

ISSN: 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 2

Выпуск 4



**ГИДРОСФЕРА.
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ****Том 2, Выпуск 4****Выходит 4 раза в год****ISSN 2686-7877 (print)****2686-8385 (online)****Учредители журнала**

Научно-исследовательский центр «Геодинамика»
Научно-производственное объединение
«Гидротехпроект»
Институт водных проблем Российской академии
наук

Главный редактор

академик РАН **Г.И. Долгих**, Дальневосточное
отделение Российской академии наук,
заместитель председателя (г. Владивосток,
Россия)

Заместители главного редактора

докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов**, Научно-
производственное объединение «Гидротехпроект»,
генеральный директор (г. Санкт-Петербург,
Россия)

член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**,
Институт водных проблем Российской академии
наук, директор (г. Москва, Россия)

канд. геол.-мин. наук, доц. **Н.А. Казаков**,
Научно-исследовательский центр
«Геодинамика», директор (г. Южно-Сахалинск,
Россия)

докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский
государственный педагогический университет
им. А.И. Герцена, декан факультета географии
(г. Санкт-Петербург, Россия)

Ответственный секретарь

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-
производственное объединение «Гидротехпроект»,
технический директор (г. Санкт-Петербург,
Россия), телефон +7(812)313-83-48, e-mail:
td@npogtp.ru.

**HYDROSPHERE.
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA
(GIDROSFERA.
OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)****Volume 2, Issue 4****Issued 4 times per year****ISSN 2686-7877 (print)****2686-8385 (online)****Founders**

Research Center «Geodynamics»
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
Institute of Water Problems of the Russian Academy
of Sciences

Editor-In-Chief

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Vice-chairman of the Far
Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(Vladivostok, Russia).

Deputy Editor-In-Chief

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences, Director of the
Institute of Water Problems of the Russian Academy
of Sciences (Moscow, Russia).

Nikolay A. Kazakov, Associate Professor, Director
of the Research Center «Geodynamics» (Yuzhno-
Sakhalinsk, Russia).

Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the
Faculty of Geography of the Herzen State
Pedagogical University of Russia (St. Petersburg,
Russia).

Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director
of the Scientific Production Association
«Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).

Executive Editor

Viktor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical
director of the Scientific Production Association
«Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia), tel.
+7(812)313-83-48, e-mail: td@npogtp.ru.

Редакционный совет

академик РАН **Г.И. Долгих**, Дальневосточное отделение Российской академии наук, заместитель председателя (г. Владивосток, Россия)

докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
 член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, Россия)

канд. геол.-мин. наук, доц. **Н.А. Казаков**, Научно-исследовательский центр «Геодинамика», директор (г. Южно-Сахалинск, Россия)

докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
 проф. **Ф. Вэй**, Институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, заместитель директора (г. Чунцин, КНР)

проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)

докт. **С. Фукс**, Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)

Редакционная коллегия

докт. биол. наук **В.Н. Безносков**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)

докт. геогр. наук **В.П. Благовещенский**, Институт географии Республики Казахстан, заведующий лабораторией природных опасностей (г. Алматы, Казахстан)

докт. физ.-мат. наук **Ф.Ф. Брюхань**, Московский государственный строительный университет, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук, с.н.с. **Т.А. Виноградова**, Санкт-Петербургский государственный университет, доцент кафедры гидрологии суши (г. Санкт-Петербург, Россия)

член-корреспондент РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, директор (г. Улан-Удэ, Россия)

Editorial Council

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Vice-chairman of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia).

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

Nikolay A. Kazakov, Ph.D., Associate Professor, Director of the Research Center «Geodynamics» (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).

Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University (St. Petersburg, Russia).

Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).

Viktor A. Objazov, Doctor of Science, Technical Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia).

Fangqiang Wei, Professor, Vice-Director of the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences (China)

Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)

Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria).

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (St. Petersburg, Russia)

Viktor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)

Fedor F. Bryukhan, Doctor of Science, professor of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia).

докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман**, Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрологии наводнений (г. Москва, Россия)

докт. геогр. наук, проф. **Г.Е. Глазырин**, Национальный университет Республики Узбекистан им. М. Улугбека, профессор (г. Ташкент, Узбекистан)

докт. физ.-мат. наук **В.К. Гусяков**, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией математического моделирования волн цунами (г. Новосибирск, Россия)

докт. **В. Джомелли**, Институт экологии и окружающей среды Национального центра научных исследований Франции, Университета Пантеон-Сорбонна и Университета Париж-Восток Кретьей, директор по исследованиям (г. Париж, Франция)

проф. **К. де Йонг**, Страсбургский университет, заведующая кафедрой международных отношений факультета географии и регионального планирования (г. Страсбург, Франция)

докт. физ.-мат. наук **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией вычислительной гидромеханики и океанографии (г. Южно-Сахалинск, Россия)

докт. геогр. наук, проф. **Н.А. Калинин**, Пермский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы (г. Пермь, Россия)

академик РАН **Б.М. Кизяев**, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, научный руководитель (г. Москва, Россия)

докт. геол.-мин. наук **А.М. Лехатинов**, МО «Тункинский район» Республики Бурятия, (г. Кырен, Россия)

канд. тех. наук **А.Е. Малашенко**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, первый заместитель директора, главный конструктор (г. Южно-Сахалинск, Россия)

канд. геогр. наук, доц. **М.Л. Марков**, Государственный гидрологический институт, заведующий

Pavel A. Chernous, Ph.D., Leading Researcher of the Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover of the Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).

Endon Zh. Garmaev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)

Boris I. Gartsman, Doctor of Science, Head of Flood Hydrology Department of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

Gleb E. Glaziryn, Professor, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Uzbekistan).

Viacheslav K. Gusiakov, Doctor of Science, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Tsunami Waves (Novosibirsk, Russia)

Vincent Jomelli, Ph.D., Research Director of the Institute of Ecology and Environment of the French National Center for Scientific Research, the University Panthéon-Sorbonne and the University Paris-Est Créteil (Paris, France)

Carmen de Jong, Professor, Head of International Relations at the Faculty of Geography and Regional Planning, University of Strasbourg (Strasbourg, France)

Nicolay A. Kalinin, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection of the Perm State University (Perm, Russia).

Boris M. Kizyaev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation (Moscow, Russia).

Anatoliy M. Lekhatinov, Doctor of Science, Municipality Tunkinsky District (Kyren, Russia).

Anatoliy Ye. Malashenko, Ph.D., deputy director of the Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).

Mikhail L. Markov, Associate Professor, Head of the Department of Forecasting Hydrological Processes and Experimental Hydrology of the State Hydrological Institute (St. Petersburg, Russia).

отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии (г. Санкт-Петербург, Россия)

академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии Республики Казахстан, директор (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **А.В. Панин**, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии (г. Москва, Россия)

академик НАН РК **И.В. Северский**, Институт географии Республики Казахстан, почётный директор; научный руководитель фундаментальных и прикладных исследований лаборатории гляциологии; вице-президент Международной гляциологической ассоциации (г. Алматы, Казахстан)

канд. геогр. наук, доцент **С.А. Сократов**, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, заместитель декана географического факультета по научной работе (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Е.А. Таланов**, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, профессор кафедры метеорологии и гидрологии (г. Алматы, Казахстан)

академик РАН **А.К. Тулохонов**, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, научный руководитель (г. Улан-Удэ, Россия)

канд. геогр. наук, доц. **С.С. Черноморец**, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук **П.А. Черноус**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)

канд. тех. наук **С.В. Шварёв**, Институт географии Российской академии наук, заведующий лабораторией геоморфологии (г. Москва, Россия)

докт. **С. Ямагучи**, Научно-исследовательский центр снега и льда Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям, старший научный сотрудник (г. Нагаока, Япония)

Akhmetkal R. Medeu, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Director of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan).

Andrey V. Panin, Doctor of Science, professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia).

Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of fundamental and applied researches of the Department of Glaciology of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan).

Sergey V. Shvarev, Ph.D., Head of the Laboratory of Geomorphology of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

Sergey A. Sokratov, Ph.D. in Environmental & Earth Sci., Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia).

Yevgeniy A. Talanov, Professor, Professor of the Meteorology and Hydrology Department Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan).

Arnold K. Tulokhonov, Academician of the Russian Academy of Sciences Scientific, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia).

Tatiana A. Vinogradova, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Hydrology of St. Petersburg University (St. Petersburg, Russia).

Satoru Yamaguchi, Ph.D., Chief Researcher of the Snow and Ice Research Division of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Nagaoka, Japan)

Andrei I. Zaitsev, Doctor of Science, Head of Laboratory of Computational Hydromechanics and Oceanography of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia).

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Кадацкой Марии Михайловны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.

Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019

ИЗДАТЕЛЬСТВО:

ООО НПО «Гидротехпроект»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Санкт-Петербург, 14-я линия В.О.
д. 97 пом. 3н.

Для почтовых отправлений: 199155 Санкт-Петербург, а/я 136, Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»

Тел. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru from technical editor **Mariya Kadatskaya**.

Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.

Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77-76914** from 11.10.2019

PUBLISHING:

Scientific Production Association «Gidrotechproekt»

EDITORIAL ADDRESS:

St. Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island,
97 of. 3n.

For corresponding: 199155 St. Petersburg, PO Box 136. Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»

Tel. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ.....	330
Роль ледовых явлений в динамике потоков на придельтовом участке Северной Двины С.В. Лебедева, Л.С. Одоев	330
МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ.....	347
Возможности оценки обеспеченности максимальных расходов рек Приангарья (на примере реки Ия) Б.И. Гарцман, Т.С. Губарева, Н.В. Кичигина.....	347
Assessing predictability of hydrological processes (on the example of frozen soil water content dynamics) Alexander N. Gelfan	365
Возможности краткосрочного прогнозирования стока малой реки с использованием методов машинного обучения В.М. Морейдо, Б.И. Гарцман, Д.П. Соломатин, З.А. Сучилина	375
Об изменении коэффициента редукции максимального модуля стока с увеличением площади водосбора С.М. Тумановская	391
МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	405
Исследование скорости искусственного грязевого селя на лабораторном стенде Н.А. Казаков, Д.А. Боброва, Е.Н. Казакова	405
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ	418

CONTENTS

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS.....	330
Ice impact on the flow dynamics the Northern Dvina River mouth area Serafima V. Lebedeva, Leonid S. Odоеv	330
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES	347
Possibilities of assessing the flood runoff probability in Angara region (Iya River as example) Boris I. Gartsman, Tatiana S. Gubareva, Natalia V. Kichigina	347
Assessing predictability of hydrological processes (on the example of frozen soil water content dynamics) Alexander N. Gelfan	365
Prospects for short-term forecasting of river streamflow from small watershed runoff using machine learning methods Vsevolod M. Moreido, Boris I. Gartsman, Dimitri P. Solomatine, Zoya A. Suchilina.....	375
On change of reduction factor of maximum runoff modulus with increase of catchment area Svetlana M. Tumanovskaya	391
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH	405
Study of the velocity of artificial mudflow on a laboratory stand Nikolay A. Kazakov, Darya A. Bobrova, Ekaterina N. Kazakova	405
AUTHOR GUIDELINES.....	420

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE:
FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 556.546

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.330

РОЛЬ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В
ДИНАМИКЕ ПОТОКОВ НА
ПРИДЕЛЬТОВОМ УЧАСТКЕ
СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

С.В. Лебедева^{1,2}, Л.С. Одоев¹

¹ФГБУ «Северное управление по
гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды», г. Архангельск, Россия;

²ФГБУ «Государственный океанографический
институт им. Н.Н. Зубова», г. Москва, Россия
hydrosima@gmail.com

ICE IMPACT ON THE FLOW
DYNAMICS THE NORTHERN
DVINA RIVER MOUTH AREA

Serafima V. Lebedeva^{1,2}, Leonid S. Odоеv¹

¹The Northern Agency for Hydrometeorology and
Environmental Monitoring, Arkhangelsk, Russia;

²Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov
State Oceanographic Institute", Moscow, Russia

hydrosima@gmail.com

Аннотация. Ледовые явления и их влияние на динамику потока на придельтовом участке реки Северная Двина рассмотрены на примере зимнего периода 2019-2020 годов. Мониторинг, расчеты и прогнозы гидрологических условий во время прохождения ледохода – актуальнейшие задачи для устьевой области реки Северная Двина. Гидрологический режим приливного многоустьевых устья очень сложен, а заторные явления – одни из самых трудных для количественного описания гидрологических явлений. Используемые статистические методики краткосрочных прогнозов не обновляются много лет. В данной работе проводится попытка реализации интегрированного подхода к изучению заторов, включающего натурные ледовые обследования, анализ космических снимков, материалы наблюдений на сети гидрологических постов и гидродинамическое моделирование. Для двумерного численного моделирования используется программный комплекс STREAM_2D CUDA, включающий блок для учета воздействия ледяного покрова.

Очевидно, что ледовые явления вносят значительные изменения в уровень и скоростной режим реки на устьевом участке реки

Abstract. The authors consider case of the winter period 2019-2020 as example of ice cover and ice jam influence on the flow dynamics in the section upstream the delta of the Northern Dvina River mouth area.

Hydrological monitoring, calculations and forecasts of the ice drift in the Northern Dvina River mouth area are actual practical tasks. The hydrological regime of a tidal river mouth is very complex phenomena and one of the most difficult for a quantitative description.

The authors implemented an integrated approach to study ice jams, including field ice surveys, satellite data analysis, data from the state hydrological monitoring system and hydrodynamic modeling. STREAM_2D CUDA software is applied for two-dimensional numerical modeling. It takes into account the impact of ice cover.

Ice phenomena usually make significant changes in the water level and velocity regime. In 2019/2020 hydrological year the ice cover provided and maintained a large backwater during all the autumn and the winter. When the spring ice drift came from the river upstream there was a 3-4 meter water level rise, which lasted for 5 days, creating a threat of flooding of the Kholmogory village by a breakthrough wave. There is no effective technique

Северная Двина. Однако гидрологический 2019/2020 год был в этом отношении особенным. С осени и всю зиму поддерживалась большая величина дополнительного подпора, создаваемого ледяным покровом, которая при подходе основного ледохода весной еще увеличилась, произошел резкий скачок уровня воды и сформировался затор, который продержался в течение 5 суток, создавая угрозу затопления волной прорыва села Холмогоры. Методик прогноза развития таких ситуаций и количественной оценки характеристик возможных затоплений при том или ином сценарном варианте не существует. На данном этапе работы выявлен ряд трудностей, возникающих при анализе ледовой обстановки и при моделировании, а также сформулированы шаги по оптимизации проводимых наблюдений и обследований ледяного покрова, измерений расходов и уровней воды.

Ключевые слова: заторы льда; ледоход; устье; река Северная Двина; численное моделирование; затопление

Введение

Формирование и разрушение заторов льда и связанные с этим изменения характеристик речного потока остаются слабо изученными и трудными для расчетов и прогнозов гидрологическими процессами. Между тем на реках, впадающих в северные моря, именно заторные явления наиболее часто определяют максимальные годовые уровни воды и вызывают наводнения.

Ледовые явления оказывают влияние на параметры потока в течение всей зимы. При установлении первой ледяной перемычки на поток начинает действовать дополнительное сопротивление. Так как на реке Северная Двина лед устанавливается не одновременно по всей реке, то на отдельных участках осенью всегда формируются зажоры различной мощности и продолжительности так, что продольный профиль водной поверхности соответствующим образом искажается относительно периода открытого русла. Обычно замерзание реки в

to forecast or assess probable scenarios for such situation.

The article identified difficulties arising during ice conditions analysis and hydrodynamic modeling of the situation. Steps to optimize the monitoring of ice cover, flow discharges and water levels are also formulated.

Keywords: ice jam; ice drift; river mouth area; the Northern Dvina; numerical model; flood

нижнем течении реки Северная Двина идет по третьему типу Р.В. Донченко [Донченко, 1987], то есть наблюдается выраженный ледоход и шугоход иногда с образованием зажоров. Тип вскрытия в каждую весну определяется комплексом условий: в некоторых случаях его можно определить как третий тип, когда вскрытие происходит на волне повышенного стока, но чаще – как второй тип, то есть смешанный, когда значительное влияние на вскрытие оказывают положительные температуры воздуха, солнечная радиация, а также мощность речного потока, действуя в комплексе [Донченко, 1987].

Период установления льда, так же как и период разрушения ледяного покрова, можно рассматривать как череду зажорных (или заторных) ситуаций, увеличивающих подпорный эффект, и ситуаций прорыва заторов с резким падением подпора и формированием волны прорыва. Такие ледовые явления играют роль регуляторов стока, которые могут приостановить или ускорить речной поток. В течение зимы

ледяной покров не только нарастает, изменяется и его структура, например, происходит перераспределение ледяных подсовов и шуги подо льдом, вместе с тем меняется и перераспределяется в пространстве фактор сопротивления льда потоку.

Характеристики ледяного покрова и особенно зажорных и заторных явлений очень индивидуальны для каждого участка реки, изменчивы во времени, трудно наблюдаемы и измеряемы. До сегодняшнего момента на практике в оперативных прогнозах для оценки наиболее вероятных сценариев развития заторных ситуаций используют статистические методики, разработанные на основе данных многолетних наблюдений, при этом каждую весну подбирают годы-аналоги по условиям формирования ледостава осенью и условиям развития весеннего половодья¹. Ситуация весны 2020 года с развитием устойчивых заторных пробок в самом начале трех основных рукавов Холмогорского разветвления не имеет аналогов за период наблюдений начиная с 20-30-х годов XX века.

Существуют комплексы прогнозных гидрологических моделей, которые состоят из связки модели формирования стока и гидродинамической модели, которые могут давать прогноз весеннего половодья в соответствии с поступающим с водосбора стоком. Такие модели при должной настройке и апробации могут заменить статистические методики. Однако для реки Северная Двина, в частности ее устьевой области, этого недостаточно из-за значительного влияния на динамику потока ледовых явлений, которые в подавляющем большинстве случаев определяют формирование опасных гидрологических ситуаций в весенний период.

В работе [Krylenko et al., 2020] предложен алгоритм действий для разработки расчета и прогноза затоплений, вызванных заторами, для

участка реки Северная Двина вблизи города Великий Устюг на базе гидродинамической модели. За рамками этой работы остались вопросы оценки такого параметра как толщина ледяного покрова и тела затора в каждой конкретной ситуации, а также ее распределение по пространству в каждый момент времени. Параметр шероховатости при этом ставится в зависимость от задаваемой толщины.

В задачи данной статьи входит:

- 1) показать, насколько значительно ледовые явления влияют на динамику потока на придельтовом участке реки Северная Двина;
- 2) описать характеристики ледяного покрова на устьевом участке реки Северная Двина в сезон 2019-2020, насколько это возможно по имеющимся данным мониторинга, включающего космические снимки, съемка беспилотными летательными аппаратами (далее – БПЛА) и данные наблюдений на сети гидрологических постов Росгидромета;
- 3) оценить достаточность имеющейся информации для воспроизведения наблюдавшейся реальной динамики потока на двумерной гидродинамической модели с учетом ледяного покрова на базе программного комплекса STREAM_2D;
- 4) сформулировать необходимые шаги по расширению мониторинга и улучшения результатов моделирования.

Объект исследования

Придельтовый участок реки Северная Двина представляет собой часть приливной многорукавной устьевой области от впадения реки Пинеги (выше гидрологического поста Усть-Пинега) до вершины дельты (створ гидрологического поста Смольный Буян) и имеет длину около 95 км (рисунок 1). Процессы, происходящие в дельте, заслуживают отдельного пристального внимания и не рассмотрены в данной статье.

¹ Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с.
Определение влияния заторов льда на уровень воды в устьевой области Северной Двины с целью предсказания заторных подъемов. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1982. 39 с.

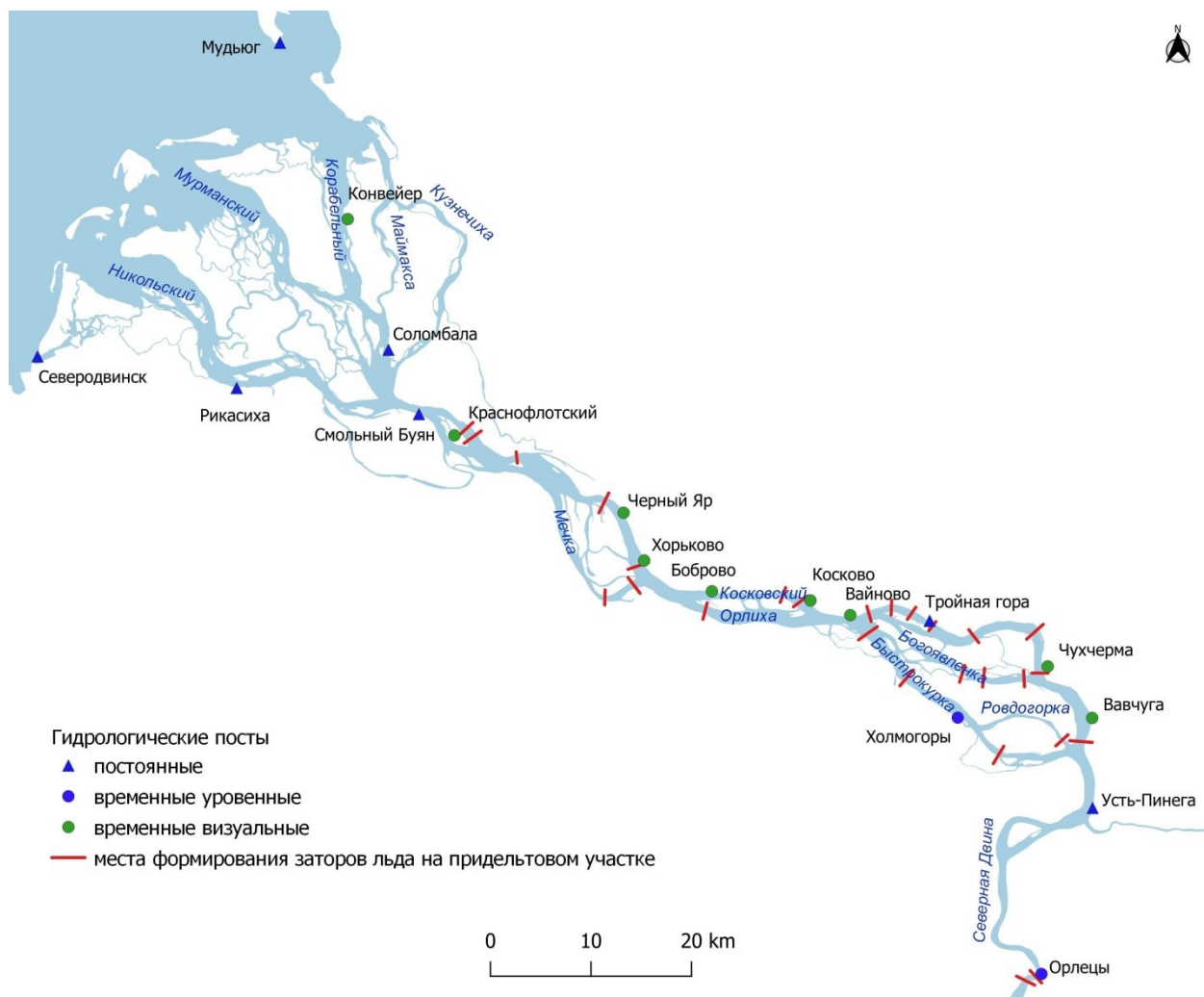


Рисунок 1. Гидрографическая схема устьевой области реки Северная Двина с сетью наблюдений Росгидромета и местами наиболее частого образования заторов льда в пределах придельтового участка по архивным материалам ФГБУ «Северное УГМС»

Figure 1. The Northern Dvina mouth area with the observation network (Roshydromet) and usual places of ice jam formation (data from archival materials of the Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring)

Гидрологический режим устьевой области реки Северная Двина формируется под воздействием речных и морских факторов. Со стороны моря действуют ветровые нагоны и приливы, со стороны реки – речной сток, ледовые явления. Площадь водосбора, с которого в устьевую область поступает сток составляет 348 000 км². Норма стока по гидрологическому посту в вершине устьевой области реки Северная Двина (135 км от морского края дельты в поселке Усть-Пинега) составляет 3 330 м³/с, а средний

максимальный расход весеннего половодья – около 21 000 м³/с. Величина приливов на морском крае дельты варьирует от 0,6-0,8 м (квадратурный прилив) до 1,25-1,50 м (сизигийный прилив). Период приливных колебаний составляет около 12,5 часов. Под воздействием приливов большую часть года на устьевом участке реки наблюдаются реверсивные течения. Дальность распространения обратных течений вверх по реке зависит преимущественно от величины речного стока, а также от фазы приливов и наличия

² Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с.

ветровых нагонов или сгонов. В половодье, по мере роста притока воды с водосбора в устьевую область, режим односторонних течений устанавливается в среднем при расходах воды от 10 000 м³/с в створе гидрологического поста Усть-Пинега.

Основной ледоход проходит в устьевой области обычно раньше, чем максимальные расходы воды. Величина максимального стока во многом зависит от сроков прохождения пика половодья на крупнейших притоках: Сухоне, Вычегде, Ваге и Пинеге. Их наложение во времени может вызвать многоводное половодье, которое не становится опасным в пределах устьевой области в отсутствие заторов льда. Все экстремальные наводнения в период весеннего половодья в пределах устьевого участка реки связаны с заторами льда. Вблизи дельты на чистой воде достижение уровня неблагоприятного или опасного явления может также вызвать воздействие нагонных ветров, действующих одновременно с прохождением высоких речных расходов воды.

В естественных условиях заторы льда при весеннем вскрытии могут образовываться по всей длине придельтового участка реки (рисунок 1). Особое значение имеют заторы в Холмогорском разветвлении. В некоторых случаях при таких заторах затоплению подвергаются крупное село Холмогоры и другие населенные пункты. Заторы в Холмогорском разветвлении периодически образуются во всех рукавах, но только при образовании затора в главном русле происходит значительный подъем уровня воды и возможны неблагоприятные и опасные явления. В этом случае часть стока льда перераспределяется в другие рукава, Быстрокурка и Богоявленка, в которых в свою очередь могут тоже сформироваться заторы.

Морфологическими причинами образования заторов в Холмогорском разветвлении называют: снижение ширины русел после деления на рукава, наличие резких поворотов, излучин, мелководные перекаты в главном судоходном русле и во второстепенных рукавах, Быстрокурка, Богоявленка и другие [Завадский и др., 2010]. Мелководные участки с

глубинами менее 1 м зимой могут перемерзнуть до дна. В связи с этим авторы статьи [Завадский и др., 2010] для снижения вероятности формирования заторов предлагают разработку обширной прорези, срезающей мелководные области главного русла до глубин 3,5 м (от проектного уровня), при этом дана оценка временного периода, за который русло вернется в свое текущее естественное состояние, и этот период составляет 20 лет.

Еще одним фактором формирования заторов в Холмогорском разветвлении являются условия прохождения ледохода на выше расположенных ключевых участках русла реки – это вынужденная излучина в районе деревни Орлецы и еще выше расположенные изгибы русла в районе мыса Кривое (35-40 км выше поселка Усть-Пинега). В годы, когда в этих районах формируются длительные и мощные заторы льда, вероятность установления опасных заторов в Холмогорском разветвлении невелика. В этой ситуации возрастает речной сток и уровни воды, ледяной покров в Холмогорском разветвлении подготавливается к вскрытию за счет теплового и механического воздействия.

На благоприятном временном увеличении глубин и скоростей течения при прохождении ледохода в Холмогорском разветвлении может также сказаться волна от прорыва заторов в деревне Орлецы и в районе мыса Кривое, если они были достаточно мощными.

После разрушения заторов в верхних частях рукавов Холмогорского разветвления лед скапливается на выходе из Холмогорского разветвления – в районе населенного пункта Вайново – там, где все рукава сливаются и речная долина имеет резкое сужение (рисунок 1).

Ниже по течению от населенного пункта Вайново характерным местом формирования заторов является район деревни Черный Яр (рисунок 1), однако этот район уже в большой степени подготавливается к вскрытию с помощью ледоколов.

Ледокольные работы проводятся на устьевом участке реки Северная Двина в преддверии прохождения ледохода наиболее активно с 1962 года. Ледокольные работы по

разрушению льда – мощнейший фактор прохождения ледохода в устьевой области реки Северная Двина. Анализ, выполненный в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее – ФГБУ «Северное УГМС»), показал, что в период 1962–2004 годов средняя продолжительность заторов снизилась более чем в 10 раз по сравнению с периодом 1939–1961 годов и составила 6 часов, максимальные уровни весеннего половодья снизились на 50–70 см [Васильев, 2006]. Эта статистика относится к району вершины дельты и проведена по данным гидрологического поста Соломбала, однако ледокольные работы проводятся и играют роль в процессе вскрытия льда почти по всей длине устьевого участка реки, но чем выше по течению, тем труднее ледоколам оказать влияние на процесс вскрытия.

Дополнительный фактор в ледообразовании и весеннем вскрытии в устьевой области реки Северная Двина – воздействие приливов, которые приводят к реверсивным течениям и перемещениям льдин, а также ветровые стоны, которые в отдельных случаях могут способствовать интенсивному выносу льдин из устьевой области или наоборот их скоплению в дельте.

Данные и методы

В представленном исследовании реализуется интегрированный подход, включающий анализ полевых материалов наблюдений, космических снимков и компьютерное гидродинамическое моделирование.

Гидродинамические условия в устьевой области могут быть смоделированы с помощью двумерной численной модели, которая была разработана ранее на базе программного

комплекса STREAM_2D³ откалибрована и валидирована на данных гидрологических ситуаций в отсутствие ледовых явлений [Лебедева и др., 2016; Alabyan, Lebedeva, 2018]. Двумерная модель на придельтовый участок реки (от гидрологического поста Усть-Пинега до гидрологического поста Смольный Буян) реализована на нерегулярной гибридной сетке, состоящей из четырехугольников и треугольников (всего 67 566 ячеек). Рельеф задан с использованием морских и речных лоций, топографических карт и материалов русловых съемок на отдельные участки реки. Эта расчетная сетка представляет собой верхнюю часть расчетной сетки модели, описанной в [Лебедева и др., 2016; Alabyan, Lebedeva, 2018], но в данном случае нижняя граница расположена в вершине дельты, так что саму дельту модель не включает.

Воздействие ледяного покрова добавлено в модель в рамках новой модификации используемого программного комплекса STREAM_2D CUDA⁴. Для этого в систему уравнений Сен-Венана внесены изменения, учитывающие дополнительное сопротивление, создаваемое ледяным покровом и заторами льда, а также сужение поперечного сечения за счет толщины ледового образования. Измененная система уравнений представлена в работе [Krylenko et al., 2020].

В качестве граничных условий для моделирования задается на верхней границе – расход в створе гидрологического поста Усть-Пинега, на нижней границе – уровни воды по самописцу на гидрологическом посту Смольный Буян. Измерения расходов воды непосредственно во время прохождения ледохода не проводились и для восстановления временного хода расходов воды использовались данные измерений с вышележащих гидрологических постов на реке Северная Двина и ее притоках.

³ Беликов В.В., Кочетков В.В. Программный комплекс STREAM_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612181 от 20.02.2014.

⁴ Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.

Основным калибровочным параметром модели является коэффициент шероховатости (коэффициент Маннинга). Характеристики ледяного покрова: дополнительная шероховатость и толщина льда или тела затора – в отсутствии фактических данных также становятся калибровочными, что в виду многообразия ситуаций ледовой обстановки делает задачу калибровки практически невозможной. Перспективным представляется путь подбора параметров по фактическим сведениям о ледяном покрове.

На данном этапе работы проведен анализ всех доступных материалов для оценки развития ситуации весеннего вскрытия льда в 2020 году. При этом задействованы следующие источники информации:

1. радарные снимки спутников Sentinel-1 и оптические спутников Sentinel-2 и Landsat-8, находящиеся в открытом доступе;

2. материалы съемки с помощью БПЛА, которые проводятся в рамках ежегодной ледовой разведки весной перед ледоходом и во время ледохода⁵;

3. данные с временных гидрологических постов, которые открываются в весенний период на базе ФГБУ «Северное УГМС» для визуальных наблюдений за ледовой обстановкой. Некоторые из временных гидрологических постов ведут также наблюдения за уровнем (рисунок 1). Сроки наблюдений на гидрологических постах в период ледохода варьируют от 4 часов и чаще в случае необходимости;

4. данные ледовых обследований, которые проводятся сотрудниками ФГБУ «Северное УГМС» совместно с Центром обеспечения мероприятий гражданской защиты

Архангельской области в конце зимы перед ледоходом для оценки ледовых условий на ключевых участках реки Северная Двина, где наиболее вероятно установление затора льда весной.

По космическим снимкам и материалам съемки БПЛА составлены схемы ледовой обстановки на ключевые даты развития ситуации при установлении ледостава и при вскрытии (рисунки 2, 3, 4). Районирование заторов льда в схемах на рисунке 5 сделано в соответствии с терминологией, принятой в методических работах ФГБУ «Северное УГМС» В.П. Поповым⁶. Оно соотносится с терминологией, принятой в Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам⁷ и у В.А. Бузина [Бузин, 2004] следующим образом. Замок или очаг затора, который представляет собой ледостав в трещинах или перемычку из ледяных полей, заклинивших русло и ставших преградой для движения льда, в нашей работе, как и в работе В.П. Попова, называется основанием затора. Головная и хвостовая части затора объединены и названы телом затора, также согласно работе В.П. Попова.

После этого проведены сценарные расчеты прохождения весеннего половодья 2020 года на модели:

1) без учета ледовых явлений, чтобы показать степень их участия в процессе;

2) с учетом ледяного покрова и формирования заторов.

Построенные схемы ледовой обстановки использованы для задания распределения в пространстве параметров ледяного покрова (толщины и шероховатости).

⁵ Видеозаписи Архангельский Центр Беспилотных Технологий // ВКонтакте. URL: <http://vk.com/videos-103871656> (дата обращения: 21.12.2020).

⁶ Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с.

⁷ Наставление гидрометеорологическим станциям и постам: в 12 вып. Выпуск 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах: в 3 ч. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 382 с.

