линейный тренд, при этом для суммарного речного стока за указанный период характерна тенденция к снижению. Существенные изменения климата региона за указанный период повлияли на сокращение периода со снежным покровом на водосборах и увеличение безледоставного периода на акватории озер. Возможные в 2010-2050 г.г. пространственно-временные изменения основных характеристик регионального климата и водного режима оценены с использованием результатов численных экспериментов на модели ECHAM4/OPYC3 для двух сценариев изменения глобального климата IPCC.

Response of Water Resources of Karelia on Climate Changes

N.N. Filatov, Yu.A. Salo and L.E. Nazarova

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre RAS
A.Nevskogo, 50, Petrozavodsk185030
Karelia Republic, , Russia
E-mail: yuris@nwpi.krc.karelia.ru

The main aim of the present study is to estimate the regional climate change and response of water ecosystems of largest lakes of Europe and White Sea. This study it was include the analysis of long-time data from multi-year records of basic climatic parameters (air temperature, precipitation, evapotranspiration, index of continentality,

river runoff, etc.). Variability of the hydrological regime of individual rivers and lakes, as well as the study area at large related to the regional climate change is presented and discussed. As the result of the statistical analysis of the climate, water balance and water level for the largest lakes of Europe (Ladoga and Onego) and White Sea over the period 1880-2004, their noticeable changes were detected. It was found that time series of annual air temperature, precipitation and evapotranspiration over a 120-year period contain significant positive linear trends, and river runoff contains a negative trend for the given period. Considerable climate changes in the region in those years are manifest also in a shorter period of snow cover in the catchments and a longer ice-free period on the lakes. Potential changes (spatial and temporal) in the regional climate and hydrologic regime for the period 2010-2050 were estimated using the results of numerical experiments with the ECHAM4/OPYC3 model and for two IPCC scenarios of the global climate change.

Заключение и рекомендации конференции

Международная конференция со школой-семинаром «Гидрологические последствия изменений климата» была проведена Институтом водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук (ИВЭП СО РАН) по инициативе и при поддержке Британского Совета в рамках программы Британского Совета по изменению климата и приурочена к 50-летию Сибирского отделения РАН.

Основной целью конференции было обсуждение состояния исследований по проблеме прогнозирования гидрологических последствий изменений климата, результатов этих исследований и обмен опытом в их проведении. Важной целью конференции было установление долгосрочных научных связей между учеными Великобритании и России, ведущими исследования по современным проблемам климатологии и гидрологии.

Тематика конференции:

- Современные методы оценки влияния климатических изменений на гидрологические процессы в реках, озерах и водохранилищах.
- Опыт применения этих методов и результаты оценки возможных гидрологических изменений вследствие вариаций и изменений климата для гидрологических объектов различного типа и масштаба.
- Гидрологические изменения как результат глобальных и региональных климатических изменений.
- Воздействие климатических изменений на водные ресурсы, включая как количественный, так и качественный аспекты.
- Влияние изменений климата на возникновение экстремальных гидрологических явлений (наводнений, маловодий на реках и т. п.).

Значительное внимание было уделено рассмотрению указанных вопросов применительно к водным объектам и гидрологическим процессам в условиях Сибири и Севера.

На заключительной дискуссии были затронуты также следующие вопросы:

- о перспективах научного сотрудничества между учеными Великобритании и России по изучению рассматривавшихся проблем (в том числе, в исследованиях применительно к северным регионам Евро-Азиатского континента);
- о подготовке Руководства по разработке и выбору расчетных сценариев для анализа гидрологических последствий изменений климата;
- о создании баз гидрометеорологических данных для конкретных научных проектов;

- о методологических проблемах сопряжения климатических и гидрологических моделей;
- об учете влияния изменений климата на ледотермический режим и качество воды в озерах и водохранилищах.

Отмечая высокий научный и организационный уровень проведенной конференции, участники считают необходимым обратить внимание на организацию и проведение исследований в следующих направлениях:

1. В дальнейших работах по анализу изменчивости речного стока, моделированию его поведения под влиянием изменений климата и прогностическим оценкам такого рода следует обратить особое внимание на изменения речного стока не только для больших водосборов в целом, но также и на его возможные изменения по длине рек, в крупных притоках в наиболее заселенных регионах страны с активной хозяйственной деятельностью.

2. Изучение влияния климатических изменений на сезонное распределение стока, частоту возникновения экстремальных ситуаций на реках.

3. Изучение процессов формирования меженного стока, в частности, выяснение механизма взаимодействия между поверхностными и подземными водами.

4. Исследования реальных механизмов формирования стока с учетом масштабного эффекта.

5. Учет фактора неопределенности в задачах об оценке влияния климатических изменений на гидрологические процессы, сток рек и водные ресурсы.

6. Оценки уязвимости гидрологических систем к изменению климата.

7. Изучение влияния климатических изменений на формирование гидроледотермического режима рек, озер и водохранилищ.

8. Считать целесообразным организацию специализированного международного проекта по сравнению гидрологических моделей (аналогично PILPS = Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes) на основе единого набора входных данных (гидрологических и метеорологических), которые предполагается использовать при оценке воздействия изменений климата на гидрологические процессы.

9. Изучить и оценить вклад природной изменчивости климата в современное потепление.

10. Разработать руководство по выработке сценариев, имея в виду варианты моделирования климатических изменений и большие размеры водосборных бассейнов в России.

11. При проведении исследований учитывать интересы водохозяйственной практики.

12. Считать важным установление научного сотрудничества (на регулярной основе) между учеными России и Великобритании по изучению актуальных проблем влияния вариаций и изменений климата на гидрологические процессы и совместное проведение двусторонних конференций и совещаний в этих целях.

Академик О. Ф. ВасильевПрофессор Н. У. Арнелл

Conclusions and Recommendations of the Conference

The British-Russian conference «Hydrological Impact of Climate Change» has been conducted by the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences by the initiative and with the support of the British Council within the framework of the British Council Programme on Climate Change and devoted to the 50th anniversary of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

The main goal of the conference was to discuss the current knowledge on the topic of the prediction of hydrological impacts of climate change, to report the results of relevant investigations and to exchange experiences concerning these. One of the purposes of the conference was to establish long-term scientific cooperation between UK and Russian scientists, leading to research on contemporary issues of climate change in hydrology.

Themes of the conference were:

- Modern methods for assessment of climate change influence on hydrological processes in rivers, lakes and reservoirs.
- Experience obtained in the assessment of possible hydrological consequences of climate change (and variation) for hydrological objects of different types and sizes (scales).
- Hydrological impacts as a result of global and regional climate changes or variability.
- Climate change and water resources.
- Influence of climate change on extreme hydrological events (floods, low water periods, etc.).

Special attention was paid to exploring the above issues for hydrological objects and processes in Siberian and Northern environments.

During the final discussion the following issues were also addressed:

- Prospects of scientific cooperation between UK and Russian scientists in joint studies of the issues under consideration at the conference (including studies related to northern regions of the Euro-Asian continent),
- Preparation of a Handbook on the development and selection of calculation scenarios for the analysis of hydrological consequences of climate changes,
- Creation of hydrometeorological databases for specific scientific projects,

- Methodological problems of overlapping of climatic and hydrological models,
- Influence of climate changes on the hydroicethermic regime and water quality of lakes and reservoirs.

The participants noted the high scientific and organizational level of the conference, and consider that it is necessary to pay attention to the organization and carrying out of research in the following directions:

1. Ongoing work aimed at the analysis of variability in river runoff, modelling its behaviour under the influence of climate change and prognostic estimations, with special attention paid to changes in river runoff not only in the lower reaches of greater rivers but also to possible changes over the river's length, in large tributaries and in the most populated and economically active regions.

2. Studying the influence of climatic changes on the seasonal distribution of river runoff, the occurrence of extreme situations on rivers, including winter runoff, low water periods and floods.

3. Studying of the processes connected with low flow and, in particular, revealing the mechanism of interaction between surface and ground waters.

4. Research on the actual mechanisms of runoff formation taking into account scale effects.

5. Taking into account the uncertainty factor in solving problems related to estimation of the influence of climatic change on hydrological processes, river runoff and water resources.

6. Estimation of the vulnerability of hydrological systems to climate change.

7. Studying of the influence of climatic change on the formation of the hydrophysical ice regime of rivers, lakes and reservoirs.

8. To consider the expedient organization of a specialized international project aimed at comparison of hydrological models (similar to PILPS = Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes) on the basis of a standard dataset of hydrological and atmospheric variables used for the estimation of the influence of climate changes upon hydrological processes.

9. To study the contribution of natural climate variability to modern warming trends.

10. Develop systematic guidelines for the application of scenarios, taking into account (i) bias in simulating climate and (ii) the large size of important Russian catchments.

11. To carry out research aimed at satisfying the interests of water resource managers, including dialogue with water resource managers concerning what they want to know and when they want to know it?

12. To consider as important the establishment of regular scientific cooperation between UK and Russian scientists on studying actual problems of the influence of variations and changes of climate on hydrological processes and jointly carrying out bilateral conferences and meetings for these purposes.

Professor Oleg F. Vasiliev

Professor Nigel W. Arnell

Организационный комитет

Сопредседатели:

О. Ф. Васильев, академик, Россия

Н. У. Арнелл, профессор, Великобритания

Заместитель председателя:

А. А. Атавин, к.т.н., Россия

Ученый секретарь:

С. Я. Двуреченская, к.х.н., Россия

Члены комитета:

М. И. Соколова, к.б.н., Россия
А. Н. Антипов, д.г.н., Россия
М. В. Болгов, д.т.н., Россия
Ю. И. Винокуров, д.г.н., Россия
В. Н. Крупчатников, д.ф.-м.н., Россия

Программный комитет

Сопредседатели:

О. Ф. Васильев, академик, Россия

Р. Дж. Мур, Великобритания

Члены комитета:

И. И. Мохов, член-корреспондент РАН, Россия
В. Ю. Георгиевский, д.г.н., Россия
А. В. Игнатов, д.г.н., Россия
В. Н. Крупчатников, д.ф.-м.н., Россия
С. М. Семенов, д.г.н., Россия