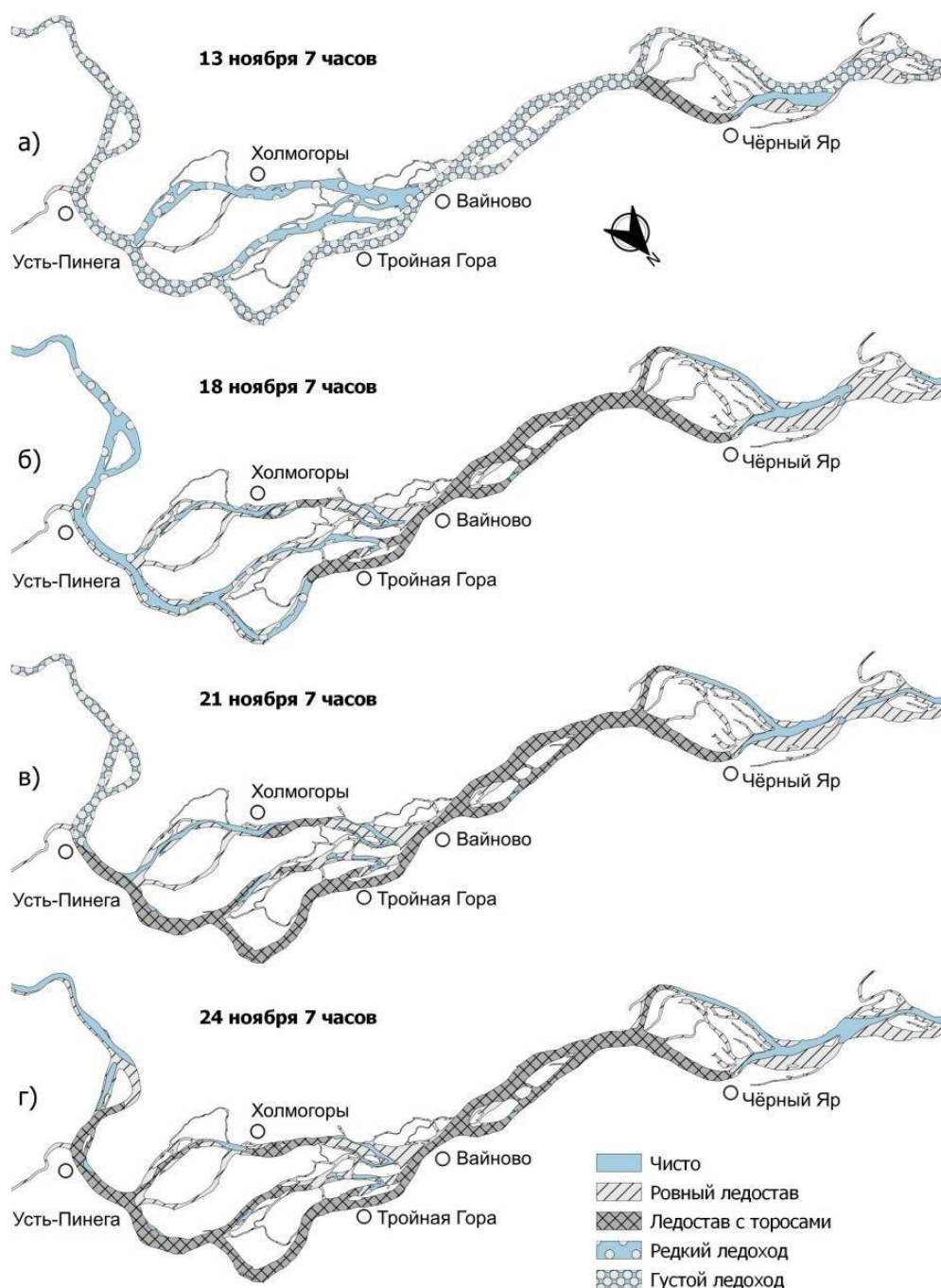


Рисунок 2. Схемы ледовой обстановки в период формирования ледяного покрова осенью 2019 года
Figure 2. Ice conditions during freeze-up period in autumn 2019



Рисунок 3. Ледовая обстановка, отражающая состояние ледяного покрова перед ледоходом
Figure 3. Ice condition before the breakup processes

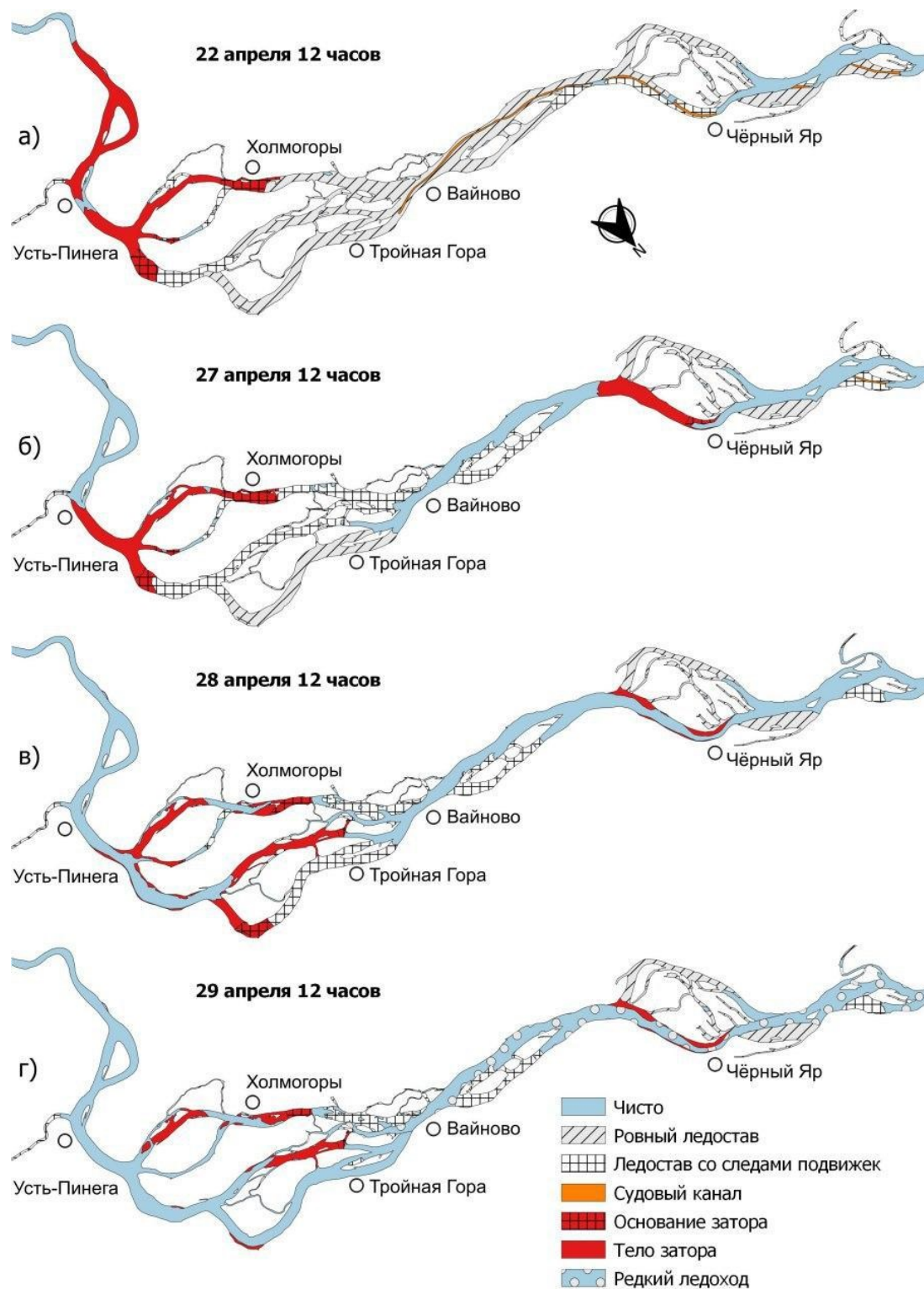


Рисунок 4. Схемы ледовой обстановки в период весеннего ледохода 2020 года

Figure 4. Ice conditions during the ice breakup in spring 2020

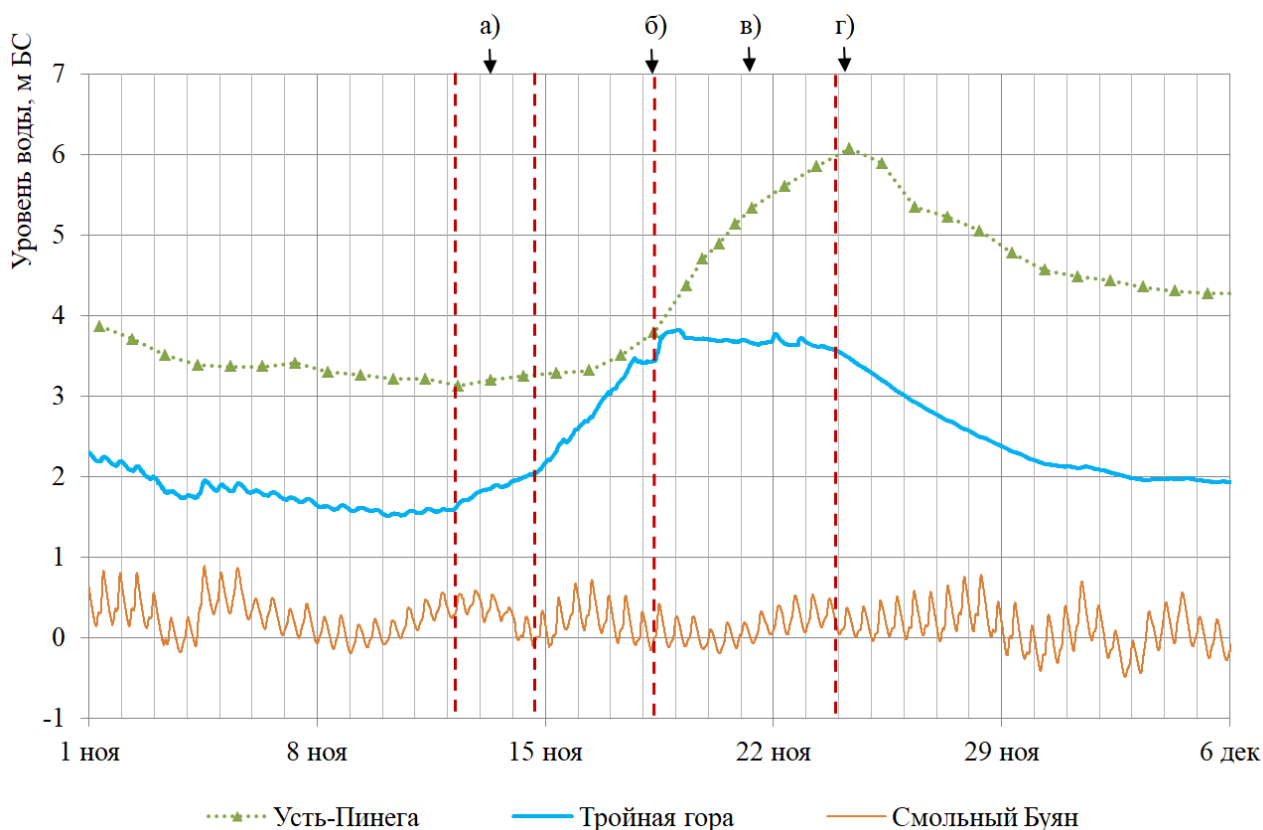


Рисунок 5. Графики изменения уровней на гидрологических постах в период формирования ледяного покрова осенью 2019 года.

Красными вертикальными пунктирами отмечены знаковые события в формировании ледостава, черными стрелочками – моменты времени, соответствующие схемам на рисунке 2

Figure 5. Water levels during the freeze-up period in autumn 2019. Red dotted lines mark significant events in the formation of freeze-up, black arrows mark the moments of ice conditions at figure 2

Результаты

Установление ледостава в ноябре 2019 г.

Появление первого льда и шуги в нижнем течении реки Северная Двина произошло 3-4 ноября 2019 года на фоне прохождения дождевых паводков при высоких уровнях воды и больших (паводочных) скоростях течения (третий тип замерзания по [Донченко, 1987]). На гидрологическом посту Усть-Пинега при этом наблюдался уровень воды, соответствующий расходу около 8 000 м³/с, что в 3-4 раза превышает среднемеженный расход воды. С 8 ноября 2019 года уже густой ледоход наблюдался в районе деревни Орлецы (160 км от морского края дельты), и весь этот лед активно поступал в акваторию устьевое участка реки Северная Двина и в дельту, где также образовывался свой местный лед. 12 ноября

2019 года образовался ледовый зажор у деревни Черный Яр (рисунок 2а), ледоход продолжил движение по левому рукаву Мечка. 14 ноября ледостав установился в реке Мечка, и весь приносной лед стал накапливаться на участке выше деревни Черный Яр. На графике уровней воды по гидрологическому посту Тройная гора можно заметить соответствующее увеличение градиента роста уровня воды с вечера 14 ноября 2019 года (рисунок 5). В первую очередь заполнялись льдом основные судоходные рукава (рукав Орлиха и главный правобережный рукав Холмогорского разветвления). 18 ноября 2019 года установился ледостав на гидрологическом посту Тройная гора, уровень воды по данным гидрологического поста вырос на 30 см за 4 часа (рисунок 2б, рисунок 5). С 19 ноября 2019 года началось заполнение льдом проток Богоявленка и Быстрокурка (рисунок 2в). Таким образом, в

течение более чем 2 недель лед с вышележащих участков реки поступал в устьевую область, а в течение 10 дней накапливался на участке от деревни Черный Яр до поселка Усть-Пинега. 24 ноября 2019 года в районе мыса Кривое сформировался зажор и прекратилось поступление приносного льда в устьевой участок реки (рисунок 2г). После этого с 24 по 29 ноября 2019 года происходил спад уровней воды во всем Холмогорском разветвлении на фоне спада паводочной волны (рисунок 5). При этом сформировавшийся ледяной покров, особенно на участках со значительными подсовами льдин и торосами, у берегов осел на прибрежные отмели. Всю зиму на острове-осередке в районе поселка Усть-Пинега можно было видеть ледяные глыбы мощностью более 2 м, сформировавшиеся в осеннем ледоходе и возвышающиеся над зимним уровнем воды.

В результате осеннего ледохода на придельтовом участке сформировались обширные области с наторошенным ледоставом и подсовами. Величина подъема уровня воды на гидрологическом посту Усть-Пинега, вызванного подпором ледяного покрова, составила около 2,5 м по результатам измерения расходов воды в феврале и марте 2020 года. Подобные условия подпора по данным гидрологического поста Усть-Пинега наблюдались ранее в 1983 и в 2007 годах. Обычно в этих случаях ожидается длительное прохождение весеннего ледохода с заторными остановками и соответствующими подъемами уровня воды. Весной 2020 года ожидалось формирование заторов льда в деревне Черный Яр и в главном русле Холмогорского разветвления.

Ледовые обследования в марте 2020 года показали, что мощность ледяного покрова с подсовами и шугой в районе деревни Черный Яр достигала 4 м при максимальной глубине до 15 м. При этом участок с подсовами и шугой мощностью от 1,5 до 4 м прослеживался на протяжении более 5 км. Главное русло Холмогорского разветвления не было обследовано так подробно как участок осеннего зазора у деревни Черный Яр, но в створе у деревни Матера (в 4 км выше гидрологического поста Тройная гора) мощность ледяного покрова

с подсовами и шугой составляла до 1,5 м при максимальной глубине в русле 7 м. Ледовая обстановка на момент перед началом ледохода в конце зимы отражена на рисунке 4.

Разрушение ледяного покрова весной 2020 г.

Первые весенние изменения в ледяном покрове на придельтовом участке реки Северная Двина были связаны с ледокольными работами, которые начались с 15 апреля 2020 года. 18 апреля 2020 года пара ледоколов дошли до нижней части Холмогорского разветвления в районе населенного пункта Вайново, оставив во льду судовые каналы, но не вызвав еще значимого выноса или подвижек льда (рисунок 4а). Вечером 19 апреля 2020 года основной ледоход пришел по реке Северная Двина к деревне Орлецы и там остановился в заторе (рисунок 6), движение льда продолжилось менее чем через двое суток, и вечером 21 апреля 2020 года ледоход остановился ниже поселка Усть-Пинега в районе разделения русла на три рукава: Быстрокурка, Ровдогорка и главное судоходное русло Холмогорского разветвления (рисунок 4а). Главное русло было плотно заполнено льдом с осени, о чем свидетельствуют космические снимки и результаты ледемерной съемки, проведенной в марте. В протоку Быстрокурка лед набился вечером 21 апреля 2020 года, в нее перераспределилась большая доля стока, который не смог направиться в главный рукав из-за мощных зажоров, сформировавшихся осенью. Уровень воды по гидрологическому посту Усть-Пинега при этом вырос на 3 м за сутки (рисунок 6). За время стояния этого затора в течение последующих четырех суток уровень воды на гидрологическом посту Усть-Пинега вырос еще на 1 м. При этом средний уклон водной поверхности на участке между гидрологическими постами Усть-Пинега и Холмогоры достигал 0,2‰, в случае прорыва затора в протоке Быстрокурка угрожая затопить село Холмогоры.

25-26 апреля 2020 года на придельтовом участке вплоть до населенного пункта Вайново проводились повторные ледокольные работы, которые вызвали освобождение ото льда судоходного рукава разветвления в районе деревни Черный Яр и вынос льдин из рукава

Орлиха и вышележащих участков. 26 апреля 2020 года около 14 часов были проведены взрывные мероприятия совместно с ледокольными работами в районе населенного пункта Вайново, после чего начался интенсивный вынос крупных льдин с этого участка и из протоки Богоявленка. Этот момент отразился на графике уровней воды по гидрологическому посту Тройная гора в виде резкого снижения примерно на 0,5 м, а несколькими часами позднее тот же эффект виден и на гидрологическом посту Усть-Пинега (рисунок 6). Часть ледохода, сформировавшегося на участке ледокольных и взрывных работ, задержалась в районе деревни Черный Яр, сформировав непродолжительный затор (рисунок 4б), который прорвался меньше чем через сутки поздним вечером 27 апреля 2020 года (рисунок 4в).

В течение дня 28 апреля 2020 года происходило медленное, с остановками, вскрытие главного рукава Холмогорского разветвления. Движение в главном русле могло быть спровоцировано затором в протоке Богоявленка: по данным наблюдателя в населенном пункте Вайново к утру 28 апреля 2020 года вынос льда из нее прекратился. В 18 часов 28 апреля 2020 года на волне движения ледохода началось освобождение от льда главного русла в створе гидрологического поста Тройная гора, при этом уровень воды в течение часа вырос на 30 см (рисунок 6). В результате первым в Холмогорском разветвлении очистилось от льда главное русло (рисунок 4г). К 1 мая 2020 года произошло полное освобождение от льда проток Богоявленка и Быстрокурка.

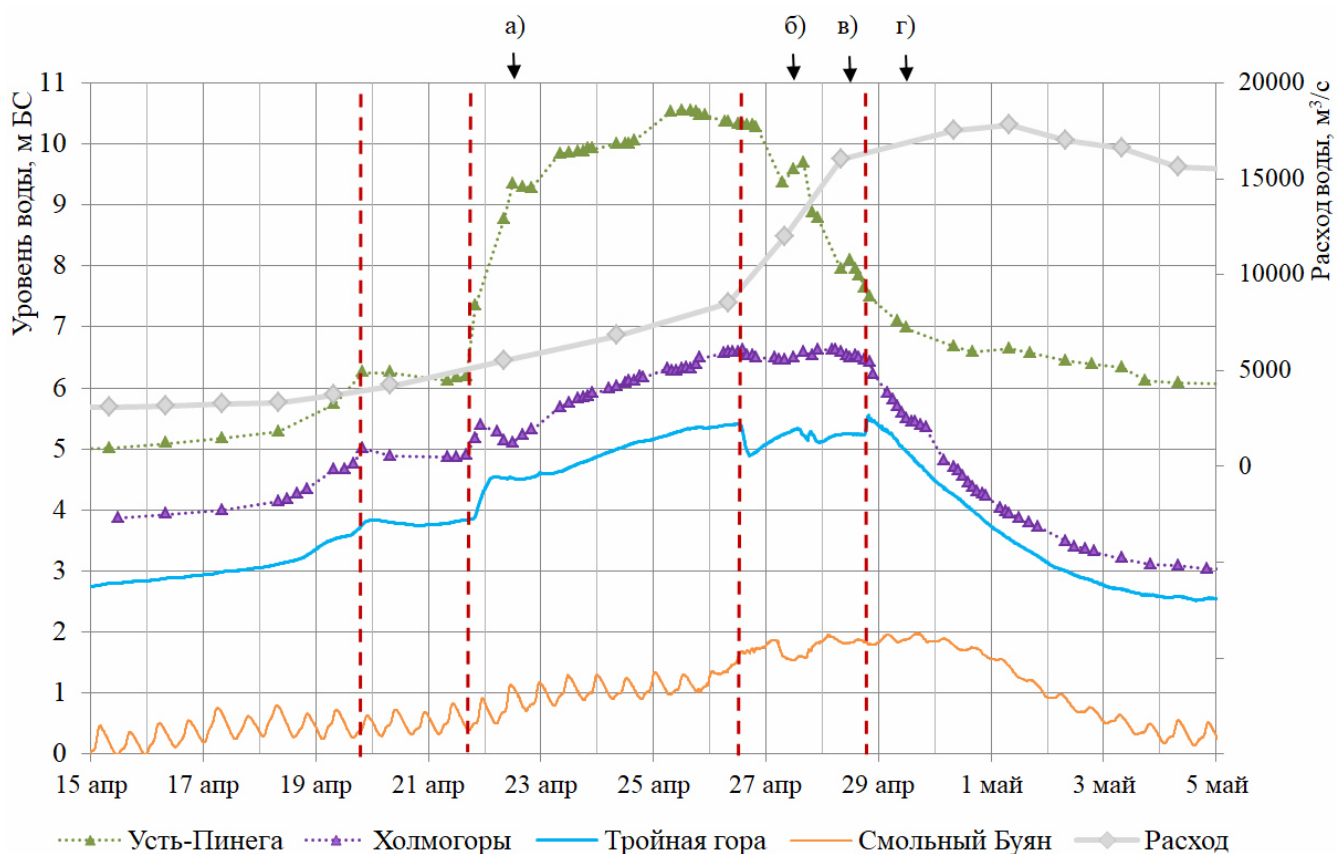


Рисунок 6. Графики изменения уровней на гидрологических постах, а также расчетная оценка объемов притока воды к устьевой области в период весеннего ледохода весной 2020 года.

Красными вертикальными пунктирами отмечены знаковые события в развитии ледохода, черными стрелочками – моменты времени, соответствующие схемам на рисунке 5

Figure 6. Water levels and river discharge during the breakup period in spring 2020. Red dotted lines mark significant events of the break-up period, black arrows mark the moments of ice conditions at figure 5

Результаты моделирования

Были проведены четыре сценарных расчета на основе данных за период половодья с 1 апреля по 30 мая 2020 года. Заданные условия по расходам воды на верхней границе и уровням воды на нижней границе представлены на рисунке 7. Ледовая обстановка была задана в следующих вариантах:

- 1) полное отсутствие влияния ледовых явлений,
- 2) с учетом воздействия ледяного покрова посредством снижения поперечного сечения потока за счет задания толщины ледостава по всей модельной области;
- 3) с учетом дополнительного сопротивления за счет задания дополнительного параметра шероховатости льда (но без учета сужения поперечного сечения потока);

4) с учетом обоих параметров ледяного покрова: толщины и шероховатости.

Для расчетов 2, 3 и 4 ледовая обстановка задавалась в соответствии с составленными схемами ледовой обстановки (рисунки 4-5). Весь расчетный период разделен на отрезки времени с разной ледовой обстановкой (таблица 1).

Толщина льда оценена исходя из ледемерных съемок, проведенных в Холмогорском разветвлении и в районе деревни Черный Яр в марте 2020 года. Параметр коэффициента шероховатости льда задан согласно рекомендациям [Krylenko et al., 2020], выведенных по результатам множества калибровочных расчетов заторных ситуаций на реке Северная Двина в районе Великого Устюга (таблица 2).

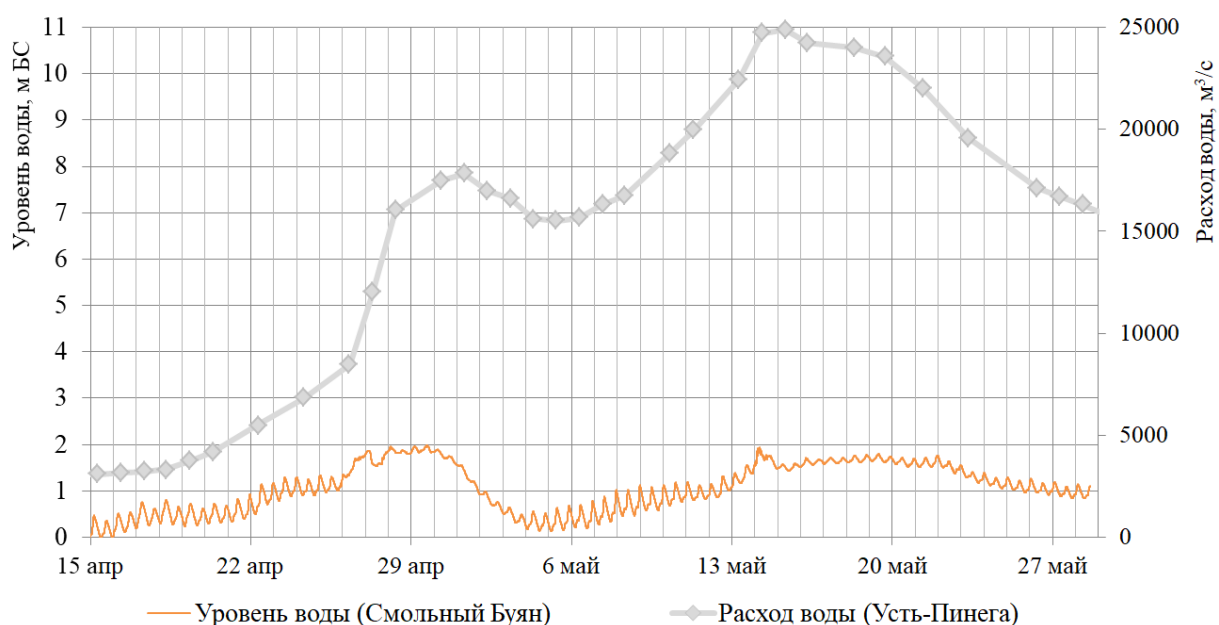


Рисунок 7. Граничные условия для модельных расчетов

Figure 7. Boundary conditions for modeling

Таблица 1. Временные периоды с различной ледовой обстановкой, принятые для моделирования

Table 1. Time periods with different ice conditions, used for modeling

Период времени		Ледовая обстановка
с	по	
начало расчета	21 апреля 20 ч.	рисунок 3
21 апреля 20 ч.	26 апреля 14 ч.	рисунок 4а
26 апреля 14 ч.	27 апреля 12 ч.	рисунок 5б (без затора у деревни Черный Яр)
27 апреля 12 ч.	27 апреля 18 ч.	рисунок 4б
27 апреля 18 ч.	28 апреля 18 ч.	рисунок 4в
28 апреля 18 ч.	29 апреля 18ч.	рисунок 4г
29 апреля 18 ч.	конец расчета	без учета ледяного покрова

Таблица 2. Параметры ледяного покрова, заданные в модельных расчетах**Table 2.** Ice cover parameters for modeling

Категория ледовой обстановки на схеме	Толщина льда, м	Коэффициент шероховатости ледяного покрова
ледостав	0,5	0,025
ледостав с подвижками	0,5	0,025
торосы	2,5	0,045
основание затора	1	0,025
тело затора	3	0,075
судовой канал	0	0,005
редкий ледоход	0	0
чисто	0	0

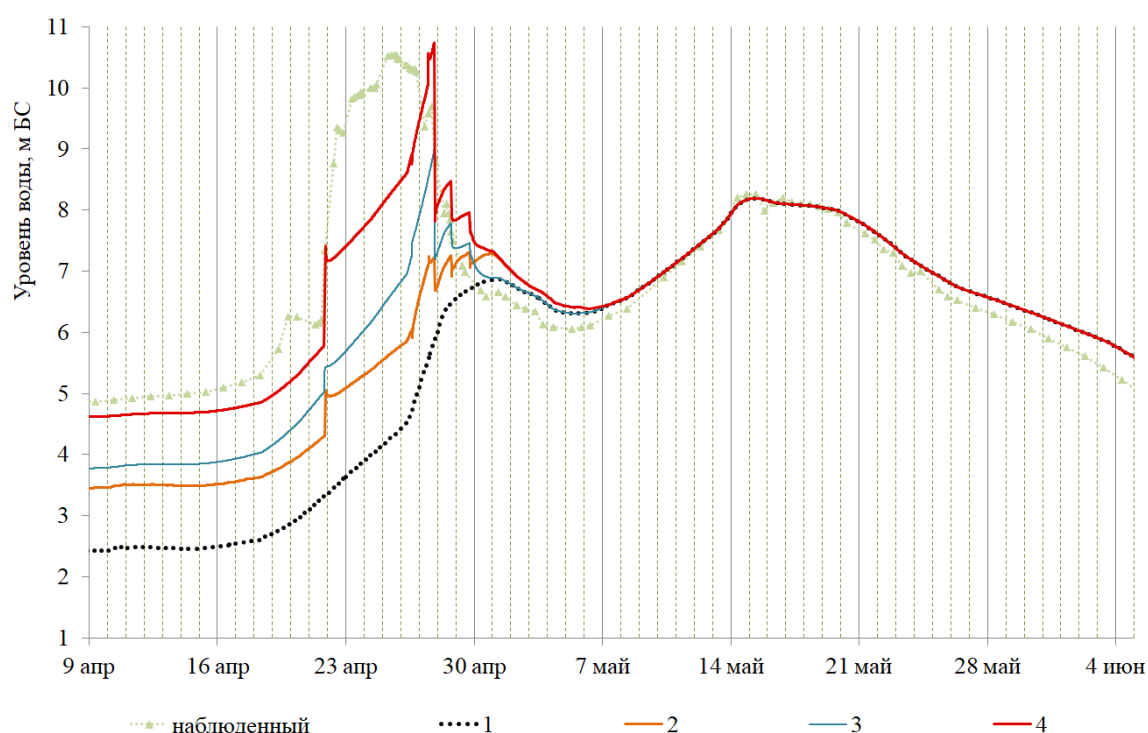


Рисунок 8. Наблюдаемый уровень воды на гидрологическом посту Усть-Пинега и результаты модельных расчетов: 1 – расчет без учета ледовых явлений, 2 – расчет с учетом толщины ледяного покрова, 3 – расчет с учетом дополнительного коэффициента шероховатости, 4 – расчет с учетом обоих факторов: толщина ледяного покрова и шероховатость

Figure 8. Water levels observed at Ust-Pinega gauge and modelled: 1 – without ice cover impact, 2 – taking into account ice and ice-jam thickness, 3 – taking into account ice roughness coefficient, 4 – taking into account both: ice roughness coefficient and ice and ice-jam thickness.

По результатам моделирования по расчету 3 (рисунок 8) удалось воспроизвести максимальный уровень на верхней границе модели (гидрологический пост Усть-Пинега) довольно точно, но он был смоделирован на двое суток позже, чем случился по факту. Большую часть периода стояния затора льда в Холмогорском разветвлении (22-26 апреля

2020 года) его воздействие на уровень воды оказалось недооценено примерно в полтора раза. Зимние условия подпора уровня воды воспроизведены с ошибкой не более 15 см, что составляет около 10% от общей величины подпора, вызванного льдом.

По результатам расчетов 1 и 2 видно, что оба фактора воздействия ледяного покрова

(толщина и шероховатости) внесли значительный сопоставимый вклад в расчет уровня. Небольшое количество фактических данных о ледяном покрове и наличие ряда других неопределенностей не позволяет назвать причины ошибок в данном расчете. Это может быть недооцененность мощности ледовых «пробок», формирующихся в процессе ледохода при сжатии льда и перераспределении его по рукавам, а также суммарный вклад ряда других ошибок.

Обсуждение результатов

Представленную работу следует рассматривать как начальный этап исследования.

Очевидно, что ледовые процессы оказывают определяющее влияние на развитие весеннего половодья на устьевом участке реки Северная Двина. Причем разнообразие возможных вариантов развития событий очень велико. Все эти варианты можно описать распределением в пространстве и во времени толщины ледовых образований и создаваемых ими дополнительных шероховатостей.

Результаты моделирования показывают трудность задания подходящих параметров ледяного покрова, а также выявляют неопределенности в задании верхнего граничного условия из-за большого влияния происходящих ледовых явлений на расходы воды в створе гидрологического поста Усть-Пинега. Однако, без проведения калибровки параметров ледяного покрова, используя материалы натурных наблюдений и космических снимков, удалось воспроизвести зимний уровень воды перед вскрытием у поселка Усть-Пинега в условиях значительного подпора, а также значение максимального уровня воды, сформировавшегося от мощнейшего затора, установившегося во всех рукавах Холмогорского разветвления весной 2020 года.

По текущим итогам можно сказать, что по имеющейся информации о развитии ледовой обстановки можно получать почти исчерпывающую картину хронологии развития весеннего ледохода (по космическим снимкам, съемке БПЛА, визуальным наблюдениям на гидрологических постах). Однако толщину

(мощность) заторных образований и ее распределение по пространству пока не удается достоверно описать по имеющимся материалам. Для решения этой задачи запланировано: во-первых, расширение и оптимизация планирования ледемерных съемок в зимний период. Ледемерные профили должны быть выполнены на участках осенних зажоров после установления ледостава осенью и перед вскрытием реки весной. Во-вторых, автоматизированное дешифрирование радарных снимков с целью количественной оценки мощности ледяного покрова и формирующихся заторов. Заторные и зажорные участки на снимках имеют обычно наибольшую яркость пикселей, а ровный ледяной покров – более темный цвет. В качестве эталонов для дешифрирования могут быть использованы данные о толщине льда и мощности заторов из результатов ледемерных съемок.

Для того чтобы полно анализировать динамичное развитие ситуации во время продвижения ледохода с заторными остановками, необходимо обеспечение всех ключевых уровней гидрологических постов самописцами с непрерывной автоматической записью. Четырехсрочные наблюдения не позволяют точно определить момент начала резкого подъема или спада уровней воды, что вызывает трудности с определением направления движения волны попуска или подпора и не позволяет однозначно оценить причину скачка уровня воды. Временная установка самописцев уровня воды на период осеннего и весеннего ледохода, к сожалению, очень затруднена из-за большой опасности потери прибора вместе с данными.

При моделировании большая неопределенность содержится в задании верхнего граничного условия. Во время ледохода створ гидрологического поста Усть-Пинега постоянно находится в состоянии подпора разной величины. Измерение расходов воды во время ледохода затруднены. Тем не менее максимальную достоверность информации о расходах на верхней границе модели нужно стремиться достичь за счет повышения качества и количества измерений. Для исключения дополнительных

ошибок необходимо провести актуализацию рельефа на придельтовом участке, так как после прохождения половодья с формированием

мощных и длительных заторов возможны значительные переформирования в русле.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив отдела речных и морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Северное УГМС» за помощь и обратную связь при анализе ледовых процессов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-60032 «Комплексное исследование динамики вод в многорукавном приливном устье реки Северная Двина на основе синтеза компьютерной модели, сетевых и экспедиционных гидрологических данных»).

Литература

Бужин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 202 с.

Васильев Л.Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий (г. Санкт Петербург, 28 сентября – 1 октября 2004 г.). М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 223-229.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 242 с.

Завадский А.С., Иванов В.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Руслевые процессы, ледовые явления и регулирование русла в Холмогорском разветвлении на реке Северной Двине // Эрозия почв и руслевые процессы. 2010. Т. 17. С. 198-217.

Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. №1. С. 18-25.

Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // Journal of Hydroinformatics. 2018. Vol. 20. Iss. 4. P. 798-814. DOI: [10.2166/hydro.2018.051](https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051).

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-60032 («Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River, based on the synthesis of computer modelling, stationary and expeditionary hydrological observations»).

References

Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, Vol. 20, no. 4, pp. 798–814. DOI: [10.2166/hydro.2018.051](https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051).

Buzin V.A. *Zatory l'da i zatornye navodneniya na rekakh [Icejams and icejam river floods]*, Saint Petersburg, Publ. Hidrometeoizdat, 2004. 204 p. (In Russian).

Donchenko R.V. *Ledovyi rezhim rek SSSR [Ice regime of the USSR rivers]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1987. 246 p. (In Russian).

Krylenko I., Alabyan A., Aleksyuk A., Belikov V., Sazonov A., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring. *Water Resources*, 2020, vol. 47, pp. 387-398. DOI: [10.1134/S0097807820030069](https://doi.org/10.1134/S0097807820030069).

Lebedeva S.V., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. Navodneniya v ust'e Severnoi Dviny i ikh modelirovanie [Floods in the Northern Dvina river mouth and the modeling of them]. *Georisk [Georisk]*, 2015, no. 1, pp. 18-25. (In Russian; abstract in English).

Vasil'ev L.Yu. Vesennnee navodnenie i protivozatornye meropriyatiya v ust'evoi oblasti Severnoi Dviny [Spring flooding and preventive mash activities in the mouth area of the Northern Dvina]. *Doklady Shestogo Vserossiiskogo*

Krylenko I., Alabyan A., Alekseyuk A., Belikov V., Sazonov A., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring // Water Resources. 2020. Vol. 47. P. 387-398. DOI: [10.1134/S0097807820030069](https://doi.org/10.1134/S0097807820030069).

gidrologicheskogo s"ezda. Sektsiya 2. Navodneniya i drugie opasnye gidrologicheskie yavleniya: otsenka, prognoz i smyagchenie negativnykh posledstviy (g. Sankt Peterburg, 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2004 g.) [Reports of the Sixth All-Russian Hydrological Congress. Section 2. Floods and other hazardous hydrological phenomena: assessment, forecast and mitigation of negative consequences (St. Petersburg, September 28 – October 1, 2004)]. Moscow, Publ. Meteoagenstvo Rosgidrometa, 2006, pp. 223-229. (In Russian).

Zavadskii A.S., Ivanov V.V., Ruleva S.N., Chalov R.S., Chalov S.R. Ruslovyie protsessy, ledovye yavleniya i regulirovanie rusla v Kholmogorskom razvetvlenii na reke Severnoi Dvine [Evolution of river bed, ice phenomena and channel regulation in the Kholmogorsk branch on the Northern Dvina river]. *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy [Soil erosion and evolution of river bed]*, 2010, vol. 17, pp. 194–213. (In Russian).

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 556.013

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.347

ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ
ОБЕСПЕЧЕННОСТИ
МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ
РЕК ПРИАНГАРЬЯ (НА ПРИМЕРЕ
РЕКИ ИЯ)Б.И. Гарцман¹, Т.С. Губарева¹,
Н.В. Кичигина²¹ Институт водных проблем Российской
академии наук, г. Москва, Россия;² Институт географии СО РАН им. В.Б. Сочавы,
г. Иркутск, Россия
gartsman@inbox.ruPOSSIBILITIES OF ASSESSING
THE FLOOD RUNOFF
PROBABILITY IN ANGARA
REGION (IYA RIVER AS
EXAMPLE)Boris I. Gartsman¹, Tatiana S. Gubareva¹,
Natalia V. Kichigina²¹ Water Problems Institute of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia;² V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Irkutsk, Russia
gartsman@inbox.ru

Аннотация. Задача работы заключается в анализе методами стохастической гидрологии опасности наводнений в Приангарье – на левобережных притоках реки Ангара от истока до Братского водохранилища. Этот регион характерен наибольшей опасностью летних дождевых наводнений, которые формируются относительно редко, но систематически, и отличаются особой разрушительностью. Исследуется возможность построения одномерной аналитической кривой распределения, надежно аппроксимирующей выборку фактических данных о максимальных годовых расходах воды и позволяющей дать обоснованную оценку обеспеченности экстремальных паводков – на примере событий на реке Ия в 1984 и 2019 годах. Использован максимально широкий спектр трехпараметрических законов распределения вероятностей и методов параметризации кривых обеспеченности.

В результате выполненного анализа построено 14 вариантов расчетных кривых распределения, сопоставляемых на основе статистических и рациональных критериев. Несмотря на наличие нескольких вариантов, удовлетворяющих почти всем требованиям, качественно решить на их основе поставленную задачу не удастся. Все

Abstract. This work aim is analyzing the flood hazard in the Angara region with using stochastic hydrology methods. This region is characterized by greatest danger of summer rain floods, relatively rare but systematic, and are very dangerous. The possibility is studied to construct one-dimensional analytical distribution curves that reliably approximates a series of observed maximum annual discharges and allow to give a reasonable estimate of the extreme floods probability – using the example of extraordinary floods on the Iya River in 1984 and 2019. A number of three-parameter probability laws and methods of probability curves parameterization was used.

Resulting, 14 variants of analytical distribution curves were constructed, compared by the statistical and rational criteria. Despite the several versions satisfy to almost all the requirements, it seems impossible to solve the problem qualitatively on their basis. All acceptable curve versions underestimate the probability for extraordinary floods of 1984 and 2019 years. Some of these versions go beyond the 5-95% confidence intervals of empirical probability curve, or are the results of direct mathematical fitting without the satisfactory conceptual reasons.

Thus, it was not possible to construct adequate three-parameter maximum discharge distribution for the Iya River according to above requirements. The

приемлемые варианты в расчетной области наивысших расходов занижают оценки обеспеченности паводков 1984 и 2019 годов. Кроме того, некоторые из этих вариантов существенно выходят за границы 5-95%-х доверительных интервалов эмпирической кривой обеспеченности, либо являются результатами прямой подгонки математических кривых к данным и не имеют удовлетворительного концептуального обоснования.

Таким образом, построить адекватную одномерную малопараметрическую вероятностную модель распределения максимальных расходов реки Ия, надежно аппроксимирующую выборку эмпирических данных и позволяющую дать обоснованную оценку обеспеченности экстраординарных паводков, не удалось. Сложность процессов формирования стока в регионе, существенные различия механизмов и условий развития рядовых и выдающихся паводков, очевидно, приводит к статистической неоднородности выборок, которые не могут быть корректно описаны одномерными трехпараметрическими законами распределения. В таких условиях для оценки вероятности выдающихся паводков наиболее целесообразным представляется использование динамико-стохастического моделирования на основе физически-обоснованной модели стока.

Ключевые слова: река Ангара; левобережные притоки; река Ия; город Тулун; опасность наводнений; максимальный сток; кривые распределения; вероятность

Введение

Паводковые (летние дождевые) наводнения в Приангарье распространены почти повсеместно, при этом наиболее опасны они в западных районах Иркутской области, в бассейнах левых притоков реки Ангара – рек Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда, Бирюса [Кичигина, 2018]. Экстремальные паводковые наводнения происходят здесь издавна, принося значительные ущербы с начала освоения этих территорий русскими [Иванько, 1997]. За

complexity of the runoff formation processes in the region, different generation mechanisms of ordinary and extraordinary floods, obviously, leads to statistical heterogeneity of the series, which cannot be correctly described by one-dimensional three-parameter distribution laws. To assess the extraordinary floods probability, it seems most appropriate to use dynamic-stochastic modeling based on a physically based runoff model.

Keywords: Angara River; left bank tributaries; Iya River; Tulun City; flood hazard; maximum run off; distribution curves; probability

последние 50 лет отмечалось несколько наиболее разрушительных паводковых событий.

- Катастрофическое наводнение летом 1971 года, когда на реках Иркутской области было затоплено 33 населенных пункта, 82 промышленных предприятия, около 700 км автодорог.

- Наводнение в июле 1984 года в Тулунском районе. В бассейне реки Ия было затоплено 12 населенных пунктов (в том числе треть

площади города Тулун), 5,5 тыс. га пастбищ, около 800 га посевов.

- Паводок в июле 1996 года на реке Уда, когда были затоплены город Нижнеудинск (60-65% территории) и 18 населенных пунктов в пойме реки, повреждены 14 мостов, водозаборные сооружения. В бассейне реки Уда площадь затопленных населенных пунктов и сельхозугодий составила 23 км², только в Нижнеудинском районе в зону затопления попали 1 200 человек.