Organizing Committee

Co-Chairs:

Prof. O. F. Vasiliev, Russia

Prof. N. W. Arnell, UK

Deputy Chair:

Dr. A. A. Atavin, Russia

Scientific Secreatry:

Dr. S. Ya. Dvurechenskaya, Russia

Members:

Dr. M. I. Sokolova, British Council, Russia
Dr. A. N. Antipov, Russia
Dr. M. V. Bolgov, Russia
Dr. Yu. I. Vinokurov, Russia
Dr. V. N. Krupchatnikov, Russia

Programme Committee

Co-Chairs:

Prof. O. F. Vasiliev, Academician of RAS, Russia
R. J. Moore, UK

Members:

Prof. I. I. Mokhov, Corr. Member of RAS, Russia
Dr. V. Yu. Georgievsky, Russia
Dr. A. V. Ignatov, Russia
Dr. V. N. Krupchatnikov, Russia
Dr. S. M. Semenov, Russia

Авторский указатель
Author Index

A

Abasov, N. V. 42
Antipov, A. N. 50
Arnell, N. W. 12, 189

B

Balybina, A. S. 50
Bednaruk, S. E. 167
Bell, V. A. 27
Berezhnykh, T. V. 42
Blyth, E. 19
Bolgov, M. V. 91

C

Cole, S. J. 27

F

Filatov, N. 182

G

Georgievsky, V. Yu. 143
Gurza, G. V. 169
Gustokashina, N. N. 50

I

Ignatov, A. V. 68

K

Kabanov, M. V. 170
Khon, V. Ch. 136
Kichigina, N. V. 50
Kondratyev, S. A. 76
Krupchatnikov, V. 172
Krylova, A. 172
Kuskov, A. I. 121

L

Liubushin, A. A. 91
Lykosov, V. N. 84

M

Martynova, Yu. 172
Menzhulin, G. V. 175
Mokhov, I. I. 103
Moore, R. J. 27
Motovilov, Yu. G. 178

N

Nazarova, L. 182

O

Onuchin, A. A. 180
Ovchinnikova, T. E. 57

P

Penenko, V. V. 112
Preis, Yu. I. 121
Prudomme, C 34

R

Rankova, E. Ya. 169

S

Salo, Yu. 182
Semchukov, A. N. 57
Semenov, S. M. 128
Shiklomanov, I. A. 143
Shimaraev, M. N. 152
Shmakova, M. V. 76

T

Tsvetova, E. A. 112

V

Vasiliev, O. F. 57, 189
Vetrova, V. V. 42
Vidal, J.-Ph. 165

W

Wade, S. 165

Z

Zinoviev, A. T. 57

A

Абасов Н. В. 42
Антипов А. Н. 50

Б

Балыбина А. С. 50
Беднарук С. Е. 166
Бережных Т. В. 42
Болгов М. В. 91

В

Васильев О. Ф. 57
Ветрова В. В. 42

Г

Георгиевский В. Ю. 143
Гурза Г. В. 169
Густокашина Н. Н. 50

З

Зиновьев А. Т. 57

И

Игнатов А. В. 68

К

Кабанов М. В. 170
Кичигина Н. В. 50
Кондратьев С. А. 76
Крупчатников В. 172
Крылова А. 172
Кусков А. И. 121

Л

Лыкосов В. Н. 84
Любушин А. А. 91

М

Мартынова Ю. 172
Менжулин Г. В. 174
Мотовилов Ю. Г. 177
Мохов И. И. 103

Н

Назарова Л. Е. 182

О

Овчинникова Т. Э. 57
Онучин А. А. 179

П

Пененко В. В. 112
Прейс Ю. И. 121

Р

Ранькова Э. Я. 169

С

Сало Ю. А. 182
Семенов С. М. 128
Семчуков А. Н. 57

Ф

Филатов Н. Н. 182

Х

Хон В. Ч. 136

Ц

Цветова Е. А. 112

Ш

Шикломанов И. А. 143
Шимараев М. Н. 152
Шмакова М. В. 76

Список участников

Prof. Nigel W. Arnell
School of Geography
University of Southampton
Highfield
Southampton
SO17 1BJ
UK
Tel.: +44(0) 2380 594648
Fax: +44(0) 2380 593295
E-mail: n.w.arnell@soton.ac.uk

Dr. Eleanor Blyth
Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
OXON, OX10 8BB
UK
Tel: +44(0) 1491 692463
Fax: +44(0) 1491 692424
E-mail: emb@ceh.ac.uk

Robert J. Moore
Centre for Ecology
and Hydrology, Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
Wallingford, OXON, OX10 8BB
UK
Tel: +44(0) 1491 692262
Fax: +44(0) 1491 692424
E-mail: rm@ceh.ac.uk

Dr. Christel Prudhomme
Centre for Ecology
and Hydrology, Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
Wallingford, OXON, OX10 8BB
UK
Tel: +44 (0) 1491 69 2381
Fax: +44 (0) 1491 69 2424
E-mail: chrp@ceh.ac.uk

Dr. Steven Wade
HR Wallingford
Howbery Park, Benson Lane,
Crowmarsh
Wallingford, OXON, OX10 8BA
UK
Tel: +44 (0) 1491 822214
Fax: +44 (0) 1491 826352
E-mail: sdw@hrwallingford.co.uk