- Паводок в июле 2001 года. От разлива рек Китой, Иркут, Белая, Ия, Ока и их притоков пострадали многие районы Иркутской области, наиболее сильно – Зиминский район. Было затоплено более 150 населенных пунктов с общей численностью 460 тыс. человек, в том числе семь городов, погибло 11 человек [Кичигина, 2020].

В конце июня 2019 года на левобережных притоках реки Ангара вновь прошел катастрофический дождевой паводок, приведший к человеческим жертвам и огромному материальному ущербу. Пострадали Нижнеудинский, Тайшетский, Тулунский, Чунский, Зиминский, Черемховский, Заларинский, Куйтунский районы. Затоплено 109 населенных пунктов, сотни километров автодорог, уничтожены посевы, снесено или повреждено 22 моста, 26 человек погибло, 5 человек пропало без вести. Основной удар пришелся на город Тулун, который погрузился в воду на глубину до нескольких метров, целые улицы деревянных домов буквально уплыли, а многоэтажные здания были затоплены до третьего этажа¹. При этом были превышены исторические максимумы на двух гидропостах: река Ия (пост Тулун) – на 254 см, река Уда (пост Нижнеудинск) – на 32 см.

Предотвращение негативного воздействия вод и снижение ущерба от наводнений относятся, в соответствии с положениями Водной стратегии Российской Федерации, к числу приоритетных

задач развития водохозяйственного комплекса. Комплекс мер, предусмотренных Федеральной целевой программой «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах»² для достижения этой задачи, включает «проведение прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполняемых по договорам на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, выполнение экспериментальных проектов, обеспечивающих выработку современных методик ... технологического и информационного обеспечения развития водохозяйственного комплекса».

В отечественной инженерной практике разработка средств технологического и информационного обеспечения управления риском наводнений основана на подходах, разработанных в середине прошлого века [Виноградов, Догановский, Обязов, 2019]. Они направлены в первую очередь на определение расчетных гидрологических характеристик (расходов или уровней воды) малой обеспеченности по имеющимся рядам наблюдений за речным стоком. Задача данной работы заключалась в статистическом анализе опасности наводнений по фактическим данным о максимальном стоке левобережных притоков реки Ангара с использованием различных методов стохастической гидрологии, рекомендованных как действующими в России нормативными документами, так и доступными авторитетными литературными источниками, российскими и зарубежными.

В статье исследуется возможность построения одномерной аналитической кривой распределения, надежно аппроксимирующей выборку эмпирических данных и позволяющей дать обоснованную и реалистичную оценку обеспеченности экстремальных паводков на реке Ия – 1984 и 2019 годов. Для этого в работе

¹ Пономарева Н. Цена наводнения – Сибирь [Электронный ресурс] // Интерфакс Россия. URL: <http://www.interfax-russia.ru/Siberia/view.asp?id=1058665> (дата обращения: 26.09.2020).

² Постановление Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2012 года №350 [Электронный ресурс] // Электронный фонд нормативной и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902343713> (дата обращения: 21.09.2020).

использован широкий спектр методов стохастической гидрологии для построения кривых обеспеченности гидрологических характеристик, включая:

- схему расчетов, рекомендованную действующими СП 33-101-2003³;
- альтернативную схему, разработанную Ю.Б. Виноградовым [1988];
- ряд законов распределения, применение которых обосновано мировым опытом расчетов максимального стока [Губарева 2010; Губарева, 2011];
- современный метод L-моментов, используемый для оценки параметров кривых распределения, преимущественно за рубежом [Губарева, Гарцман, 2010].

Объекты, исходные данные

Регион исследования включает бассейны левых притоков реки Ангара – реки Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда, Бирюса, которые берут начало в горах Восточного Саяна.

В северо-восточном направлении от Восточного Саяна отходит ряд отрогов (Тункинский, Китойский, Вельский, Окинский и др.), являющихся водоразделами между упомянутыми притоками реки Ангара. На юге водораздельная линия проходит по хребтам Хамар-Дабан и Удинский, на севере – по Ангарскому кряжу. Ближе к нижнему течению рек территория относится уже к подножию Восточного Саяна, к которому широкой полосой примыкает Иркутско-Черемховская равнина. Климат территории резко континентальный, в зимний период образуются мощные антициклоны, формирующие морозную малооблачную погоду с небольшим количеством осадков. Летом развивается циклоническая деятельность, с которой связано выпадение значительного количества осадков, с наибольшими их значениями на наветренных склонах Восточного Саяна. Питание рек главным образом дождевое (40-60%). Наиболее

многоводные месяцы – июнь-август, когда на реках проходят серии интенсивных дождевых паводков. Максимальный сток приходится как правило на июль [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1972].

Река Ия, основной объект настоящего исследования, целиком протекает по территории Иркутской области. Длина реки – 484 км, площадь бассейна – 18,1 тыс. км² (до города Тулун – 14,5 тыс. км²). Река берёт начало на северных склонах Восточного Саяна слиянием рек Холба и Хиаи. Впадает в Окинский залив Братского водохранилища. Питание главным образом дождевое и грунтовое. Средний годовой расход воды у города Тулун (119 км от устья) – 149 м³/с, максимальный расход по данным стандартных измерений – 4 400 м³/с (восстановленный для паводка 2019 года – 5 700 м³/с), минимальный – 4,5 м³/с. Основные притоки: справа – река Кирей, слева – реки Икей, Курзанка.

Исходными материалами послужили данные максимальных годовых расходов за период от начала наблюдений на гидропостах по 2018-2019 годы (по тем постам, где наблюдаемые максимальные расходы 2019 года удалось включить в выборки). Были использованы данные ежегодников и справочников Государственного водного кадастра [Многолетние данные..., 1986], данные Иркутского управления по гидрометеорологии, а также информационного ресурса⁴. Сведения об использованных постах и периодах наблюдений приведены в таблице 1.

Основной объем приведенного ниже анализа, с учетом задачи исследования, выполнялся по выборке данных гидрологического поста река Ия – город Тулун. Объем выборки срочных максимальных годовых расходов, полученных непосредственно по данным наблюдений на данном посту, составляет 84 года (1936-2019 годы). Данные наблюдений более ранних лет забракованы как явно ненадежные. Наибольшим в этой выборке является значение максимального расхода

³ СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

⁴ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 26.09.2020).

Таблица 1. Список гидропостов и использованные периоды наблюдений**Table 1.** List of gauging stations and used observation periods

№ п/п	Река	Пункт	Площадь водосбора, км ²	Годы наблюдений
1	р. Иркут	г. Иркутск	15 000	1928–2018, <i>с 1988 – данные с приводкой</i>
2	р. Китой	р.п. Китой	8 420	1947–1959, 1964–2019
3	р. Белая	р.п. Мишелевка	16 400	1968–2019
4	р. Ия	п. Аршан	5 140	1956–2018
5	р. Ия	г. Тулун	14 500	1921–1922, 1928–1932, 1936–2019
6	р. Кирей	с. Уйгат	2 950	1960–2018
7	р. Ока	с. Усть-Када	33 400	1963–1984, 1986–2019
8	р. Уда	с. Укар	17 200	1932, 1934–2018
9	р. Бирюса	с. Суетиха (Бирюсинск)	24 700	1929–2018, <i>с 1991 – данные с приводкой</i>

2019 года, восстановленное по данным изысканий по следам прошедшего наводнения с применением двумерного гидродинамического моделирования⁵. Тем не менее выдающиеся наводнения с превышением опасного уровня 850 см за период наблюдений зафиксированы здесь шесть раз: в 1937, 1980, 1984, 2006 годах и дважды в 2019 году.

Методика исследований

Рекомендации действующего в России СП 33-101-2003 включают использование в гидрологических расчетах преимущественно кривых, производных от гамма-распределения – распределения Пирсона III типа и трехпараметрического гамма-распределения Крицкого-Менкеля. В качестве основного метода оценки параметров аналитических кривых на основе выборок измеренных данных рекомендуется метод моментов. Для распределения Пирсона III типа дополнительно рекомендуется графоаналитический метод, а для распределения Крицкого-Менкеля – метод

приближенного максимального правдоподобия. При этом документ не воспрещает, при специальном обосновании, использовать иные методики расчетов.

В альтернативной схеме Ю.Б. Виноградова использовано семейство функционально-нормальных кривых и непараметрические методы оценивания их параметров по выборкам. В данном исследовании использовались трехпараметрическое логнормальное распределение и распределение С-3, описываемое преобразованием

$$z=0,5(x^a+1)\ln x \quad (1)$$

где z – нормально распределённая случайная величина.

Для аппроксимации использовался метод прямой численной подгонки аналитических кривых к выборочным точкам (калибровки) с использованием различных мер сходимости. Для точек выборки принимаются несмещенные оценки координат эмпирической функции распределения, параметры аналитической

⁵ Анализ опасности наводнений и гидродинамическое моделирование опасного развития гидрологической обстановки на территории Тулунского района Иркутской области (в рамках Государственного контракта № 05-66-57-41/19 от 02 августа 2019 г. «Исследование и комплексный анализ факторов опасного развития гидрологической обстановки и разработка научно обоснованных рекомендаций для предотвращения катастрофических паводков, и обеспечения безопасности территорий Тулунского района Иркутской области»). Этап 2. Численное гидродинамическое моделирование на базе программного комплекса STREAM 2D. Отчет о научно-исследовательской работе. М.: ФГБУН ИВП РАН, 2020. 147 с.

функции распределения вычисляются исходя из условия минимизации меры сходимости.

В качестве таких мер (критериев) использовались величина суммарного относительного расхождения эмпирической и аналитической кривой по вероятности

$$\omega = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|p^* - p^{**}|}{p_b^* - p_a^*} \right)_i \quad (2)$$

где p^* и p^{**} – эмпирическая и аналитическая вероятности членов вариационного ряда ($p^* = m/n$);

p_a^* и p_b^* – границы доверительного интервала для вероятности p при данных m и n и заданном уровне значимости;

m и n – ранг i -го значения и общий объем выборки [Виноградов, 1988].

Минимум величины ω обеспечивает сходимость аналитической и эмпирической кривой по вероятности и характеризует *надёжность* принимаемого решения.

В другом случае использовалась мера сходимости по абсолютной величине, представляющая собой среднеквадратическое отклонение ординат эмпирической кривой от аналитической и характеризующая *точность* принимаемого решения

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_p^* - k_p^{**})^2} \quad (3)$$

где k_p^* и k_p^{**} – равнообеспеченные квантили эмпирического и аналитического распределений в форме модульных коэффициентов.

Таким образом, по «альтернативной» схеме также строились 4 варианта аналитических кривых распределения: логнормальная с аппроксимацией по ω и по s , а также С-3 с аппроксимацией по ω и по s . В дальнейшем показатели ω (*надёжность*) и s (*точность*) используются как критерии для сравнительной оценки всех расчетных вариантов кривых обеспеченности. Важным критерием адекватности аналитической кривой обеспеченности является расположение её в

пределах границ доверительных интервалов эмпирической кривой p_a^* и p_b^* .

Из широко используемых и рекомендованных в мировой научной литературе для расчетов максимального стока вариантов законов распределения выбраны следующие: обобщенное распределение экстремальных величин (далее – GEV), обобщенное логистическое распределение (далее – GLO), обобщенное распределение Парето (далее – GPD), распределение Парето (далее – Pareto). Выбор указанных распределений обусловлен установленным фактом [Писаренко и др., 2002; Найденов, 2004; Губарева, 2010], что для вероятностного описания экстремальных характеристик в области больших значений наиболее адекватны распределения с тяжелыми хвостами.

Метод L -моментов как альтернативный способ представления формы кривых распределения вероятностей предложен сравнительно недавно в работе [Hosking, Wallis, 1997]. Он демонстрирует ряд существенных преимуществ перед ранее разработанными методами и уже широко используется в мировой практике. Теоретически L -моменты являются модификацией «вероятностно взвешенных моментов (probability weighted moments)», предложенных в [Greenwood et al., 1979]. На практике вначале определяются выборочные несмещенные оценки вероятностно взвешенных моментов распределения b_r по ранжированной в возрастающем порядке выборке $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$ размером n , которые могут быть представлены в виде

$$b_0 = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{j:n}, \quad b_1 = n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_{j:n},$$

$$b_2 = n^{-1} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_{j:n}. \quad (4)$$

Общее выражение для b_r имеет вид

$$b_r = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_{j:n} \quad (5)$$

Таблица 2. Методический инструментарий построения кривых обеспеченности**Table 2.** Methodical tools for constructing of probability curves

Аналитические законы распределения	Методы оценки параметров (аппроксимации)
Пирсона III типа. Трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого-Менкеля. Трехпараметрическое логнормальное. Функционально-нормальное СЗ Виноградова. Распределение GEV. Распределение GLO. Распределение GPD. Распределение Pareto.	Метод моментов. Метод приближенного наибольшего правдоподобия. Метод графоаналитический. Метод L-моментов. Непараметрический метод калибровки.

Выборочные L -моменты определяются по уравнениям

$$l_1 = b_0, \quad l_2 = 2b_1 - b_0, \quad l_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0, \\ l_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0. \quad (6)$$

В общем виде,

$$l_{r+1} = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* b_k; \quad r = 0, 1, \dots, n-1 \quad (7)$$

где коэффициенты $p_{r,k}^*$ определяются как

$$p_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \frac{(-1)^{r-k} (r+k)!}{(k!)^2 (r-k)!}. \quad (8)$$

Выборочные L -моментные отношения r -го порядка определяются выражениями

$$t = l_2/l_1, \quad t_r = l_r/l_2, \quad r = 3, 4, \dots, \quad (9)$$

откуда t – выборочный коэффициент L -вариации;

t_3 – выборочный коэффициент L -асимметрии;

t_4 – выборочный L -эксцесс.

В работе [Губарева, Гарцман, 2010] приведены алгоритмы взаимного вычисления L -моментов и параметров для нескольких трехпараметрических законов распределения, характеризуемых параметрами сдвига, формы и масштаба.

В таблице 2 сведены аналитические законы распределения и методы оценки параметров (аппроксимации), используемые для построения кривых обеспеченности максимальных расходов воды в данном исследовании. Каждый расчетный

вариант кривой обеспеченности характеризуется конкретным сочетанием используемых аналитического закона распределения и метода оценки параметров (аппроксимации). Для каждого расчетного варианта вычисляются значения критериев ω (надежность) и s (точность) для сравнительной оценки качества различных вариантов. Дополнительно для сопоставления вариантов используется степень попадания конкретной расчетной аналитической кривой обеспеченности в границы доверительного интервала p_a^* и p_b^* для вероятности p каждой точки эмпирической кривой обеспеченности при заданном уровне надежности 90%. Кроме того, экспертной оценкой вариантов служит «реалистичность» полученной по ним расчетной обеспеченности некоторых реперных значений максимальных расходов воды.

Результаты оценки вероятности экстремальных паводков

Анализируемая выборка максимальных срочных расходов воды по посту реке Ия – город Тулун включает 84 значения за период 1936–2019 годы. Соответственно, эмпирические оценки обеспеченностей двух наивысших расходов в выборке 1984 и 2019 годов составляют 2,4% и 1,2%. Попытка построения для данной выборки аналитических кривых обеспеченности в соответствии с основными рекомендациями

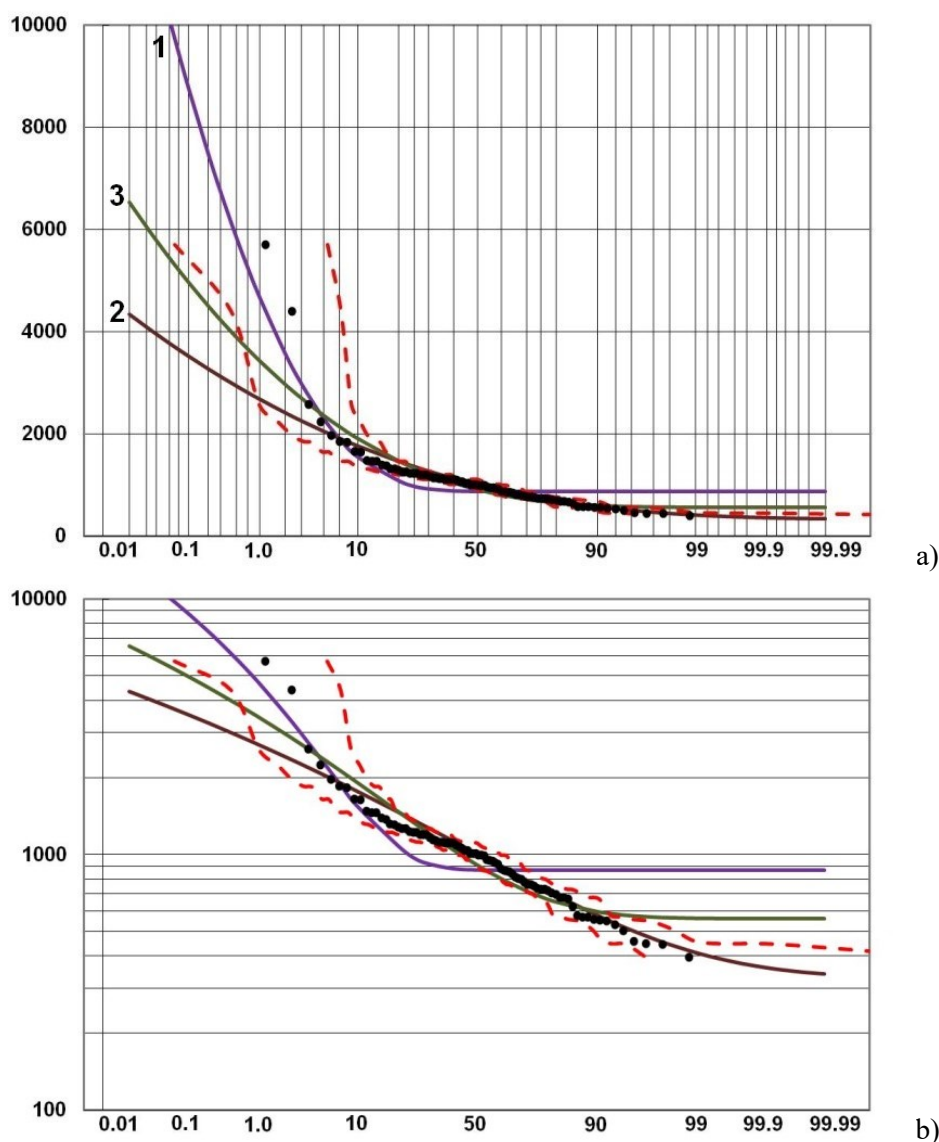


Рисунок 1. Кривые обеспеченности максимальных срочных расходов на посту реки Ия – город Тулун, эмпирическая (точки) и аналитические: а) кривая Пирсона III типа, нормализующая клетчатка, с параметризацией различными методами (1 – моментов, 2 – графоаналитический; 3 – L-моментов); б) то же при логарифмическом масштабе по вертикальной оси.

Красный пунктир – границы доверительного интервала эмпирической кривой 5-95% обеспеченности

Figure 1. Probability curves of annual maximum runoff at the gauging station Iya – Tulun. Empirical (points) and analytical: a) Pearson curve of type III, normalizing fiber, with parameterization by various methods (1 – moments, 2 – graphic-analytical; 3 – L-moments);

b) the same with a logarithmic scale along the vertical axis.

Red dotted line – the confidence interval boundaries of the empirical curve of 5-95% probability

СП 33-101-2003 столкнулась со значительными затруднениями. Построение в соответствии с распределением Крицкого-Менкеля вообще оказалось невозможным, что для данного региона уже отмечалось ранее [Губарева, 2011]. Это вызвано тем, что кривая Крицкого-Менкеля имеет теоретический нижний предел, равный нулю, а

все ряды данных, представленные в таблице 1, имеют нижний предел значительно выше нуля, и не могут быть аппроксимированы этой кривой.

На рисунках 1а, 1б приведены кривые распределения Пирсона III типа, построенные с оценками параметров по методам моментов, графоаналитическому и L-моментов. Видно, что

результаты построения неудовлетворительны. Кривая, построенная по методу моментов, совершенно не следует форме эмпирической кривой, хотя ближе остальных лежит к ней в расчетной области малых обеспеченностей. Остальные две аналитические кривые неплохо ложатся на эмпирическую в основной части, но сильно занижены в расчетной области, давая нереалистичные оценки обеспеченности для расходов 1984 и 2019 годов.

Для наглядности анализ соответствия аналитических кривых распределения эмпирической кривой каждый раз приводится в двух вариантах построения – на обычной нормализующей клетчатке, которая представляет интегральную кривую нормального распределения вероятности в виде прямой линии, и такое же построение с применением логарифмического масштаба вертикальной оси (оси расходов). Второй вариант позволяет отчетливо разглядеть степень «попадания» аналитической кривой в границы доверительного интервала 5-95% эмпирической кривой.

На рисунке 1а отражены основные особенности эмпирической кривой обеспеченности, из-за которой её аналитическая аппроксимация оказывается такой затруднительной. Кроме упомянутого выше свойства «удаленности» выборки от нулевых значений, кривая демонстрирует характерный излом вверх в узкой области малых значений (примерно <3%) обеспеченности. Излом обусловлен двумя наибольшими значениями расходов 1984 и 2019 годов, точки которых не располагаются вдоль плавной тенденции, задаваемой остальными значениями, а резко отклоняются вверх от неё. Такая особенность эмпирической выборки может быть её индивидуальной особенностью, обусловленной редким случайным сочетанием необычно высоких паводков в данной выборке, либо отражением неоднородности выборки в силу существенно различных условий формирования стока при рядовых и экстремальных паводках.

Анализ данных по максимальному стоку в исследуемом регионе, как выполненный ранее [Губарева, 2011], так и заново проведенный по

группе соседних рек, подтверждает последнее предположение. В эмпирических кривых распределения максимальных расходов некоторых соседних с рекой Ия рек, например река Белая (у села Мишелевка), присутствует аналогичный излом, иногда обусловленный одной, а иногда 2-3 отклоняющимися точками. Причем на разных реках эти отклоняющиеся точки относятся к разным годам. Этот факт, а также наличие исторических сведений о разрушительных паводках в регионе до начала наблюдений, подтверждают, что экстремально высокие паводки, формирующиеся при особых, редко повторяющихся условиях, представляют собой типичный, хотя и редкий феномен в данном регионе, повторяясь с регулярностью в несколько десятилетий.

В то же время на некоторых из исследуемых рек, например на реке Ока (у села Усть-Када), таких паводков не отмечено (либо они не попали в выборку?) и для них характерны «гладкие» кривые обеспеченности максимальных расходов, хорошо описываемые кривой Пирсона III типа. Такая особенность режима максимального стока делает задачу построения кривых обеспеченности максимальных расходов в рассматриваемом регионе методами стохастической гидрологии исключительно сложной, особенно с учетом имеющегося, в целом, дефицита данных наблюдений.

На рисунках 2а, 2б приведены кривые трехпараметрического логнормального распределения для поста реки Ия – город Тулун, построенные с оценками параметров по методам моментов, максимального правдоподобия и L-моментов. Для этого типа распределения картина существенно иная. Вариант логнормальной кривой, построенный по методу моментов, близко следует эмпирическим точкам и, хотя и значительно отклоняется от максимальной точки, но везде остается в пределах доверительного интервала. Этот вариант в принципе может быть принят как расчетный, однако даваемые им оценки обеспеченности паводков 1984 и 2019 годов существенно ниже эмпирических. Вариант, построенный по методу максимального правдоподобия совершенно

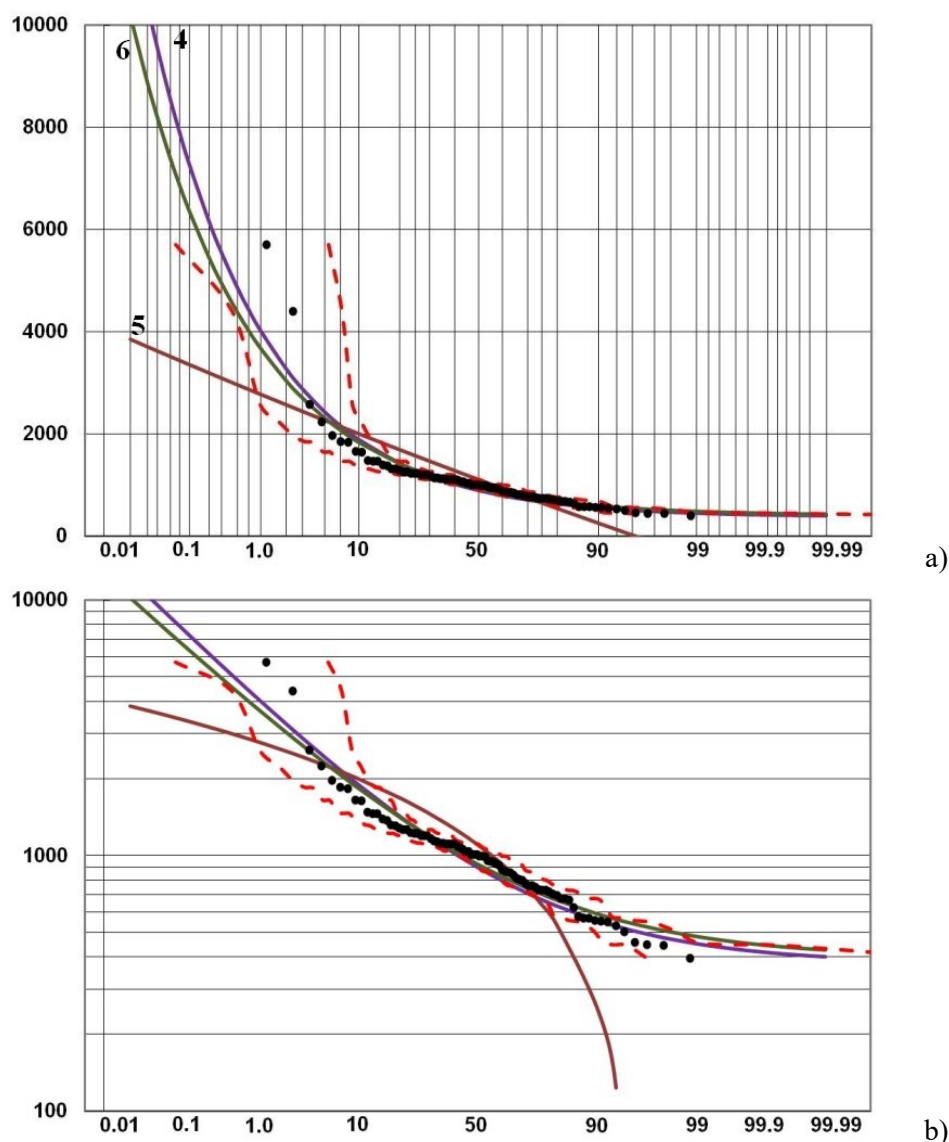


Рисунок 2. Кривые обеспеченности максимальных срочных расходов на посту реки Ия – город Тулун, эмпирическая (точки) и аналитические: а) кривая трехпараметрического логнормального распределения, нормализующая клетчатку, с параметризацией различными методами (4 – моментов, 5 – максимального правдоподобия; 6 – L-моментов);

б) то же при логарифмическом масштабе по вертикальной оси.

Красный пунктир – границы доверительного интервала эмпирической кривой 5-95% обеспеченности

Figure 2. Probability curves of annual maximum runoff at the gauging station Iya – Tulun. Empirical (points) and analytical: a) a curve of three-parameter lognormal distribution, normalizing fiber, with parameterization by various methods (4 – moments, 5 – maximum likelihood; 6 – L-moments); b) the same with a logarithmic scale along the vertical axis.

Red dotted line – the confidence interval boundaries of the empirical curve of 5-95% probability

неудовлетворителен, а построенный по методу L-моментов несколько выходит за границы доверительного интервала и дает существенно более низкие оценки обеспеченностей двух наивысших паводков.

Результаты описанных выше и выполненных далее расчетов сведены в таблицу 3, которая содержит следующую информацию. В первой колонке стоит номер расчетного варианта согласно сквозной их нумерации, применяемой на рисунках 1-4.

Таблица 3. Сравнительная оценка вариантов расчетных кривых обеспеченности срочных максимальных годовых расходов воды реки Ия – город Тулун**Table 3.** Analytical curves comparative assessment of urgent maximum annual runoff at the Iya River – Tulun City

№	Тип кривой	Метод оценки параметров	Надежность ω	Точность s	$Q_{\max} 1\%$ обесп	Обесп. $Q_{1984}=2.4\%$	Обесп. $Q_{2019}=1.2\%$
Варианты распределения Пирсона III типа (рисунок 1)							
1	Пирсона III типа	Моментов	82,1	5,11	4670	1,25	0,55
2	Пирсона III типа	Графоаналитич.	17,4	11,5	2680	<0,01	<<0,01
3	Пирсона III типа	L-моментов	32,5	7,48	3420	0,22	0,035
Варианты трехпараметрического логнормального распределения (рисунок 2)							
4	Логнорм. 3 пар.	Моментов	28,6	5,04	4020	0,70	0,29
5	Логнорм. 3 пар.	Макс. правдоп.	59,9	14,9	2770	<<0,01	<<0,01
6	Логнорм. 3 пар.	L-моментов	22,7	6,18	3670	0,50	0,17
Варианты по альтернативной схеме Ю.Б. Виноградова (рисунок 3)							
7	Логнорм. 3 пар.	Калибр. по надежн.	16,7	9,91	2950	0,085	0,014
8	Логнорм. 3 пар.	Калибр. по точн.	33,2	3,96	4900	1,50	0,62
9	Виноградова СЗ	Калибр. по надежн.	15,7	9,48	3040	0,15	0,03
10	Виноградова СЗ	Калибр. по точн.	25,6	2,12	5530	1,75	0,94
Варианты по методам, рекомендуемым в литературных источниках (рисунок 4)							
11	GEV	L-моментов	18,1	5,75	3780	0,62	0,27
12	GLO	L-моментов	15,0	5,60	3830	0,67	0,33
13	GPD	L-моментов	28,9	6,99	3510	0,45	0,082
14	Pareto	L-моментов	37,3	3,67	4550	1,15	0,60

Затем идет тип закона распределения и метод оценки параметров, используемых в данном расчетном варианте. Далее приводятся оценки *надежности ω* и *точности s* данного расчетного варианта, описанные выше. Далее приводится расчетное значение срочного максимального годового расхода воды 1%-й обеспеченности, полученное в данном расчетном варианте. В двух последних колонках представлены оценки обеспеченности, полученные при данном расчетном варианте для двух наивысших за период наблюдений расходов – паводков 1984 и 2019 годов.

На рисунках 3а, 3б приведены расчетные варианты кривых обеспеченности максимальных расходов воды для поста реки Ия – город Тулун, построенные по рекомендациям альтернативной схемы расчетов, предложенной Ю.Б. Виноградовым. Две кривые из приводимого набора соответствуют трехпараметрическому логнормальному распределению и построены

методом прямой подгонки ординат к точкам эмпирической кривой с применением критериев *надежности ω* или *точности s* . Другие две кривые основаны на функциональном преобразовании логнормального распределения, вариант СЗ по Ю.Б. Виноградову [1988], и также построены методом прямой подгонки ординат к точкам эмпирической кривой (калибровки) с применением критериев *надежности ω* или *точности s* .

В этом наборе расчетных вариантов степень соответствия положения аналитических и эмпирической кривых распределения в целом выше чем в предыдущих, как и следовало ожидать в силу метода построения. Варианты аналитических кривых, построенные с применением калибровки по критерию *надежности ω* , лежат в пределах доверительных интервалов эмпирической кривой почти во всем диапазоне её значений, однако выходят за их границы в расчетной области малых

обеспеченностей. Поэтому они не могут быть использованы как оценочные. Варианты, построенные с применением калибровки по критерию *точности s*, напротив, полностью (почти полностью) лежат в пределах доверительных интервалов эмпирической кривой. При этом оба варианта дают наиболее близкие к эмпирическим оценки обеспеченностей расходов паводков 1984 и 2019 годов.

На рисунках 4а, 4б приведен последний набор расчетных вариантов кривых обеспеченности максимальных расходов воды для поста реки Ия – город Тулун, построенных по рекомендациям литературных источников к применению для оценок максимального стока и используемых преимущественно в зарубежной практике. Сюда входят кривые обобщенных распределений GEV, GLO и GPD, а также Pareto. Параметризация всех кривых при этом выполнялась с использованием метода L-моментов. Все варианты в этом наборе также достаточно хороши, с некоторыми замечаниями.

Так, распределение GPD выходит за доверительные интервалы эмпирической кривой как в верхнем, так и в нижнем диапазоне изменения расходов. Распределение Pareto лежит наиболее близко к точкам в расчетном диапазоне малых обеспеченностей, но при этом выходит за границы доверительных интервалов в большом диапазоне нижней части кривой. Самыми перспективными для рассмотрения выглядят кривые распределений GEV и GLO, при этом вариант GLO имеет преимущество по совокупности оценок и является наилучшим в данном наборе. Следует отметить также, что именно распределение GLO рекомендовано в ранее выполненном исследовании [Губарева, 2011] как наиболее пригодное для расчетов

максимального стока в регионе Восточной Сибири.

Таким образом, обобщая сводку данных таблицы 3, можно заключить, что большинство из расчетных вариантов кривых обеспеченности дают аналитические оценки обеспеченностей расходов 1984 и 2019 годов многократно (от 4 до сотен раз) меньше, чем эмпирические их обеспеченности. Другими словами, с точки зрения большинства вариантов расчетных моделей два наивысших в ряду паводка должны рассматриваться как практически невозможные события, что делает эти варианты мало- либо совсем неприемлемыми по крайней мере в прикладном аспекте, вне зависимости от других оценок их качества как моделей.

Выделяются несколько вариантов кривых обеспеченности, которые наилучшим образом подходят в качестве расчетных – под номерами 1, 8, 10, 14. При отборе этих вариантов имеет значение наибольшая близость аналитических оценок обеспеченности расходов 1984 и 2019 годов к эмпирическим их оценкам, а также наилучшие оценки по *точности s*, причем два этих аспекта тесно связаны друг с другом. Следует отметить, что из отобранных вариантов расчетной кривой два (под номерами 8 и 10) представляют собой схему Ю.Б. Виноградова, основанную на использовании функционально-нормальных кривых, а аппроксимация отобранных вариантов к эмпирическим данным осуществляется путем калибровки по значению *точности s* в качестве критерия. Другими словами, эти варианты – результаты прямой подгонки математических кривых к данным, в наименьшей степени среди всех обеспеченные физическим или хотя бы концептуальным (с точки зрения теории случайных процессов) обоснованием.

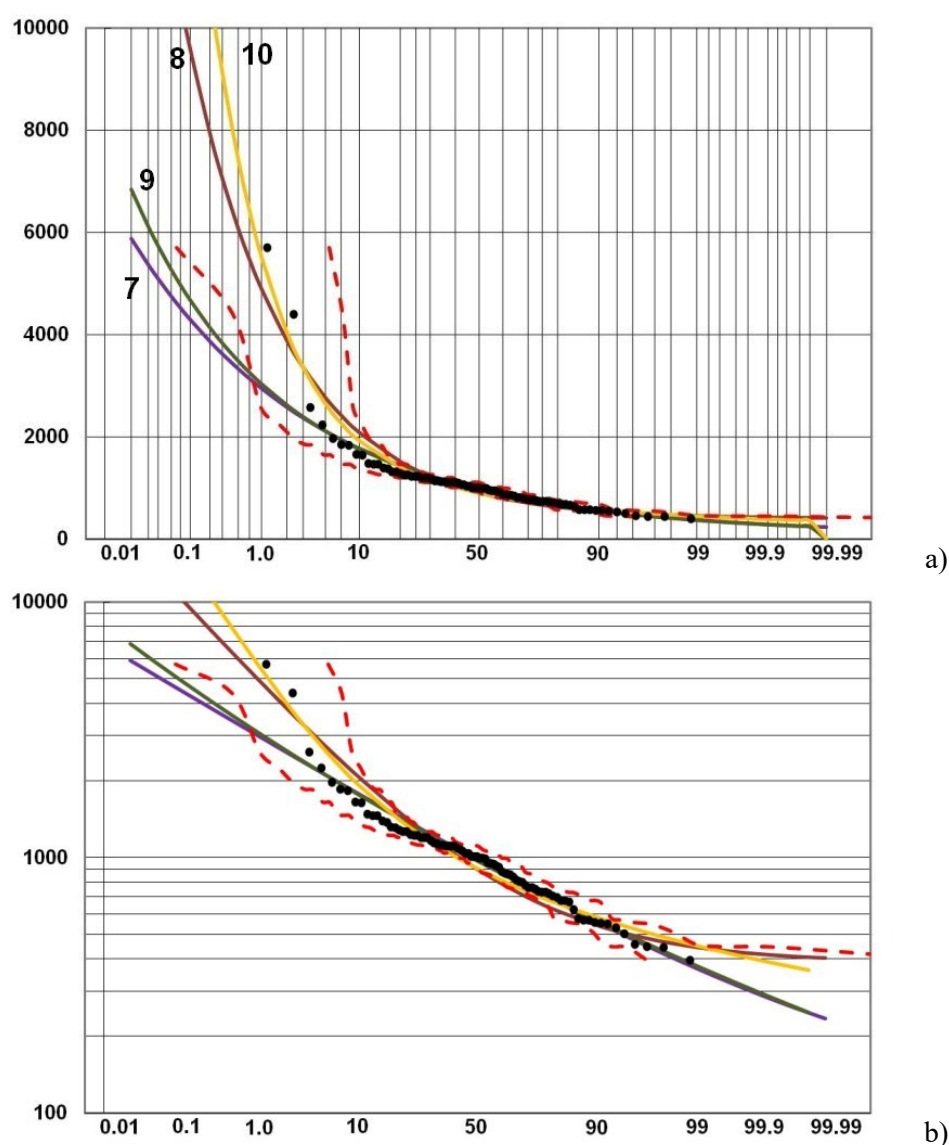


Рисунок 3. Кривые обеспеченности максимальных срочных расходов на посту реки Ия – город Тулун, эмпирическая (точки) и аналитические: а) построенные по альтернативной схеме на нормализующей клетчатке (7 – трехпараметрическая логнормальная с калибровкой по ω , 8 – трехпараметрическая логнормальная с калибровкой по s , 9 – функционально-нормальная СЗ с калибровкой по ω , 10 – функционально-нормальная СЗ с калибровкой по s); б) то же при логарифмическом масштабе по вертикальной оси.

Красный пунктир – границы доверительного интервала эмпирической кривой 5-95% обеспеченности

Figure 3. Probability curves of annual maximum runoff at the gauging station Iya – Tulun. Empirical (points) and analytical: a) constructed according to an alternative scheme on the normalizing fiber (7 – three-parameter log-normal with calibration according to ω , 8 – three-parameter log-normal with calibration s , 9 – functionally normal C3 with calibration according to ω , 10 – functionally normal C3 with calibration according to s); b) the same with a logarithmic scale along the vertical axis.

Red dotted line – the confidence interval boundaries of the empirical curve of 5-95% probability

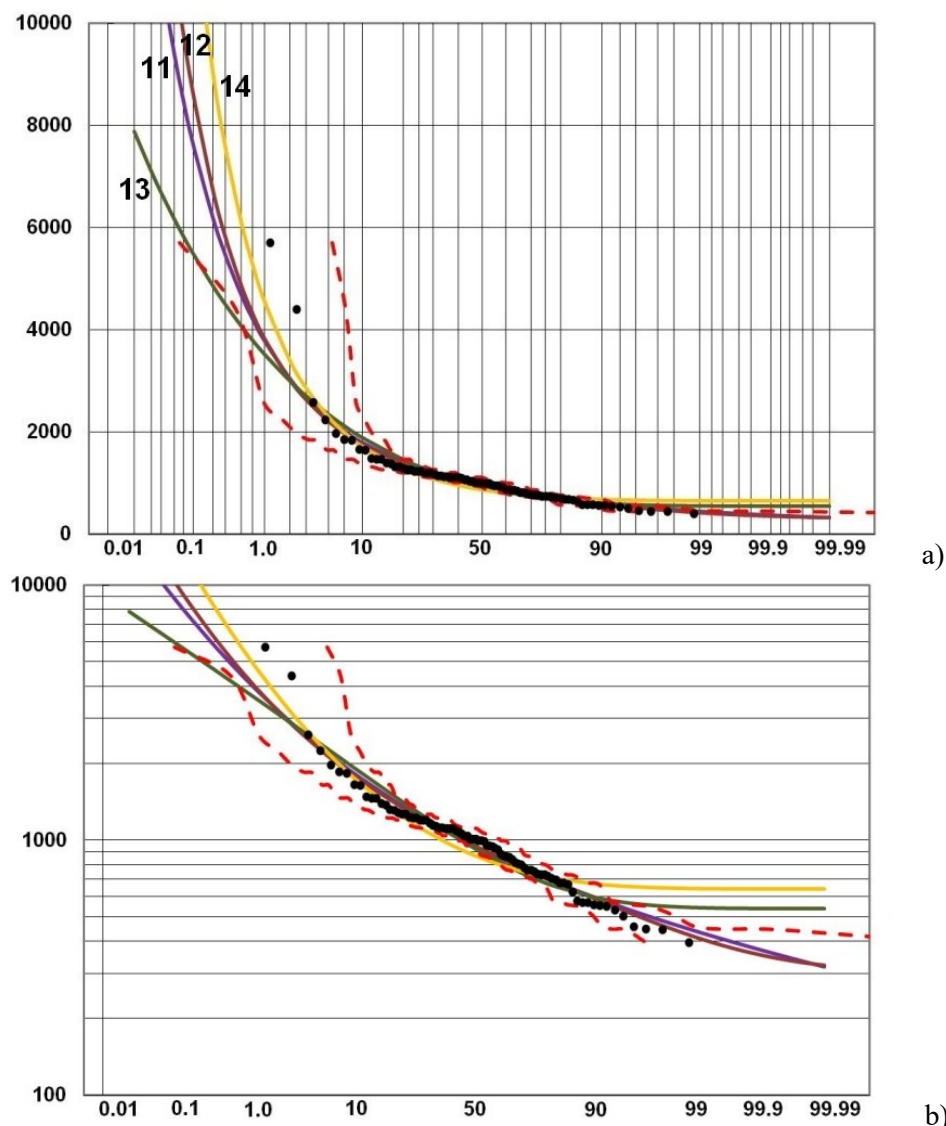


Рисунок 4. Кривые обеспеченности максимальных срочных расходов на посту реки Ия – город Тулун, эмпирическая (точки) и аналитические: а) построенные по рекомендациям литературных источников с использованием метода L-моментов (11 – GEV, 12 – GLO, 13 – GPD, 14 – Pareto); б) то же, при логарифмическом масштабе по вертикальной оси. Красный пунктир – границы доверительного интервала эмпирической кривой 5-95% обеспеченности

Figure 4. Probability curves of annual maximum runoff at the gauging station Iya – Tulun. Empirical (points) and analytical: a) curves, according to the recommendations of literary sources using the L-moments method (11 – GEV, 12 – GLO, 13 – GPD, 14 – Pareto); b) the same, with a logarithmic scale along the vertical axis. Red dotted line - the confidence interval boundaries of the empirical curve of 5-95% probability

В то же время нельзя не отметить, что оба этих варианта модели полностью лежат в пределах границ доверительных интервалов, то есть удовлетворяют всем используемым формальным критериям к моделям, и с наибольшими основаниями могут быть приняты для использования в инженерных расчетах. Однако и в этих вариантах аналитические оценки

обеспеченности расходов 1984 и 2019 годов в 1,3-2,0 раза занижены по сравнению с эмпирическими, что соответственно до 2 раз увеличивает расчетный период повторяемости таких паводков по сравнению с наблюдениями.

Вариант расчетной кривой под номером 1, включающий кривую Пирсона III типа и её параметризацию методом моментов, большей

частью лежит за пределами границ доверительного интервала и в целом имеет форму, сильно отличающуюся от эмпирической кривой. Особенно важным аспектом является наличие для этого варианта нижней границы расходов, ниже которой лежит более 30% эмпирических точек. Вариант расчетной кривой под номером 14, включающий кривую Pareto и параметризацию методом L-моментов, имеет аналогичные, хотя и слабее выраженные, недостатки – в частности 14% точек эмпирической кривой лежат ниже нижнего предела аналитической. Относительно хорошо лежащие в границах доверительного интервала и достаточно высоко оцениваемые по критериям варианты под номерами 4, 11 и 12 дают аналитические оценки обеспеченности паводков 1984 и 2019 годов в 4-5 раз ниже эмпирических.

Несмотря на наличие нескольких вариантов расчетных кривых, удовлетворяющих почти всем требованиям в совокупности, качественно решить на их основе поставленную задачу не удастся. Все отобранные варианты в расчетной области малых обеспеченностей существенно отклоняются от эмпирических точек наивысших паводков вниз. Это означает, что по результатам расчетов следует трактовать паводки как 1984 года, так и 2019 года как весьма редкие события, а их сочетание в пределах периода наблюдений продолжительностью 84 года – как исключительно редкое. Диапазон оценок периодов повторяемости паводков 1984 и 2019 годов по наилучшим вариантам кривых (под номерами 8 и 10) составляет около 62 и 135 лет, соответственно. Эта оценка могла бы считаться приемлемой, но, как указано выше, эти варианты расчета не являются, по сути, моделями. Они практически не имеют рационального обоснования и должны рассматриваться лишь как прием математического сглаживания эмпирической зависимости. Между тем, имеющиеся наблюдения на посту реки Ия – город Тулун, экспертное обобщение данных наблюдений по соседним постам и исторических сведений о событиях в регионе указывают, что период повторяемости экстремальных дождевых паводков имеет порядок 1 раз в 50 лет.

Обсуждение результатов

Таким образом, на данном этапе исследования использован практически полный арсенал средств стохастической гидрологии, направленный на получение вероятностных оценок экстремальных значений гидрологических характеристик непосредственно на основе эмпирических данных наблюдений за оцениваемыми характеристиками. Использован широкий спектр законов распределения вероятностей и практически весь известный набор методов аппроксимации кривых обеспеченности. В результате получено несколько вариантов одномерной вероятностной модели максимальных годовых расходов воды – расчетных кривых обеспеченности, которые удовлетворительно, с точки зрения набора формальных оценок, описывают эмпирическую кривую распределения максимальных годовых расходов на посту реки Ия – город Тулун.

Однако, диапазон аналитических оценок обеспеченности расходов наибольших за период наблюдений паводков 1984 и 2019 годов, полученный по вариантам расчетных кривых, не включает в себя эмпирические оценки их обеспеченности, охватывая существенно более низкие значения. Причем наиболее близкие к эмпирическим оценки (тоже заметно заниженные) имеют наименьшее содержательное обоснование, являясь результатом прямой аналитической аппроксимации исходных данных. Экспертная оценка региональных данных о выдающихся паводках, включая как данные регулярных наблюдений на сети, так и сведения из других источников, заставляет предположить, что полученные результаты ориентируют на недооценку паводковой опасности в регионе.

Таким образом, задача построения аналитической кривой распределения максимальных расходов воды, надежно аппроксимирующей выборку эмпирических данных и позволяющей дать обоснованную и реалистичную оценку обеспеченности экстраординарных паводков в бассейне реки Ия, не решена. Причиной этого, очевидно, является сложность процессов формирования стока в регионе, существенные различия механизмов и

условий развития рядовых и выдающихся паводков. Это приводит к статистической неоднородности выборок максимальных расходов, которые не могут быть корректно описаны в рамках применения одномерных трехпараметрических законов распределения.

Судя по результатам, эта задача и не может быть решена на основе чисто статистического подхода и при ограниченности исходных данных. Для решения задачи оценки вероятности выдающихся паводков в таких условиях наиболее целесообразным представляется использование

динамико-стохастического моделирования на основе физически-обоснованной модели стока.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН и темы № FUGS-2019-0003 (№ государственной регистрации АААА-А17-117041910172-4) Государственного задания ИГ СО РАН им. В.Б. Сочавы.

Литература

Виноградов А.Ю., Догановский А.М., Обязов В.А. Существующие проблемы гидрологических расчётов. Часть 1 // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 143-159. DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.004](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.004).

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. М.: Гидрометеиздат, 1988. 365 с.

Губарева Т.С. Типы распределений при оценке экстремальных паводков // Геоэкология. 2010. № 5. С. 446-457.

Губарева Т.С. Пространственные закономерности распределения паводков рек умеренного пояса Северного полушария // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2011. № 2. С. 65-77.

Губарева Т.С., Гарцман Б.И. Оценка параметров распределений экстремальных гидрологических величин методом L-моментов // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 4. С. 398-407.

Иванько Я.М. Экстремальные природные явления исторического прошлого на территории Иркутской области. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1997. 96 с.

Кичигина Н.В. Опасность наводнений на реках Байкальского региона // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 41-51. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(41-51\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(41-51)).

Кичигина Н.В. Опасность паводочных наводнений в бассейнах левых притоков Ангары // География и природные ресурсы. 2020. № 4.

References

Greenwood J.A., Landwehr J.M., Matalas N.C., Wallis J.R. Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 1979, vol. 15, iss. 5, pp. 1049-1054. DOI: [10.1029/WR015i005p01049](https://doi.org/10.1029/WR015i005p01049).

Gubareva T.S. Tipy raspredelenii pri otsenke ekstremal'nykh pavodkov [Types of probability distribution for extreme flood estimation]. *Geoekologiya [Geoecology]*, 2010, no. 5, pp. 446-457. (In Russian; abstract in English).

Gubareva T.S. Prostranstvennye zakonomernosti raspredeleniya pavodkov rek umerennogo poyasa Severnogo polushariya [Spatial patterns of flood distribution on rivers in temperate zone of the Northern Hemisphere]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]*, 2011, no. 2, pp. 65-77. (In Russian; abstract in English).

Gubareva T.S., Gartsman B.I. Estimating distribution parameters of extreme hydrometeorological characteristics by L-moments method. *Water Resources*, 2010, vol. 37, iss. 4, pp. 437-445. DOI: [10.1134/S0097807810040020](https://doi.org/10.1134/S0097807810040020). (Russ. ed.: Gubareva T.S., Gartsman B.I. Otsenka parametrov raspredelenii ekstremal'nykh gidrologicheskikh velichin metodom L-momentov. *Vodnye Resursy*, 2010, vol. 37, no. 4, pp. 398-407).

Hosking J.R.M., Wallis J.R. *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments*.

С. 45-55. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2020-4\(45-55\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(45-55)).

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: в 3 т. Том 1. РСФСР: в 25 вып. Выпуск 13. Бассейн Ангары. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 290 с.

Найденев В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 317 с.

Писаренко В.Ф., Болгов М.В., Осипова Н.В., Руквишников Т.А. Применение теории экстремальных событий в задачах аппроксимации распределений вероятностей максимальных расходов воды // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 6. С. 645-657.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т. 16. Ангаро-Енисейский район: в 3 вып. Вып. 2. Ангара. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 593 с.

Greenwood J.A., Landwehr J.M., Matalas N.C., Wallis J.R. Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form // Water Resources Research. 1979. Vol. 15. Iss. 5. Pp. 1049-1054. DOI: [10.1029/WR015i005p01049](https://doi.org/10.1029/WR015i005p01049).

Hosking J.R.M., Wallis J.R. Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 224 p. DOI: [10.1017/CBO9780511529443](https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443).

Cambridge, Cambridge Univers. Press, 1997, 224 p. DOI: [10.1017/CBO9780511529443](https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443).

Ivan'o Ya.M. *Ekstremal'nye prirodnye yavleniya istoricheskogo proshlogo na territorii Irkutskoi oblasti [Extreme natural phenomena of the historical past on the territory of the Irkutsk region]*. Irkutsk, Publ. IGU, 1997. 96 p. (In Russian).

Kichigina N.V. Opasnost' navodnenii na rekakh Baikal'skogo regiona [Floods hazards on the rivers of the Baikal region]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2018, iss. 2, pp. 41-51. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(41-51\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(41-51)).

Kichigina N.V. Opasnost' pаводоchnykh navodnenii v basseinakh levyykh pritokov Angary [Flood hazard within the basins of the left tributaries of the Angara]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2020, no. 4. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2020-4\(45-55\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(45-55))

Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi: v 3 t. Том 1. RSFSR: в 25 вып. Vypusk 13. Bassein Angary. [Long-term data on the regime and resources of land surface waters: in 3 volumes. Volume 1. RSFSR: in 25 issues. Issue 13. Angara basin.] Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1986. 290 p. (In Russian).

Naidenov V.I. *Nelineinaya dinamika poverkhnostnykh vod sushi [Nonlinear dynamics of land surface waters]*. Moscow, Publ. Nauka, 2004. 318 p. (In Russian).

Pisarenko V.F., Bolgov M.V., Osipova N.V., Rukavishnikova T.A. Application of the theory of extreme events to problems of approximating probability distributions of water flow peaks *Water Resources*, 2002, vol. 29, iss. 6, pp. 593-604. (Russ. ed.: *Pisarenko V.F., Bolgov M.V., Osipova N.V., Rukavishnikova T.A.* *Primenenie teorii ekstremal'nykh sobytii v zadachakh approksimatsii raspredelenii veroyatnostei maksimal'nykh raskhodov vody. Vodnye Resursy*, 2002, vol. 29, no. 6, pp. 645-657).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 tomah. Том 16. Angaro-Eniseiskii raion: в 3 вып. Vyp. 2. Angara [USSR surface water resources: in 20 volumes. Volume 16. Angara-Yenisei region: in

3 issues. Issue 2. Angara]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 593 p. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Doganovsky A.M., Obyazov V.A. Sushchestvuyushchie problemy gidrologicheskikh raschetov. Chast' 1 [Existing issues of hydrology calculations. Part 1]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 143-159 (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.004](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.004).

Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov formirovaniya stoka [Mathematical modeling of runoff formation processes]*. Moscow, Publ. Gidrometeoizdat, 1988. 365 p. (In Russian).

УДК 556.16

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.365

**ASSESSING PREDICTABILITY OF
HYDROLOGICAL PROCESSES (ON
THE EXAMPLE OF FROZEN SOIL
WATER CONTENT DYNAMICS)**

Alexander N. Gelfan

*Water Problems Institute of Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia*
hydrowpi@iwp.ru

Abstract. A method has been developed for assessing the limits of predictability of the frozen soil water content (according to observations at the Nizhnedevitskaya water balance station). The method is based on the analysis of the convergence of a given probabilistic measure (the variance of the calculated soil water content at a given date) to its stable value. The soil water content was simulated by the physically based model of heat and water transfer in a frozen soil column during a autumn-winter seasons. To assess variability of the modelled soil water content at a given date, the boundary meteorological conditions for the autumn-winter period were simulated by the Monte Carlo procedure using a stochastic weather generator. The initial conditions were assigned as the constant soil temperature and soil moisture values over the 1-meter soil column. The predictability of the soil water content in the one-meter layer of the studied soils has occurred to be about 1.5 months; it means that for the forest-steppe conditions, the soil water content before the beginning of soil freezing cannot serve as an indicator of soil water content before spring. Numerical experiments have shown that the soil water content predictability: (1) grows with an increase in the thickness of the considered soil layer and its depth; (2) decreases for coarser soils as compared to finely dispersed soils; (3) is more sensitive to changes in the soil texture than to changes in the climatic norms of precipitation and air temperature.

**ОЦЕНКА ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ
ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ
МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ)**

А.Н. Гельфан

*Институт водных проблем Российской
академии наук, г. Москва, Россия,*
hydrowpi@iwp.ru

Аннотация. Разработана методика оценки пределов предсказуемости влажности мерзлой почвы (по данным наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции). Методика основана на анализе сходимости заданной вероятностной меры (дисперсии расчетной влажности почвы на заданную дату) к ее устойчивому значению. Влагосодержание почвы рассчитывалось с помощью физико-математической модели вертикального тепло- и влагопереноса в почвенной колонке в осенне-зимний период. Чтобы оценить вариацию величины влажности почвы, рассчитанной на заданную дату, граничные метеорологические условия в течение осенне-зимнего периода моделировались с помощью процедуры Монте-Карло с использованием стохастического генератора погоды. Начальные условия задавались в виде профилей постоянных значений температуры и влажности почвы по глубине. Расчетная оценка предсказуемости влажности почвы в метровом слое исследуемых почв составила около 1,5 месяцев, то есть для условий лесостепи осенняя влажность почвы не может служить индикатором ее увлажнения перед началом весеннего снеготаяния. Численные эксперименты показали, что предсказуемость влажности почвы: 1) растет с увеличением толщины рассматриваемого слоя почвы и глубины этого слоя; 2) уменьшается для почв легкого механического состава по сравнению с почвами тяжелого состава; 3) более чувствительна к изменению текстуры почвы, чем

Keywords: hydrological processes; predictability; physically-based model; weather generator; soil moisture dynamics; frozen soil

Introduction

The study of the predictability of natural processes is a traditional task for many geophysical sciences. In meteorology, for example, such studies are based on the concepts of two types of predictability developed in the classical works of E. Lorenz [Lorenz, 1975]: predictability of the first kind, due to the internal instability of atmospheric processes, their high sensitivity to small perturbations of the initial conditions and predictability of the second kind, associated with the variability of external influences with respect to the atmosphere (ocean, land surface, etc.). The study of the physical mechanisms and factors of predictability, the determination of its limits depending on the space-time scales of the processes under study, the identification of potentially predictable structures – the listed and other problems of scientific meteorology are solving on the basis of the concept of predictability as a problem of mathematical physics developed already half a century ago (see, for example, [Dymnikov, 2007]).

In hydrology, the concept of predictability over many years is associated, as a rule, with the possibility of constructing a forecast method that meets the specified criteria of accuracy and lead time (see, for example, [Shukla et al., 2013]). This understanding of predictability is close to the concept of “effective predictability” [Douville, 2010] or “forecastability” accepted in meteorology, which depends, inter alia, on subjective factors, including the experience and methodological preferences of a forecast developers, the characteristics of the existing observation network, etc. Interest in the analysis of predictability as an objective property of the hydrological system has arisen in recent years and is

к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха.

Ключевые слова: гидрологические процессы; предсказуемость; физико-математическая модель; генератор погоды; динамика почвенной влаги; мерзлая почва

primarily associated with studies of the macroscale variability of soil moisture and snow cover characteristics aimed at deepening understanding of the contribution of low-frequency variability of these characteristics to the dynamics of the climate system¹. In addition, publications have appeared in which factors influencing the predictability of hydrological processes on a river basin scale are investigated, such as: spatial averaging of processes [Blöschl, Sivapalan, 1995], nonlinearity of hydrological systems [Zehe et al., 2007], hydraulic properties of the basin [Kumar, 2011]. There is reason to believe that the construction of a conceptual framework for analyzing the predictability of hydrological systems is becoming one of the key scientific problems in hydrology [Blöschl, 2006].

The purpose of this study is to develop a methodological approach to assessing the predictability limits (potential predictability) of hydrological processes using the example of moisture transfer processes and the formation of soil moisture content in a frozen soil. The moisture content of frozen soil is the main factor in the snowmelt runoff losses during the formation of spring floods (freshets) in the cold regions' river basins, and the reliability of its assessment significantly affects the accuracy of forecasts of spring floods using the existing operational techniques. At the same time, measurements of soil moisture in winter are mostly not performed in Russia (there are only point measurement data at the experimental sites of water balance stations and small experimental basins), therefore, to assess the moisture content of frozen soil before the onset of snow melting, existing forecast methods use the so-called indices of preliminary

¹ Report of a Workshop on Predictability & Limits-To-Prediction in Hydrologic Systems. Washington, D.C., National Academy Press, 2002. 138 p.

moisture content². Such indices are, as a rule, data on the soil moisture content or on the low-flow runoff for the previous autumn period. In other words, the hypothesis is implicitly accepted that the moisture content of frozen soil before the onset of snow melting depends to a greater extent on the autumn soil moisture than on moisture transfer processes in winter. The validity of this hypothesis depends on many factors, primarily on the weather conditions during the winter, soil properties and vegetation cover. A quantitative estimate of the time period during which the influence of the previous (autumn) conditions persists, depending on the listed factors, constitutes the essence of the approach proposed in the article and can serve as a methodological basis for testing this hypothesis.

Methods

Approach to assessing the predictability limit of a hydrological system

Consider a stochastic dynamical system described by the equation [Dymnikov, 2007]:

$$\frac{dW}{dt} = B(W) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

$$W|_{t=0} = W_0 \quad (2)$$

where $W = W(t)$ is a state variable;

$B(W)$ is a dynamics operator;

$\varepsilon(t)$ – delta-correlated Gaussian random process $\langle \varepsilon_i(t) \times \varepsilon_j(t') \rangle = 2d_{ij}\delta(t - t')$, $d_{ij} > 0$;

$\langle \rangle$ – averaging operator.

In hydrology, the dynamic-stochastic equation (1) is used to describe the soil moisture dynamics, interannual changes in river runoff, fluctuations in the lake level, and the dynamics of the volume of mountain glaciers (see, for example, [Demchenko, Kislov, 2010]). It was shown [Dymnikov, 2007] that, under the condition $d_{ij} \equiv d$, equation (1) can be written in the form of the Fokker-Planck equation for the probability density function $\rho(W)$:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(B(W)\rho) = d\Delta\rho \quad (3)$$

$$\rho \geq 0, \int \rho dW = 1 \quad (4)$$

The initial condition for the equation (3) is written as:

$$\rho|_{t=0} = \delta(W - W_0) \quad (5)$$

It was also shown [Dymnikov, 2007] that over time, the probability density function $\rho(W)$ of the system state will converge to a stationary solution $\bar{\rho}$, and information about the initial condition will be lost by the system. The time interval during which the system retains information about its initial state can be set by the time of convergence of a given probabilistic measure to its stable value and determines the potential predictability of the system or the physically determined limit of its predictability.

For a complex nonlinear system, the implementation of the described approach is possible through experiments with a numerical dynamical-stochastic model with random inputs, which describes the dynamics of the system states. This possibility will be illustrated below using the example of a dynamic-stochastic model of moisture transfer in a frozen soil.

Dynamic-stochastic model of water transfer in a frozen soil

The structure of the developed dynamic-stochastic model combines two components: (1) a physically based model of vertical moisture transfer in a frozen soil, taking into account the accumulation and melting of snow cover on its surface, and (2) a stochastic weather generator.

The physically based model is described in [Gelfan, 2006] and based on solving a system of nonlinear equations of heat and moisture transfer describing the hydrothermal regime of the soil during its freezing, thawing and infiltration of melt water, taking into account the phase water-ice transformation, the influence of over-cooled moisture. The system of equations and methods of their numerical integration, the results of model tests based on the data of laboratory and field experiments of the Hydrophysical Laboratory of the State Hydrological Institute and field observations at the

² Guide to Hydrological Forecasts. Issue 1. Long-term forecasts of the elements of the water regime of rivers and reservoirs. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1989. 358 p. (In Russian).

Nizhnedevitskaya water balance station are presented in detail in [Gelfan, 2006]. The used stochastic weather generator, which allows one to reproduce by the Monte Carlo method long-term artificial sequences of meteorological variables with daily resolution at a given point (without taking into account the spatial relationships between meteorological variables) is described in [Gelfan, 2007]. The paper describes the results of calibration and testing of the weather generator based on meteorological measurements on the territory of the forest-steppe zone of the European Russia.

Numerical experiments design

Numerical experiments to assess the potential predictability of soil moisture content in the autumn-winter period were carried out using observational data at the Nizhnedevitskaya water balance station and were organized as follows.

Calculations were made for the period from November 1 to March 31. Stochastic weather generator was developed for this season on the basis of the meteorological observations from 1969 till 2014. The initial conditions for solving the equations of heat and moisture transfer were set as the constant total (liquid water + ice) soil moisture content and the constant soil temperature over the depth of a one meter soil column. An ensemble of 1 000 random realizations of time series of meteorological variables (air temperature, precipitation and air humidity) with daily resolution for the period from November 1 to March 31 was modeled using a stochastic weather generator. These variables were set as boundary conditions for the calculated equations of heat and moisture transfer in the absence of snow. If there is a snow cover on the soil surface (its characteristics were calculated from the generated meteorological “inputs” using a single-layer model [Gelfan, 2006]), the boundary conditions were set in the form of heat and moisture fluxes at the snow-soil boundary.

Using a dynamic-stochastic model, an ensemble of $N=1\,000$ trajectories of changes in daily

values of soil moisture $W_{ijk}=W_k(z_i, t_j)$ and temperature $T_{ijk}=T_k(z_i, t_j)$ at different depths was calculated from November 1 to March 31 (here k is the number of the calculated trajectory, $k=1, 2, \dots, 1000$; $z_i=[10(i-1); 10i]$ [cm] is i -th calculated 10-cm layer along the depth of a meter soil column from its surface; $i=1, 2, \dots, 10$; $t_j=[(j-1); j]$, [days], is j -th daily time interval from the beginning of calculations $j=1, 2, \dots, 151$).

Each of the 1000 trajectories was calculated under given (the same for all calculations) initial conditions and random, simulated by the Monte Carlo method, boundary conditions.

For each calculated step t_j and soil layer z_i , the mean square deviation $\sigma_{ij}(W)$ of soil moisture was calculated for the ensemble $N=1\,000$ trajectories:

$$\sigma_{ij}(W) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (W_{ijk} - \bar{W}_{ij})^2 \times (N-1)^{-1}} \quad (6)$$

where $\bar{W}_{ij} = N^{-1} \sum_{k=1}^N W_{ijk}$ is an average over the ensemble of trajectories value of soil moisture in the layer z_i and at the time step t_j .

The value $\sigma_{ij}(W)$ was specified as a probabilistic measure, the time of convergence of which to a stable value was assigned as the potential predictability of soil moisture.

The limit of predictability $\Delta_i(W)$ of soil moisture (potential predictability) was estimated from the condition:

$$\Delta_i = \min(j) : \left| \frac{\sigma_{ij} - \sigma_{i(j-1)}}{\sigma_{ij}} \right| \leq \alpha, \quad j=1, 2, \dots, 151 \quad (7)$$

where α is the specified threshold value (taken equal to 0.01).

Thus, the predictability limit of the process is determined by the time period during which the variance of the scatter of trajectories calculated for each time step becomes a constant value determined by external meteorological forcing (winter weather conditions), and the effect of initial conditions (pre-winter moisture and soil temperature) becomes insignificant.

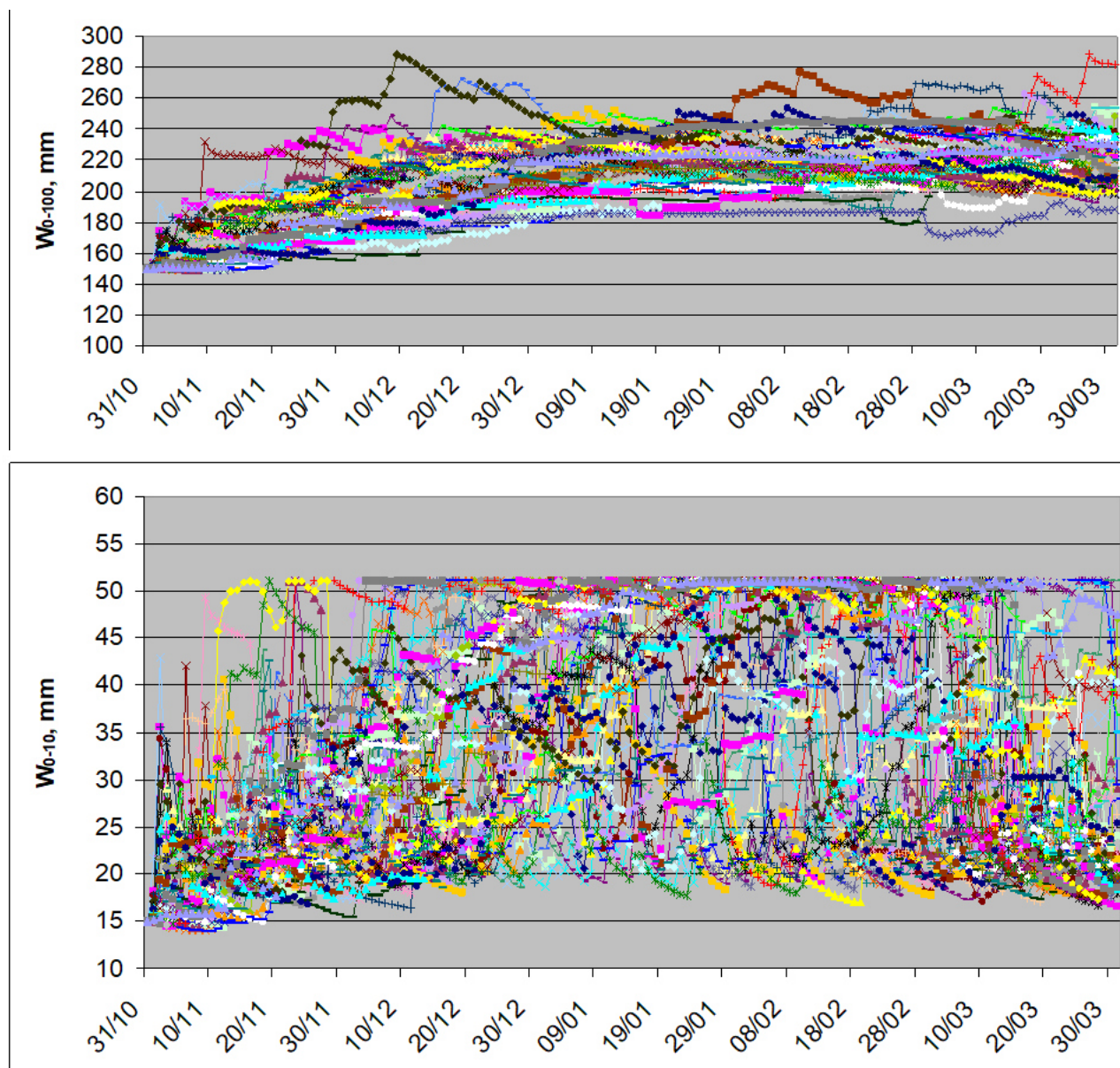


Figure 1. Ensemble of trajectories of the total moisture content (mm) of the meter (top) and upper 10-cm (bottom) soil layers of freezing soil, calculated under the same initial conditions ($W(z,0)=0.15$; $T(z,0)=3^{\circ}\text{C}$) and the Monte Carlo simulated boundary meteorological conditions

Рисунок 1. Ансамбль траекторий изменения влагосодержания (мм) метрового слоя (вверху) и верхнего 10-см слоя промерзающей почвы, рассчитанных при начальных условиях ($W(z,0)=0,15$; $T(z,0)=3^{\circ}\text{C}$) и граничных метеорологических условиях, сгенерированных методом Монте Карло

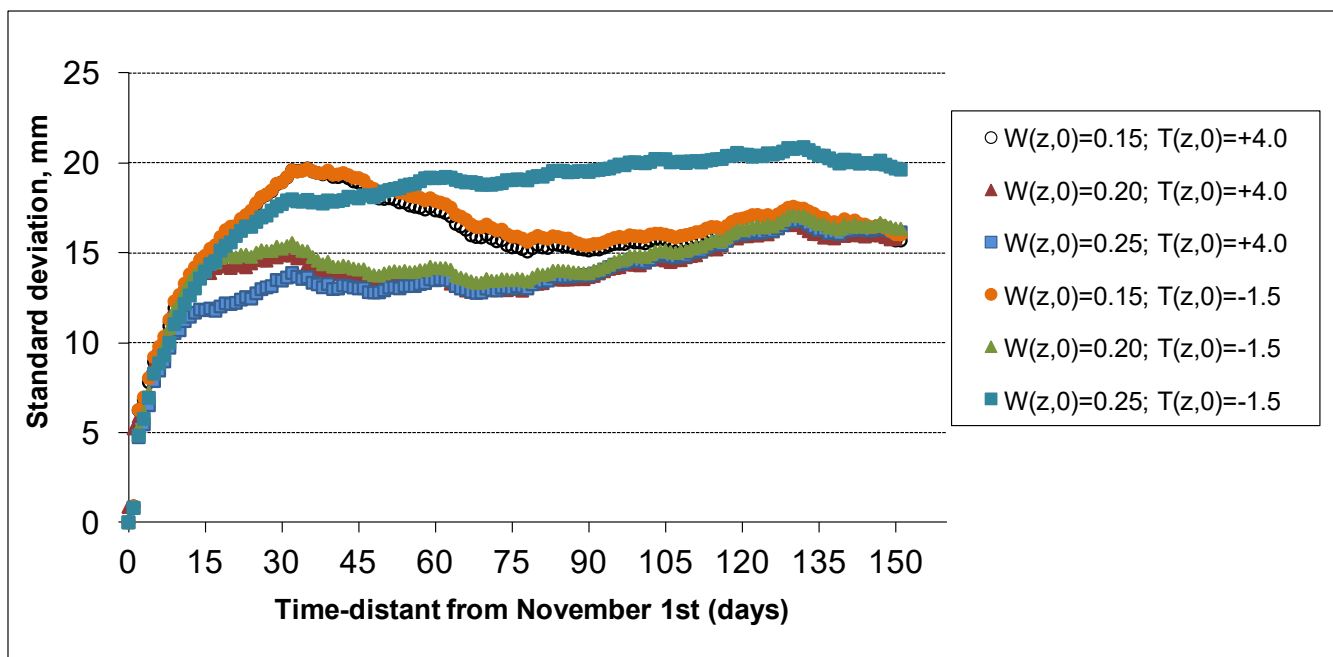


Figure 2. Change in the mean square deviation (over the ensemble of 1 000 trajectories) of the freezing soil moisture content (meter soil layer) with time-distance from the initial date (November 1).

Each line relates to the specific initial conditions

Рисунок 2. Изменения среднеквадратического отклонения (по ансамблю 1000 траекторий) значений влагосодержания метрового слоя почвы с удалением от начальной расчетной даты (1 ноября).

Каждая линия на графике относится к конкретным начальным условиям

Results and discussion

The calculated trajectories of changes in the total moisture content are shown as an example in figure 1.

Figure 2 shows how the value $\sigma_{ij}(W)$ changes with the time-distance from the initial date of calculation (November 1) under different initial conditions (the total moisture content of a meter soil layer of freezing soil is shown as an example).

Figure 2 shows that the predictability limit of the total moisture content of the soil column,

calculated by formula (4) at $\alpha=1\%$, varies in a rather narrow range, namely from 31 to 42 days, with the given significant changes in the initial conditions ($W(z,0)=0.15\div0.25$; $T(z,0)=-1.5\div+4^\circ\text{C}$).

In general, the obtained estimates of the predictability of the moisture reserve for individual 10-cm layers of the freezing soil column showed that predictability increases with increasing layer depth: for the upper layer, predictability is about one month, for the lower layer 90-100 cm it reaches 3 months (figure 3).

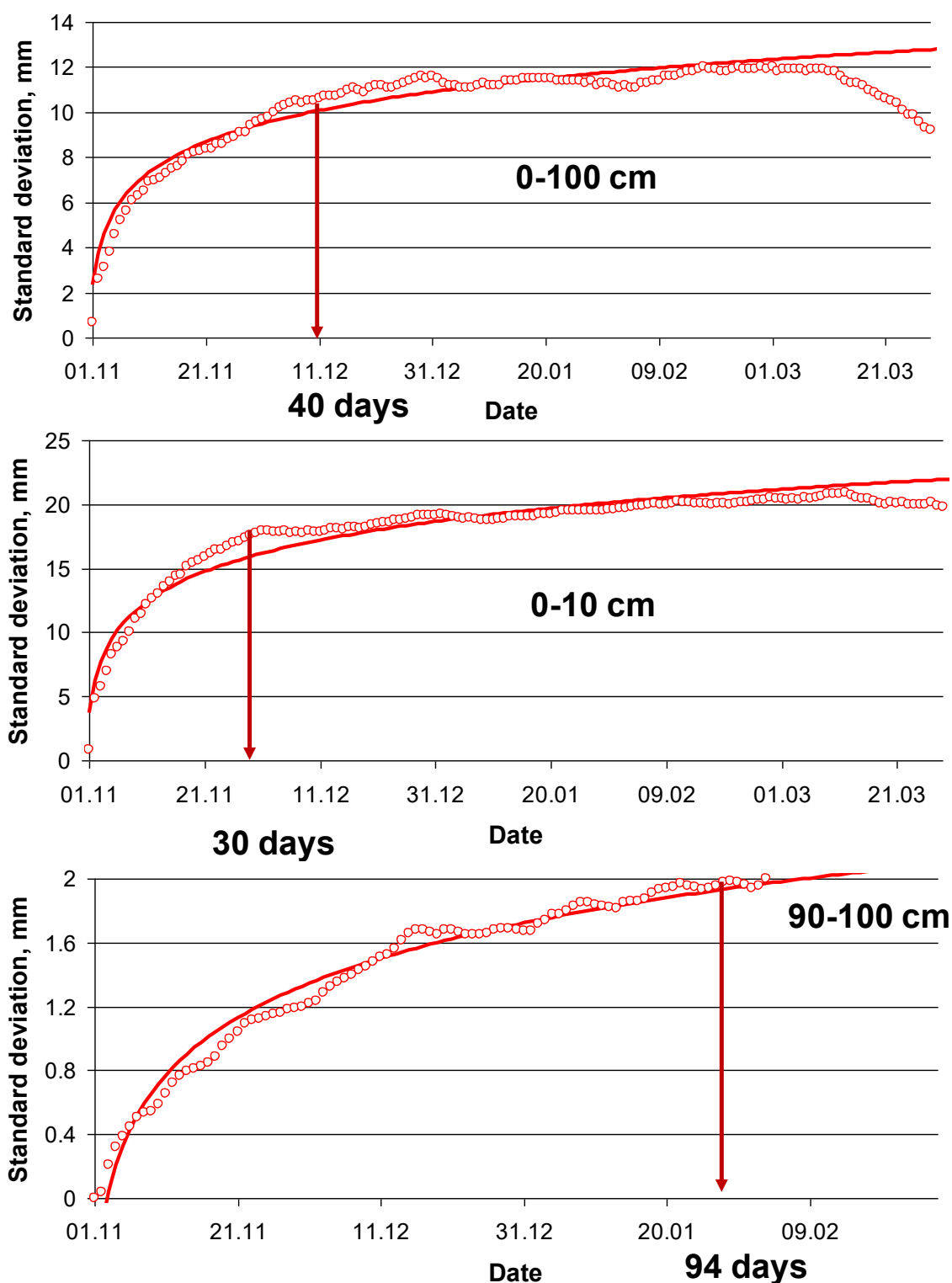


Figure 3. Change in the standard deviation and assessment of the predictability of the moisture content in the meter soil layer (top figure), moisture content in the 0-10 cm layer (middle figure) and moisture content in the 90-100 cm layer (bottom figure)

Рисунок 3. Изменения среднеквадратического отклонения и оценки предсказуемости влагосодержания метрового слоя почвы (вверху), верхнего 10-см слоя почвы (средний рисунок) и слоя 90-100 см (нижний рисунок)

Two series of numerical experiments were carried out to assess the sensitivity of the calculated predictability limit of the 1-meter soil moisture content: (1) to changes in soil texture, which affects the hydraulic and thermal parameters of the equations of heat and moisture transfer, and also (2) to changes in climatic norms of air temperature and precipitation specified as parameters of the stochastic weather generator. The results of numerical experiments are shown in figures 4, 5. The experiments have shown that the predictability of the 1-meter soil moisture content increases for soils with a heavier texture, reaching 51 days for heavy loam (figure 4). To assess sensitivity of predictability to the climatic norms (mean annual values), four numerical experiments were carried out. First, the air temperature climatic norm, T_a , as the weather generator parameter was increased by 2°C with an unchanged precipitation

climatic norm (hereafter, “Scenarios 1”). Second, T_a was increased by 1°C with an unchanged precipitation norm (“Scenarios 2”). Third, the annual precipitation P was increased by 10% at an unchanged air temperature norm (“Scenarios 3”) and, fourth, P increased by 20% at an unchanged air temperature norm (“Scenarios 4”). The calculation results are shown in figure 5. One can see that the assigned changes in climatic characteristics did not have a noticeable effect on the predictability limit of soil moisture content.