Атавин Аркадий Анатольевич
к.т.н., директор Новосибирского филиала
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Новосибирск 630090,
Морской пр., 2
Тел.: (383) 3308484
Факс/Тел.: (383) 3302005
E-mail: atavin@ad-sbras.nsc.ru

Беднарук Сергей Евстафьевич
директор ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра»
Москва 127550,
ул. Прянишникова, 2а, стр. 2
Тел.: (495) 9770461
E-mail: bse@waterinfo.ru

Борисенко Василий Иванович
заместитель руководителя
Верхне-Обское бассейновое водное управление
Новосибирск 630087,
ул. Немировича-Данченко, 167
Тел.: (383) 3460259
Факс: (383) 3461055
E-mail: bvi-77@mail.ru

Бережных Тамара Васильевна
к.г.н., ведущий научный сотрудник, заведующий сектором
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
Иркутск 660033,
ул. Лермонтова, 130
Тел.: (3952) 428961
Факс: (3952) 426796
E-mail: berejn@isem.sei.irk.ru

Васильев Олег Федорович
д.т.н., академик РАН, профессор, советник РАН
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Новосибирск 630090,
Морской пр., 2
Тел.: (383) 3308484
Факс: (383) 3302005
E-mail: vasiliev@ad-sbras.nsc.ru

Бобров Владислав Андреевич
к.г-м.н., ведущий научный сотрудник
Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Коптюга, 3
Тел.: (383) 3302307

Вахрушев Виктор Александрович
Верхне-Обское бассейновое водное управление
Новосибирск 630087,
ул. Немировича-Данченко, 167
Тел.: (383) 3465228
Факс: (383) 3461055
E-mail: bvu5@ngs.ru

Болгов Михаил Васильевич
д.т.н., заведующий лабораторией
Институт водных проблем РАН
Москва 119333, ул. Губкина, 3
Тел.: (495) 135 0406
Факс: (495) 135 5415
E-mail: bolgovmv@mail.ru

Винокуров Юрий Иванович
д.г.н., директор
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул 656038, ул. Молодежная, 1
Тел.: (3852) 6664055
Факс: (3852) 240396
E-mail: iwep@iwep.asu.ru

Вохминова Наталья Сергеевна
менеджер центра Британский Совет в Новосибирске
Новосибирск 630087,
пр. К. Маркса, 26/4
Тел.: (383) 3040144
Факс: (383) 3040144
E-mail: novosibirsk@britishcouncil.ru

Гранин Николай Григорьевич
к.г.н., заведующий лабораторией
Лимнологический институт СО РАН
Иркутск 664033,
ул. Улан-Баторская, 3
Тел.: (3952) 428182
Факс: (3952) 426405
E-mail: nick@lin.irk.ru

Георгиевский Владимир Юрьевич
д.г.н., заместитель директора
Государственный гидрологический институт
Санкт-Петербург 199053,
Васильевский остров,
2-я линия ВО, 23
Тел.: (812) 3233519
Факс: (812)3231028
E-mail: ggi2@mailbox.alkor.ru

Густокашина Надежда Николаевна
к.г.н., старший научный сотрудник
Институт географии
им. В. Б. Сочавы СО РАН
Иркутск 664033,
ул. Улан-Баторская, 1
Тел.: (3952) 422693
Факс: (3952) 422717
E-mail: nadya@irigs.irk.ru

Галахов Владимир Прокопьевич
к.г.н., старший научный сотрудник
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул 656038,ул. Молодежная, 1
Тел.: (3852) 666501
Факс: (3852) 240396
E-mail: iwep@iwep.asu.ru

Завалишин Николай Николаевич
к.ф.-м.н.
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Новосибирск 630099,
ул. Советская, 30
Тел./Факс: (383) 2222530
E-mail: monex@meteo.nso.ru

Гордов Евгений Петрович
д.ф.-.м.н., профессор
главный научный сотрудник
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск 634055,
Академический пр., 10/3
Тел.: (3822) 492187
Факс: (3822) 492537
E-mail: gordov@scert.ru

Занина Анастасия Сергеевна
лаборант-исследователь
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул 656038,
ул. Молодежная, 1
Тел.: (3852) 666501
E-mail: iwep@iwep.asu.ru

Зиновьев Александр Тимофеевич
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул 656038,
ул. Молодежная, 1
Тел.: (3852) 240214
Факс: (3852) 666474
E-mail: zinoviev@iwep.asu.ru

Кабанов Михаил Всеволодович
член-корреспондент РАН,
профессор, директор
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск 634055,
Академический пр., 10/3
Тел.: (3822) 492252
Факс: (3822) 492150
E-mail: kabanov@imces.ru

Зыкин Владимир Сергеевич
к.г-м.н., заведующий лабораторией
Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии
им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Коптюга, 3
Тел.: (383) 3332923
E-mail: zykin@uiggm.nsc.ru

Казанцев Сергей Алексеевич
к.т.н., старший научный сотрудник
Объединенный институт геологии, геофизики
и минералогии
им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск 630090,
просп. Коптюга, 3
Тел.: (383) 3302591
E-mail: skaz@uiggm.nsc.ru