Thus, an important property of the system under consideration is that its predictability depends on the internal properties of the system to a greater extent than on the characteristics of the forcing process. A similar result for a linear dynamical-stochastic system was obtained analytically in [Demchenko, Kislov, 2010].

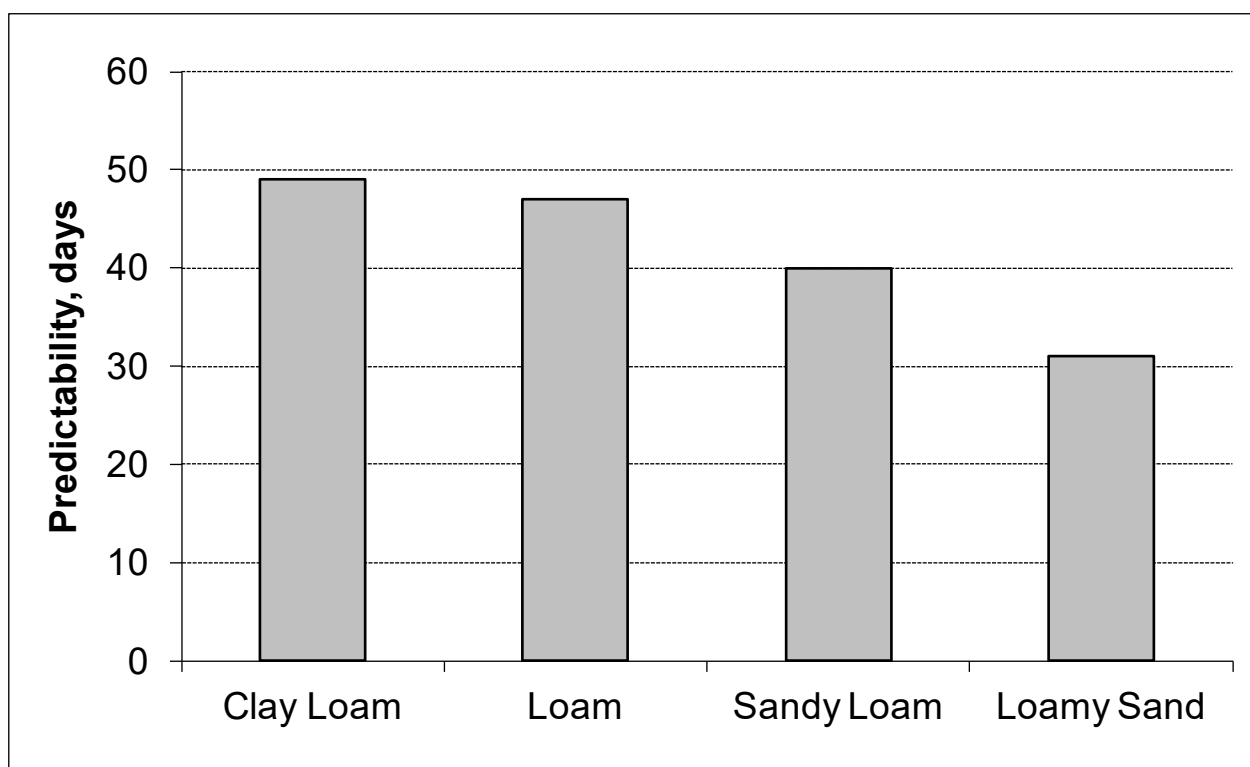


Figure 4. Predictability of moisture content of a meter layer of freezing soil, depending on soil texture

Рисунок 4. Предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы разного механического состава

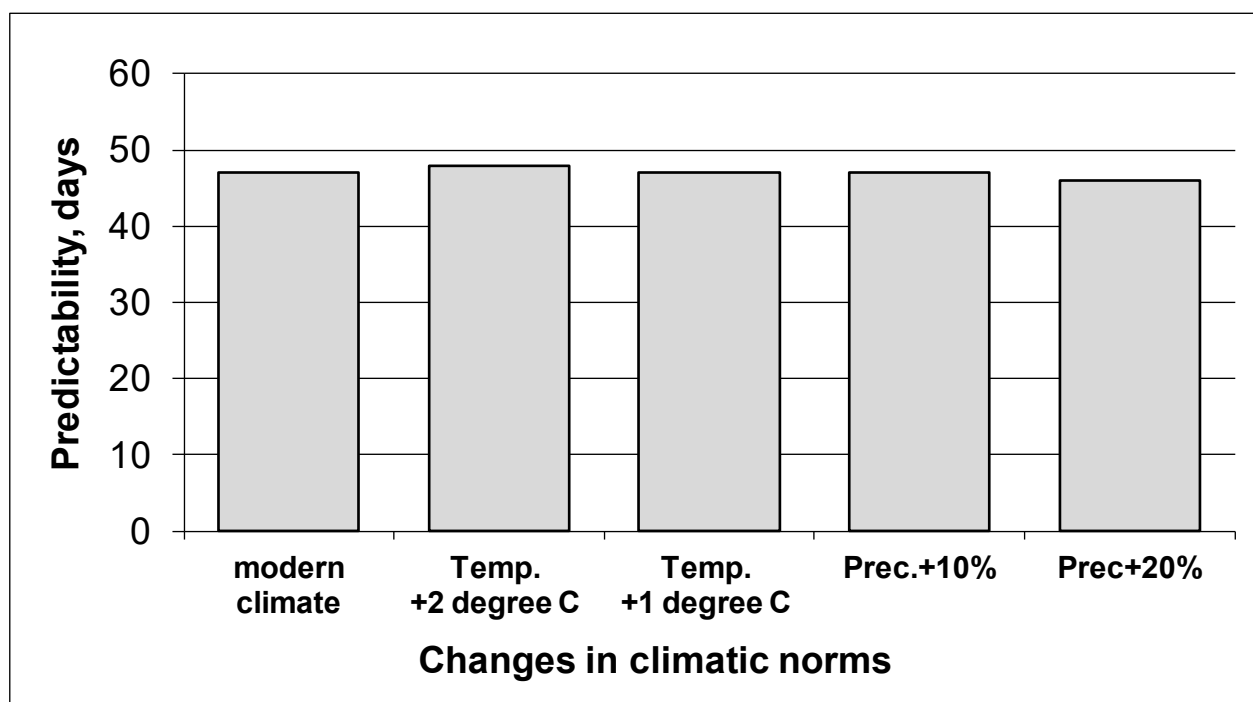


Figure 5. Predictability of moisture content in a meter layer of freezing soil under different scenarios of changes in climatic norms of air temperature and precipitation

Рисунок 5. Предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы при 4-х сценариях изменений климатических норм температуры воздуха и осадков

Conclusions

The paper proposes a method for estimating the predictability limits of a hydrological system based on a dynamic-stochastic model with random inputs. The method is based on calculating the time of convergence of the variance of the state of the system to its stable value. The method was applied to assess the predictability of moisture content in a freezing soil. Using numerical experiments with the developed model, the following is shown.

References

- Blöschl G. Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales. *Water Resources Research*, 2006, vol. 42, iss. 3, W03S02. DOI: [10.1029/2005WR004319](https://doi.org/10.1029/2005WR004319).
- Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 1995, vol. 9, iss. 3-4, pp. 251-290. DOI: [10.1002/hyp.3360090305](https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305).
- Demchenko P.F., Kislov A.V. *Stokhasticheskaya dinamika prirodnnykh ob"ektov. Brounovskoe dvizhenie i geofizicheskie prilozheniya* [Stochastic

1. The predictability of the moisture content of the freezing soil grows with an increase in the thickness and depth of the considered soil layer.

2. In soils of light texture, the predictability of moisture content is less than in heavier soils.

3. The predictability of soil moisture content depends on the hydraulic properties of the soil to a much greater extent than on the parameters of the meteorological forcing (climatic norms of precipitation and air temperature).

Литература

- Демченко П.Ф., Кислов А.В. Стохастическая динамика природных объектов. Броуновское движение и геофизические приложения. М.: Изд-во ГЕОС, 2010. 189 с.
- Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: Изд-во ИВМ РАН, 2007. 282 с.
- Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Изд-во Наука, 2007. 278 с.

dynamics of natural objects: Brownian motion and geophysical applications]. Moscow, Publ. GEOS, 2010. 189 p. (In Russian).

Douville H. Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study. *Climate Dynamics*, 2010, vol. 34, iss. 6, pp. 797-818. DOI: [10.1007/s00382-008-0508-1](https://doi.org/10.1007/s00382-008-0508-1).

Dymnikov V.P. *Ustoichivost' i predskazuemost' krupnomasshtabnykh atmosferynykh protsessov [Stability and predictability of large-scale atmospheric processes]*. Moscow, Publ. IVM RAN, 2007. 282 p. (In Russian).

Gelfan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka [Dynamic-stochastic modeling of the formation of melt runoff]*. Moscow, Publ. Nauka, 2007. 278 p. (In Russian).

Gelfan A.N. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data. *Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress: Proceedings of the Seventh IAHS Scientific Assembly (April 3-9, 2005, Foz do Iguazu, Brazil)*, 2006, pp. 293-304.

Kumar P. Typology of hydrologic predictability. *Water Resources Research*, 2011, vol. 47, iss. 3, W00H05. DOI: [10.1029/2010WR009769](https://doi.org/10.1029/2010WR009769).

Lorenz E.N. Climatic predictability. *Report of the International Study Conference "The Physical Basis of Climate and Climate Modelling" (29 July – 10 August 1974, Stockholm)*, Geneva, GARP Publications Series No. 16, 1975, pp. 132-136.

Shukla S., Sheffield J., Wood E.F., Lettenmaier D.P. On the sources of global land surface hydrologic predictability. *Hydrology and earth system sciences*, 2013, vol. 17, iss. 7, pp. 2781-2796. DOI: [10.5194/hess-17-2781-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-2781-2013).

Zehe E., Elsenbeer H., Lindenmaier F., Schulz, K., Blöschl G. Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 2007, vol. 43, iss. 7, W07434. DOI: [10.1029/2006WR005589](https://doi.org/10.1029/2006WR005589).

Blöschl G. Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales // *Water Resources Research*. 2006. Vol. 42. Iss. 3. W03S02. DOI: [10.1029/2005WR004319](https://doi.org/10.1029/2005WR004319).

Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review // *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. Iss. 3-4. Pp. 251-290. DOI: [10.1002/hyp.3360090305](https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305).

Douville H. Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study // *Climate Dynamics*. 2010. Vol. 34. Iss. 6. Pp. 797-818. DOI: [10.1007/s00382-008-0508-1](https://doi.org/10.1007/s00382-008-0508-1).

Gelfan A.N. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data // *Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress: Proceedings of the Seventh IAHS Scientific Assembly (April 3-9, 2005, Foz do Iguazu, Brazil)*. 2006. P. 293-304.

Kumar P. Typology of hydrologic predictability // *Water Resources Research*. 2011. Vol. 47. Iss. 3. W00H05. DOI: [10.1029/2010WR009769](https://doi.org/10.1029/2010WR009769).

Lorenz E.N. Climatic predictability // *Report of the International Study Conference "The Physical Basis of Climate and Climate Modelling" (29 July – 10 August 1974, Stockholm)*. Geneva: GARP Publications Series No. 16, 1975. Pp. 132-136.

Shukla S., Sheffield J., Wood E.F., Lettenmaier D.P. On the sources of global land surface hydrologic predictability // *Hydrology and earth system sciences*. 2013. Vol. 17. Iss. 7. Pp. 2781-2796. DOI: [10.5194/hess-17-2781-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-2781-2013).

Zehe E., Elsenbeer H., Lindenmaier F., Schulz, K., Blöschl G. Patterns of predictability in hydrological threshold systems // *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43. Iss. 7, W07434. DOI: [10.1029/2006WR005589](https://doi.org/10.1029/2006WR005589).

УДК 504.064.2.001.18

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.375

ВОЗМОЖНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА МАЛОЙ РЕКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В.М. Морейдо¹, Б.И. Гарцман¹,
Д.П. Соломатин^{1,2}, З.А. Сучилина¹

¹Институт водных проблем Российской
академии наук, г. Москва, Россия

²IHE Delft Институт образования в сфере
водных ресурсов, г. Дельфт, Нидерланды
moreido@mail.ru

PROSPECTS FOR SHORT-TERM FORECASTING OF RIVER STREAMFLOW FROM SMALL WATERSHED RUNOFF USING MACHINE LEARNING METHODS

Vsevolod M. Moreido¹, Boris I. Gartsman¹,
Dimitri P. Solomatine^{1,2}, Zoya A. Suchilina¹

¹ Water Problems Institute of Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russia

²IHE Delft Institute for Water Education, Delft, The
Netherlands
moreido@mail.ru

Аннотация. В статье исследуются возможности краткосрочного (от 1 до 7 суток) прогнозирования расходов воды на основе нескольких методов машинного обучения: модели множественной линейной регрессии, искусственной нейронной сети по типу многослойного перцептрона и рекуррентной искусственной нейронной сети с долгосрочной кратковременной памятью. Предлагаются методы расширения набора предикторов для построения моделей и исследуется возможность случайного перемешивания хронологического ряда предикторов для калибровки и верификации моделей как повышающая устойчивость результатов прогноза. В качестве объекта исследования используется малая река Средней полосы России – река Протва (гидрометрический пост Спас-Загорье). В качестве предикторов используются расходы воды на посту и суточные суммы осадков на трех ближайших метеостанциях в текущий момент времени (сутки) и со сдвигом назад до 7 суток, а также индекс увлажнения бассейна и характеристики температуры воздуха и испарения. На конкретном примере показана возможность построения эффективной оперативной прогностической системы для краткосрочного прогнозирования стока. Исследование выявило приемлемую для оперативной практики

Abstract. The paper addresses prospects for short-term (from 1 to 7 days) forecasting of river streamflow runoff based on several machine learning methods: multiple linear regression (LM) model, a multilayer perceptron (MLP) artificial neural network, and a recurrent artificial neural network with long short-term memory (LSTM). Methods for expanding the set of predictors for model construction are proposed, and the possibility of random shuffling of the time-series of predictors for model calibration and verification are assessed. The object of the study is the small river of Central Russia – river Protva (Spas-Zagorie gauge). Current and lagged values of streamflow discharge at the gauge and daily precipitation at local weather stations are used as predictors for the model, as well as moisture index and evaporation rate. The obtained results show the possibility of constructing an effective operational forecasting system for short-term runoff forecasting. The study revealed the applicability of artificial neural network models, acceptable for operational practice, using all available hydrometeorological information on the catchment, as they showed the most stable results at all lead times from 1 to 7 days. In contrast to the linear model, which efficiency decreases after lead time of more than 3 days, the artificial neural networks models have higher forecast efficiency up to 7 days. The results obtained are robust for all

применимость моделей искусственных нейронных сетей, использующих всю доступную гидрометеорологическую информацию на водосборе, как показавших наиболее устойчивые результаты на всех заблаговременностях от 1 до 7 суток. Так, в отличие от линейной прогностической модели, эффективность которой снижается на заблаговременностях более 3 суток, модели искусственных нейронных сетей показали высокую эффективность прогноза до 7 суток. Полученные результаты устойчивы для всех фаз водного режима, как весеннего половодья, так и летних паводков. Программная реализация моделей выполнена на основании открытых программных библиотек на языке Python, что показывает возможность широкого использования описанных методик для научных исследований и прикладных задач.

Ключевые слова: гидрологические прогнозы; машинное обучение; прогнозы речного стока; искусственные нейронные сети; краткосрочные прогнозы расходов воды; модели речного стока

Введение

Использование математических моделей для расчета и прогноза речного стока является достаточно хорошо разработанной областью гидрологии суши, опыт которой насчитывает уже более 70 лет [Emerton et al., 2016; Fatichi et al., 2016; Мотовилов, 2016a]. На сегодняшний день известно достаточно большое число классов и структур гидрологических моделей, предназначенных для решения различных научных и прикладных задач [Кучмент, Гельфан, 1993; Gelfan, Motovilov, 2009]. Так, для детальных расчетов процессов формирования речного стока используются физико-математические модели, содержащие сложные параметризации описываемых процессов и позволяющие проводить различные их оценки, например реакцию компонентов гидрологического цикла на изменения в климатической системе [Fatichi et al., 2016; Мотовилов, 2016a; Мотовилов, 2016b; Beven, 2020]. Наряду с этими моделями в задачах, где детальное описание процессов формирования не требуется, а исследуется реакция речной

системы на метеорологические воздействия, таких как краткосрочное прогнозирование речного стока, успешно используются более упрощенные модели, связывающие предшествующие наблюдения за речным стоком и метеовеличинами в пределах речного водосбора с будущими величинами речного стока [Белякова и др., 2013; Beven, 2020]. Такие модели, получившие название «черного ящика» по причине отсутствия в них детального описания стокоформирующих процессов, были известны с середины 50-х годов [Кучмент, Гельфан, 1993]. Физической основой для них является, как правило, сильная автокорреляция рядов речного стока и (в некоторых физико-географических условиях) корреляция стока с осадками. На протяжении последних 20 лет такие модели находятся на новом витке эволюции. Это происходит благодаря развитию высокопроизводительных вычислительных систем и разработке новых алгоритмов, получивших общее название «модели машинного обучения» (“machine learning”) [Halff, Halff,

Keywords: hydrological forecasting, machine learning, artificial neural networks; runoff forecasts; short-term streamflow forecasting; runoff modelling

Azmoodeh, 1993; Kratzert et al., 2018]). Такие модели, в том числе один из их подклассов – искусственные нейронные сети (далее – ИНС), – показали свою эффективность в решении различных прикладных задач прогнозирования временных рядов, включая речной сток [Beven, 2020]. В основе таких моделей лежит нелинейная трансформация весов, присваиваемых исходным данным (предикторам) в процессе оценки относительного вклада каждого из предикторов в выходной ряд (предикат), а также оптимизация значений этих весов на каждом расчетном шаге для минимизации целевой функции (также называемое обратным распространением ошибки модели [Werbos, 1990]). Нелинейная трансформация происходит внутри нейросети на слое узлов активации, называемых нейронами, и связывающих все предикторы и предикат.

Следует отметить, что модели машинного обучения, и ИНС в том числе, отличаются непритязательностью к исходным данным, так как не содержат детальных описаний процессов формирования стока и тем самым освобождены от неопределенностей, связанных с параметризацией таких процессов. Это достоинство, впрочем, одновременно является и их главным недостатком, поскольку одной из основных претензий, предъявляемых гидрологическим сообществом к таким моделям, является невозможность объективной интерпретации их структуры [Abrahart et al., 2012].

В настоящем исследовании предпринята попытка продемонстрировать возможность построения эффективной системы краткосрочного прогнозирования речного стока с помощью моделей ИНС двух типов – многослойного перцептрона [Haykin, 1994] и модели с долгосрочной кратковременной памятью [Hochreiter, Schmidhuber, 1997]. В качестве объекта исследования используется бассейн малой реки Средней полосы России – реки Протва с замыкающим гидрометрическим створом в селе Спас-Загорье, для которого строятся прогнозы речного стока заблаговременностью до 7 суток. В статье последовательно описываются архитектура

моделей, использованные ряды данных для построения моделей и методы обучения и проверки, после чего производится сопоставление полученных результатов между собой.

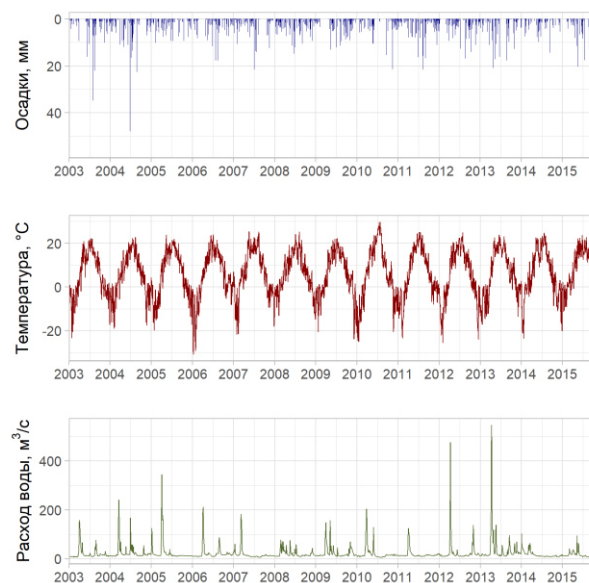
Объект исследования

Малая река Протва расположена в средней полосе Европейской России в пределах водосбора реки Волга (рисунок 1а). Длина реки – 282 км, площадь водосбора – 4 620 км². Исток реки Протва находится на междуречье реки Ока и ее крупного притока – реки Москва, – близ города Можайск, и впадает река Протва в реку Ока у города Протвино. Бассейн реки Протва расположен в области умеренно-континентального климата с холодной зимой и умеренно теплым летом. Особенностью территории является частое прохождение циклонов как в холодный, так и в теплый период года. С прохождением циклонов связано основное количество (до 90%) осадков. Водный режим реки Протва относится к восточноевропейскому типу [Зайков, 1946], главная его фаза – весеннее половодье – длится примерно 30-40 суток. В этот период проходит более половины годового стока. Остальная часть года представляет собой относительно маловодный период, состоящий из летне-осенней и зимней межени, за исключением небольшого повышения водности в конце теплого периода, вызванного осенними дождями.

В силу размера водосбора сток реки Протва в теплый период года чувствителен к ливневым осадкам, а в холодный – к периодам оттепелей. В стоке реки Протва доминирует снеговая составляющая (50%), при этом активно участвуют подземное (30%) и дождевое (20%) питание (рисунок 1б). Средний многолетний расход реки Протва в устье составляет 24 м³/с. Для данного исследования был выбран створ на реке Протва у села Спас-Загорье, который освещает наблюдениями площадь водосбора 4 250 км². На территории бассейна и близ его границ расположены три метеорологические станции, ведущие наблюдения за температурой воздуха и количеством осадков (рисунок 1а).



(a)



(б)

Рисунок 1. Схема водосбора реки Протва (а) с расположением метеорологических станций и гидрологических постов, гидрограф за расчетный период с 2003 по 2015 год (б, снизу) с нанесением рядов осадков (б, сверху) и температур (б, в середине)

Figure 1. Map of the catchment area of the Protva river (a) with the location of meteorological stations and river gauges, daily hydrograph (б, bottom), precipitation (б, top) and temperatures (б, middle) time-series for the period from 2003 to 2015

Использованные данные и методы

Исходные ряды наблюдений

Наборы исходных данных для каждого из бассейнов созданы на основе архивов стандартных наблюдений с суточным шагом на метеорологических станциях и гидрологических постах Росгидромета. Архивы созданы и поддерживаются в виде автоматизированной базы данных Института водных проблем Российской академии наук на основе информации, предоставленной Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных.

Набор метеорологических данных включает ряды среднесуточных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и суточных сумм осадков (мм), измеренных также на 3 метеостанциях в пределах этого бассейна (Можайск, Малоярославец, Обнинск) за период 2003–2015 годов. Ряд среднесуточных расходов воды сформирован за тот же период времени по данным наблюдений на гидрометрическом посту в селе Спас-Загорье.

Подготовка рядов исходных данных

Для проведения вычислительных экспериментов были подготовлены матрицы исходных данных с 2003 по 2015 год. Расчеты выполнялись для каждого дня в году. На каждую дату выполнялся прогноз ежедневных расходов воды на определенную заблаговременность на основе информации, известной на момент выдачи прогноза. Обе матрицы включали набор из 58 предикторов – рядов ежедневных значений переменных, полученных на основе обработки исходной гидрометеорологической информации. В тех же матрицах содержались и по 7 предикторов – рядов прогнозируемой характеристики (расхода воды) – с заблаговременностью от 1 до 7 суток. В число предикторов входили (таблица 1):

— расходы воды в замыкающем створе $Q_{t-\tau}$, $\text{м}^3/\text{с}$, на день выдачи прогноза и за предысторию $\tau=1\dots 7$ суток;

— максимальные суточные изменения расходов $\Delta Q_{\text{max},\tau}$, $\text{м}^3/\text{с}$, за предысторию $\tau=2\dots 7$ суток;

— суточные суммы осадков $P_{t-\tau}$, мм, по отдельным метеостанциям на день выдачи прогноза и за предысторию в $\tau=1\dots 7$ суток;

Таблица 1. Структура строки матриц исходных данных

Table 1. Structure of the input data matrices

Переменные	Номер позиции в строке	Описание
Предикаты		
Расходы воды	2-8	$Q_{t+\tau}, \tau=1 \dots 7$
«Динамические» предикторы		
Расходы воды	9-16	$Q_{t-\tau}, \tau=0 \dots 7$
Максимальные суточные изменения расхода за период	17-23	$\Delta Q_{max_{\tau}}, \tau=2 \dots 7$
Суточные суммы осадков по трем метеостанциям	24-47	$P^j_{t-\tau}, \tau=0 \dots 7, j = 27\ 509, 27\ 606, 27\ 611$
Средние суточные суммы осадков	48-55	$P_{t-\tau}, \tau=0 \dots 7$
Средние суточные суммы осадков, накопленные за период	56-61	$\sum P_{\tau}, \tau=1 \dots 7$
«Инерционные» предикторы		
Индекс предшествующего увлажнения	62	I_W
Накопленные от начала сезона суммы температур выше пороговых значений 0, +2 и +5°C	63-65	$\sum T_0, \sum T_{+2}, \sum T_{+5}$
Суммарное от начала сезона расчетное испарение	66	ΣPET

— средние по трем метеостанциям осадки $\bar{P}_{t-\tau}$, мм, на день выдачи прогноза и за предысторию $\tau=1 \dots 7$ суток;

— накопленные средние по бассейну осадки $\sum P_{t-\tau}$, мм, за предысторию $\tau=1 \dots 7$ суток;

— накопленные от начала каждого теплого периода суммы суточных температур $\sum T$, °C, выше пороговых значений (0, +2 и +5°C);

— расчетные значения индекса предшествующего увлажнения I_W , мм, вычисляемого по данным о средних по бассейну осадках за 60 суток, предшествующих дате выдачи прогноза, по формуле:

$$I_W = P_t + \sum_{\tau=1}^4 P_{t-\tau} + 0,5 \sum_{\tau=5}^9 P_{t-\tau} + 0,3 \sum_{\tau=10}^{14} P_{t-\tau} + 0,2 \sum_{\tau=15}^{30} P_{t-\tau} + 0,1 \sum_{\tau=31}^{60} P_{t-\tau}$$

— накопленное от начала сезона расчетное испарение $\sum PET$, мм, представляющее потенциальное испарение суммарное с начала теплого периода, вычисляемое по суточным значениям PET с использованием формулы Одина [Oudin, Michel, Anctil, 2005]:

$$PET = \begin{cases} \frac{0,408 R_e (T+5)}{100}, & \text{при } T + 5 > 0, \\ 0, & \text{при } T + 5 \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

где PET – суммарное испарение за сутки, мм;

R_e – приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы, Вт;

T – среднесуточная температура воздуха, °C.

Матрицы исходных данных организованы построчно, структура строки представлена в таблице 1. В первой позиции каждой строки располагается «текущая» дата – дата выдачи экспериментального прогноза t . В 9 позиции строки располагается расход воды на дату t – переменная Q_t . Позиции слева от Q_t , со 2 по 8, занимают предикаты – «будущие» расходы воды в порядке с Q_{t+7} по Q_{t+1} . Справа от Q_t последовательно располагаются предшествующие расходы воды на глубину учитываемой предыстории в порядке с Q_{t-1} по Q_{t-7} . Далее располагаются максимальные величины изменения расхода за предшествующий период от 2 до 7 суток ($\Delta Q_{max_2} \dots \Delta Q_{max_7}$). Далее следуют ежедневные осадки по трем станциям, для каждой из них сначала за текущую дату, затем последовательно за предшествующие дни от 1 до 7 суток. Далее в аналогичном порядке располагаются средние по

бассейну осадки, в обоих случаях вычисленные по трем станциям, то есть $P_1 \dots P_{t-7}$. Затем следуют накопленные суммы средних по бассейну осадков за несколько предшествующих дней – от двух ($\sum P_2$) до семи ($\sum P_7$). На этом заканчивается совокупность быстроизменяющихся переменных, которые можно назвать «динамическими», используемых в качестве предикторов.

Далее следует набор предикторов, которые можно обозначить как «инерционные». Это индекс предшествующего увлажнения I_W , накопленные суммы положительных температур $\sum T$ выше 0, +2 и +5°C, а также суммарная испаряемость $\sum PET$. Таким образом, каждая строка матрицы исходных данных представляет собой отдельную структуру данных, включающую полный набор значений испытываемых предикторов и предикторов на заданную дату. Общая длина (количество строк) матрицы исходных данных составила 4 727 строк.

Таким образом, динамические предикторы учитывают информацию на день выдачи прогноза и на глубину предыстории в 7 суток. Такова же и предельная заблаговременность, на которую испытываются методы прогноза. Это обусловлено соображениями, что для прогноза на определенную заблаговременность необходимо привлечь информацию за предысторию процесса такой же длительности или более. Выбор предельного интервала 7 суток обусловлен предварительно выполненным анализом коэффициентов корреляций стока с осадками на различных интервалах времени. Анализ выполнялся как качественно, путем сопоставления отдельных гидрографов и гиетографов, так и методом расчета коэффициентов корреляции стока с осадками со скользящим сдвигом во времени. Оба метода дали сходные результаты: характерное время реакции (время добегания) для бассейна реки Протва – село Спас-Загорье составляет 3-4 суток. Таким образом, выбранный для тестирования предельный интервал 7 суток заведомо

охватывает значения времени добегания для любого из исследуемых паводков.

Случайное перемешивание исходных данных

В соответствии с требованиями подготовки данных моделей машинного обучения [Bhattacharya, Solomatine, 2006] набор данных должен быть разделен на обучающий и тестовый наборы достаточной длины и обладающих сходными статистическими характеристиками. Из-за стохастической природы речного стока последнее требование кажется трудновыполнимым при разделении исходных календарных рядов наблюдений, особенно когда для оптимизации параметров модели используется метод многократной кросс-валидации. При этом методе исходный обучающий набор дополнительно разделяется на 10 равных частей и обучение производится на 9/10 частях, а проверка на 1/10 части, затем части последовательно меняются. Указанные методы могут приводить к смещению статистических характеристик при простом разделении исходной выборки. Эта проблема была нами решена путем случайного перемешивания исходного набора данных, что значительно уменьшило изменчивость между подвыборками данных (рисунок 2).

При разделении исходного набора данных для реки Протва на 10 подвыборок случайная перетасовка показала снижение коэффициента вариации средних значений подвыборок на 72% (с 0,20 до 0,05 для неперемешанной и перемешанной выборок соответственно). Такая обработка исходного набора данных, в котором каждая строка представляет ряд «динамических» и «инерционных» предикторов, допускает подобное случайное перемешивание, сохраняя тем самым статистические взаимосвязи между данными без изменений. Полученный перемешанный набор данных был разделен на две подвыборки: 80% данных для обучения и 20% данных для проверки моделей.

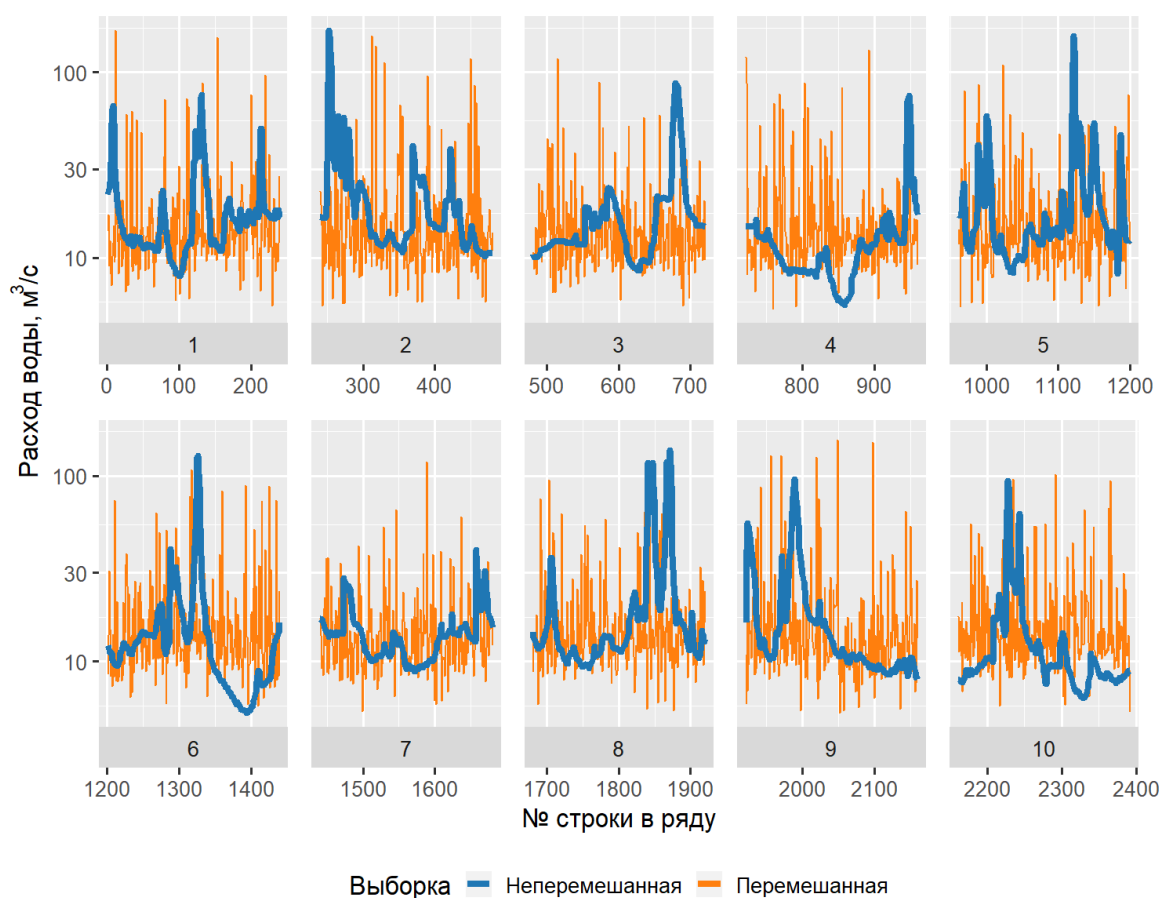


Рисунок 2. Сравнение исходной (неперемешанной) и перемешанной выборки
Figure 2. Shuffled (orange line) and initial (unshuffled, blue) input dataset intercomparison

Описанное выше случайное перемешивание не применялось при подготовке данных для модели с долгосрочной кратковременной памятью (Long Short-Term memory), потому что в этой модели предусмотрена другая процедура перемешивания [Abadi et al., 2016]. В модели используются 7 предикторов: расход воды Q_t , температуры T и суточные суммы осадков P^j на метеостанциях ($j=27509, 27606, 27611$). Для каждого набора предикторов $Q_{t+\tau}$ формируется подмножество предикторов со сдвигом 60 дней (шагов) назад по времени, и исходная выборка данных «нарезается» на «блоки», имеющие размерность $[7, 60]$, каждая из которых относится к одному набору из 7 предикторов $Q_{t+\tau}$, имеющему размерность $[7, 1]$. Можно заметить, что хронология исходного ряда таким образом не

нарушается и каждому значению предиката соответствует 60 значений предикторов. После этого такие «блоки» перемешиваются и случайным образом загружаются в модель для обучения.

Использованные модели и методы их построения

Программная реализация

Для исследования были построены несколько моделей машинного обучения. Построение моделей было выполнено на языке Python в интерактивной оболочке Jupyter Notebook с использованием библиотеки машинного обучения scikit-learn [Pedregosa et al., 2011] и Tensorflow [Abadi et al., 2016]. Исходные коды моделей и набор данных доступны в репозитории¹.

¹ Морейдо В.М. Модели машинного обучения для краткосрочных прогнозов расходов воды р. Протва – с. Спас-Загорье [Электронный ресурс] // GitHub. URL: https://github.com/esmoreido/protva_models (дата обращения: 15.12.2020).

Были запрограммированы и откалиброваны несколько основных модельных архитектур:

- модель множественной линейной регрессии;
- модель искусственной нейронной сети;
- модель с долгосрочной кратковременной памятью.

Модель множественной линейной регрессии

Модель множественной линейной регрессии (далее – LM) представляет собой линейную модель, оптимизирующую веса n входных переменных x : $W = \sum(Wx_1, \dots, Wx_n)$ по методу наименьших квадратов. Кроме весов входных переменных модель не имеет оптимизируемых параметров.

Модель ИНС по типу многослойного перцептрона

Модель искусственной нейронной сети по типу многослойного перцептрона с нелинейной функцией активации на скрытых слоях [Haykin, 2009], здесь и далее обозначаемая MLP, представляет собой одну из многочисленных архитектур ИНС, основанных на искусственных нейронах. Искусственный нейрон представляет собой нелинейную функцию от единственного аргумента – линейной комбинации всех входных сигналов. ИНС – это подход к обучению для аппроксимации функций путем соединения элементов, называемых нейронами (рисунок 3), между слоями.

Нейрон j получает входные данные в виде векторов используемых предикторов $x_1 - x_i$, с присвоенными им весами $a_{1j} - a_{ij}$ и вычисляет нелинейное преобразование для приведения значения в диапазон $[0, 1]$ (рисунок 3а). В качестве функций преобразования, называемых активационными, используются, например,

логистическая функция (сигмоида), гиперболический тангенс, полулинейный выпрямительный элемент (ReLU) и др. Выходные данные с нейрона j затем отправляются на следующий слой нейросети с весами $a_{jk} - a_{jn}$. Связи представлены линейными весами между нейронами, например, a_{jk} обозначает связь между j -м нейроном и k -м нейроном, которые находятся на уровне $l-1$ и l , соответственно. Многослойная сеть, показанная на рисунке 3а, называется полностью связанной, поскольку каждый нейрон на одном слое связан с каждым нейроном на соседнем слое. Слои ввода и вывода напрямую связаны со входами и выходами и поэтому называются видимыми слоями, в отличие от скрытых слоев посередине. Веса сети определяются путем минимизации целевой функции, например по методу наименьших квадратов между данными расчетов и наблюдений. Процесс определения весов ИНС называется обучением, а использование данных наблюдений для оптимизации целевой функции обуславливает название процесса подбора весов – «обучение с учителем». Наиболее распространенным методом обучения является обратное распространение ошибки [Rumelhart et al., 1986], который представляет собой форму метода градиентного спуска, передающего величину ошибки обратно в ИНС и обновляющего все значения весов на каждом расчетном шаге. По сравнению с другими методами оптимизации, такими как эволюционные алгоритмы, обратное распространение ошибок очень эффективно благодаря дифференциации и линейному характеру сетевых соединений. Количество нейронов в слое называется шириной, а количество слоев называется глубиной сети.

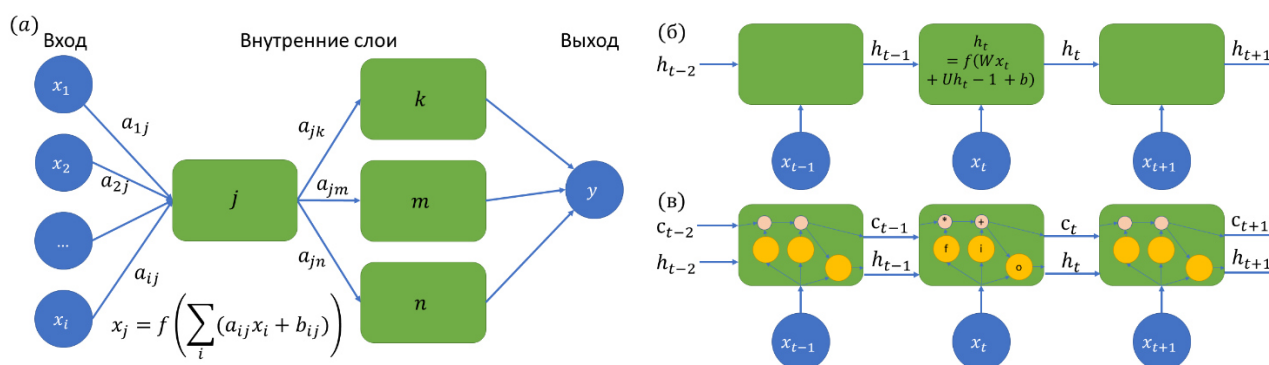


Рисунок 3. Схема нейронов ИНС по типу MLP (а), RNN (б) и LSTM (в). Обозначения: $x_1 - x_i$ – векторы переменных на входе; $a_{1j}-a_{ij}$ – веса входных переменных;

a_j – трансформированное значение в нейроне j ; b_{ij} – свободный член;

$a_{jk}-a_{in}$ – веса трансформированных переменных между слоями нейросети; k, m, n – нейроны на следующем внутреннем слое; y – вектор вывода; $x_{t\pm\tau}$ – входной вектор предикторов на временном шаге τ , $\tau = 1 \dots n$ шагов по времени; $h_{t\pm\tau}$ – матрица весов нейронов на временном шаге τ ;

$c_{t\pm\tau}$ – матрица переменных состояния на временном шаге τ ; f – регулятор памяти;

i – регулятор входа; o – регулятор выхода

Figure 3. Diagram of a neuron of an artificial neural network of the MLP type (a), a recurrent neural network RNN (b) and LSTM (c). Notation: $x_1 - x_i$ – vectors of variables at the input; $a_{1j}-a_{ij}$ – weights of input variables; a_j – transformed value in neuron j ; b_{ij} – bias; $a_{jk}-a_{in}$ – weights of the transformed variables between the layers of the neural network; k, m, n – neurons on the next inner layer; y is the output vector; $x_{t\pm\tau}$ – input vector of predictors at the time step τ , $\tau = 1 \dots n$ time steps; $h_{t\pm\tau}$ – matrix of neurons' weights at the time step τ ; $c_{t\pm\tau}$ – matrix of state variables at the time step τ ; f – forget gate; i – input gate; o – output gate

Модель с долгосрочной кратковременной памятью

Модель с долгосрочной кратковременной памятью (Long short-term memory, далее – LSTM) – модификация рекуррентной нейронной сети (Recurrent Neural Network, RNN) для глубокого обучения [Hochreiter, Schmidhuber, 1997] с дополнительными переменными состояниями, сохраняющими веса отдельных нейронов и передающими их между расчетными шагами при обучении нейросети, если их значение приводит к снижению ошибки модели. LSTM сохраняет информацию о состояниях между расчетными шагами и на основании параметров регуляторов памяти определяет, когда как долго сохранять эту информацию и когда её можно «забыть». Простые рекуррентные нейронные сети RNN обновляли только вектор одного прошлого состояния (рисунок 3б). Состояние ячейки h_t служит памятью системы, чем-то похожим на состояние в моделях авторегрессии. Вектор состояний h_t умножается на обучаемые веса и затем

комбинируется с входными данными для перехода к следующему временному уровню. RNN обучаются с использованием алгоритма обратного распространения во времени [Mozier, 1989; Werbos, 1990], который применяет обратное распространение после первого развертывания сети. Как и в случае с другими алгоритмами обратного распространения, функция потерь распространяется в обратном направлении для определения обновлений весов. В простых рекуррентных сетях обратное распространение сталкивается с проблемой исчезающего градиента [Hochreiter, 1998]. В общих чертах эта проблема может быть описана так: поскольку состояния из более ранних временных шагов многократно умножались на векторы весов, прежде чем они влияли на конечный результат, влияние обратного распространения на них уменьшалось экспоненциально до нуля. В результате простые RNN обучались очень медленно. Решением этой проблемы в архитектуре LSTM являются специально

разработанные блоки, называемые регуляторами входа, выхода и памяти (рисунок 3в). Эти регуляторы, которые сами по себе являются нейронами с обучаемыми весами, контролируют поток информации для переменной состояния (c_i). После обучения входной регулятор контролирует, какие входные данные достаточно важны, чтобы их запомнить. Регулятор памяти решает, как долго и какое прошлое состояние памяти должно храниться. Выходной регулятор определяет, какая часть переменной состояния c_i используется для вектора выходных данных o . Вместе они позволяют сети запоминать и передавать информацию из отдаленных предыдущих состояний, отбрасывая несущественную информацию.

Методы оценки качества моделей

Для оценки результатов прогнозирования были использованы следующие метрики прогнозов. Среднеквадратическое отклонение смоделированного ряда от фактического рассчитывалось как

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i^p - Q_i^o)^2} \quad (3)$$

где Q_i^p – смоделированный расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$);
 Q_i^o – наблюдаемое значение ($\text{м}^3/\text{с}$);
 N – длина оцениваемого ряда.

Эффективность прогнозирования относительно среднего рассчитана по критерию эффективности Нэша-Сатклиффа:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^p - Q_i^o)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^o - \bar{Q}^o)^2} \quad (4)$$

Для оценки преимущества моделей относительно прогноза «по тенденции» рассчитывался показатель [Борщ, Христофоров, 2015]:

$$\frac{S}{\sigma_\Delta} \quad (5)$$

где S – среднеквадратическая ошибка прогноза (3);

σ_Δ – отклонение прогноза «по тенденции» для каждой заглаговременности:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2} \quad (6)$$

$$\Delta_i = Q_i^o - Q_{i+\tau}^o, \tau = 1 \dots 7 \quad (7)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i \quad (8)$$

Значения показателя S/σ_Δ находятся в интервале $[0; +\infty)$; значения между 0 и 0,5 свидетельствуют об отличном качестве методики прогноза, 0,5–0,7 – хорошем, 0,7–1,0 – удовлетворительном, более 1 – непригодном. Для расчета этого показателя требуется использования хронологического (неперемешанного) исходного ряда наблюдений, методика сопоставления моделей между собой с его помощью описана в следующем разделе.

Результаты расчетов

Предварительно было проверено предположение, что перемешивание исходных хронологических рядов данных приводит к повышению устойчивости модели на этапе обучения и улучшению результатов на проверочной выборке. Для этого был проведен эксперимент с моделью LM. В ходе эксперимента одна и та же архитектура модели была настроена и проверена с помощью хронологических (неперемешанных) и перемешанных рядов, разделенных на одинаковые по длине обучающие и проверочные выборки. Расчет критериев S и NSE производился непосредственно по полученным прогностическим рядам и рядам наблюдений за каждую заглаговременность, а для расчета S/σ_Δ для каждой модели было взято значение σ_Δ по фактическому ряду. Сравнение результатов (рисунок 4) показало, что при сопоставимых значениях критериев качества на обучающей выборке на проверочной выборке модель, обученная на перемешанных рядах, показывает результаты, существенно превосходящие результаты модели, обученной на хронологическом ряду. Так, среднеквадратическая ошибка модели с перемешиванием на всех заглаговременностях в среднем лучше на $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ (до $3,75 \text{ м}^3/\text{с}$), NSE лучше на величину около 0,05, а S/σ_Δ – на 0,06 (до 0,12).

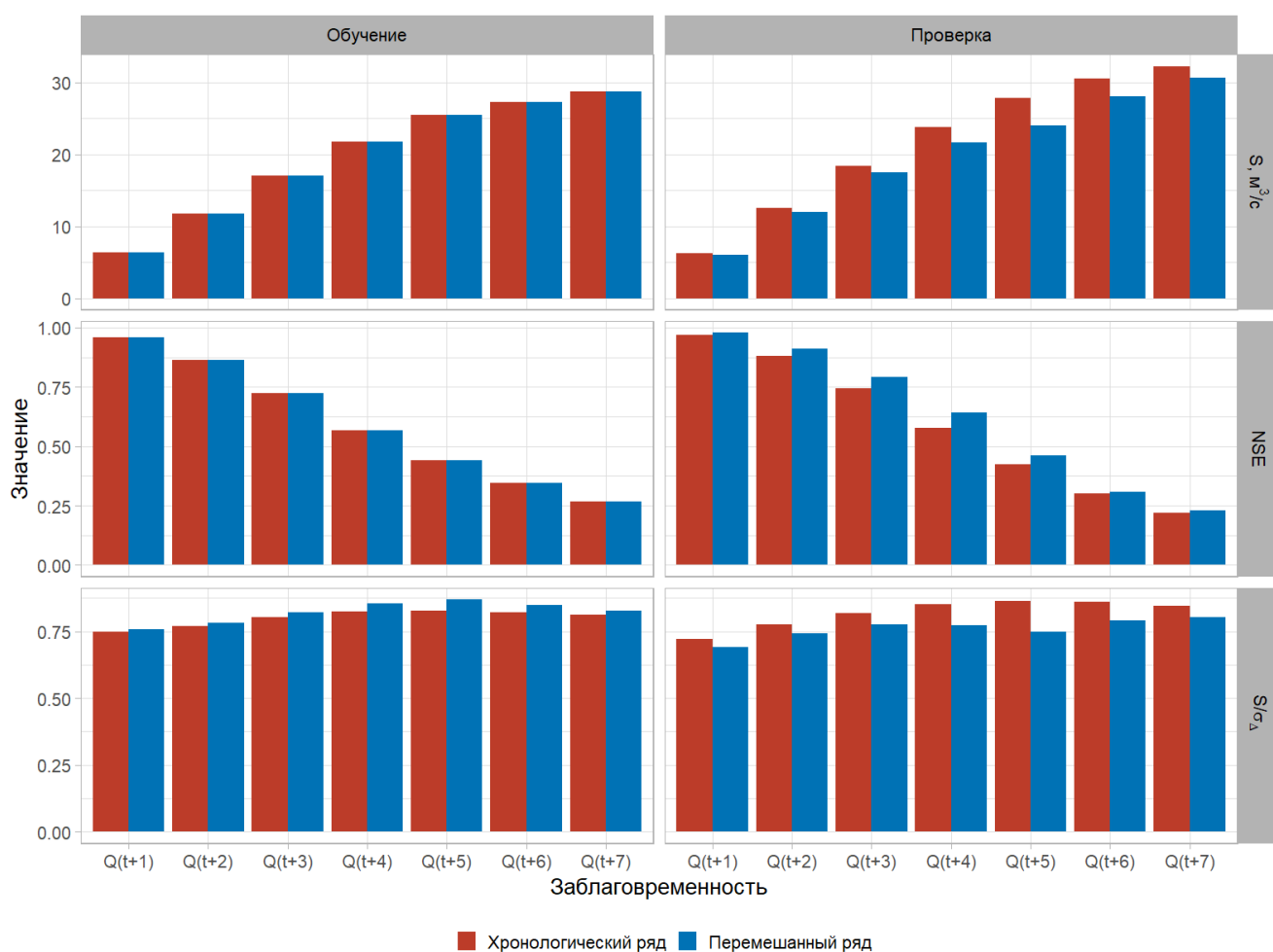


Рисунок 4. Сравнение результатов прогнозирования по модели LM с использованием хронологического и перемешанного ряда

Figure 4. Comparison of the LM model forecasting results trained on unshuffled (red bars) and shuffled (blue bars) time-series

В результате для расчета показателя S/σ_{Δ} для модели MLP также был использован описанный выше подход: обучение модели на перемешанных рядах предикторов с последующей проверкой на перемешанном и неперемешанном ряде. Процесс обучения и проверки модели LSTM был описан выше, но он также позволяет получить проверочные ряды в хронологическом порядке и сопоставить качество прогноза по критерию S/σ_{Δ} .

Обсуждение

Оценка моделей на проверочном ряде показала, что наиболее качественными с точки зрения ошибки прогноза и критериев эффективности оказались модели MLP и

LSTM_TP, учитывающие все имеющиеся в наличии предикторы (рисунок 5б).

Так, для первых шагов по заблаговременности все модели были достаточно аккуратны в предсказании расходов воды, что выражалось в небольших значениях среднеквадратической ошибки, хорошо согласовывались с фактическими рядами – высокий показатель эффективности NSE и «хорошие» значения S/σ_{Δ} , впрочем, кроме модели LM. На этих заблаговременностях, несомненно, это объясняется высоким коэффициентом автокорреляции. Однако далее, начиная с прогноза на 4 суток, качество прогнозирования ухудшалось по всем моделям и лишь MLP показало высокую эффективность и точность вплоть до седьмых прогнозных суток,

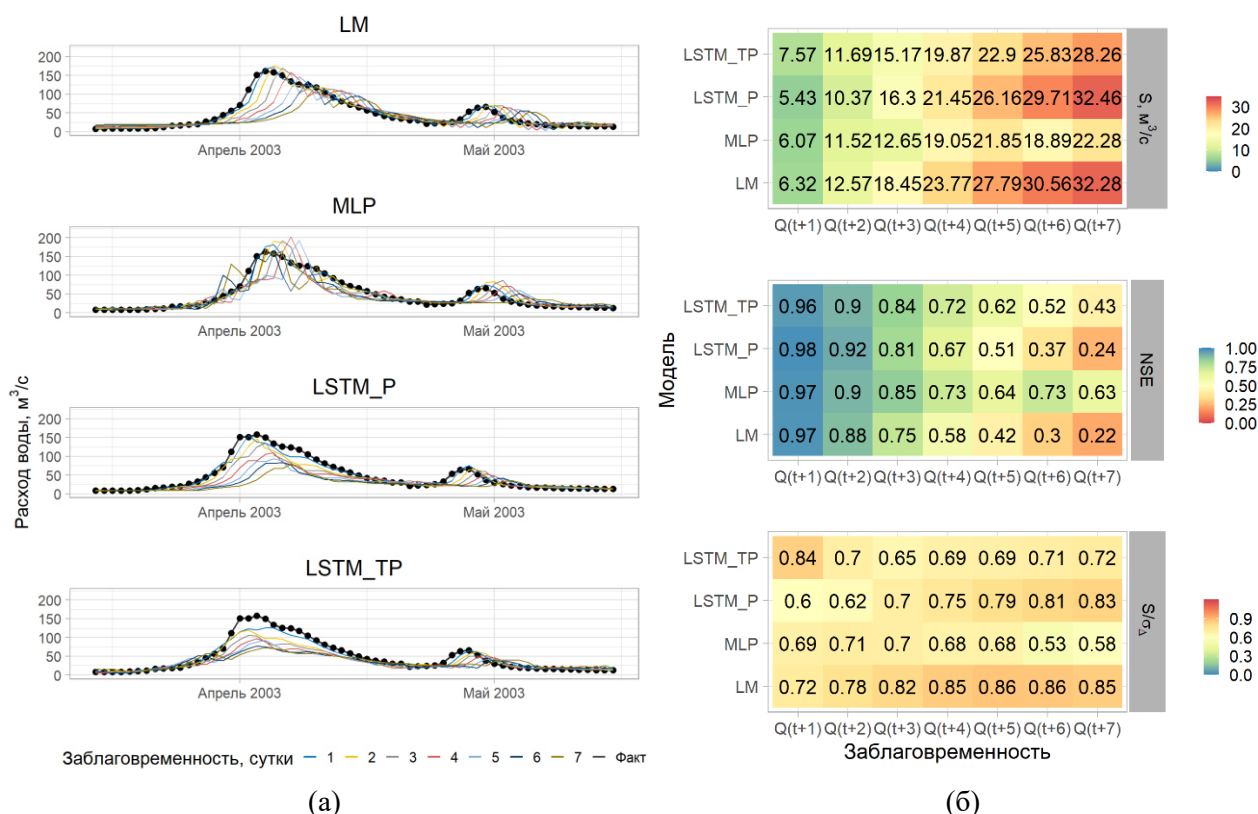


Рисунок 5. Фактический и прогнозные гидрографы реки Протва за период с 15 марта по 01 мая 2003 года (а) и результаты оценки качества моделей на проверочном ряде (б)

Figure 5. Observed and forecast hydrographs of the Protva river for period March, 15 – May, 01 2003 (a) and the results of the model quality assessment on the test dataset (b)

когда значения NSE не упали ниже 0,6, а значения S/σ_Δ даже начали снижаться. В целом следует отметить, что две модели нейронной сети, использовавшие в качестве входной информации не только предшествующие расходы воды, но и температуру воздуха и суточные суммы осадков, показали более высокое качество прогноза, чем линейная модель и модель LSTM без температур. В случае с линейной моделью, вероятно, это объясняется присваиванием более высоких весов значениям предшествующих расходов воды и недостаточно существенными весами для предикторов: температуры и осадков. В случае с LSTM без температуры – отсутствием учета возможного накопления осадков в переменных состояния, отвечающих за перераспределения осадков во времени.

Из полученных прогнозных гидрографов за период проверки видно (рисунок 5а), что всем моделям свойственно занижение значений расходов воды с увеличением заблаговременности, однако для модели MLP это

не столь существенно, а наличие колебаний на подъеме половодья конкретно взятого для иллюстрации 2003 года отражает реакцию на колебания температуры воздуха на водосборе.

Заключение

Выполненные расчеты позволили оценить применимость моделей ИНС в качестве основы для системы краткосрочных прогнозов расходов воды в речной системе Средней полосы России с преимущественно снежным питанием. Расчеты показали, что ИНС могут быть применены для прогнозов при условии использования всей имеющейся гидрометеорологической информации – данных о предыдущих расходах воды, температуре воздуха на водосборе и количестве осадков. При этом создается возможность для более устойчивого во времени прогноза, чем используемые в настоящее время модели множественной линейной регрессии.

В ходе численных экспериментов показана эффективность подготовки данных с включением

«инерционных» и «динамических» предикторов, в которые входят как среднесуточные данные наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками на водосборе, так и предикторы, рассчитанные на их основе – сумма и разность значений в скользящем окне, индексы увлажнения за длительный период времени и потенциальное испарение с водосбора. Также было опробовано случайное перемешивание исходных хронологических рядов данных для повышения выборочной устойчивости на

обучающей и проверочной подвыборках и показано эффективное улучшение качества прогноза при таком перемешивании.

Программная реализация моделей ИНС находится на высоком уровне, не требующем существенных специальных знаний (кроме общих базовых навыков программирования). Таким образом, следует проводить дальнейшие исследования в направлении использования ИНС в прогностических целях, в том числе в различных природных зонах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН, гранта РНФ №17-77-30006 и гранта РФФИ №19-05-00087 А.

Литература

Белякова П.А., Бориц С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогноз максимального стока рек Черноморского побережья Кавказа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 4-16.

Бориц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.

Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР. Л.: изд-во и 2-я типолитограф. Гидрометеиздата, 1946. 148 с.

Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 101 с.

Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные Ресурсы. 2016а. Т. 43. № 3. С. 243-253. DOI: [10.7868/S0321059616030111](https://doi.org/10.7868/S0321059616030111).

Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты

Acknowledgements

The work was supported by State assignment № 0147-2019-0001 (reg. №АААА-А18-118022090056-0) of the WPI RAS, RSCF grant №17-77-30006 and RFBR grant №19-05-00087А.

References

Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Zh., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Irving G., Isard M., Kudlur M., Levenberg J., Monga R., Moore Sh., Murray D.G., Steiner B., Tucker P., Vasudevan V., Warden P., Wicke M., Yu Y. Zheng X. TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning. *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI'16) (Savannah, GA, USA, November 2-4, 2016)*. Publ. USENIX Association, 2016, pp. 265-283.

Abrahart R.J., Anctil F., Coulibaly P., Dawson Ch.W., Mount N.J., See L.M., Shamseldin A.Y., Solomatine D.P., Toth E., Wilby R.L. Two decades of anarchy? Emerging themes and outstanding challenges for neural network river forecasting. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, vol. 36, iss. 4, pp. 480-513. DOI: [10.1177/0309133312444943](https://doi.org/10.1177/0309133312444943).

Belyakova P.A., Borshch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Prognoz maksimal'nogo stoka rek Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza [Forecast of the maximum runoff of the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2013, no. 6, pp. 4-16. (In Russian).

испытаний // Водные Ресурсы. 2016b. Т. 43. № 5. С. 467-475. DOI: [10.7868/S0321059616050096](https://doi.org/10.7868/S0321059616050096).

Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Zh., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Irving G., Isard M., Kudlur M., Levenberg J., Monga R., Moore Sh., Murray D.G., Steiner B., Tucker P., Vasudevan V., Warden P., Wicke M., Yu Y. Zheng X. TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning // Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI'16) (Savannah, GA, USA, November 2-4, 2016). Publ. USENIX Association, 2016. P. 265-283.

Abrahart R.J., Anctil F., Coulibaly P., Dawson Ch.W., Mount N.J., See L.M., Shamseldin A.Y., Solomatine D.P., Toth E., Wilby R.L. Two decades of anarchy? Emerging themes and outstanding challenges for neural network river forecasting // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2012. Vol. 36. Iss. 4. Pp. 480-513. DOI: [10.1177/0309133312444943](https://doi.org/10.1177/0309133312444943).

Beven K. Deep learning, hydrological processes and the uniqueness of place // Hydrological Processes. 2020. Vol. 34. Iss. 16. Pp. 3608-3613. DOI: [10.1002/hyp.13805](https://doi.org/10.1002/hyp.13805).

Bhattacharya B., Solomatine D.P. Machine learning in sedimentation modelling // Neural Networks. 2006. Vol. 19. Iss. 2. Pp. 208-214. DOI: [10.1016/j.neunet.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.007).

Emerton R.E., Stephens E.M., Pappenberger F., Pagano Th.C., Weerts A.H., Wood A.W., Salamon P., Brown J.D., Hjerdt N., Donnelly Ch., Baugh C.A., Cloke H.L. Continental and global scale flood forecasting systems // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2016. Vol. 3. Iss. 3. Pp. 391-418. DOI: [10.1002/wat2.1137](https://doi.org/10.1002/wat2.1137).

Fatichi S., Vivoni E.R., Ogden F.L., Ivanov V.Y., Mirus B., Gochis D., Downer Ch.W., Camporese M., Davison J.H., Ebel B., Jones N., Kim J., Mascaro G., Niswonger R., Restrepo P., Rigon R., Shen Ch., Sulis M., Tarboton D. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 537. Pp. 45-60. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026).

Beven K. Deep learning, hydrological processes and the uniqueness of place. *Hydrological Processes*, 2020, vol. 34, iss. 16, pp. 3608-3613. DOI: [10.1002/hyp.13805](https://doi.org/10.1002/hyp.13805).

Bhattacharya B., Solomatine D.P. Machine learning in sedimentation modelling. *Neural Networks*, 2006, vol. 19, iss. 2, pp. 208-214. DOI: [10.1016/j.neunet.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.007).

Borsch S.V., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Hydrologic flow forecast verification]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation]*, 2015, special issue 355. 198 p. (In Russian; abstract in English).

Emerton R.E., Stephens E.M., Pappenberger F., Pagano Th.C., Weerts A.H., Wood A.W., Salamon P., Brown J.D., Hjerdt N., Donnelly Ch., Baugh C.A., Cloke H.L. Continental and global scale flood forecasting systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016, vol. 3, iss. 3, pp. 391-418. DOI: [10.1002/wat2.1137](https://doi.org/10.1002/wat2.1137).

Fatichi S., Vivoni E.R., Ogden F.L., Ivanov V.Y., Mirus B., Gochis D., Downer Ch.W., Camporese M., Davison J.H., Ebel B., Jones N., Kim J., Mascaro G., Niswonger R., Restrepo P., Rigon R., Shen Ch., Sulis M., Tarboton D. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 537, pp. 45-60. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.026).

Gelfan A.N., Motovilov Y.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect. *Geography Compass*, 2009, vol. 3, iss. 5, pp. 1841-1864. DOI: [10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x).

Halff A.H., Halff H.M., Azmoodeh M. Predicting runoff from rainfall using neural networks. *Proceedings of Symposium Engineering Hydrology (San Francisco, California, July 25-30, 1993)*, 1993, pp. 760-765.

Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines: 3rd ed.* Prentice Hall Publ., 2009. 906 p.

- Gelfan A.N., Motovilov Y.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect // *Geography Compass*. 2009. Vol. 3. Iss. 5. Pp. 1841-1864. DOI: [10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00256.x).
- Halff A.H., Halff H.M., Azmoodeh M. Predicting runoff from rainfall using neural networks // *Proceedings of Symposium Engineering Hydrology (San Francisco, California, July 25-30, 1993)*. 1993. Pp. 760-765.
- Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines*: 3rd ed. Prentice Hall Publ., 2009. 906 p.
- Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, United States, 1994. 768 p.
- Hochreiter S. The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 1998. Vol. 6. No. 2. Pp. 107-116. DOI: [10.1142/S0218488598000094](https://doi.org/10.1142/S0218488598000094).
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9. Iss. 8. Pp. 1735-1780. DOI: [10.1162/neco.1997.9.8.1735](https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735).
- Kratzert F., Klotz D., Brenner C., Schulz K., Herrnegger M. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, vol. 22, iss. 11, pp. 6005-6022. DOI: [10.5194/hess-22-6005-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018).
- Kuchment L.S., Gelfan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskie modeli formirovaniya rechnogo stoka [Dynamic-stochastic models of river runoff formation]*. Moscow, Publ. Nauka, 1993. 101 p. (In Russian).
- Motovilov Y.G. Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 1. Generalization and averaging algorithms. *Water Resources*. 2016a, vol. 43, iss. 3, pp. 429-437. DOI: [10.1134/S0097807816030118](https://doi.org/10.1134/S0097807816030118) (Russ. ed.: Motovilov Yu.G. Gidrologicheskoe modelirovanie rechnykh basseinov v razlichnykh prostranstvennykh masshtabakh. 1. Algoritmy generalizatsii i osredneniya. *Vodnye Resursy*, 2016a, vol. 43, no. 3, pp. 243-253. DOI: [10.7868/S0321059616030111](https://doi.org/10.7868/S0321059616030111)).
- Motovilov Y.G. Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 2. Test results. *Water Resources*, 2016b, vol. 43, iss. 5, pp. 743-753. DOI: [10.1134/S0097807816050092](https://doi.org/10.1134/S0097807816050092) (Russ. ed.: Motovilov Yu.G. Gidrologicheskoe modelirovanie rechnykh basseinov v razlichnykh prostranstvennykh masshtabakh. 2. Rezul'taty ispytaniy. *Vodnye Resursy*, 2016b, vol. 43, no. 5, pp. 467-475. DOI: [10.7868/S0321059616050096](https://doi.org/10.7868/S0321059616050096)).
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. Pp. 2825-2830.

Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors // *Nature*. 1986. Vol. 323. No. 6088. Pp. 533-536. DOI: [10.1038/323533a0](https://doi.org/10.1038/323533a0).

Werbos P.J. Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It // *Proceedings of the IEEE*. 1990. Vol. 78. No. 10. Pp. 1550-1560. DOI: [10.1109/5.58337](https://doi.org/10.1109/5.58337).

Mozer M.C. A Focused Backpropagation Algorithm for Temporal Pattern Recognition. *Complex Systems*, 1989, vol. 3, iss.4, pp. 349-381.

Oudin L., Michel C., Anctil F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 303, iss. 1-4, pp. 275-289. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.025).

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2825-2830.

Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986, vol. 323, no. 6088, pp. 533-536. DOI: [10.1038/323533a0](https://doi.org/10.1038/323533a0).

Werbos P.J. Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, no. 10, pp. 1550-1560. DOI: [10.1109/5.58337](https://doi.org/10.1109/5.58337).

Zaikov B.D. *Srednii stok i ego raspredelenie v godu na territorii SSSR [Average runoff and its distribution per year in the USSR]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1946. 148 p. (In Russian).

УДК 556

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.391

ОБ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ МАКСИМАЛЬНОГО МОДУЛЯ СТОКА С УВЕЛИЧЕНИЕМ ПЛОЩАДИ ВОДОСБОРА

С.М. Тумановская

ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия

sw258@rambler.ru

ON CHANGE OF REDUCTION FACTOR OF MAXIMUM RUNOFF MODULUS WITH INCREASE OF CATCHMENT AREA

Svetlana M. Tumanovskaya

Scientific and Industrial Research Association

Gidrotehproekt, Valday, Russia

sw258@rambler.ru

Аннотация. При формировании речного стока, как правило, происходит уменьшение (редукция) его максимального модуля при возрастании площади водосбора. Для водосборов площадью менее 5 км² редукция максимальных модулей водоотдачи и стока не выражена, что подтверждает принятое допущение о равенстве водоотдачи и стока для малых площадей водосбора. Это первый этап процесса формирования стока воды половодья на безрусловых склонах. На втором этапе на водосборах площадью от 5 до 10 км² появляется тенденция к снижению максимального модуля стока с увеличением площади водосбора. Причина снижения модулей водоотдачи – уменьшение действующей площади водосбора как следствие изменения площади покрытия снегом; для модулей стока воды – снижение действующей площади водосбора и начало руслового регулирования. На третьем этапе на водосборах с площадью от 10 до 100 км² снижение максимального модуля стока воды в зависимости от площади водосбора имеет устойчивую тенденцию, определяющуюся русловым регулированием, снижением действующей площади водосбора, особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока. На четвертом этапе на водосборах с площадью более 100 км² редукция максимального модуля стока воды имеет устойчивый вид и определяется русловым регулированием и особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока. Для малых водотоков зависимость

Abstract. When forming river runoff, as a rule, its maximum modulus decreases (reduction) as the catchment area increases. For catchments with an area of less than 5 km², reduction of maximum drainage and runoff modules is not expressed, which confirms the accepted assumption of equal drainage and runoff for small catchment areas. This is the first stage of the process of forming flood water runoff on channel-free slopes. At the second stage, catchments with an area of 5 to 10 km² tend to decrease the maximum runoff modulus with an increase in catchment area. The reason for the decrease in drainage modules is a decrease in the effective catchment area as a result of a change in the snow cover area; for water flow modules - reduction of the effective catchment area and beginning of channel regulation. At the third stage, at catchments with an area of 10 to 100 km², a decrease in the maximum water flow modulus depending on the catchment area has a stable tendency, determined by channel regulation, a decrease in the existing catchment area, and features of the increase in the catchment area along the length of the main watercourse. At the fourth stage, at catchments with an area of more than 100 km², the reduction of the maximum module of water flow has a stable appearance and is determined by channel regulation and features of the increase in the catchment area along the length of the main watercourse. For small watercourses, the dependence of the shape coefficient of the catchment (K_f) on its area reflects the process of development of the catchment from slopes in which the width of the catchment is significantly longer, to watercourses where the width of the catchment becomes less than

коэффициента формы водосбора (K_f) от его площади отражает процесс развития водосбора от склонов, в которых ширина водосбора существенно больше длины, к водотокам, где ширина водосбора становится меньше длины водотока. В целом K_f недостаточно информативен и не отражает особенностей нарастания площади водосбора по длине русла главного водотока. Основной причиной использования при анализе и расчетах K_f является отсутствие кадастровых данных о нарастании площади водосбора по длине русла главного водотока для всех гидрологически изученных рек.

Ключевые слова: максимальный модуль стока; коэффициент формы водосбора; коэффициент редукции; площадь водосбора; половодье; слой стока; расход воды

Введение

При формировании речного стока, как правило, происходит уменьшение (редукция) его максимального модуля при возрастании площади водосбора. Эта зависимость неоднозначна и может меняться на различных по величине водотоках. В связи с этим представляется важным оценить редукцию максимального модуля стока воды весеннего половодья в пространстве и времени на разных этапах процесса его формирования.

В качестве объектов исследования приняты малые водотоки Московской области.

О коэффициенте редукции максимального модуля стока

Общепринятое выражение «коэффициент редукции стока» связано с максимальным модулем стока весеннего половодья или дождевых паводков заданной вероятности превышения $P\%$. Как правило, в гидрологических исследованиях в качестве опорной принята вероятность превышения $P\%=1\%$. Так, в широко применяемой с 1937 года редукционной формуле Д.Л. Соколовского (1), степенной параметр n

the length of the watercourse. In general, K_f is not sufficiently informative and does not reflect the features of the increase in catchment area along the length of the channel of the main watercourse. The main reason for using K_f in analysis and calculations is the lack of cadastral data on the increase in catchment area along the length of the main watercourse bed for all hydrologically studied rivers.

Keywords: maximum unit discharge; shape factor of the watersheds; reduction coefficient; area of watershed; flood; drain layer; flow of water

представляет собой коэффициент редукции максимального модуля стока весеннего (или летнего) половодья с увеличением площади водосбора F , км²:

$$q_{max,1\%} = \frac{A_{max,1\%}}{(F+1)^n} * \delta \quad (1)$$

где $A_{max,1\%}$ – максимальный модуль стока весеннего (или летнего) половодья с элементарного водосбора, м³/с·км², как правило, $A_{max,1\%}$ рассматривают также как максимальную интенсивность водоотдачи с безрусловых склонов в русловую сеть;

F – площадь водосбора, км².

Элементарный водосбор – безрусловой склоновый водосбор. Площади безрусловых склонов в большой степени зависят от климатических характеристик, почв, слагающих водосбор, наличия травяного покрова, уклона водосбора, экспозиции склона.

В таблице 1 приведены наибольшие предельные значения площадей безрусловых склонов для Северо-Запада Российской Федерации (по данным работы [Нежиховский, 1971]).

Таблица 1. Наибольшие предельные значения площадей безрусловых склонов (зона отсутствия русловой эрозии) для Северо-Западного региона Российской Федерации

Table 1. The highest limit values of the areas of riverless slopes (the zone of absence of riverbed erosion) for the North-Western region of the Russian Federation

Интенсивность поверхностного стекания (водоотдачи), мм/час Surface run-off rate (water discharge), mm/hour	Уклон водосбора, % Catchment slope, %	Травяной покров Grass cover	Наибольшая предельная площадь безруслового склона, км² Maximum limit area of absolute slope, km²
20	≤10	Удовлетворительный Satisfactory	1,5-2,0
10	≤10	Удовлетворительный Satisfactory	5,5
20	≤10	Редкий Rare	0,2
10	≤10	Редкий Rare	0,7
20	30	Удовлетворительный Satisfactory	0,15
10	30	Удовлетворительный Satisfactory	0,5

Все малые водосборы с размерами, превышающими предельные площади, приведенные в таблице 1, имеют динамически устойчивое русло водного объекта, а водосборы, площади которых менее приведенных предельных значений, характеризуются неустойчивым местным русловым процессом. Исходя из таблицы 1 можно принять допущение, что в целом для Северо-Западного региона Российской Федерации наибольшая площадь безрусловых склонов не превышает 5 км².

На малых водотоках весеннее половодье представляет собой несколько суточных волн, формирование которых обусловлено внутрисуточным ходом температуры воздуха и связанной с ним интенсивностью снеготаяния, продолжительность активной фазы которой в течение суток не превышает 8-10 часов.

Следует отметить, что суточные гидрографы стока воды малых водотоков в период весеннего половодья косвенно учитывают аккумуляющую роль бессточных понижений на водосборе и потери стока на инфильтрацию в

почву. При этом в связи с незначительной продолжительностью склонового и практическим отсутствием руслового добега не проявляется влияние распластывания наибольшей суточной волны половодья.

Учитывая вышеприведенное, суточные гидрографы стока воды малых водотоков и стоковых площадок можно рассматривать как суточные гидрографы водоотдачи талых вод со склонов в русловую сеть.

В работе [Тумановская, 1981] приведены ординаты осредненных кривых редукции относительной максимальной интенсивности водоотдачи $\psi(\tau_6) = f(\tau)$ для заданных интервалов времени, которые в дальнейшем были приравнены к бассейновому времени добега. Значения этих ординат получены, исходя из вышеуказанного условия о соответствии гидрографов стока и водоотдачи, на основе обработки и статистического анализа многолетних данных максимальных суточных гидрографов и суточных слоев стока воды ($h \cdot P_{\%}$, мм) малых водотоков воднобалансовых

станций Европейской части Российской Федерации (стоковых площадках, ручьях и логах) площадью менее 10 км².

На основе ряда преобразований были рассчитаны значения относительных максимальных модулей водоотдачи (стока) $A_{max,P\%}^* = \frac{q_{max,P\%}}{h_{P\%}^*}$ для $P \leq 25\%$ в зависимости от гидроморфометрического параметра русла Φ_p и времени склонового добегания, которые представлены в таблице 2.

С учетом выражений (2) и (3) [Тумановская, 1995] было получено уравнение (4) для определения площади водосбора F , км², соответствующей гидроморфометрическому параметру русла Φ_p (по таблице 2) при известном

значении суточного слоя стока ($h_{P\%}^*$ мм) вероятности превышения $P\%$.

$$F = 0,31 \cdot L^2 \quad (2)$$

$$I_{ср.р.} = \frac{11,3}{F^{0,35}} \quad (3)$$

где L – длина водотока, км;

$I_{ср.р.}$ – средневзвешенный уклон русла реки, ‰.

$$F = \left(\frac{\Phi_p}{89,3} \right)^{2,70} \cdot h_{P\%}^* \quad (4)$$

Формула (2) принята согласно исследованиям Г.А. Алексеева для рек Европейской части Российской Федерации с $F \leq 100-1000$ км², а формула (3) – по рекомендациям Р.А. Нежиховского для водотоков, водосборы которых можно соотнести с возвышенностями, холмами и увалами.