Игнатов Анатолий Васильевич
д.г.н., к.ф-м.н., ведущий научный сотрудник
Институт географии
им. В. Б. Сочавы СО РАН,
лаборатория гидрологии и климатологии
Иркутск 664033,
ул. Улан-Баторская, 1
Тел.: (3952) 422693
Факс: (3952) 422717
E-mail: ignatov@irigs.irk.ru

Кичигина Наталья Витальевна
к.г.н., научный сотрудник
Институт географии
им. В. Б. Сочавы СО РАН
Иркутск 664033,
ул. Улан-Баторская, 1
Тел.: (3952) 428275
Факс: (3952) 422717
E-mail: nkichigina@mail.ru, korytny@irigs.irk.ru

Костюков Василий Васильевич
д.ф.-м.н., заведующий отделом
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Новосибирск 630099,
ул. Советская, 30
Тел.: (383) 2222530

Крылова Алла Ивановна
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Лаврентьева, 6
Тел.: (383) 3306151
E-mail: alla@climate.sscc.ru

Кусковский Виктор Семенович
д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник
Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Коптюга, 3
Тел.: (383) 3332109
E-mail: kuskovskiy@ipgg.nsc.ru

Леженин Анатолий Александрович
старший научный сотрудник
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Лаврентьева, 6
Тел.: (383) 3306450
E-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Кондратьев Сергей Алексеевич
д.ф.-м.н., заместитель директора
Институт озероведения РАН
Санкт-Петербург 196105,
ул. Севастьянова, 9
Тел.: (812) 3870276
Факс: (812) 3887327
E-mail: Kondratyev@limno.org.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна
старший научный сотрудник
Институт водных и экологических проблем СО РАН
Барнаул 656038,
ул. Молодежная, 1
Тел.: (3852) 666501
Факс: (3852) 240396
E-mail: lov@iwep.asu.ru

Котельников Валерий Ильич
ученый секретарь
Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов
Республика Тыва, Кызыл 667007
ул. Интернациональная, 117А
Тел.: (394 22) 21853
Факс (39422) 21753
E-mail: tikopr@tuva.ru

Лыкосов Василий Николаевич
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник
Институт вычислительной математики РАН
Москва 119991,
ул. Губкина, 8
Тел.: (495) 9383915
Факс: (495) 9381821
E-mail: lykossov@inm.ras.ru

Мальцев Владимир Степанович
главный специалист-эксперт
Верхне-Обское бассейновое водное управление
Новосибирск 630087,
ул. Немировича-Данченко, 167
Тел.: (383) 3148915
Факс: (383) 3461055
E-mail: vobvu@vobvu.nsk.su

Мохов Игорь Иванович
член-корреспондент РАН,
д.ф.-м.н.,
заведующий лабораторией
Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН
Москва 119017,
Пыжевский пер., 3
Тел.: (495) 9516453
Факс: (495) 9531652
E-mail: mokhov@ifaran.ru

Менжулин Геннадий Викторович
д.т.н., профессор, заместитель директора
Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН
Санкт-Петербург 191187,
Набережная Кутузова, 14
Тел.: (812) 2732113
Факс (812) 2724265
E-mail: inenco@mail.neva.ru

Назарова Евгения Викторовна
главный специалист-эксперт
Верхне-Обское бассейновое водное управление
Новосибирск 630087,
ул. Немировича-Данченко, 167
Тел.: (383) 3464101
Факс: (383) 3464101
E-mail: ovr_nso@ngs.ru

Мотовилов Юрий Георгиевич
к.г.н., заместитель директора ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и государственного водного кадастра»
Москва 127550,
ул. Прянишникова, 2а, стр. 2
Тел.: (495) 6519597
E-mail: motol@waterinfo.ru, motol@pochta.ru

Немировская Лариса Гдальевна
к.г.н., старший научный сотрудник
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Новосибирск 630099,
ул. Советская, 30
Тел.: (383) 2222530

Онучин Александр Александрович
д.б.н., директор, Институт леса
им. В. Н. Сукачева СО РАН
Красноярск 660036,
Академгородок, 50
Тел.: (3912) 494447
Факс: (3912) 433686
E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru

Осуховская Юлия Николаевна
аспирант
Институт геохимии им.
А.П.Виноградова СО РАН
Иркутск 664058,
ул. Фаворского, 1а
Тел.: (3952) 511442
E-mail: julia7910@yandex.ru

Пененко Владимир Викторович
д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Лаврентьева, 6
Тел.: (383) 3306152
E-mail: penenko@sscc.ru

Прейс Юлия Ивановна
к.б.н., старший научный сотрудник
Институт мониторинга
климатических и экологических
систем СО РАН
Томск 634055,
Академический пр., 10/3
Тел.: (3822) 492352
Факс: (3822) 492352
E-mail: preisyui@rambler.ru

Сало Юрий Андреевич
к.г.н., старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
Республика Карелия
Петрозаводск 185031
пр. А. Невского, 50
Тел.: (8142) 576381
Факс: (8142) 578464
E-mail: yuris@nwpi.krc.karelia.ru

Семенов Сергей Михайлович
д.ф.-м.н, профессор, заместитель директора,
Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Москва 107258,
ул. Глебовская, 20Б
Тел.: (495) 1692411
Факс: (495) 1600831
E-mail:Serguei.Semenov@mtu-net.ru

Хон Вячеслав Чуненович
к.ф.-м.н., научный сотрудник
Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН
Москва 119017,
Пыжевский пер., 3
Тел.: (495) 9515387
E-mail: khon@ifaran.ru

Цветова Елена Александровна
к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН
Новосибирск 630090,
просп. ак. Лаврентьева, 6
Тел.: (383) 3306152

Шибанова Наталья Владимировна
менеджер проекта
Британский Совет в Москве
Санкт-Петербург,
Невский пр., 32
Тел.: (812) 7185060
Факс: (812) 7185061
E-mail:
natalia.shibanova@britishcouncil.ru

Чупикова Светлана Александровна
Тувинский институт комплексного
освоения природных ресурсов
Республика Тыва,
Кызыл 667007,
ул. Интернациональная, 117А
Тел.: (394 22) 21853
Факс (39422) 21753
E-mail: tikopr@tuva.ru

Юдин Михаил Серафимович
старший научный сотрудник
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск 630090,
пр. Лаврентьева, 6
E-mail: yudin@ommfao.sscc.ru

List of Participants

Professor Nigel W. ARNELL
School of Geography
University of Southampton
Highfield
Southampton
SO17 1BJ
UK
Tel.: +44(0) 2380 594648
Fax: +44(0) 2380 593295
E-mail: n.w.arnell@soton.ac.uk

Dr. Arkady A. ATAVIN
Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Morskoy Pr., 2, Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3308484
Fax/Phone:+7 383 3302005
E-mail: atavin@ad-sbras.nsc.ru

Sergey E. BEDNARUK
Centre of Russian Waterworks Inventory and State Water Cadastre
Federal Agency of Water Resources
Pryanishnikova Str., 2a, build 2,
Moscow 127550
RUSSIA
Phone: +7 495 9770461
E-mail: bse@waterinfo.ru

Dr. Mikhail V. BOLGOV
Water Problems Institute
Russian Academy of Sciences
Gubkina Str., 3, Moscow 119333
RUSSIA
Phone: +7 495 1350406
Fax: +7 495 1355415
E-mail: bolgovmv@mail.ru

Dr. Tamara V. BEREZHNYKH
L. A. Melentiev Energy Systems Institute
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Lermontova Str., 130,
Irkutsk 664033
RUSSIA
Phone: +7 3952 428961
Fax: +7 3952 426796
E-mail: berejn@isem.sei.irk.ru

Dr. Eleanor BLYTH
Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
OXON OX10 8BB
UK
Phone: +44(0) 1491 692463
Fax: +44(0) 1491 692424
E-mail: emb@ceh.ac.uk

Dr. Vladislav A. BOBROV
A.A. Trofimuk United Institute
for Geology, Geophysics
and Mineralogy
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Novosibirsk 630090
Pr. Koptyga, 3,
RUSSIA
Phone: +7 383 3302307

Vasily I. BORISENKO
The Upper-Ob Basin Water Authority
Nemirovicha-Danchenko Str., 167,
Novosibirsk 630087
RUSSIA
Phone: +7 383 3460259
Fax: +7 383 3461055
E-mail: bvu-77@mail.ru

Svetlana A. CHUPIKOVA
Tuva Institute for Exploration of
Natural Resources Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
Internatsionalnaya, 117A,
Kyzyl 66700, Tuva
RUSSIA
Phone: +7 394 2221853
Fax: +7 3942221753
E-mail: tikopr@tuva.ru

Dr. Vladimir P. GALAKHOV
Institute for Water and Environmental
Problems
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Molodezhnaya Str., 1,
Barnaul 656038
RUSSIA
Phone: +7 3852 666501
Fax: +7 3852 240396
E-mail: iwep@.iwep.asu.ru

Dr. Vladimir Yu. GEORGIEVSKY
State Hydrological Institute
Line 2 at Island Vas., 23,
St.-Petersburg 199053
RUSSIA
Phone: +7 812 3233519
Fax: +7 812 3231028
E-mail: ggi2@mailbox.alkor.ru

Prof. Yevgeny P. GORDOV
Institute of Monitoring of Climatic
and Ecological Systems Siberian
Branch, Russian Academy of Sciences
Akademichesky pr., 10/3,
Tomsk 634055
RUSSIA
Phone: +7 3822 492187
Fax: +7 3822 492537
E-mail: gordov@scert.ru

Dr. Nikolai G. GRANIN
Limnological Institute
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Ulan-batorskaya Str., 3,
Irkutsk 664033
RUSSIA
Phone: +7 3952 428182
Fax: +7 3952 426405
E-mail: nick@lin.irk.ru

Dr. Nadezhda N. GUSTOKASHINA
V. B. Sochava Institute of Geography
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Ulan-Batorskaya Str., 1,
Irkutsk 664033
RUSSIA
Phone: +7 3952 422693
Fax: +7 3952 422717
E-mail: nadya@irigs.irk.ru