Таблица 2. Значения относительного максимального модуля стока

Table 2. Values of the relative maximum flow modulus

Время склонового добегания $\tau_{ск}$, мин Slope running time, min	Гидроморфометрический параметр русла Φ_p , мин Hydromorphology parameter channel Φ_p , min								
	0	10	30	60	90	150	200	300	400
60	0,048	0,038	0,036	0,033	0,029	0,025	0,022	0,017	0,015
120	0,045	0,035	0,033	0,029	0,025	0,022	0,019	0,016	0,014

Таблица 3. Определение 1% модуля стока весеннего половодья; время склонового добегания 60 мин

Table 3. Determination of 1% of the spring flood runoff; $\tau_{ск}=60$ min

Φ_p	$h_{1\%}^*$	20 мм		50 мм		100 мм	
	$A_{max,1\%}^*$	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²
0	0,048	0	0,96	0	2,4	0	4,8
1	0,046	0,000	0,92	0,000	2,3	0,000	4,6
5	0,042	0,003	0,84	0,006	2,1	0,007	4,2
10	0,038	0,021	0,76	0,039	1,9	0,046	3,8
20	0,037	0,1	0,74	0,3	1,85	0,3	3,7
30	0,036	0,4	0,72	0,8	1,8	0,9	3,6
40	0,035	0,9	0,7	1,6	1,75	1,9	3,5
50	0,034	1,6	0,68	3,0	1,7	3,5	3,4
60	0,033	2,6	0,66	4,9	1,65	5,8	3,3
70	0,031	4,0	0,62	7,4	1,55	8,7	3,1
80	0,03	5,7	0,6	10,6	1,5	12,5	3
90	0,029	7,8	0,58	14,6	1,45	17,2	2,9
100	0,028	10,4	0,56	19,4	1,4	22,9	2,8
150	0,025	31,1	0,5	58,0	1,25	68,4	2,5
200	0,022	67,7	0,44	126	1,1	149	2,2
250	0,019	124	0,38	230	0,95	272	1,9
300	0,017	202	0,34	377	0,85	445	1,7
400	0,015	440	0,3	820	0,75	967	1,5

Для низменностей зависимость вида формулы (3) должна быть представлена в виде

$$I_{\text{ср.р.}} = \frac{1,4}{F^{0,35}} \quad (5)$$

Расчетная формула для определения значений гидроморфометрического параметра русла Φ_p в формуле (4) имеет следующий вид:

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m_p^*(I_p)^{0,33} F^{0,25} (h_{1\%}^*)^{0,25}} \quad (6)$$

где m_p^* , (м/мин) – гидравлический параметр, характеризующий шероховатость русла водотока.

В таблице 3 представлены расчеты площадей условных водосборов, F , согласно (4) при значениях максимального суточного слоя стока $h_{1\%}^*$, равных 20, 50 и 100 мм, и значениях гидроморфометрического параметра русла Φ_p из таблицы 2.

Значения $q_{\text{max},1\%}$, $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$, для этих вариантов расчета определены исходя из формулы (7) при $\tau_{\text{ск}}=60$ мин

$$A_{\text{max},1\%}^* = \frac{q_{\text{max},1\%}}{h_{1\%}^*} \quad (7)$$

На рисунке 1 приведены зависимости $q_{\text{max},1\%}=f(F)$, которые для очень малых водосборов отражают характер изменения водоотдачи для трех вариантов значений максимального суточного слоя стока вероятности превышения $P=1\%$. Также на рисунке 1 нанесены расчетные значения максимальных модулей стока весеннего половодья расчетной вероятности превышения $P=1\%$ ($q_{\text{max},1\%}$), полученные на основе статистического анализа многолетних данных наблюдений за максимальным стоком воды весеннего половодья для малых водотоков Московской области. Базовая гидрологическая информация по этим водотокам представлена в таблицах 4 и 5 [Виноградов и др., 2015].

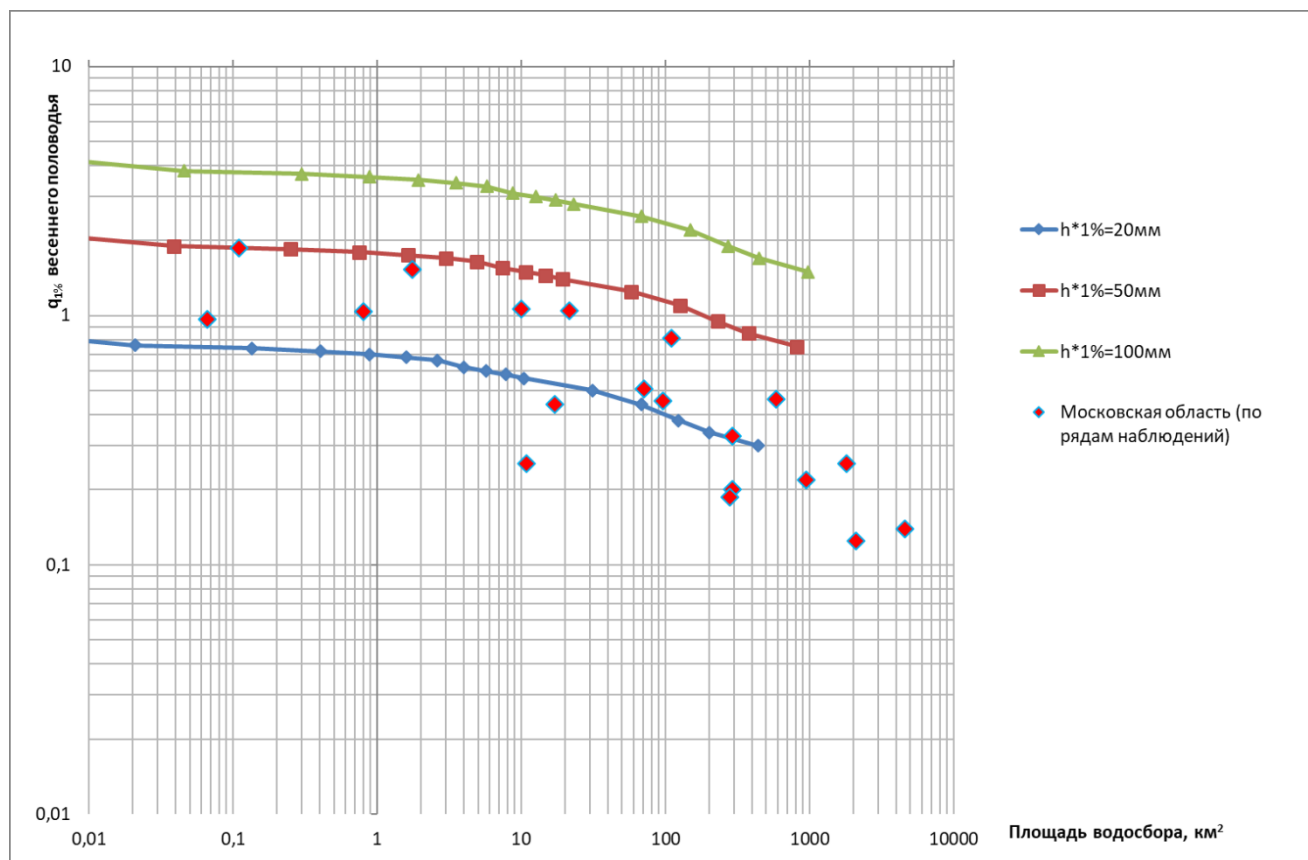


Рисунок 1. Зависимость 1% модуля стока весеннего половодья от площади водосборов для водотоков Московской области

Figure 1. Dependence of 1% of the spring flood runoff module on the catchment area for watercourses of the Moscow Region

Таблица 4. Базовая гидрологическая информация по малым водотокам Московской области

Table 4. Basic hydrological information on small watercourses of the Moscow Region

Река (гидрологический пост) River (hydrological post)	Код поста Post code	Площадь, км ² Area, km ²	Длина, км Length, km	Уклон реки, ‰ River slope, ‰	q ₁ %, м ³ /с·км ²	h ₁ %, мм	K _{0,1} %
руч. Малица (с. Николо-Малица)	75052	10,9	3,4	5	0,26	115	0,002
р. Дубна (пгт Вербилки)	75079	2100	113	0,42	0,12	226	0,001
р. Нерль (д. Подол)	75093	1810	100	0,4	0,25	257	0,001
р. Орлица (д. Большой Рог)	75335	96	22	1,6	0,46	246	0,002
р. Катыш (с. Троицкое)	75428	70,5	14,8	5	0,51	252	0,002
р. Нудоль (д. Кузнецово)	75429	291	38	1,2	0,20	262	0,001
р. Мал. Истра (д. Киселево)	75430	280	41	0,9	0,19	192	0,001
р. Медвенка (д. Лапино)	75434	10	4	7,1	1,06	259	0,004
р. Медвенка (д. Большое Сареево)	75435	21,5	7,3	5,9	1,04	202	0,005
лог Лызлово (д. Лызлово)	75437	1,76	1,3	18,3	1,53	137	0,011
р. Зака (д. Большое Сареево)	75438	17	6	6	0,44	183	0,002
руч. Прогоны (д. Большое Сареево)	75441	0,8	1,6	19,6	1,04	135	0,008
лог Полевой (д. Лызлово)	75442	0,11	0,2	18,7	1,86	221	0,008
лог Лесной (д. Лызлово)	75443	0,066	0,1	21,8	0,97	127	0,008
р. Большой Ломовис (с. Рождественское)	75527	110	19	1,6	0,81	232	0,003
р. Клязьма (г. Павловский Посад)	75550	4550	184	0,4	0,14	187	0,001
р. Воря (с. Мишнево)	75559	947	88	0,6	0,22	205	0,001
р. Серая (д. Новинки)	75561	293	40	1	0,33	212	0,002
р. Лух (пгт Лух)	75591	587	45	0,6	0,46	304	0,002

Таблица 5. Гидрологические характеристики малых водотоков Московской области

Table 5. Hydrological characteristics on small watercourses of the Moscow Region

Код поста Post code	$Q_{\max,1\%}$, м ³ /с	$Q_{\max,1\% \text{ ср.сут.}}$, м ³ /с	$h^*_{1\%}$, набл., мм	Φ_p , мин	$A^*_{1\%}$	τ_p , мин	K_ϕ
75052	2,78	2,2	17	60	0,033	172	0,89
75079	262	260	11	1366	-	4155	1,56
75093	461	420	20	1089	-	3245	1,50
75335	43,7	33	30	286	0,017	814	1,71
75428	35,9	17	21	156	0,025	395	1,37
75429	58,3	52	15	486	0,014	1439	1,58
75430	52,2	46	14	594	-	1755	1,75
75434	10,6	5,6	48	50	0,034	129	1,10
75435	22,4	10	40	83	0,03	208	1,31
75437	0,87	0,83	41	19	0,037	43	0,95
75438	7,51	3,8	19	87	0,029	223	1,23
75441	0,83	0,23	25	32	0,036	70	1,81
75442	0,205	0,068	20	7	0,04	13	0,69
75443	0,064	0,025	33	3	0,044	8	0,46
75527	89	44	35	230	0,02	589	1,37
75550	636	636	12	1807	-	5508	1,65
75559	207	200	18	1009	-	3051	1,90
75561	96,5	78	23	491	0,014	1418	1,66
75591	270	250	37	488	0,014	1460	1,27

Следует заметить, что на рисунке 1 основная масса точек, соответствующих водотокам, приведенным в таблице 4, расположена между двумя линиями зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$, для значений $h^*_{1\%}$ равных 20 мм и 50 мм, являющихся преимущественно пограничными значениями суточных слоев стока $h^*_{1\%}$ для рассматриваемых водотоков.

На основе анализа рисунка 1 можно сделать вывод, что для водосборов площадью менее 5 км² (первая группа водотоков) снижение (редукция) максимальных модулей водоотдачи (по кривым зависимости) и стока (по статистически обработанным данным наблюдений) не является ярко выраженным. Отсутствуют и существенные различия в значениях этих модулей, что подтверждает принятое допущение о равенстве водоотдачи и стока для малых площадей водосбора.

Этот этап развития в пространстве и времени процесса формирования стока воды весеннего половодья на безрусловых склонах при отсутствии влияния руслового регулирования является *первым*. В этот период последовательно развиваются процессы снеготаяния, внутриснежной аккумуляции, инфильтрации воды в почву, водоотдачи и стекания поверхностного и ручейкового. При этом большое влияние помимо климатических факторов оказывают форма водосбора, экспозиция и уклон склонов, почвы, слагающие водосбор, а также хозяйственная освоенность. При стекании по склонам талой воды слоем или по микроручейковой сети характер движения воды является неустойчивым с переходом от ламинарного к турбулентному.

На втором этапе на водосборах площадью от 5 до 10 км² (вторая группа водотоков), соответствующих согласно таблице 3 значениям

Φ_p в диапазоне от 50 до 80 мин., появляется, хотя и не ярко выраженная, тенденция к снижению максимального модуля стока с увеличением площади водосбора (рисунок 1).

Для условных водосборов, соответствующих величинам гидроморфометрического параметра русла Φ_p в диапазоне 50–80 минут, также имеет место незначительная редукция максимальных модулей водоотдачи. При этом характер этих изменений для максимальных модулей водоотдачи и стока воды в принципе является идентичным. Однако причины редукции водоотдачи и стока воды на этих водосборах не являются общими. Основная причина снижения модулей водоотдачи связана с уменьшением действующей площади водосбора вследствие изменения площади покрытия снегом, а для модулей стока воды – со снижением действующей площади водосбора и началом руслового регулирования.

На третьем этапе на водосборах с площадью от 10 до 100 км² (третья группа водотоков) снижение максимального модуля стока воды зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$ имеет уже достаточно устойчивую тенденцию (рисунок 1), которая определяется в основном тремя факторами:

- 1) русловым регулированием;
- 2) снижением действующей площади водосбора;
- 3) особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока.

Следует отметить, что 2-ой и 3-ий факторы в численном выражении отражаются коэффициентом формы водосбора, который рассчитывается по формуле

$$K_\Phi = \frac{L}{F^{0,56}} \quad (8)$$

где L – длина водотока, км;

F – площадь водосбора реки, км².

На четвертом этапе на водосборах с площадью более 100 км² (четвертая группа водотоков) редукция максимального модуля стока воды зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$ имеет ярко выраженный устойчивый вид и определяется в основном русловым регулированием и особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока.

Для вышеприведенных трех групп малых водотоков с площадью менее 100 км² характерной особенностью водного режима в период весеннего половодья является внутрисуточный ход стока воды, обусловленный внутрисуточным ходом температуры воздуха и временем бассейнового добегания менее 1 суток.

Для определения значения площади водосбора водотоков Московской области, где соотношение срочного и среднесуточного максимальных расходов воды приближается к единице, были выполнены расчеты. Для всех водотоков, приведенных в таблицах 4 и 5, были определены по формуле (9) значения руслового времени добегания τ_p , мин.

$$\tau_p = \frac{1000L}{m_p^*(I_p)^{0,33}(Q_{\max,1\%})^{0,25}} \quad (9)$$

На основе полученных значений были выделены водотоки с $\tau_p \leq 400$ мин (соответствующие водосборам площадью 70 км²), которые были сгруппированы в таблицу 6. На рисунке 2 представлена зависимость $q_{\text{вод},1\%}/q_{\max,1\%}=f(\tau_p)$ для этих водотоков.

Анализ рисунка 3 показывает, что наибольшая предельная площадь водосборов малых водотоков Московской области, на которых внутрисуточный ход стока затухает, не превышает 70-100 км², что соответствует примерно 500 минутам бассейнового времени добегания (при $\tau_{\text{ск}}=100$ мин).

Таблица 6. Определение отношения максимальных модулей водоотдачи ($q_{\text{вод},1\%}$) и стока ($q_{\text{макс},1\%}$) для малых водотоков Московской области

Table 6. Determination of the ratio of the maximum water output modules ($q_{\text{water},1\%}$) and drain ($q_{\text{max},1\%}$) for small watercourses of the Moscow region

Река (гидрологический пост) River (hydrological post)	Код поста Post code	Площадь, км ² Area, km ²	L, км	K_{ϕ}	τ_p , мин	$\frac{q_{\text{вод},1\%}}{q_{\text{макс},1\%}}$
руч. Малица (с. Николо-Малица)	75052	10,9	3,4	0,89	172	2,26
р. Катыш (с. Троицкое)	75428	70,5	14,8	1,37	395	1,08
р. Медвенка (д. Лапино)	75434	10	4	1,10	129	1,55
р. Медвенка (д. Большое Сареево)	75435	21,5	7,3	1,31	208	1,16
р. Закза (д. Большое Сареево)	75438	17	6	1,23	223	1,27
лог Лесной (д. Лызлово)	75443	0,066	0,1	0,46	8	1,49
лог Лызлово (д. Лызлово)	75437	1,76	1,3	0,95	43	0,98
руч. Прогоны (д. Большое Сареево)	75441	0,8	1,6	1,81	70	0,86

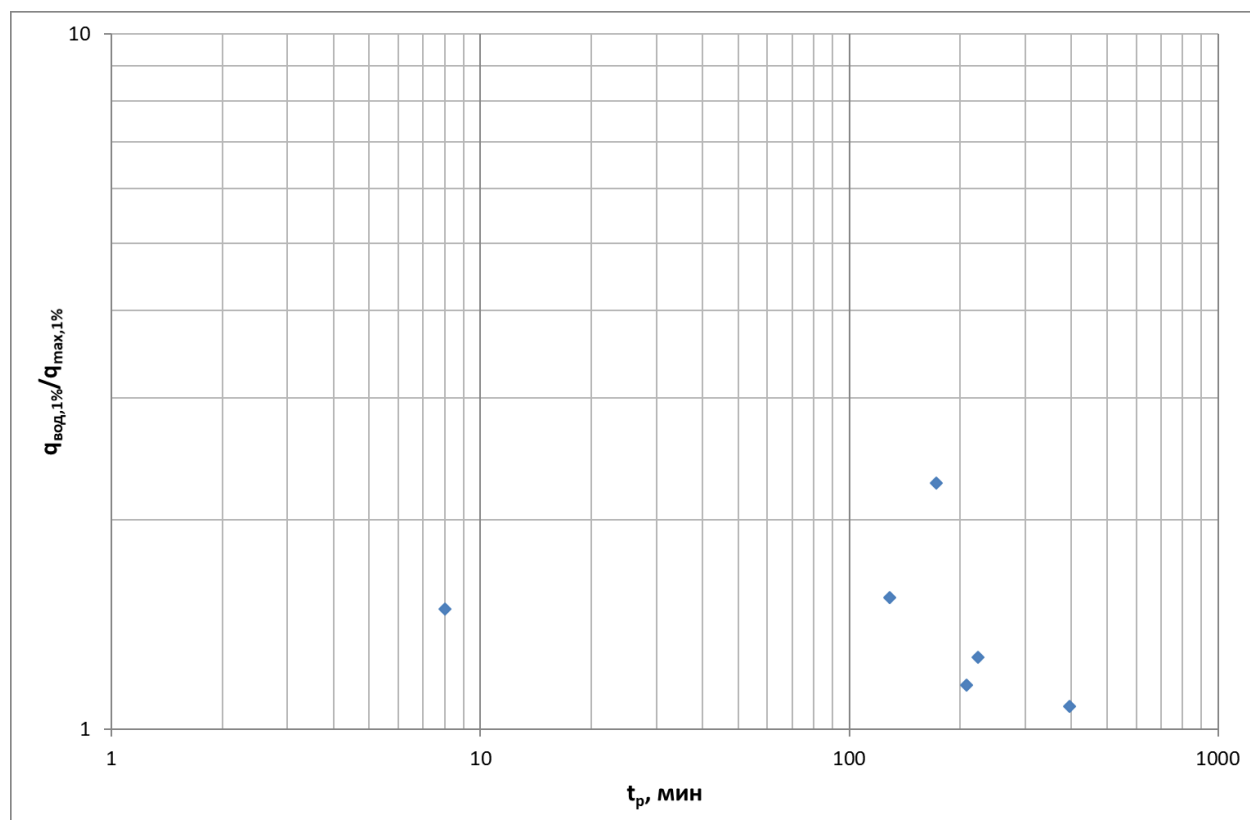


Рисунок 2. Зависимость $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{макс},1\%}=f(\tau_p)$ для малых водотоков Московской области

Figure 2. Dependence of $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{макс},1\%}=f(\tau_p)$ for small watercourses of the Moscow region

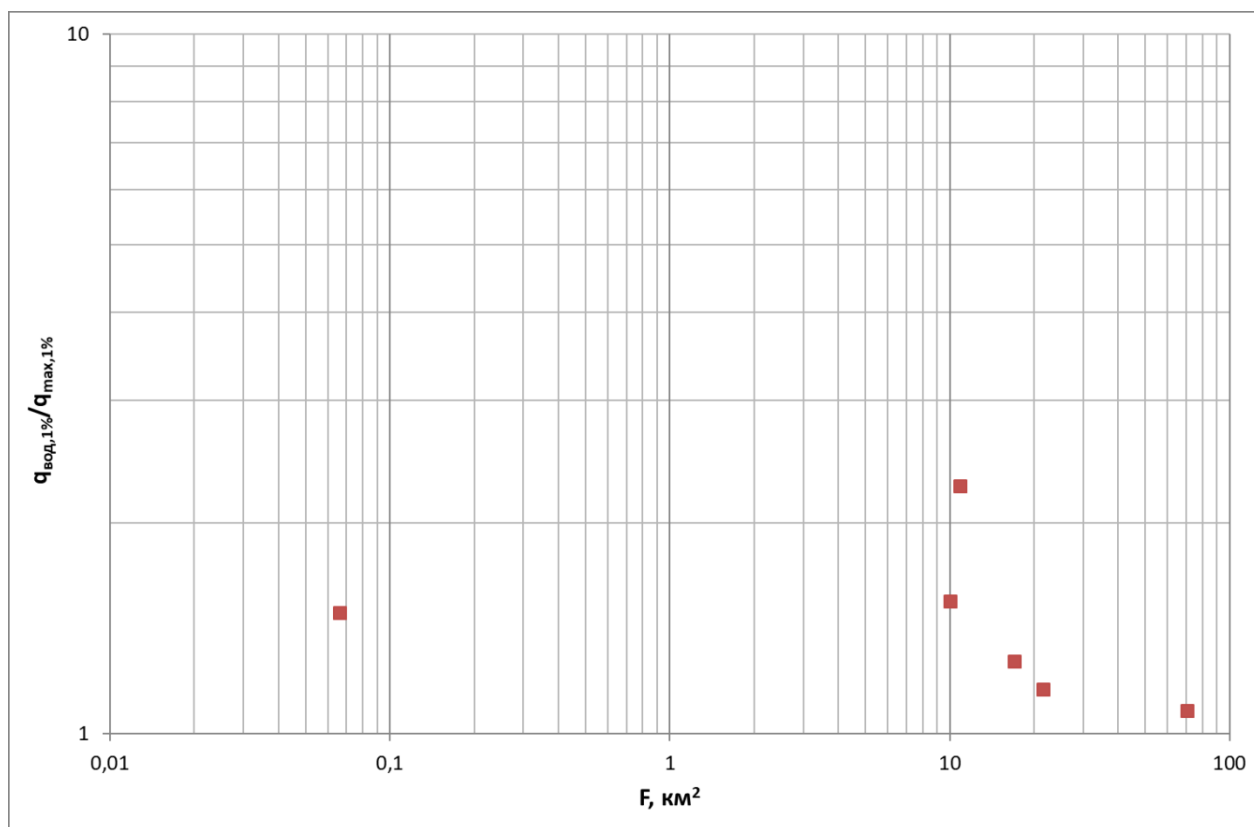


Рисунок 3. Зависимость $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{max},1\%}=f(F)$ для малых водотоков Московской области

Figure 3. Dependence of $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{max},1\%}=f(F)$ for small watercourses of the Moscow region

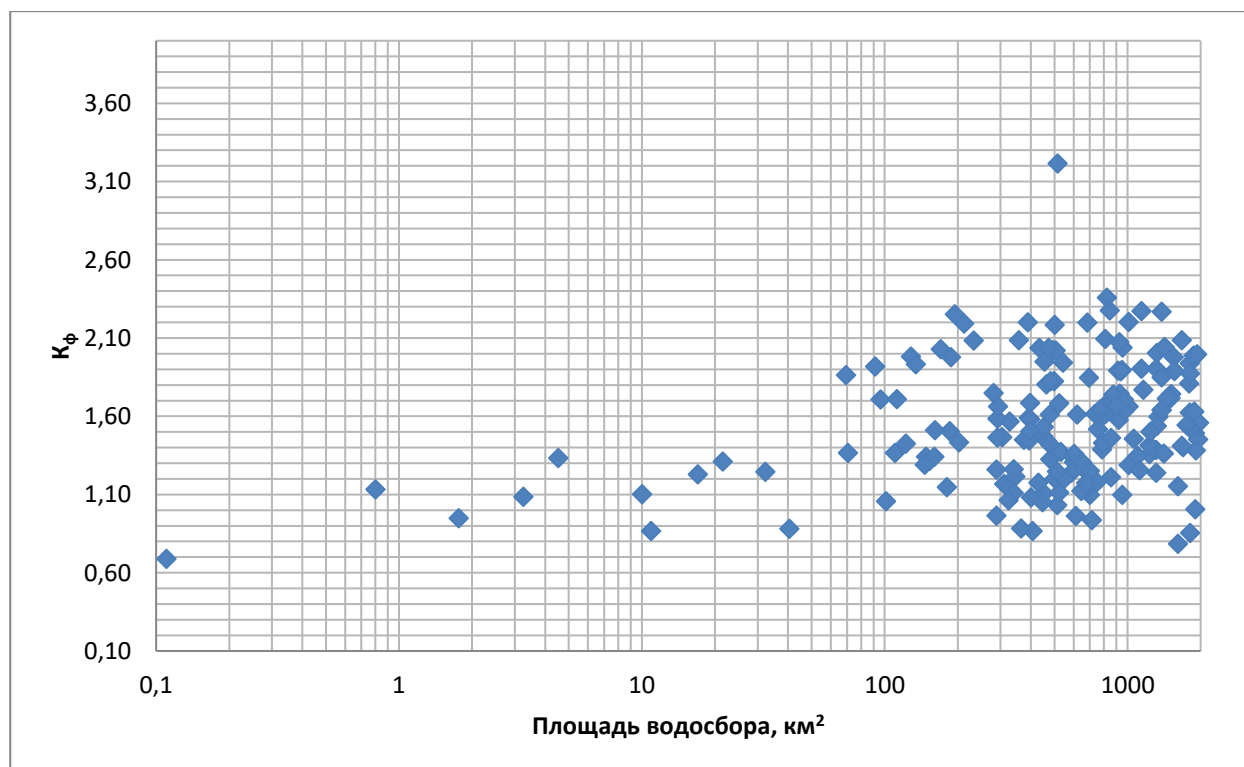


Рисунок 4. График связи коэффициента формы водосбора K_ϕ с площадью водосбора F , км²

Figure 4. Connection graph between the coefficient of the catchment area K_ϕ and the catchment area F , км²

Для четвертой группы водотоков отсутствие внутрисуточного хода стока приводит к устойчивой тенденции изменения максимального модуля стока ($q_{\max,1\%}$, $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$) с увеличением площади водосбора (F , км^2), что способствует достаточно надежному определению коэффициента редукции максимального модуля стока вероятности превышения $P=1\%$, отражающему общий характер зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$. В то же время следует отметить, что для этой группы рек характерной чертой является широкий диапазон изменений в значениях $q_{\max,1\%}$ для одной и той же площади водосбора F .

Одним из основных факторов, приводящих к столь существенным разбросам, является форма водосбора водотоков. Как указано выше, в настоящее время основным численным показателем этого фактора является коэффициент формы водосбора K_f , который определяется по формуле (8). На рисунке 4 представлен график связи $K_f=f(F)$ для водотоков бассейна Верхней Волги, включающего водотоки Московской области.

Из рисунка 4 можно сделать следующие выводы:

1) Для водотоков площадью менее 100 км^2 зависимость $K_f=f(F)$ отражает процесс развития водосбора от склонов, в которых ширина водосбора существенно больше длины, к водотокам, где ширина водосбора становится существенно меньше длины водотока. То есть, иными словами, склоны площадью менее 1 км^2 представляет собой вытянутую форму, в большой степени ориентированную как бы перпендикулярно основному направлению поверхностного стекания.

2) Форма водосборов площадью около 100 км^2 представляет собой уже устойчивую грушевидную форму ($K_f=1,2-1,3$), где ширина водосбора становится существенно меньше длины водотока.

3) Чем больше коэффициент формы ($K_f \geq 1,3$), тем более вытянутым является водосбор вдоль основного русла водотока. При этом для подобных водосборов характерной чертой является отсутствие значительных притоков.

4) Для водосборов с коэффициентом $K_f \leq 1,3$ характерной формой водосбора является грушевидная и даже более округлая в связи с наличием большого числа достаточно существенных водотоков.

Следует отметить, что, к сожалению, коэффициент формы водосбора недостаточно информативен и не отражает особенностей нарастания площади водосбора по длине русла главного водотока. Основной причиной использования при анализе и расчетах лишь коэффициента K_f является отсутствие кадастровых данных о нарастании площади водосбора по длине русла главного водотока для всех гидрологически изученных рек.

Наличие таких данных позволило бы построить кривые связи $F_n/F=f(L_n*100/L)$ на подобии кривых вероятности распределения, где F_n/F и L_n*100/L представляли бы относительные значения площадей водосборов для отдельных участков n (в относительных единицах) и соответствующих им длин главного русла (в процентах).

На основе анализа этих зависимостей появится возможность выработки принципов группировки рек по характеристикам кривых связи $F_n/F=f(L_n*100/L)$ и, как следствие, уточнение коэффициентов редукции максимальных модулей стока.

О показателе n , характеризующим тенденцию изменения коэффициента дружности половодья (K_0) с увеличением площади водосбора (F , км^2)

В нормативных документах определение расчетных максимальных расходов воды весеннего половодья вероятности превышения $P\%$ производится по формулам, использующим коэффициент дружности половодья K_0 , который рассчитывается из формулы (10) при наличии рек-аналогов обратным ходом вычислений.

$$Q_{p\%} = \frac{K_0 h_{p\%} \mu \delta_1 \delta_2 F}{(F + F_1)^n} \quad (10)$$

Как правило, в формуле (10) параметр n трактуется, как показатель степени редукции, то есть показатель степени снижения параметра K_0 с увеличением площади водосбора F . Значение n

определяется на основе построения зависимости $K_0^* = f(F)$, где K_0^* рассчитывается по формуле

$$K_0^* = \frac{q_{\max, 1\%}}{h_{1\%}} \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) $h_{p\%}$ и $h_{1\%}$ (мм) – слой стока весеннего половодья (для равнинных и полугорных рек) или слой годового стока (для высокогорных районов Средней Азии и Кавказа) вероятностью превышения $P\%$ и 1% соответственно.

На рисунке 5 представлен график связи $K_0^* = f(F)$ для водотоков Московской области, а на рисунке 6 – график связи $h_{1\%} = f(F)$.

По данным водотоков Московской области с увеличением площади водосбора согласно рисунку 1 максимальный модуль стока весеннего половодья ($q_{\max, 1\%}$) уменьшается, а согласно

рисунку 6 слой стока весеннего половодья ($h_{1\%}$, мм) увеличивается.

В гидрологической литературе также отмечается, что в горных районах слой стока весеннего половодья ($h_{1\%}$, мм) возрастает с увеличением средней высоты водосбора (H , м). Таким образом, с учетом приведенных сведений, обобщенно можно записать

$$h_{1\%} = h_F \cdot F^{n_1} \quad (12)$$

$$h_{1\%} = h_H \cdot H^{n_2} \quad (13)$$

Формула (12) отражает увеличение слоя стока весеннего половодья с увеличением площади водосбора, а формула (13) – увеличение слоя стока весеннего половодья с увеличением средней высоты водосбора.

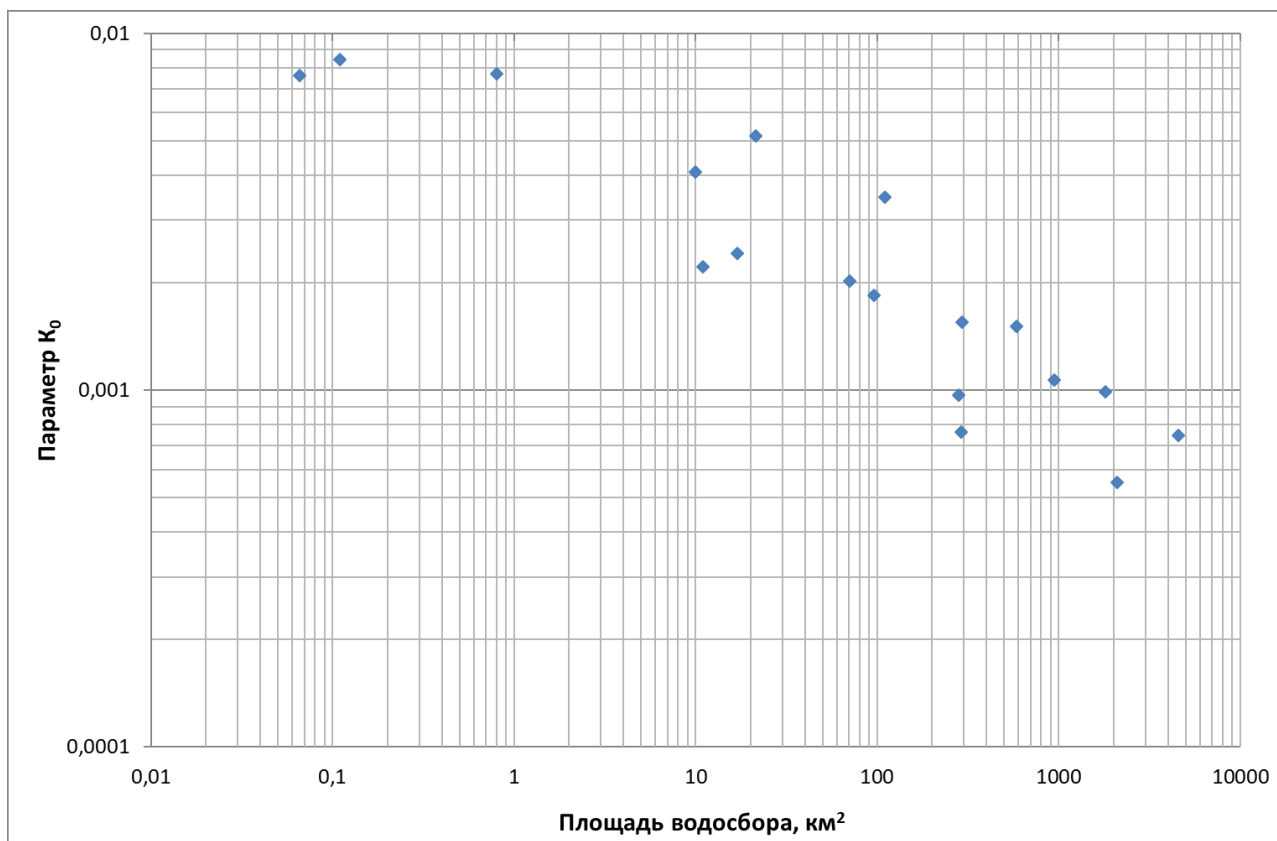


Рисунок 5. График связи $K_0^* = f(F)$ для водотоков Московской области

Figure 5. Connection graph $K_0^* = f(F)$ for watercourses of the Moscow region

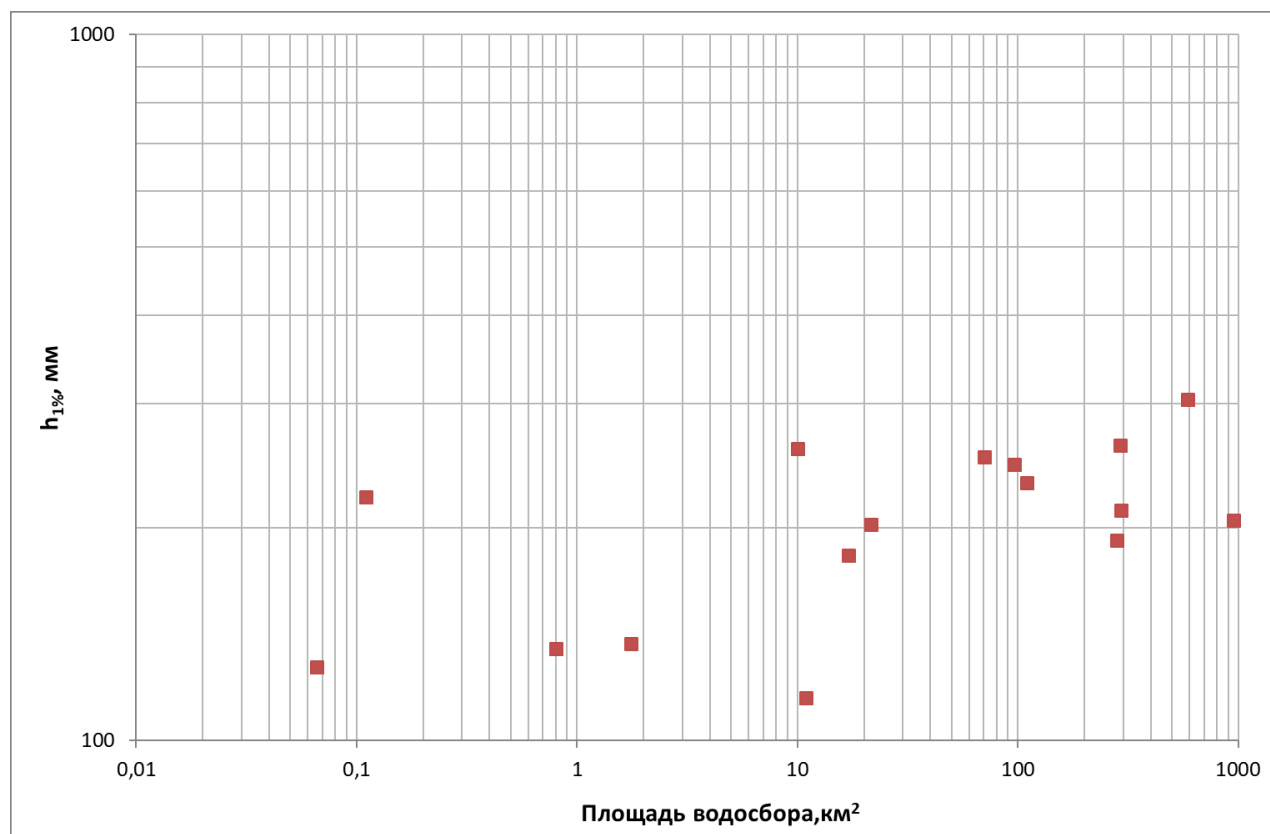


Рисунок 6. График связи $h_{1\% \text{весеннего половодья}} = f(F)$ для водотоков Московской области

Figure 6. Connection graph $h_{1\% \text{spring flood}} = f(F)$ for watercourses of the Moscow region

Выводы

Коэффициент редукции является результирующим показателем, совокупно отражающим характер ряда зависимостей максимального модуля и слоя стока весеннего половодья вероятности превышения $P=1\%$ с увеличением площади и средней высоты водосбора.