Dr. Anatoly V. IGNATOV
V. B. Sochava Institute of Geography
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Ulan-Batorskaya Str., 1,
Irkutsk 664033
RUSSIA
Phone: +7 3952 422693
Fax: +7 3952 422717
E-mail: ignatov@irigs.irk.ru

Dr. Vyacheslav Ch. KHON
A. M. Obukhov Institute
of Atmospheric Physics
Pyzhevsky per., 3,
Moscow 119017
Phone: +7 495 9515387
E-mail: khon@ifaran.ru

Prof. Mikhail V. KABANOV
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Akademichesky pr., 10/3,
Tomsk 634055
RUSSIA
Phone: +7 3822 492252
Fax: +7 3822 492150
E-mail: kabanov@imces.ru

Dr. Natalia V. KICHIGINA
V. B. Sochava Institute of Geography
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Ulan-Batorskaya Str., 1,
Irkutsk 664033
RUSSIA
Phone: +7 3952 428275
Fax: +7 3952 422717
E-mail: nkichigina@mail.ru,
korytny@irigs.irk.ru

Dr. Sergei A. KAZANTSEV
A. A. Trofimuk United
Institute for Geology, Geophysics and Mineralogy
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Pr. Koptyga, 3,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3302591
E-mail: skaz@uiggm.nsc.ru

Dr. Sergei A. KONDRATIEV
Institute of Limnology
Russian Academy of Sciences
Sevastyanova Str., 9,
St.-Petersburg 196105
RUSSIA
Phone: +7 812 3870276
Fax: +7 812 3887327
E-mail:Kondratyev@limno.org.ru

Dr. Vasily V. KOSTYUKOV
Siberian Regional
Hydrometeorological Research Institute
Sovetskaya Str., 30,
Novosibirsk 630099
RUSSIA
Phone: +7 383 2222530

Dr. Valery I. KOTELNIKOV
Tuva Institute for Exploration
of Natural Resources
Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
Internatsionalnaya Str., 117A,
Kyzyl 66700, Tuva,
RUSSIA
Phone: +7 394 2221853
Fax: +7 3942221753
E-mail: tikopr@tuva.ru

Anatoly A. LEZHENIN
Institute of Computational
Mathematics and Mathematical
Geophysics Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
Pr. Lavrentyeva, 6,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3306450
E-mail: lezhenin@ommfao.sscc.ru

Dr. Alla I. KRYLOVA
Institute of Computational Mathemat-
ics and Mathematical Geophysics
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Pr. Lavrentyeva, 6,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3306151
E-mail: alla@climate.sscc.ru

Olga V. LOVTSKAYA
Institute for Water and Environmental
Problems Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
Molodezhnaya Str., 1,
Barnaul 656038
RUSSIA
Phone: +7 3852 666501
Fax: +7 3852 240396
E-mail: lov@iwep.asu.ru

Dr. Viktor S. KUSKOVSKIY
A. A. Trofimuk United
Institute for Geology, Geophysics and
Mineralogy
Siberian Branch, Russian Academy of
Sciences
Novosibirsk 630090
Pr. Koptyga, 3
RUSSIA
Phone: +7 383 3332109
E-mail: kuskovskiy@ipgg.nsc.ru

Prof. Vasily N. LYKOSOV
Institute for Numerical Mathematics
Russian Academy of Sciences
Gubkina Str., 8,
Moscow 119333
RUSSIA
Phone: +7 495 9383915
Fax: +7 495 9381821
E-mail: lykossov@inm.ras.ru

Dr. Vladimir S. MALTSEV
The Upper-Ob Basin Water Authority
Nemirovicha-Danchenko Str., 167,
Novosibirsk 630087
RUSSIA
Phone: +7 383 3148915
Fax: +7 383 3461055
E-mail: vobvu@vobvu.nsk.su

Robert J. MOORE
Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
Wallingford, OXON, OX10 8BB
UK
Phone: +44(0) 1491 692262
Fax: +44(0) 1491 692424
E-mail: rm@ceh.ac.uk

Prof. Gennady V. MENZHULIN
Research Center for Interdisciplinary Environmental Cooperation
Russian Academy of Sciences
Kutuzova Embankment, 14,
St.-Petersburg 191187
RUSSIA
Phone: +7 812 2732113
Fax: +7 812 2724265
E-mail: inenco@mail.neva.ru

Dr. Yury G. MOTOVILOV
Centre of Russian Waterworks Inventory and State Water Cadastre
Pryanishnikova Str., 2a, build 2,
Moscow 127550
RUSSIA
Phone: +7 495 6519597
E-mail: motol@waterinfo.ru,
E-mail: motol@pochta.ru

Prof. Igor I. MOKHOV
A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences
Pyzhevsky per., 3,
Moscow 119017
RUSSIA
Phone: +7 495 9516453
Fax: +7 495 9531652
E-mail: mokhov@ifaran.ru

Evgeniya V. NAZAROVA
The Upper-Ob Basin Water Authority
Nemirovicha-Danchenko Str., 167,
Novosibirsk 630087
RUSSIA
Phone: +7 383 3464101
Fax: +7 383 3464101
E-mail: ovr_nso@ngs.ru

Dr. Larisa G. NEMIROVSKAYA
Siberian Regional
Hydrometeorological
Research Institute
Sovetskaya Str., 30,
Novosibirsk 630099
RUSSIA
Phone: +7 383 2222530

Dr. Yulia I. PREIS
Institute of Monitoring of Climatic
and Ecological SystemsSiberian
Branch, Russian Academy of Sciences
Akademichesky pr., 10/3,
Tomsk 634055
RUSSIA
Phone: +7 3822 492352
Fax: +7 3822 492352
E-mail: preisyui@rambler.ru

Dr. Alexander A. ONUCHIN
V. N. Sukachev Institute of Forest
Academgorogok, 50,
Krasnoyarsk 660036
RUSSIA
Phone: +7 3912 494447
Fax: +7 3912 433686
E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru

Dr. Christel PRUDHOMME
Centre for Ecology and Hydrology,
Wallingford
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
Wallingford, OXON, OX10 8BB UK
Tel: +44 (0) 1491 69 2381
Fax: +44 (0) 1491 69 2424
E-mail: chrp@ceh.ac.uk

Yulia V. OSUKHOVSKAYA
A. P. Vinogradov Institute of
Geochemistry, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
Favorskogo Str., 1a,
Irkutsk 664058
RUSSIA
Phone: +7 3952 511442
E-mail: julia7910@yandex.ru

Dr. Yuri A. SALO
Nothern Water Problems Institute
Karelian Research Center Russian
Academy of Sciences
Pr. A. Nevskogo, 50,
Petrozavodsk 185031
Republic of Karelia, RUSSIA
Phone: +7 8142 576381
Fax: +7 8142 578464
E-mail:yuris@nwpi.krc.karelia.ru

Prof. Vladimir V. PENENKO
Institute of Computational
Mathematics and Mathematical
Geophysics, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
Pr. Lavrentyeva, 6,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3306152
E-mail: penenko@sscc.ru

Prof. Sergey M. SEMENOV
Institute of Global Climate
and Ecology of Roshydromet
Russian Academy of Sciences
Glebovskaya Str., 20B,
Moscow 107258
RUSSIA
Phone: +7 495 1692411
Fax: +7 495 1600831
E-mail:Serguei.Semenov@mtu-net.ru

Natalia V. SHIBANOVA
British Council, St Petersburg
Nevsky pr., 32,
St.-Petersburg 191186
RUSSIA
Phone: +7 812 7185060
Fax: +7 812 7185061
E-mail:
natalia.shibanova@britishcouncil.ru

Natalia S. VOKHMINOVA
British Council, Novosibirsk
pr. K. Marksa, 32,
Novosibirsk 630087
RUSSIA
Phone: +7 383 3040144
Fax: +7 383 3040144
E-mail: novosibirsk@britishcouncil.ru

Dr. Elena A. TSVETOVA
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Pr. Lavrentyeva, 6, Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3306152

Prof. Yuri I. VINOKUROV
Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Molodezhnaya Str., 1,
Barnaul 656038 RUSSIA
Phone: +7 3852 666055
Fax: +7 3852 240396
E-mail: iwep@.iwep.asu.ru

Viktor A. VAKHRUSHEV
The Upper-Ob Basin Water Authority
Nemirovicha-Danchenko Str., 167,
Novosibirsk 630087
RUSSIA
Phone: +7 383 3465228
Fax: +7 383 3461055
E-mail: bvu5@ngs.ru

Anastasiya S. ZANINA
Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Molodezhnaya Str., 1,
Barnaul 656038 RUSSIA
Phone: +7 3852 666501
E-mail: iwep@.iwep.asu.ru

Prof. Oleg F. VASILIEV
Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Morskoy pr., 2,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
Phone: +7 383 3308484
Fax/Phone:+7 383 3302005
E-mail:vasiliev@ad-sbras.nsc.ru

Dr. Nikolai N. ZAVALISHIN
Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute
Sovetskaya Str., 30,
Novosibirsk 630099
RUSSIA
Phone/Fax: (383) 2222530
E-mail: monex@meteo.nso.ru

Dr. Steven WADE
HR Wallingford
Howbery Park, Benson Lane,
Crowmarsh
Wallingford, OXON, OX10 8BA
UK
Phone: +44 (0) 1491 822214
Fax: +44 (0) 1491 826352
Email:
sdw@hrwallingford.co.uk

Dr. Alexander T. ZINOVIEV
Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Molodezhnaya Str., 1,
Barnaul 656038
RUSSIA
Phone: +7 3852 666474
Fax: +7 3852 240396
E-mail: zinoviev@iwep.asu.ru

Mikhail S. YUDIN
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Pr. Lavrentyeva, 6,
Novosibirsk 630090
RUSSIA
E-mail: yudin@ommfao.sscc.ru

Dr. Vladimir S. ZYKIN
A. A. Trofimuk United Institute for Geology, Geophysics and Mineralogy Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
Novosibirsk 630090,
pr. Koptyga, 3,
RUSSIA
Phone: +7 383 3332923
E-mail: zykin@uiggm.nsc.ru