В гидрологически однородных горных районах средняя высота водосбора может уменьшаться с увеличением площади водосбора. В этих случаях возможно увеличение слоя стока

весеннего половодья с уменьшением площади водосбора.

Учитывая выше отмеченные зависимости составляющих K_0^* (максимального модуля и слоя стока весеннего половодья), при гидрологических исследованиях необходимо выявить превалирующие факторы влияния отдельно для максимального уровня и максимального модуля стока. Затем необходимо выявить следующие факторы влияния и только при отсутствии таковых строить зависимость типа $K_0^* = f(F)$, исключив из расчетной формулы коэффициент редукции максимального модуля стока весеннего половодья.

Литература

Виноградов А.Ю., Никуфоровский А.А., Догановский Д.А., Белоногова Н.А., Виноградова Т.А., Марков М.Л., Салминен Э.О., Тюрин Н.А. Новые методы расчетов максимального стока для малых водотоков лесной зоны. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 481 с.

References

Nezhikhovskii R.A. *Ruslovaya set' basseina i protsess formirovaniya stoka vody [The channel network of the basin and the process of water flow formation]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 476 p. (In Russian).

Tumanovskaya S.M. *Raschet maksimal'nogo stoka vesennego polovod'ya s malykh vodosborov i*

Нежиховский Р.А. Руслонная сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 476 с.

Тумановская С.М. Расчет максимального стока весеннего половодья с малых водосборов и склонов на основе кривой редукции водоотдачи // Исследования формирования речного стока и его расчеты: межведомственный сборник ЛГМИ, выпуск 76 / Отв. ред. Б.Б. Богословский. Л.: Ленингр. политехн. ин-т, 1981. С. 97-106.

Тумановская С.М. Особенности организации полевых исследований на малых водосборах для оценки характеристик максимального стока // Условия формирования и методы прогноза стока Волги: Сб. работ по проекту РФФИ (93-05-9111) / Под ред. В.И. Бабкина. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. С.70-81.

sklonov na osnove krivoi reduksii vodootdachi [Calculation of the maximum runoff of spring floods from small catchments and slopes on the basis of the water loss reduction curve] In B.B. Bogoslovskii (ed.) *Issledovaniya formirovaniya rechnogo stoka i ego raschety* [Studies of river runoff formation and its calculations], Leningrad, Publ. of Leningrad Polytechnic Institute, 1981, pp. 97-106. (In Russian).

Tumanovskaya S.M. Osobennosti organizatsii polevykh issledovaniy na malykh vodosborakh dlya otsenki kharakteristik maksimal'nogo stoka [Features of the organization of field research on small catchments to assess the characteristics of maximum runoff]. In V.I. Babkin (ed.) *Usloviya formirovaniya i metody prognoza stoka Volgi: sbornik rabot po projektu RFFI (93-05-9111)* [Conditions for the formation and methods of forecasting the runoff of the Volga: Collection of papers on the RFBR project (93-05-9111)]. Saint Petersburg, Publ. of Gidrometeoizdat, 1995, pp.70-81. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Nikiforovskii A.A., Doganovskii D.A., Belonogova N.A., Vinogradova T.A., Markov M.L., Salminen E.O., Tyurin N.A. *Novye metody raschetov maksimal'nogo stoka dlya malykh vodotokov lesnoi zony* [New methods for calculating the maximum flow for small watercourses in the forest zone]. Saint Petersburg, Publ. of SPbGLTU, 2015. 481 p. (In Russian).

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 624.131.544: 551.311.2: 627.141.1

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.405

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ
ИСКУССТВЕННОГО ГРЯЗЕВОГО
СЕЛЯ НА ЛАБОРАТОРНОМ
СТЕНДЕ

Н.А. Казаков^{1,2}, Д.А. Боброва¹,
Е.Н. Казакова¹

¹ФГБУН Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследований
Дальневосточного отделения Российской
академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

²НИЦ «Геодинамика», г. Южно-Сахалинск,
Россия

cdsmd@yandex.ru

STUDY OF THE VELOCITY OF
ARTIFICIAL MUDFLOW ON A
LABORATORY STAND

Nikolay A. Kazakov^{1,2}, Darya A. Bobrova¹,
Ekaterina N. Kazakova¹

¹Special Research Bureau for Automation of Marine
Researches of the Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Research Center «Geodinamics», Yuzhno-
Sakhalinsk, Russia

cdsmd@yandex.ru

Аннотация. В августе 2020 года был проведён эксперимент по измерению скорости искусственного связного (грязевого) селя на лабораторном стенде. Стенд: прямоугольный в поперечном сечении лоток длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м. В лотке установлены 4 вешки для измерения гидродинамического напора селя. Уклон лотка: 29°. Движение селя снималось скоростной видеокамерой. Измерялись скорость и скоростной напор грязевого селя. Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок, до 30%) плотностью в естественном 2 210 кг/м³. Плотность суглинка – 1 910 кг/м³. Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью 2 210 кг/м³. Преобладающая часть тонкодисперсных фракций грунта селевой смеси – пылеватые частицы размером менее 0,25 мм (34%). Плотность селевой смеси 1 880 кг/м³. Плотность селевых отложений составила 2 040 кг/м³. Характер движения потока – турбулентный. Скорость селя на разных участках постоянно изменялась, что говорит о

Abstract. In August 2020, an experiment was conducted to measure the velocity of an artificial coherent mudflow on a laboratory stand. The stand is a rectangular cross-section tray with a length of 3.0 m, a width of 0.25 m, a depth of 0.25 m, slope – 29°. 4 racks were installed in the tray to measure the hydrodynamic pressure of the mudflow. The movement of the mudflow was filmed by a high-speed video camera. Velocity of artificial mudflow were measured. Most of the mudflow mixture soil is made up of particles less than 0.25 mm in size (34%). The density of the prepared mudflow mixture was 1 880 kg/m³. Density of mudflow deposits 2 040 kg/m³. Despite the small values of the Reynolds number, the turbulent movement of the mudflow was observed. Comparison of the results of the measured mudflow velocities with the velocities calculated by different methods of calculating the mudflow velocity based on the structure of the Shezi formula (for Newtonian fluids) showed a strong variation of the calculated values. The methods either greatly overestimate or, on the contrary, greatly underestimate the measured values. This is probably due to the fact that the connected mudflow is not a Newtonian fluid, but a non-Newtonian fluid. The closest physical analogue of a connected mudflow is

постоянном изменении динамической и эффективной вязкостей потока. На это же указывает и характер обтекания селем препятствий. Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по разным методикам, основанным на структуре формулы Шези (для ньютоновских жидкостей) и по величине гидродинамического напора показало сильный разброс рассчитанных значений. Методики либо сильно завышают, либо, наоборот, сильно занижают измеренные значения. Вероятно, это вызвано тем, что связный сел не является ньютоновской жидкостью, а является жидкостью неньютоновской. Наиболее близкий физический аналог связного селя – псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига. Скорость связных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей. В качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости, течение которой подобно течению связных селей (грязевых и грязекаменных).

Ключевые слова: связный сел; грязевой сел; селевой процесс; скорость селя; селевой лоток; селевые отложения; гидродинамический напор

Введение

Несмотря на многолетние исследования селевых процессов, мы до сих пор не имеем ответов на вопросы о характере влияния физических характеристик селевых смесей на динамику связных селей (в том числе на их скорость).

В частности, не решёнными остаются вопросы о зависимости скорости селя от плотности и вязкости селевой массы, о закономерностях формирования селевых отложений и, соответственно, о зависимости их структуры и стратификации от скорости селя, плотности и вязкости селевой массы и о природе и физических свойствах селевой смеси.

a pseudoplastic (non-Newtonian) fluid whose viscosity decreases with increasing shear stress. As a physical model of a connected mudflow, it is advisable to use the Bingham fluid model, the flow of which is similar to the flow of coherent debris-flows and mudflows.

Keywords: coherent mudflow; mudflow; mudflow process; mudflow velocity; mudflow tray; mudflow deposits; debris-flows; a hydrodynamic pressure

Эти проблемы связаны в первую очередь со сложностью исследования характеристик селевых смесей в натурных условиях.

Исследование физических характеристик селевых смесей и установление некоторых закономерностей зависимости динамики селей от свойств селевой смеси возможно при проведении экспериментов на лабораторных стендах, которые достаточно широко применяются исследователями (преимущественно за рубежом) [Wei et al., 2012; Казаков и др., 2019]. В СССР селевые лотки и лабораторные установки для экспериментальных исследований динамики селей существовали в нескольких научно-исследовательских организациях ГрузНИИГиМ, АрмНИИГ, НИИ транспортного строительства и МГУ [Флейшман, 1978].

Несмотря на то что исследование характеристик связных селей на лабораторных селевых лотках имеет ряд недостатков (малая длина лотков, малые объёмы и глубина селей и так далее), такие исследования всё же позволяют получить экспериментальные данные о физических характеристиках селевых смесей и об общих закономерностях динамики вязких потоков, необходимых для физического моделирования селей. В 2019 году селевой лоток был создан в СКБ САМИ ДВО РАН в городе Южно-Сахалинск [Казаков и др., 2019].

Методика эксперимента

В августе 2020 года нами был проведён эксперимент по измерению скорости вязкого грязевого селя на лабораторном селевом стенде.

Измерялись скорость и гидродинамический напор искусственного грязевого селя.

Селевой лоток длиной 3,0 м, шириной 0,25 м, глубиной 0,25 м [Казаков и др., 2019] был установлен с уклоном 29° .

В лотке были установлены 3 вешки диаметром от 0,016 до 0,022 м (6-9% от ширины лотка), по которым измерялась высота гидродинамического напора селевого потока (рисунок 1) и определялся характер взаимодействия потока с препятствием. Вешки

разделили лоток на 4 участка, на которых измерялась скорость потока.

Движение селя снималось скоростной видеокамерой сбоку через прозрачную стенку селевого лотка и фронтально. Скорость селя определялась по видеосъёмке.

Селевая смесь была приготовлена из дресвяно-щебенистого элювиально-делювиального грунта возрастом Q_{IV} с суглинистым заполнителем (лёгкий и средний суглинок до 30%) плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 . Плотность суглинка – 1910 кг/м^3 .

Дресва и щебень представлены алевролитом средней прочности плотностью в естественном залегании 2210 кг/м^3 .

Преобладающая часть тонкодисперсных фракций грунта селевой смеси представлена пылеватыми частицами размером менее 0,25 мм (таблица 1). Показатель текучести – $0,25 < J_L \leq 0,50$. Грунт относится к тугопластичным суглинкам.

Гранулометрический состав исходных грунтов показан в таблице 1.

Поток из подготовленной селевой смеси был пущен по лотку. Плотность подготовленной селевой смеси составила 1880 кг/м^3 (таблица 2). Длина пути селя составила 2,49 м.



Рисунок 1. Селевые обмазки на вешке показывают величину гидродинамического напора селя
Figure 1. Mudflow coatings on the rod show the value of the hydrodynamic pressure of the mudflow

Таблица 1. Гранулометрический состав грунтов для подготовки селевой смеси

Table 1. Granulometric composition of soils for the preparation of debris-flow mixture

Наименование горной породы Name of rock	Геологический возраст и генезис Geological age and Genesis	Гранулометрический состав, % Granulometric composition, %						
		Щебень Crushed	Дресва Gravel		Песок Sand			Пылеватые частицы Dusty particles
	Размер частиц, мм Particle size, mm	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	<0,25
Дресвяно-щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 45%, средней плотности, влажный Dry-crushed soil with loamy aggregate up to 45%, medium density, wet	pdQ_{IV}	18,2	15,6	14,5	8,9	5,1	3,3	34,3

Таблица 2. Характеристики селевой смеси

Table 2. Characteristics of the mudflow mixture

Плотность селевой смеси, кг/см ³ Density of mudflow mixture, kg/cm ³	Плотность селевых отложений, кг/см ³ Density of mudflow deposits, kg/cm ³	Объёмная влажность, % Volume humidity, %	Пористость, % Porosity, %	Коэффициент пористости Porosity coefficient	Нормативные значения Standard values			
					Удельное сцепление, МПа Specific coupling, MPa	Угол внутреннего трения, град. Internal friction angle, deg.	Модуль деформации, МПа Modulus of deformation, MPa	Сопротивление сдвигу, МПа Shear strength, MPa
1 880	2 040	0,17	9,29	0,47	0,044	39	30	14,675

Коэффициент динамической вязкости селевой смеси рассчитывалась по формуле [Гончаров, 1962]:

$$\mu = \frac{\rho i h^2}{2U} \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость, мм²/с;
 ρ – плотность селевой смеси, кг/м³;

h – глубина потока, м;

i – уклон русла, град;

U – скорость потока, м/с.

Коэффициент кинематической вязкости селевой смеси рассчитывалась по формуле:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм²/с;
 ρ – плотность селевой смеси, г/см³.

По результатам эксперимента было проведено сравнение измеренной скорости селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам, часто используемым для расчёта скорости селя при научно-исследовательских и проектно-изыскательских работах.

1. Скорость селя по величине гидродинамического напора¹:

$$U = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\alpha}} \quad (3)$$

где Δh – скоростной/гидродинамический напор, определяемый как разность между отметками следов уровня (обмазки) в лобовой и тыловой части вешки, рисунок 1), м;

α – коэффициент, зависящий от свойств селевой массы (в среднем равняется 0,55).

2. Скорость грязевых и грязекаменных селей по [Голубцов, 1969]:

$$v_c = 3,75h_{cp}^{0,5}i^{0,17} \quad (4)$$

где h_{cp} – глубина потока, м;
 i – уклон русла, ‰.

3. Скорость селя по И.И. Херхеулидзе²:

$$v_c = 4,83h^{0,5}(\sin\alpha)^{0,25} \quad (5)$$

где h – средняя глубина потока, м;
 α – средний угол наклона селевого русла, ‰.

4. Скорость селя по [Срибный, 1960]:

$$v_c = \frac{mR^{2/3}I^{1/4}}{\sqrt{\frac{\rho_c\rho_T-\rho_T}{\rho_T-\rho_c}+1}} \quad (6)$$

где m – коэффициент шероховатости;
 R – гидравлический радиус потока, м;
 I – продольный уклон русла, град.;
 ρ_T – плотность наносов, т/м³;
 ρ_c – средняя плотность селевой массы, т/м³.

5. Скорость селя по Кханну [Голубцов, 1969]:

$$v_c = 8,05h_{cp}^{0,58}I^{0,30} \quad (7)$$

где h_{cp} – средняя глубина потока, м;
 I – продольный уклон русла, град.

6. Скорость селя по [Крюков, Бутенко, 2013]:

$$v_c = 11,4h_{cp}^{0,5}\left(Usin\alpha^{\frac{1}{3}}\right) \quad (8)$$

где U – относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в поток каменных материалов (для оперативных расчётов принимается равным 0,7...1,0 м/с); в наших расчётах принято равным 1,0 м/с;

α – средний угол наклона селевого русла, ‰;

h_{cp} – средняя глубина потока, м.

Результаты и их обсуждение

Созданный во время эксперимента сель можно описать как вязкий грязевой сель с турбулентным режимом течения (рисунок 2, 3).



Рисунок 2. Селевые отложения
 Figure 2. Mudflow deposits

¹ Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 143 с.

² РД 52.30.238-90. Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеиздат, 1990. 199 с.

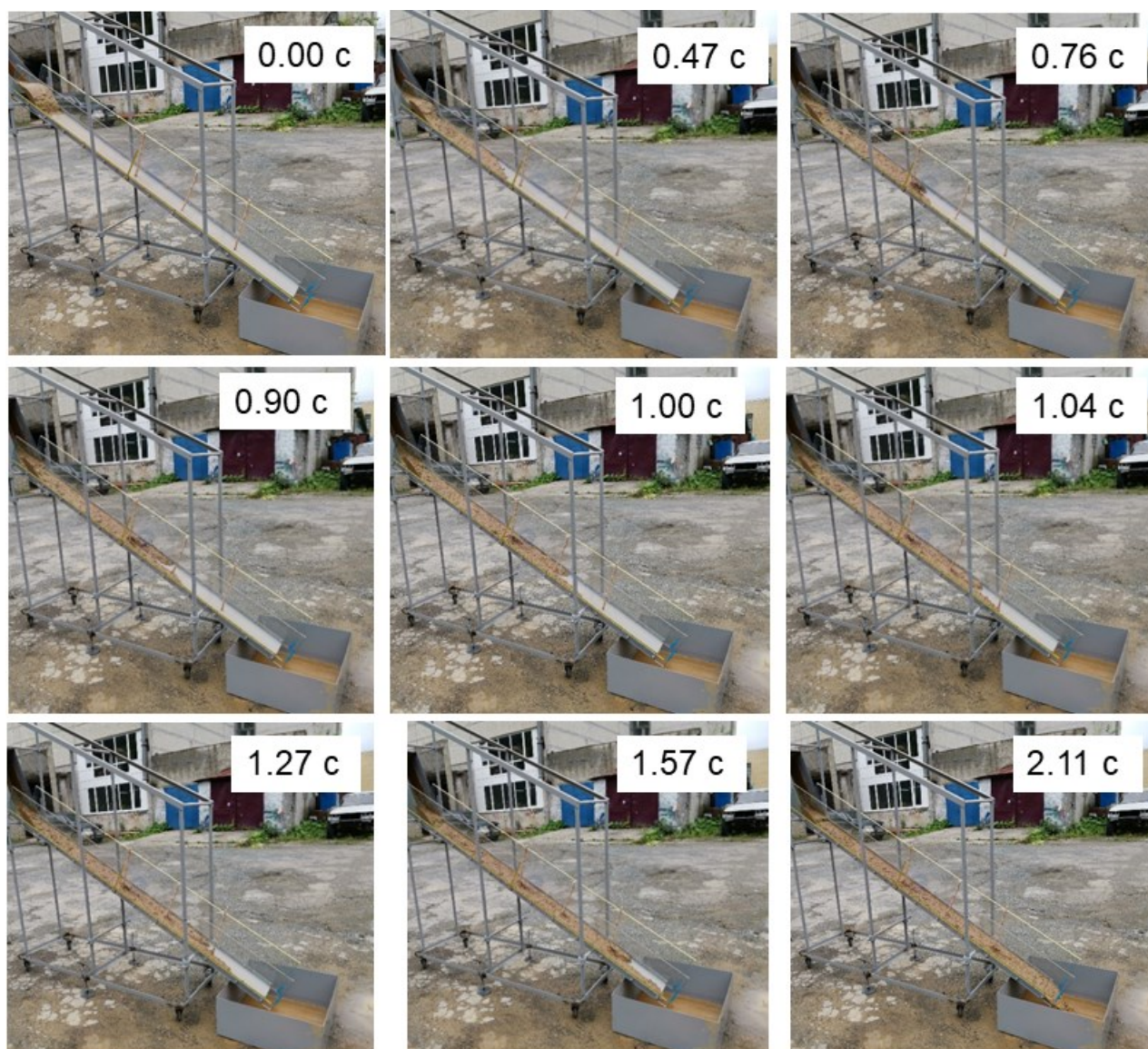


Рисунок 3. Стадии движения искусственного грязевого селя в лотке (время от начала движения, с)
Figure 3. Stages of an artificial mudflow movement in a tray (time from the beginning of the movement, s)

Рассчитанное для смоделированного грязевого селя число Рейнольдса ($<1,82$, таблица 3) характерно для ламинарного режима течения. Однако при наблюдении поток визуально был определён именно как турбулентный: несмотря на малые значения числа Рейнольдса, в потоке наблюдалось выраженное вихревое движение. Перемешивание селевой смеси и перемещение обломков размером 25 см (соизмеримых с глубиной и шириной потока) происходило на протяжении всего движения селя.

По этому мы согласны с мнением С.М. Флейшмана о том, что если для двухфазных потоков (наносоводных) с незначительной вязкостью дисперсионной среды критическое

значение числа Рейнольдса при переходе потока к турбулентному режиму превышает 2 300-2 400, то для квазиднофазных связных селей, вязкость которых в сотни раз превышает вязкость воды, значения числа Рейнольдса при турбулентном режиме движения могут не превышать значение 5 [Флейшман, 1978].

Действительно, при малых значениях числа Рейнольдса (таблица 3) на отдельных участках пути смоделированного нами селя в потоке наблюдалось выраженное вихревое движение, а перемешивание селевой смеси и перемещение обломков размером 2-5 см (соизмеримых с глубиной и шириной потока) происходило на протяжении всего движения селя.

Таблица 3. Условия и результаты эксперимента по измерению скорости грязевого селя
Table 3. Conditions and results of the experiment on measuring the mudflow velocity

№ участка	№№ участка	Длина участка, м The length of channel, m	Уклон лотка, град Angle of inclination grad.	Глубина селя, м Depth of mudflow, m	Величина гидродинамического напора на вешке, м Hydrodynamic head on the rod, m	Характеристики селевой смеси				Плотность селевых отложений, кг/м³ Density of the mudflow deposits, kg/m³	Расход начальный, м³/с Initial discharge, m³/s	Расход, м³/с Discharge, m³/s	Гидравлический диаметр, м The hydraulic radius, m	Число Рейнольдса Reynolds Number	Коэффициент шероховатости Coefficient of roughness	Измеренная скорость, м/с Measured velocity, m/s
						Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Температура, °C Temperature, °C	Коэффициент динамической вязкости, кг*с/м² Coefficient of dynamic viscosity, kg*s/m²	Коэффициент кинематической вязкости, м²/с Coefficient of kinematic viscosity, m²/s							
1		1,03	29	0,040	0,07	1 880	20,6	22,87	0,0122	2 040	0,045	0,019	0,006	1,82	1,44	1,91
2		0,46		0,030	0,07			24,43	0,0130			0,026	0,004	0,64	2,28	1,00
3		0,49		0,023	0,04			23,65	0,0126			0,004	0,003	0,82	1,16	1,64
4		0,51		0,025	0,05			32,43	0,0173			0,012	0,003	0,76	1,06	1,90
Среднее		2,49														1,59



Рисунок 4. Турбулентный режим течения наносоводного потока

Figure 4. Turbulent flow regime of the suspended stream

Смоделированный наносоводный поток имел ярко выраженный турбулентный режим течения (рисунок 4).

В ходе эксперимента была измерена скорость селя на разных участках селевого лотка и исследован характер его взаимодействия с препятствием (таблица 3).

Результаты эксперимента (таблица 3) показали следующее.

После прохождения селя и формирования селевых отложений плотность селевой смеси увеличилась на 9%: с $1\,880\text{ кг/м}^3$ до $2\,040\text{ кг/м}^3$ у селевых отложений (таблица 3). В связи с этим возникает сомнение в правомерности определения плотности селевой смеси путём сравнения форм образцов селевой смеси, приведённых к первоначальному состоянию, с естественными формами обмазки³.

Отмечена неравномерная скорость селя на разных участках селевого лотка: как уменьшение скорости, так и её увеличение (таблица 3).

Интересными оказались наблюдения за характером обтекания грязевым потоком препятствий (вешек).

При обтекании селем вешки № 1 произошло разделение потока на 2 рукава (рисунок 5).

Слияние рукавов произошло на участке № 2 (между вешками №№ 1, 2) через 0,50 с после разделения потока на расстоянии 0,46 м от точки его разделения, что может говорить о достаточно высокой вязкости селя. К моменту слияния рукавов, фронт правого рукава уже миновал вешку № 2.

На участке № 2 (после взаимодействия с вешкой № 1) скорость правого рукава резко возросла (таблица 4), что можно объяснить снижением динамической вязкости потока вследствие его разделения на 2 рукава, каждый из которых имел ширину 0,1 м при глубине 0,05 м.

При обтекании селем вешки № 2 поток также разделился на 2 рукава, однако слияние рукавов потока произошло через 0,20 с.

При обтекании селем вешки № 3 поток вновь разделился на 2 рукава, слияние которых произошло через 0,40 с: уже после того, как фронт правого рукава достиг конца лотка.

При движении селя по участку № 2 (между вешками №№ 1, 2) скорость селя резко уменьшилась.

Напротив, скорость селя при подходе к вешке № 3 вновь возросла: несмотря на то, что рукава потока слились в один и динамическая вязкость потока должна была возрасти (таблица 4).

Таким образом, можно в первом приближении предположить, что вязкость связанного селя постоянно изменяется в процессе его движения. Изменение вязкости носит нелинейный характер.

Следует однако отметить, что диаметр вешки № 1 больше, чем диаметр вешек №№ 2, 3, а глубина потока – больше.

Интересно отметить, что исследования взаимодействия снежной лавины с препятствием в виде столба, колонны и тому подобным, установленного в зоне максимальных скоростей лавины, приводит к снижению скорости и дальности выброса лавин [Ржевский, 1984]. Возможно это объясняется тем, что скорость лавины на порядок больше скорости селя, а плотность – на порядок меньше.

³ Там же.

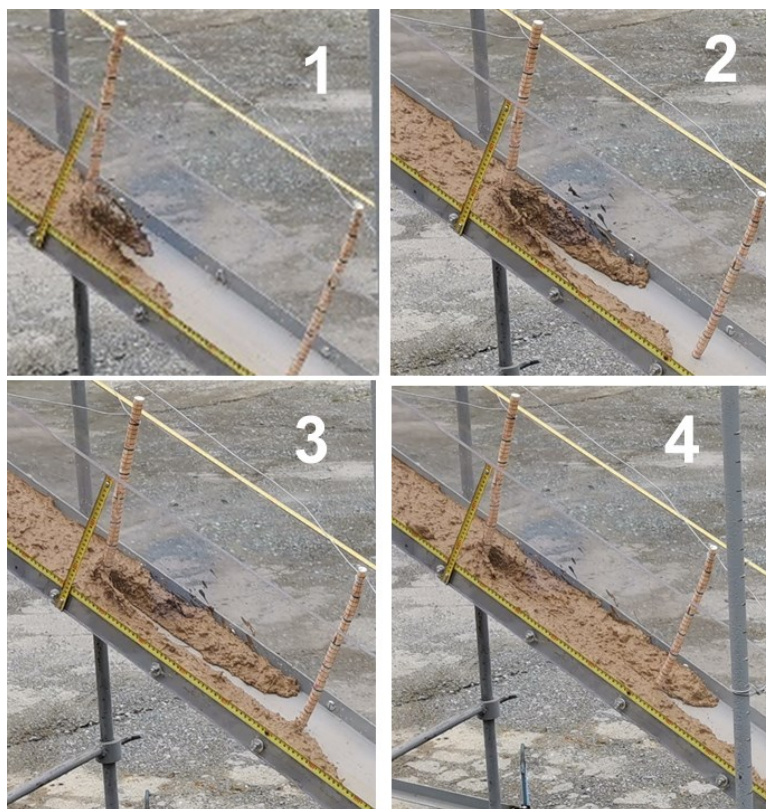


Рисунок 5. Последовательные стадии обтекания вешки № 1 грязевым селом

Figure 5. Interaction of mudflow with an obstacle. Rod № 1

Таблица 4. Условия взаимодействия селя с препятствием

Table 4. Conditions of the interaction the mudflow with an obstacle

№, № вешки №, № rod	Длина участка до вешки, м Length of channel, m	Ширина лотка, м Width of the tray, m	Диаметр вешки, м Diameter of the rod, m	Отношение диаметра вешки к ширине лотка Ratio of the diameter of the rod to the width of the tray	Глубина селя, м Depth of mudflow, m	Отношение диаметра вешки к глубине селя Ratio of the diameter of the rod to the depth of mudflow	Глубина потока на вешке (гидродинамический напор), м Depth of the thread on the rod (hydrodynamic head), m	Скорость селя при обтекании вешки, м/с Mudflow velocity when the leakage in the rod, m/s	Скорость правого рукава селя после обтекания вешки, м/с Mudflow right sleeve velocity after the leakage in the rod, m/s
1	1,03	0,25	0,022	0,09	0,040	0,55	0,07	1,91	1,49
2	1,49		0,018	0,07	0,030	0,60	0,07	1,00	1,39
3	1,98		0,016	0,06	0,023	0,70	0,04	1,64	1,82

Таблица 5. Сравнение значений скорости грязевого селя, рассчитанных по разным методикам**Table 5.** A comparison of the values of the mudflow velocity, calculated by different methods

№№ участка №№ of site	Измеренная скорость, м/с Measured velocity, m/s	Рассчитанная скорость, м/с Speed head, m/s					
		По величине гидродинамического напора By the value of the hydrodynamic head	По В.В. Голубцову According to V.V. Golubtsov	По М.Ф. Срибному According to M.F. Sribniy	По И.И. Херхеулидзе According to I.I. Kherkheulidze	По Е.В. Крюкову, В.М. Бутенко According to E.V. Kryukov, V.M. Butenko	По Кханну According to Khann
1	1,91	1,58	2,20	1,66	0,81	1,79	3,42
2	1,00	1,19	1,90	1,59	0,70	1,55	2,89
3	1,64	1,34	1,66	1,54	0,61	1,36	2,48
4	1,90		1,74	1,56	0,64	1,42	2,60
Среднее	1,59		1,74	1,56	0,64	1,42	2,60

Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам, показало, что они сильно различаются между собой (таблица 5).

Значение скорости селя, рассчитанное по величине гидродинамического напора, в двух случаях ниже измеренной скорости, в одном случае – выше. Скорость селя, рассчитанная по величине гидродинамического напора, оказалась ниже измеренной скорости грязекаменного селя до препятствия (вешки) и выше измеренной скорости после препятствия.

Значение скорости селя, определённое по формуле В.В. Голубцова, в двух случаях ниже измеренной скорости, в трёх случаях – выше измеренной.

Значение скорости селя, определённое по формуле М.Ф. Срибного, во всех случаях ниже измеренной скорости. Однако рассчитанная скорость прохождения селом всего лотка

оказалась близка к средней измеренной скорости для всего лотка.

Значение скорости селя, определённое по формуле И.И. Херхеулидзе, во всех случаях намного ниже измеренной.

Значение скорости селя, определённое по Е.В. Крюкову, В.М. Бутенко, в четырёх случаях ниже измеренной скорости, в одном – намного выше.

Скорость по Кханну оказалась во всех случаях намного выше измеренной.

Разброс значений скорости связного селя, рассчитанных по разным методикам, отмечается и в других работах [Соколова и др., 2019].

Важно отметить, что все использованные формулы расчёта скорости селя выведены из уравнения Шези, предназначенного для определения скорости ньютоновских жидкостей и включают в себя в основном такие характеристики, как глубина потока и уклон русла.

Кроме того, в проверенных методиках присутствуют эмпирические коэффициенты, введение которых в любые расчётные формулы выводит такую методику за рамки строго научного обоснованной – в область более искусства, чем науки.

Селевая смесь как неньютоновская жидкость

Как указывалось выше, все проверенные нами методики расчёта скорости селя основаны на структуре формулы Шези: уравнении для ньютоновских жидкостей. Однако с точки зрения физики связный сел не является суспензией [Казаков, 2019], а является неньютоновской жидкостью. Такого взгляда придерживается и ряд других исследователей [Натишвили, Тевзадзе, 2007].

По нашему мнению, наиболее близкий физический аналог связного селя – коллоидная система [Казаков, 2019] или псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига.

Большинство неньютоновских жидкостей разжижаются при сдвиге, их эффективная вязкость снижается при увеличении скорости сдвига.

По этой причине скорость связных грязевых и грязекаменных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей.

Возможно в качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости (тела Бингама): неньютоновские жидкости, которые сохраняют свою структуру вплоть до достижения напряжения, равного начальному напряжению сдвига. Под действием напряжений, превышающих предел текучести, структура такого объекта резко разрушается и жидкость течёт до некоторой степени подобно ньютоновской жидкости. С увеличением скорости деформации наблюдаемая вязкость тел Бингама уменьшается. К Бингамовским жидкостям относятся, например, буровые растворы, шламы, сточные грязи и тому подобное: объекты, подобные связным селям.

Выводы

1. Определены основные характеристики экспериментального связного селевого потока: скорость течения на разных участках, расход, коэффициенты динамической и кинематической вязкости.

2. Скорость селя на разных участках постоянно изменялась, что говорит о постоянном изменении динамической и эффективной вязкостей потока. На это же указывает и характер обтекания селом препятствий.

3. Значение скорости селя, определённое по величине гидродинамического напора показало сильный разброс значений: как занижение скорости, так и завышение.

4. Сравнение результатов измеренных скоростей селя со скоростями, рассчитанными по различным методикам расчёта скорости селя, основанным на структуре формулы Шези (для ньютоновских жидкостей) показало сильный разброс рассчитанных значений. Методики либо сильно завышают, либо, наоборот, сильно занижают измеренные значения. Вероятно это вызвано тем, что связный сел не является ньютоновской жидкостью, а является жидкостью неньютоновской.

5. Наиболее близкий физический аналог связного селя – псевдопластичная жидкость, вязкость которой уменьшается при увеличении напряжения сдвига. По этой причине скорость связных грязевых и грязекаменных селей необходимо рассчитывать как скорость потоков неньютоновских жидкостей. В качестве физической модели связного селя целесообразно использовать модель Бингамовской жидкости, течение которой подобно течению связных селей (грязевых и грязекаменных).

6. После прохождения селя и формирования селевых отложений плотность селевой смеси увеличилась на 9%. В связи с этим возникает сомнение в правомерности определения плотности селевой смеси методом сравнения форм образцов селевой смеси, приведённых к первоначальному состоянию, с естественными формами обмазки.

Литература

Голубцов В.В. О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 30-41.

Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 358 с.

Казаков Н.А. Фазовые переходы в селевой геосистеме // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 172-189. DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.001](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.001).

Казаков Н.А., Боброва Д.А., Казакова Е.Н., Рыбальченко С.В. Исследование динамики селей на экспериментальном стенде // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 4. С. 490-503. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.490](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.490).

Крюков Е.В., Бутенко В.М. Опасные природные процессы: учеб.-метод. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 119 с.

Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Основы динамики селей. Тбилиси, 2007. 213 с.

Ржевский Б.Н. Оценка тормозящей роли одиночного препятствия, обтекаемого лавинным потоком // Вопросы проектирования, строительства и реконструкции железных дорог Сибири: межвузовский сборник научных трудов. Новосибирск, 1984. С. 101-109.

Соколова Д.П., Куровская В.А., Остахов А.А., Казаков Н.А. Оценка динамических характеристик селевого потока по материалам видеосъемки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 1. С. 31-51. DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.003](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.003).

Срибный М.Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению // Исследования и комплексное использование водных ресурсов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 204-220.

Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 312 с.

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X. Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory // WIT Transactions on Engineering

References

Fleishman S.M. *Seli [Mudflow]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1978. 312 p. (In Russian).

Golubtsov V.V. O gidravlicheskom soprotivlenii i formule dlya rascheta srednei skorosti techeniya gornykh rek [About the hydraulic resistance and a formula for calculation of average speed of a current of the mountain rivers]. *Trudy Kazakhskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Kazakh Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 1969, no. 33, pp. 30-41. (In Russian).

Goncharov V.N. *Dinamika ruslovykh potokov [Channel flow dynamics]*. Leningrad, Publ. Hydrometeorological, 1962. 358 p. (In Russian).

Kazakov N.A. Fazovye perekhody v selevoi geosisteme [Phase transitions in the debris flow geosystems]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 172-189. DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.001](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.001). (In Russian; abstract in English).

Kazakov N.A., Bobrova D.A., Kazakova E.N., Rybal'chenko S.V. Issledovanie dinamiki selei na eksperimental'nom stende [The study of the debris-flows dynamics on an experimental stand]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 4, pp. 490-503. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.490](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.490). (In Russian; abstract in English).

Kryukov E.V., Butenko V.M. Opasnye prirodnye protsessy: uchebno-metodicheskoe posobie [Hazardous natural processes]. Moscow, Publ. of Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia. 119 p. (In Russian).

Natishvili O.G., Tevzadze V.I. *Osnovy dinamiki selei [The fundamentals of debris-flow dynamics]*. Tbilisi, 2007. 213 p. (In Russian; abstract in English).

Rzhevskii B.N. Otsenka tormozyashchei roli odinochnogo prepyatstviya, obtekaemogo lavinnym potokom [Assessment of the inhibitory role of a single obstacle streamlined by an avalanche stream].

Sciences. 2012. Vol 73. Pp. 61-71.
DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061).

Voprosy proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii zheleznykh dorog Sibiri: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Issues of design, construction and reconstruction of Siberian railways: interuniversity collection of scientific papers]. Novosibirsk, 1984, pp. 101-109. (In Russian).

Sokolova D.P., Kurovskaya V.A., Ostashov A.A., Kazakov N.A. Otsenka dinamicheskikh kharakteristik selevogo potoka po materialam videos"emki [Evaluation of debris flow dynamic characteristics by video materials]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 31-51. DOI: [10.34753/HS.2019.1.1.003](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.003). (In Russian; abstract in English).

Sribnyi M.F. Formula srednei skorosti techeniya rek i ikh gidravlicheskaya klassifikatsiya po soprotivleniyu dvizheniyu [Formula of the average flow velocity of rivers and their hydraulic classification by resistance to the movement] *Issledovaniya i kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh resursov [Researches and complex use of water resources]*. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Science, 1960, pp. 204-220. (In Russian).

Wei F., Yang H., Hu K., Hong Y., Li X. Two methods for measuring internal velocity of debris flows in laboratory. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2012, vol 73, pp. 61-71. DOI: [10.2495/DEB120061](https://doi.org/10.2495/DEB120061).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли.
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Экологические проблемы и опасности в гидросфере.
4. Эволюция гидросферы.
5. Методы, модели и технологии.
6. Вопросы совершенствования нормативной документации.
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования.
8. Научные дискуссии.
9. Наследие.
10. Хроника.

Плата за публикации статей не взимается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;
- шрифт Times New Roman, размер – 11 pt;
- междустрочный интервал – множитель 1,15, переносы в словах не допускаются;
- абзацный отступ – 1 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;
- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);
- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;
- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащий актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;
- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;
- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;
- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если

таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Отсылка на затекстовые библиографические ссылки приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *Фамилия И.О.* Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на материалы в сборнике конференции: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 9 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); авторская справка. При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 250 слов).

Подробные правила приведены <http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements>.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena" in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes in the hydrosphere: fundamental and engineering aspects
3. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
4. The evolution of the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Monitoring, experimental and expeditionary research
8. Scientific discussions
9. Heritage
10. Chronicles

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal's website in the public domain.

Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 11 pt;
- line spacing – 1,15, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)' name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figures should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the current article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. *Title of book*. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book*. City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. *Title of thesis*. *Thesis type*. City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Conference Proceedings (date and place of the conference)*, City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49-53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49-53. Available at: <http://example.com/example>.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);

academic degree and title;

organization affiliation with full address (including Post Code);

position in organization;

contact telefon (for all authors);

contact e-mail (for all authors);

scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena": <http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements>

Научное издание

**ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ.
HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA
(GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)**

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: М.М. Кадацкая

На обложке фото В.П.Благовещенского,
рисунки М.А. Парфеновой, Н.А. Казакова

Подписано в печать 15.02.2021. Формат: 60х84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская
Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.__.2021

Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект»
Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений:
199155 Санкт-Петербург, а/я 136

Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48
e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28





© 2020 «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены.
© 2020 «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены.