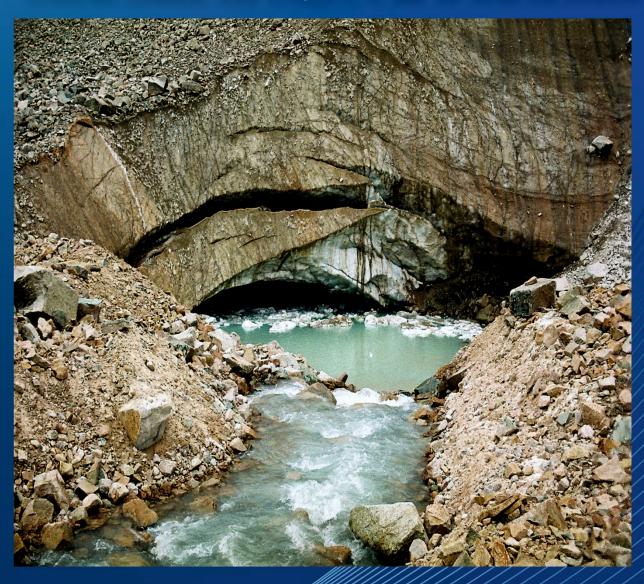
ISSN: 2686-7877 (print) 2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Tom 3

Выпуск 3



ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 3, Выпуск 3

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, Научнопроизводственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия) член-корреспондент А.Н. Гельфан, PAH Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, 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,** Научнопроизводственное 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 3, Issue 3

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)

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)

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. Безносов**, 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)

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. 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 Кретей, 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, доц. **А.А.** Лаврусевич, Московский государственный строительный университет, заведующий кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия) академик НАН Б **В.Ф.** Логинов, Институт приро-

академик НАН Б **В.Ф.** Логинов, Институт природопользования НАН Беларуси, главный научный сотрудник (г. Минск, Беларусь)

канд. геогр. наук, доц. **М.Л. Марков**, Государственный гидрологический институт, заведующий отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии (г. Санкт-Петербург, Россия)

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)

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)

Andrey A. Lavrusevich, Doctor of Science, Head of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Vladimir F. Loginov, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Chief Researcher of Institute for Environmental Management (Minsk, Belarus)

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)

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

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** ot 11.10.2019

ИЗДАТЕЛЬСТВО:

ООО НПО «Гидротехпроект»

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

Для почтовых отправлений:

199155, г. 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 to technical editor Mariya Kadatskaya.

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

Certificate of registration as the media ΠM No ΦC **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

ЭВОЛЮЦИЯ ГИДРОСФЕРЫ	. 204
Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии В.А. Обязов, В.Е. Кирилюк, А.В. Кирилюк	
МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ	. 233
Геостатистическое описание пространственного распределения снежного покрова в физиматематической модели снеготаяния на речном водосборе А.Н. Гельфан	
Моделирование паводков 2005 года в бассейне реки Камы А.Л. Ветров, А.А. Тиунов	. 250
ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	. 259
Оценка возможности использования СП 33-101-2003 для расчётов максимального стока н примере воднобалансовой станции Междуречье А.Ю. Виноградов, А.Ф. Шакиров, Е.А. Парфенов, О.В. Зубова, И.А. Виноградов	
МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	. 275
Характеристики и условия формирования предпочтительных водопроводящих путей на склонах долин малых горных рек В.В. Шамов, Е.А. Шекман, Т.С. Губарева, Б.И. Гарцман, С.Ю. Лупаков, Г.А. Челноков, Н.К. Кожевникова, М.Л. Бурдуковский, А.В. Орляковский	
НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ	. 297
Реакция стока малых рек и надмерзлотных вод Анадырской низменности на перепады атмосферного давления О.Д. Трегубов, Б.И. Гарцман, В.В. Шамов Л.С. Лебедева, А.М. Тарбес	ева
правила лля авторов	310

CONTENTS

THE EVOLUTION OF THE HYDROSPHERE	204
Torey lakes as an indicator of moisture long-term changes in southeastern transbaikalia and northeastern mongolia Victor A. Obyazov, Vadim E. Kirilyuk, Anastasia V. Kirilyuk	
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES	233
Geostatistical description of snow cover heterogeneity in a physically based catchment-scale smodel Alexander N. Gelfan	
Flood simulation in the Kama river basin 2005 Andrey L. Vetrov, Aleksei A. Tiunov	250
Estimation of the possibility of using SP 33-101-2003 for calculation of the maximum runoff of example of the water balance station Mezdureche Alexey Yu. Vinogradov, Amir F. Shakirov, Evgeniy A. Parfenov, Oksana V. Zubova, Ivan A. Vinogradov	on the
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH	
Properties of preferential water flow paths networks and background for their genesis in the of small mountain valleys Vladimir V. Shamov, Evgeniy A. Shekman, Tatiana S. Gubareva, Boris I. Gartsman, Sergei Yu. Lupakov, Georgiy A. Chelnokov, Nadezhda K. Kozhevnikova, Maksim L. Burdukovskii, Aleksandr V. Orlyakovskiy	·
SCIENTIFIC DISCUSSIONS	297
Response of streams and suprapermafrost waters of the Anadyr lowland to atmospheric pres drop Oleg D. Tregubov, Boris I. Gartsman, Vladimir V. Shamov, Ludmila S. Lebedeva, Anna M. Tarbeeva	
AUTHOD CUIDELINES	297
ALLEMENT LITTER LINKS	31/

ЭВОЛЮЦИЯ ГИДРОСФЕРЫ THE EVOLUTION OF THE HYDROSPHERE

УДК 556.555.2; 551.583

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.204

ТОРЕЙСКИЕ ОЗЕРА КАК ИНДИКАТОР МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ УВЛАЖНЕННОСТИ ЮГОВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ МОНГОЛИИ

В.А. Обязов^{1,2}, В.Е. Кирилюк^{3,4}, А.В. Кирилюк^{4,5}

¹ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; ²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия; ³Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия; ⁴Государственный заповедник «Даурский», г. Нижний Цасучей, Россия; ⁵Северо-Восточный Лесной Университет, г. Харбин, Китай td@npogtp.ru

Аннотация. Расположенные в Юго-Восточном Забайкалье на границе с Монголией в зоне недостаточного увлажнения резко озера, континентального климата Торейские представленные соединенными между собой бессточными озерами Барун-Торей и Зун-Торей, периодически наполняются, затапливая десятки тысяч гектаров территории, а спустя несколько лет полностью высыхают. Анализ изменений их уровня воды с начала 1700-х до 1960-х годов, выполнен преимущественно на качественном уровне на основе картографических материалов XVIII века, свидетельств путешественников и ученых, фондовых геологических гидрометеорологических данных. За последние использовались инструментальные данные и снимки искусственных спутников Земли. Показано, что средняя годовая Юго-Восточном температура воздуха В Забайкалье с середины XX века повысилась в

TOREY LAKES AS AN INDICATOR OF MOISTURE LONG-TERM CHANGES IN SOUTHEASTERN TRANSBAIKALIA AND NORTHEASTERN MONGOLIA

Victor A. Obyazov^{1,2}, Vadim E. Kirilyuk^{3,4}, Anastasia V. Kirilyuk^{4,5}

¹Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; ²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia; ³Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the RAS, Chita, Russia; ⁴Daursky State Nature Biosphere Reserve, Nizhniy Tsasuchey, Russia; ⁵Northeast Forestry University, Harbin, China

td@npogtp.ru

Abstract. The Torey Lakes, represented by the interconnected Barun-Torey and Zun-Torey lakes in Southeastern Transbaikalia on the Russia-Mongolia border, have global ecological significance. We aimed to assess the dependence of the Torey Lakes' water level fluctuations on climatic factors by using cartographic materials, scientists' evidence and observations, and a geological and hydrometeorological databases from the early 1700s to the 1960s, and instrumental data and satellite imagery over the past 55 years. The average annual air temperature from the middle of the 20th century increased by an average of 2°C. Until the early 1990s this growth was due to warming during the cold period; after the 1990s due to an increase in temperature during the warm period, causing significantly higher evaporation over the past 20 years. We revealed a significant decrease in atmospheric precipitation in the south of the study area, including the Torey Lakes depression, causing среднем на 2°C. До начала 1990-х годов это повышение обусловливалось потеплением в холодный период года, а позже - ростом температуры теплого периода. В частности, это сказалось существенном увеличении на испаряемости в последние 20 лет. В южных районах исследуемой территории, в том числе в котловине Торейских озер, произошло значимое уменьшение атмосферных осадков, обусловившее, наряду c увеличением испаряемости, усиление аридизации этих районов. В многолетнем режиме осалков преобладают внутривековые циклы продолжительностью 25-30 лет. Цикличность характерна и для многолетних изменений стока рек. Наиболее устойчивыми за весь период наблюдений за стоком в Забайкалье, начиная с конца XIX века, являются 25-30-летние циклы. Цикличность атмосферных осадков и речного стока обусловила соответствующий уровенный режим Торейских озер. Отмечаемая слабая выраженность влажной фазы цикла, которая должна была начаться примерно с 2011 года, обусловлена усилением аридизации южных районов исследуемой территории в последние годы. Сделан вывод, что Торейские озера в полной мере могут считаться индикатором многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии.

Ключевые слова: Торейские озера; уровень воды; увлажненность; температура воздуха; атмосферные осадки; сток рек; многолетние изменения.

Введение

Торейские озера издавна привлекали внимание исследователей природы Забайкалья своим неустойчивым водным режимом. Периодически разливаясь, они затапливали десятки тысяч гектаров территории, а спустя несколько лет могли полностью высохнуть. Особый интерес гидрологический режим этих озер вызывает в связи с их глобальным экологическим значением. Торейские относятся к полутора – двум десяткам ключевых an increase in evaporation and aridization in these areas. However, a reliable relationship between longterm changes in atmospheric precipitation and air temperature was not found. Intrasecular cycles of 25-30 years prevail in the multiyear precipitation regime. Cyclicity is also typical for long-term changes in rivers' runoff. The cyclical nature of atmospheric precipitation and river determined the Torey Lakes level regime. We noted a weak manifestation of the wet phase of the cycle due to the increased aridization in recent years. We concluded that the Torey Lakes can be considered an indicator of long-term changes in moisture in Southeastern Transbaikalia and Northeastern Mongolia.

Keywords: Torey Lakes; water level; moisture content; air temperature; precipitation; river flow; long-term changes.

водно-болотных угодий Восточной Азии, от которых зависит существование многих водоплавающих и околоводных птиц, в том числе исчезающих видов, таких как реликтовая чайка. Они имеют статус участка Всемирного наследия ЮНЕСКО в составе российско-монгольского объекта «Ландшафты Даурии» и водно-болотных угодий международного значения, охраняемых положениями Рамсарской конвенции, и чрезвычайно важны для сохранения десятков

видов птиц, мигрирующих по Восточноазиатско-австралийскому пролетному пути.

Анализ характера колебаний водности Торейских озер и их причин предпринимался неоднократно. На нестабильность уровня воды этих озер в голоцене указывает наличие на поверхности низких террас их котловины около береговых валов [Корнутова, Шамсутдинов, 1971] и 18-20 горизонтов погребенных почв или гумусированных осадков [Шамсутдинов, 1971]. Принимая отложений в 10-12 тысяч лет, В.Х. Шамсутдинов в своей работе [Шамсутдинов, 1971] вычислил среднюю продолжительность циклов колебаний климата, составившую 550-600 лет, и сделал что «ритмичные изменения вывод, климатических условий находились определенной связи с ритмично проявившимися тектоническими процессами». Меньшие продолжительности колебания уровня воды Торейских озер он также связывал с тектоникой [Шамсутдинов, 1983]. Подобное мнение о генезисе колебаний водности этих озер еще раньше было высказано в работе [Симонов, 1969]. исследователи [Кренделев, 1986; Другие Чечель,1991] пришли к выводу, что колебания воды Торейских озер отражают особенности климата, обусловленные различной степенью солнечной активности.

Ранее одним из авторов [Обязов, 1994] была сделана попытка представить имеющиеся качественные и количественные данные уровня воды Торейских озер в виде схематического графика и сравнить его с данными атмосферных осадках и речном стоке в регионе. Сравнительный анализ показал большое сходство их многолетних изменений, что послужило основанием сделать вывод климатообусловленных колебаниях водности этих озер. За прошедшие годы накоплен большой фактический материал, часть из которого опубликована [Обязов, 1999а; Обязов, 1999б; Ткаченко, Обязов, 2003; Обязов, 2012; Kirilyuk et al., 2012; Обязов, 2015], позволяющий сделать количественный анализ.

Целью настоящей работы является оценка зависимости колебаний уровня воды Торейских

озер от климатических факторов. Достижение поставленной цели реализовано путем анализа многолетнего режима температуры воздуха, атмосферных осадков, испаряемости, стока рек региона, оценки зависимости от их колебаний уровня воды Торейских озер в прошлом.

Материалы и методы

основу данной работы положены материалы стандартных гидрометеорологических наблюдений на стационарной наблюдательной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Анализ выполнен по данным о средней месячной температуре и влажности воздуха, месячных суммах атмосферных осадков, средних месячных расходах воды. При анализе многолетних изменений температуры воздуха и осадков данные метеостанций использованы 9 15 гидрологических постов (таблица 1), характеризующей Юго-Восточное Забайкалье в междуречье рек Онон и Аргунь за период с 1951 по 2019 год. Дополнительно привлечены данные по метеостанции Нерчинский Завод за более ранние годы. Анализ гидрологического режима рек выполнен преимущественно по данным с 1958 по 2019 год, реки Шилки с 1897 по 2019 год, а озера Барун-Торей с 1965 по 2020 год.

Для расчета испаряемости использована одна из самых распространенных формул — эмпирическая формула, представленная в работе [Иванов, 1954]:

$$E_0 = 0.0018 (25 + t)^2 (100 - f), \tag{1}$$

где E_0 – испаряемость, мм;

t — средняя месячная температура воздуха, °C; f — средняя месячная относительная влажность воздуха, %.

В исследовании применены различные количественные методы как традиционные, так и современные. К традиционным методам можно отнести разностные интегральные кривые, для получения ординат которых производится последовательное суммирование отклонений модульных коэффициентов от среднего значения.

Таблица 1. Перечень метеорологических станций и гидрологических постов.

Table 1. List of meteorological stations and hydrological posts.

Метеорологические станции	Гидрологические посты
Акша	река Борзя – город Борзя
Александровский Завод	река Верхняя Борзя – село Бырка
Кайластуй	река Газимур – село Александровский Завод
Сретенск	река Нижняя Борзя – село Михайловка
Борзя	река Онон – село Бытэв
Соловьевск	река Онон – село Верхний Ульхун
Газимурский Завод	река Онон – село Чирон
Нерчинский Завод	река Онон – село Оловянная
Мангут	река Турга – село Бырка
	река Ульдза – село Соловьевск
	река Унда – село Ново-Ивановск
	река Унда – село Шелопугино
	река Учирка – село Бытэв
	река Шилка – город Сретенск
	река Шилка – село Усть-Онон

В последние годы все более активно для анализа временных рядов используется вейвлет-[Астафьева, 1996]. анализ Вейвлетпреобразование представляет собой разложение «одномерного сигнала по базису, сконструированному солитоноподобных ИЗ функций (вейвлетов), посредством масштабных изменений и переносов вдоль оси времени» [Витязев, 2001]. Термин «вейвлет» переводится как «маленькая волна». непрерывного вейвлет-преобразования использовался вейвлет Морле. Вейвлет когерентность вычислялась с помощью пакета программ Crosswavelet and Wavelet Coherence [Grinsted, Moore, Jevrejeva, 2004]. Для оценки достоверности статистической вейвлет когерентности применен метод Монте-Карло. Анализ выполнен с помощью программного пакета Matlab.

Тенденции многолетних изменений показателей климата и стока рек выявлены методом наименьших квадратов. Пространственно-временная согласованность исследуемых характеристик выполнена помощью корреляционного анализа. Для оценки статистической значимости линейного тренда и коэффициента корреляции применялся критерий Стьюдента при заданном уровне значимости $\alpha = 0.05$.

пространственных изменений атмосферных осадков, а также их визуализация выполнялась с помощью программного пакета OGIS.

Для оценки многолетних колебаний уровня воды Торейских озер их значения за период с 1981 по 2009 год восстановлены с помощью метода водного баланса. Расчеты проводились на дату начала гидрологического года, за которую было ноября. Контроль точности получаемых значений осуществлялся по данным эпизодических наблюдений. При несовпадении измеренных и рассчитанных значений уровня воды, последние подвергались корректировке. Восстановление значений уровня воды в озере Барун-Торей в период с 2010 по 2020 год выполнено по данным космических снимков.

Площадь водосборного бассейна Торейских озер рассчитана на основе бассейнов 10-12 уровней из каталога BasinATLAS [Lehner, Grill, 2013], представленного в пространственном формате HydroATLAS v1.0 [Linke et al. 2019]. При расчете из бассейна реки Ульдзы (Улз-Гол) исключена водосборная площадь Торейских озер, уровень воды которых согласно топографическим картам масштаба 1:100 000 находится ниже уровня реки в ближайшем ее створе на 2 м и более.

Объект исследования

Торейские озера – наиболее крупные водоемы Забайкалья, расположенные в его юговосточной части на границе с Монголией (рисунок 1) представляют собой соединенных двойной короткой протокой Уточи, озера Барун-Торей и Зун-Торей. В озеро Барун-Торей впадают две реки – Ульдза и Ималка. Озеро Зун-Торей притоков не имеет. Его питание поверхностными водами происходит через озеро Барун-Торей. При понижениях уровня воды ниже порога слива протоки Уточи режим водоемов становится независимым. Общая площадь их водной поверхности в периоды наибольшего наполнения составляет около 860-870 км², из которых две трети приходится на озеро Барун-Торей (таблица 2). При этом Торейские озера очень мелководны – их максимальная глубина не превышает 8 м. Водосборная площадь этих озер равна 25 272,87 км², большая часть которого представлена водосборами реки Ульдзы (21 976,25 км²) и реки Ималки (1 395,64 км²).

Торейские озера и их водосбор расположены в области резко континентального климата в зоне недостаточного увлажнения. Годовая сумма осадков по данным метеостанции Соловьевск, расположенной в непосредственной близости от этих озер, в период с 1990 по 2019 год изменялась от 167,8 до 465,1 мм при средней величине за данный период равной 279,3 мм. Основные характеристики температуры воздуха приведены в таблице 3.

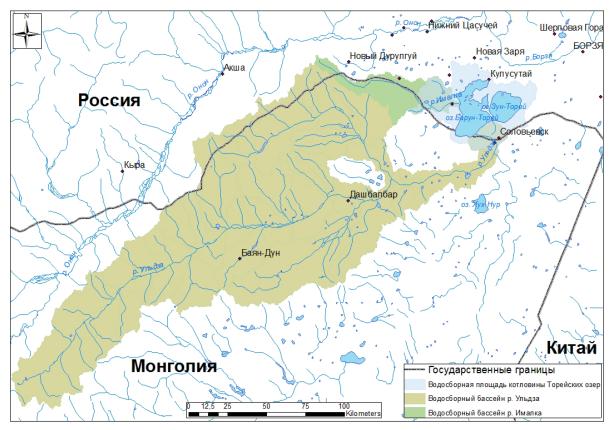


Рисунок 1. Торейские озера и их водосбор. **Figure 1.** The Torey Lakes basin.

Таблица 2. Морфометрические характеристики Торейских озер при уровне воды 599,0 м БС. **Table 2.** Morphometric characteristics of the Torey Lakes at a water level of 599.0 m BS.

Название озера	Площадь, км ²	Объем, км ³	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м
Барун-Торей	567	1,83	3,2	5,1
Зун-Торей	295	1,84	6,2	7,6

Таблица 3. Основные характеристики температуры воздуха по данным метеостанции Соловьевск в период с 1990 по 2019 год.

Table 3. Main characteristics of air temperature according to the data of the Solovievsk settlement weather station in 1990–2019.

Средняя температура воздуха, оС		Максимальная	Минимальная	
январь	июль	год	температура, °С	температура, °С
-23,3	18,5	0,3	42,4	-45,7

Единственным элементом расходной части водного баланса Торейских озер является испарение, озера бессточные.

Результаты и обсуждение

Многолетние изменения температуры воздуха

температуры Многолетние изменения воздуха в Юго-Восточном Забайкалье происходят достаточно согласованно (таблица 4). Коэффициенты корреляции между рядами средних годовых температур превышают 0,8. Высокая степень пространственной согласованности термического режима позволяет наиболее длительный использовать ряд наблюдений на метеостанции Нерчинский Завод для оценки вековых изменений температуры воздуха в исследуемом регионе (рисунок 2).

На графике хода средней годовой температуры можно выделить три периода, что отмечалось ранее [Обязов, 19966; Обязов, 19996]. С середины XIX до начала XX века происходил рост температуры. Затем до середины XX века тренд имел значение близкое к нулю. В начале 1950-х годов начался новый период потепления. За период с 1951 по 2019 год средняя годовая температура повысилась в среднем по территории на 2,0°C, изменение значимое.

В холодный период года (октябрь – апрель) с 1951 по 1990 год температура росла достаточно интенсивно. Темпы ее роста в среднем составляли

0,39°С/10 лет (тренд значимый). В дальнейшем она не только прекратила расти, но даже наметилась тенденция ее понижения (рисунок 3а). Поскольку тренд статистически не значим, утверждать, что наступил период похолодания, нет оснований. Тем не менее можно с уверенностью констатировать отсутствие потепления в Юго-Восточном Забайкалье в холодный период года в период с 1990 по 2019 год.

В теплый период года наблюдается обратная картина (рисунок 36). В период с 1951 по 1990 год в изменениях температуры воздуха отсутствовали какие-либо тенденции. Величина тренда была близка к нулю. Зато в последующие годы произошло достаточно активное ее повышение. Темпы роста температуры в период с 1990 по 2019 год составили в среднем по исследуемой территории статистически значимую величину — 0,39°С/10 лет.

Таким образом, рост средних годовых температур воздуха с середины XX века до начала 1990-х годов обусловливался потеплением в холодный период года, в основном в феврале — апреле, в то время как в теплый период температура не росла. В последующие годы картина поменялась на прямо противоположную: активно повышается температура теплого периода, а рост температуры холодного периода прекратился.

Таблица 4. Величины тенденций изменений средней годовой температуры воздуха.

Table 4. Values of a trend of the average an	annual air temperature changes.
---	---------------------------------

Метеорологическая станция	Величина тренда, °С	Значимость тренда, α = 0,05
Акша	1,5	значимый
Александровский Завод	1,7	значимый
Кайластуй	2,0	значимый
Сретенск	2,1	значимый
Борзя	2,1	значимый
Соловьевск	2,1	значимый
Газимурский Завод	2,2	значимый
Нерчинский Завод	2,2	значимый
Мангут	2,2	значимый
Средняя по территории	2,0	значимый

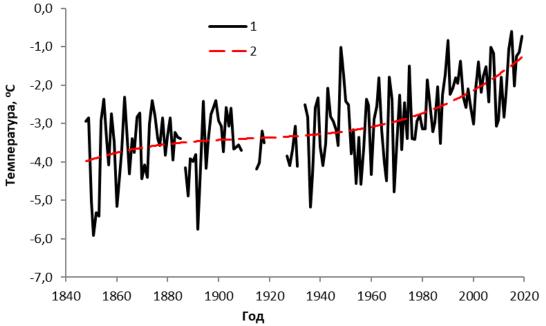


Рисунок 2. Многолетние изменения средней годовой температуры воздуха по данным метеостанции Нерчинский Завод за период с 1848 по 2019 год: 1 – исходный ряд; 2 – полиномиальный тренд. **Figure 2.** Long-term changes in the average annual air temperature according to the data of the Nerchinskiy

Zavod settlement weather station, 1848–2019: 1 – original dataset; 2 – polynomial trend.

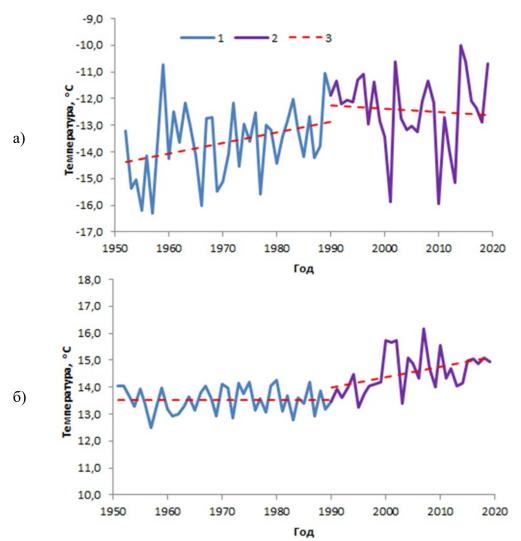


Рисунок 3. Многолетние изменения осредненной по территории Юго-Восточного Забайкалья средней за холодный период (а) и средней за теплый период (б) года температуры воздуха:

1 — период с 1951 по 1990 год; 2 — период с 1990 по 2019 год; 3 — линейные тренды.

Figure 3. Long-term changes in the average air temperature for the cold (a) and warm period (b), averaged over the territory of Southeastern Transbaikalia:

1 – period 1951–1990; 2 – period 1990–2019; 3 – linear trends.

Многолетние изменения атмосферных осадков

Атмосферные осадки в Юго-Восточном Забайкалье пространственно не столь согласованны, как температура воздуха. Если парные коэффициенты корреляции между рядами средних годовых температур не имеют значений ниже 0,8, то между рядами годовых сумм осадков они располагаются преимущественно в диапазоне 0,4—0,6. Тем не менее они статистически достоверны при заданном уровне значимости.

Количество осадков на исследуемой территории с середины прошлого столетия в

среднем уменьшилось на 39 мм, что составляет около 11% годовой суммы (рисунок 4). При этом тренд статистически не значим. Ранее был сделан вывод о значимом увеличении атмосферных осадков в Юго-Восточном Забайкалье [Обязов, 1999а; Обязов, 1999б], что было справедливо до 1990-х годов. Аналогичный вывод был сделан также в работе [Баженова, Мартьянова, 2000]. Однако последовавший затем период пониженной увлажненности привел к смене знака тренда.

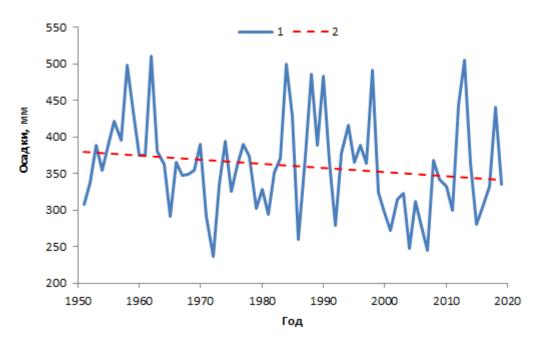


Рисунок 4. Многолетние изменения годовых сумм атмосферных осадков, осредненных по территории Юго-Восточного Забайкалья: 1 — исходный ряд; 2 — линейный тренд. **Figure 4.** Long-term changes in the annual total precipitation averaged over the territory of Southeastern Transbaikalia: 1 — original dataset; 2 — linear trend.

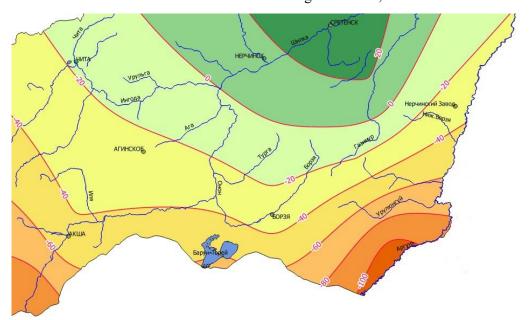


Рисунок 5. Распределение величины тренда годовых сумм атмосферных осадков в Юго-Восточном Забайкалье.

Figure 5. Distribution of the trend value of the annual total precipitation in Southeastern Transbaikalia.

Наибольшие изменения характерны для южных районов (рисунок 5), в том числе в районе Торейских озер. При продвижении на север величины тренда уменьшаются и за пределами степной зоны становятся слабо положительными. При этом только для трех рядов годовых сумм

осадков (метеостанции Кайластуй, Соловьевск, Мангут) из 9, использованных в анализе, достоверность тренда подтвердилась.

Многолетние изменения месячных сумм осадков статистически недостоверны, за исключением тренда в феврале. За 69 лет осадки

в этом месяце возросли на 2,0 мм. Наибольшую величину тренд имеет В июле: рассматриваемый период месячная сумма осредненных осадков, по исследуемой территории, уменьшилась на 21 мм. Однако значимость этого тренда не подтверждается.

Учитывая то, что июльские осадки по количеству наибольшие в течение года и дисперсия их рядов превышают дисперсию рядов в другие месяцы, тенденции уменьшения годовых сумм атмосферных осадков, характерных для большей части Юго-Восточного Забайкалья,

обусловлены преимущественно их изменениями в

В межгодовых изменениях атмосферных осадков наиболее четко выражена внутривековая цикличность (рисунок 6а), наличие которой ранее было выявлено в работе [Обязов, 1996а]. В период с 1955 по 1963 год отмечался период с осадками, превышающими норму. Затем до 1982 года преобладали годы с осадками ниже нормы. В 1983 году вновь наступил влажный период, который продолжался до 1998 года. В 1999 году начался сухой период, год окончания которого приходится, по-видимому, на 2011 год.

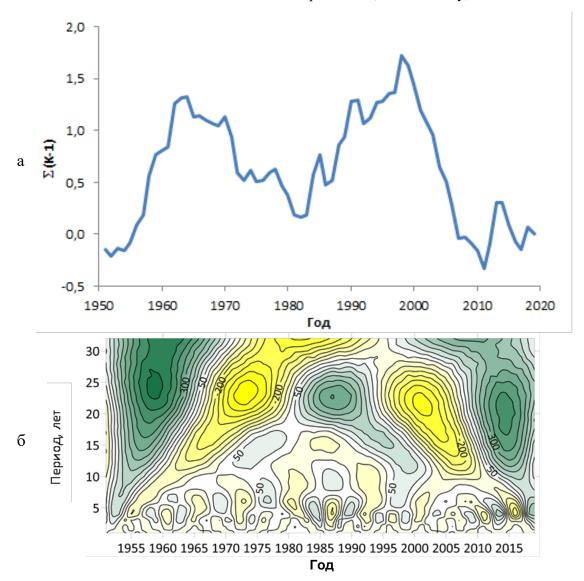


Рисунок 6. Разностная интегральная кривая (а) и вейвлет-спектр (б) средних по территории Юго-Восточного Забайкалья годовых сумм атмосферных осадков за период 1951–2019 гг.

Figure 6. Difference-integral curve (a) and wavelet spectrum (b) of the average annual total precipitation over the territory of Southeastern Transbaikalia, 1951–2019.

Результаты вейвлет-анализа (рисунок 6б) в согласуются аналогичными целом c полученными результатами, ПО разностной Наиболее интегральной кривой. четко проявляются ритмы продолжительностью 25-30 лет. Квазитридцатилетняя цикличность в изменениях увлажненности исследуемой территории, как показал анализ данных о радиальном приросте годичных колец сосен Цасучейского бора, расположенного вблизи озер, стабильно Торейских проявляется середины XIX века [Вахнина, Обязов, Замана, Одной ИЗ причин неустойчивости 2018]. в 25-30-летнем влажного периода начавшегося, вероятно, в 2012 году, является наличие в середине 2010-х годов хорошо выраженной сухой фазы в квазипятилетнем цикле. Здесь и далее на вейвлет спектрах положительные отклонения исследуемой величины от среднего даны зеленым цветом, отрицательные желтым; чем больше насыщенность цвета, тем больше величина отклонения.

Таким образом, в колебаниях атмосферных осадков в Юго-Восточном Забайкалье во второй половине XX века и в первом десятилетии XXI века выделяются два внутривековых цикла: с 1955 по 1982 год и с 1983 по 2011 год. Длительность циклов составила 29 и 30 лет соответственно. На их фоне достаточно хорошо выражены квазипятилетние ритмы.

Согласованность изменений атмосферных осадков и температуры воздуха отсутствует [Обязов, 2011; Обязов, 2012].

Многолетние изменения испаряемости

В качестве оценки испарения с водной поверхности как одного из главных элементов водного баланса бессточных Торейских озер была использована величина испаряемости — максимально возможного испарения с увлажненной поверхности. Многолетние изменения рассчитанных величин суммарной

испаряемости за май — сентябрь по данным метеостанции Соловьевск, расположенной в непосредственной близости от Торейских озер, представлены на рисунке 7. Обращает на себя внимание увеличение испаряемости в последние два десятилетия. Ее средняя величина в период с 1999 по 2020 год примерно на 20% больше чем в предшествующий период с 1951 по 1998 год. Линейный тренд за период с 1951 по 2020 год статистически достоверен.

Многолетние изменения стока рек

Ряды средних годовых расходов воды рек Юго-Восточного Забайкалья имеют между собой достаточно надежную корреляционную связь. Наибольшие коэффициенты корреляции, значения которых превышают 0,9, характерны для рек бассейна реки Онон, а также между рядами стока реки Онон и реки Шилки. Наименьшая скоррелированность изменений характеризующаяся коэффициентами стока, корреляции, достигающими значений менее 0,6, отмечается между реками бассейна рек Аргуни и Онон.

Согласованность стока рек подтверждается и при совместном анализе разностных интегральных кривых (рисунок 8), на которых выявляется хорошо выраженная синфазность его изменений.

В многолетнем режиме стока рек хорошо выражена цикличность. Результаты вейвлетанализа ряда средних годовых расходов воды реки Шилки в створе города Сретенска показали наличие достаточно устойчивой на протяжении периода наблюдений 25-30-летней цикличности (рисунок 9). Близкие по величине ритмы выявлялись ранее в работах [Обязов, 1998; Обязов, 2012; Обязов, Смахтин, 2012; Обязов 2015]. С конца XIX века до середины 1920-х годов, а также в 1940-1970-х годах проявлялись 10-12-летние ритмы. В 1980-1990-х годах в высокочастотной части спектра преобладали колебания с периодом 4-5 лет.

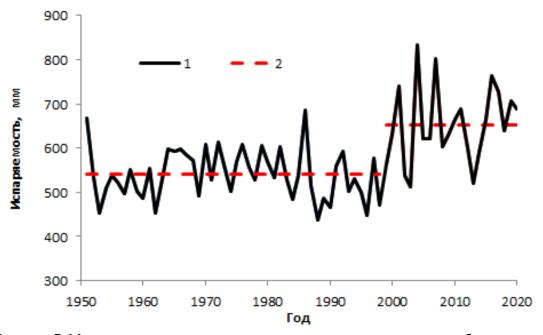


Рисунок 7. Многолетние изменения испаряемости в период с мая по сентябрь по данным метеостанции Соловьевск за период с 1951 по 2020 год: 1 — исходный ряд; 2 — средние значения за периоды с 1951 по 1998 год и с 1999 по 2020 год.

Figure 7. Long-term changes in evaporation from May to September according to the data of the Solovievsk settlement weather station, 1951–2020: 1 – original dataset;

2 – average values during 1951–1998 and 1999–2020.

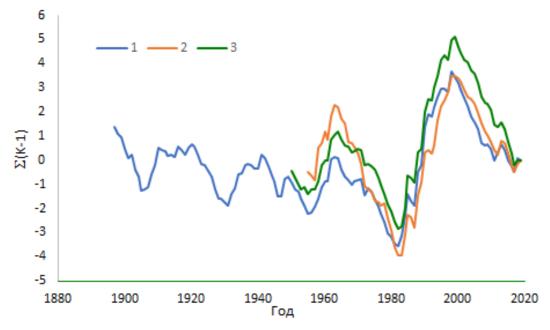


Рисунок 8. Многолетние изменения стока реки Шилки у города Сретенска (1), реки Унды у села Ново-Ивановск (2) и реки Онон у села Чирон (3), представленные в виде разностных интегральных кривых.

Figure 8. Long-term changes in the runoff of rivers: the Shilka river near Sretensk town (1), the Unda river near Novo-Ivanovsk village (2) and the Onon river near Chiron village (3), presented as difference-integral curves.

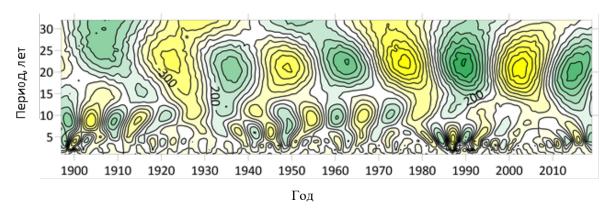


Рисунок 9. Вейвлет-спектр многолетних изменений стока реки Шилки у г. Сретенска. **Figure 9.** Wavelet spectrum of long-term changes in the Shilka river runoff near Sretensk town.

Многолетние изменения годового стока на всех исследованных реках Юго-Восточного Забайкалья имеют отрицательный тренд. Осредненный по территории средний годовой модуль стока в период с 1958 по 2019 год уменьшился на 0,74 л/с·км² или на 35% (рисунок 10). Однако его статистическая достоверность не подтверждается при заданном уровне значимости.

Как показали ранее выполненные исследования [Обязов, 2012; Обязов, Смахтин, 2012], величина и знак тренда в многолетних изменениях стока во многом зависят от продолжительности ряда наблюдений,

используемого для анализа, и в большей степени определяется характером фазы водности в конце ряда. В случае завершения ряда многоводной фазой наиболее часто тренд имеет положительный знак, а в случае завершения маловодной фазой – отрицательный.

Многолетние изменения стока реки Ульдзы – основного притока Торейских озер – хорошо согласуются с изменениями стока других рек Юго-Восточного Забайкалья. Коэффициенты парной корреляции между рядами средних годовых расходов статистически достоверны и в большинстве случаев превышает значение 0,7.

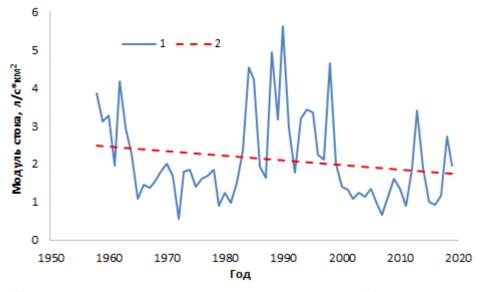


Рисунок. 10. Изменение среднего годового модуля стока воды по 14 пунктам Юго-Восточного Забайкалья: 1 – исходный ряд; 2 – линейный тренд.

Figure 10. Change in the average annual module of water runoff by 14 study sites in Southeastern Transbaikalia: 1 – the original row; 2 – linear trend.

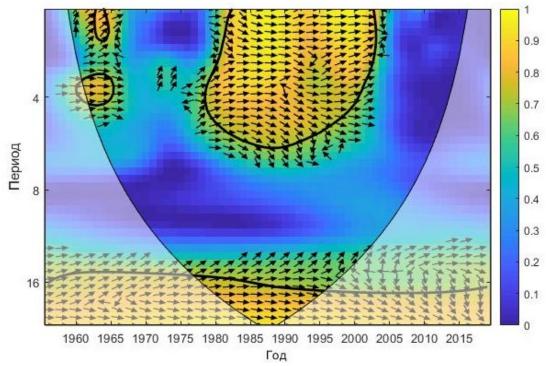


Рисунок 11. Вейвлет-когерентность годового стока реки Шилки у города Сретенска и реки Ульдзы у села Соловьевск.

Figure 11. Wavelet coherence of the annual runoff of the Shilka river near Sretensk town and the Uldza river near Solovievsk village.

вейвлет Анализ когерентности многолетних колебаний стока реки Ульдзы и реки Шилки показал, что наибольшая статистически достоверная согласованность на всем протяжении анализируемых рядов приходится на частоты, соответствующим ритмам длительностью более 16 лет (рисунок 11). В высокочастотной области колебаний (менее 4 лет) отмечается значимая величина когерентности в период с начала 1980-х до середины 2010-х годов. При этом необходимо отметить, что с целью получения большего разрешения на низких частотах при оценке когерентности ряд средних годовых расходов реки Ульдзы был ретроспективно продлен на 9 лет (период с 1956 по 1964 год) с помощью уравнения множественной регрессии по данным гидрологических постов река Онон – село Чирон и река Нижняя Борзя - село Михайловка. Множественный коэффициент корреляции этой связи составил 0,84.

Связь многолетних изменений среднего годового стока реки Ульдзы у села Соловьевск и годовых сумм атмосферных осадков в Онон-Аргунском междуречье несколько слабее, чем со

стоком рек. Тем не менее все полученные значения коэффициентов корреляции статистически достоверны.

Сравнение временных рядов многолетних изменений стока реки Ульдзы и осадков, измеренных метеостанции Соловьевск, представленных В виде вейвлет-спектров, выявило их согласованность во внутривековых колебаниях (рисунок 12). Хотя в вейвлетспектрах имеются отличия, тем не менее относительно сухим периодам атмосферных осадков соответствуют маловодные фазы в режиме стока, а влажным периодам многоводные фазы. Короткопериодные ритмы в изменениях стока почти не проявляются.

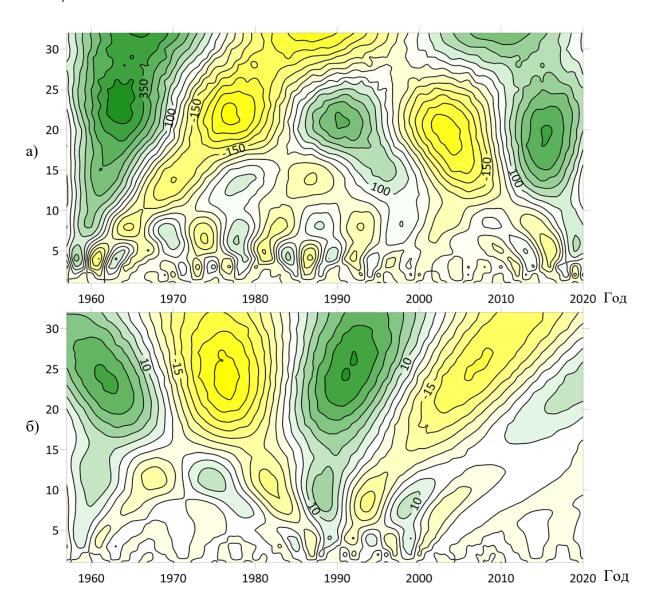


Рисунок 12. Вейвлет-спектры межгодовых изменений атмосферных осадков по данным метеостанции Соловьевск (а) и стока реки Ульдзы у села Соловьевск (б).

Figure 12. Wavelet spectrum of interannual changes in atmospheric precipitation according to the data of the Solovievsk settlement weather station (a) and the flow of the Uldza river near Solovievsk village (b).

Многолетние изменения уровня воды Торейских озер

Торейские озера, как и река Ульдза, не показаны на многолистной «новой карте Китая», изготовленной французскими миссионерами в 1709–1718 годах, на основе которой сделан Атлас [D'Anville, 1937], «необычайный не только для Китая, но и для Европы того времени по точности и охвату...» [Красникова, 2011]. Эти же листы карты были использованы И.К. Кириловым

[Красникова, 2011] для подготовки «Новой лант разграничения Российской карты между империей, Сибирскими землями Китайского владения с мунгальскими землицами» ¹ [Атлас, 2008]. Здесь уже Торейские озера изображены в виде единого большого водоема с точным местоположением впадающих в них рек. В легенде карты указано, что работы выполнены в привлечением 1727 году пограничных российских геодезистов. Известно, что

218

 $^{^1}$ Атлас Всероссийской империи: Собрание карт И.К. Кирилова / Вступ. статья О. А. Красниковой. Репринтное издание 1727—1737 годов. СПб.: Альфарет, 2008. 10 с.

геодезическая съемка 1727 года проведена и на Торейских озерах [Магидович, Магидович, 1984]. И.К. Кирилов во исполнение поручения главы государства и дипломатической миссии с привлечением геодезистов детально нанес на границы государства. карту полосу вдоль Основываясь на данных указанных карт, можно предположить, что в период с 1709 по 1718 год Торейские озера были сухими, а в 1727 году со стороны границы представляли собой единый большой водоем, простиравшийся от 49 до 53 пограничного маяка, но не выходивший к югу за границу¹. Однако этот вопрос требует отдельного изучения, поскольку при современных значениях элементов водного баланса Торейских озер столь существенные изменения за такой короткий (около лет) промежуток времени представляются маловероятными.

Первые описания Торейских озер опубликованы П.С. Палласом, посетившим Юго-Восточное Забайкалье в 1772 году и увидевшим эти озера совершенно сухими, русла реки Ульдзы и реки Ималки в устьях также были безводными [Паллас, 1788]. Впоследствии Торейские озера обводнились, как это следует из результатов Г.И. опросов Радде, обследовавшего в 1856 году [Радде, 1858]. Однако примерно за пять лет до его приезда эти озера вновь высохли. Возможно, за 84 года, отделяющих эти две экспедиции, наполнения высыхания происходили неоднократно.

конце XIX века В Торейские озера наполнились, свидетельствует чем Г.Н. Потанин, маршрут которого пролегал через Торейские озера в 1899 году [Потанин, 1948]. При его посещении вода была только в озере Барун-Торей. Наполненность озерных ванн в этот период отмечается также в работах [Дмитриева, Напрасников, Сизиков, 1976; Иванов, 1977; Кренделев, 1986]. Причем В [Дмитриева, Напрасников, Сизиков, 1976; Кренделев, 1986] приводятся даже точные даты наполнения — 1872 и 1897 годы.

О состоянии Торейских озер в XX веке имеется более подробная информация [Обязов, включающая сведения из научной литературы [Прасолов, 1927; Некипелов, 1957; Корнутова, 1968; Фриш, 1972], фондовые данные Читагеолкома и Забайкальского управления гидрометслужбы, полученные главным образом при геологическом, гидрологическом, почвенном и зоологическом исследованиях Юго-Восточного Забайкалья, а также в результате опросов местных жителей. Однако до 1964 года такая информация носила лишь качественный характер. В период с 1964 по 1980 год Забайкальским управлением Гидрометслужбы на озере Барун-Торей у села Кулусутай проводились инструментальные наблюдения. Прекращение наблюдений было обусловлено отступанием береговой линии на километров. Впоследствии несколько Государственным природным биосферным заповедником «Даурский» производились лишь эпизодические наблюдения за уровнем воды Торейских озер.

График многолетних изменений уровня Барун-Торей, построенный воды озера инструментальным данным данным, полученным в результате воднобалансовых расчетов и изучения космических снимков, показан на рисунке 13. Максимальные за год уровни воды, как правило, отличаются от приведенных на графике, а внутрисезонная динамика уровня воды имеет обычно амплитуду выше, чем величина соседних многолетних определенную параметров на дату. Для устранения влияния высокой сезонной изменчивости применены и рассчитаны уровни воды на начало гидрологического года (1 ноября).

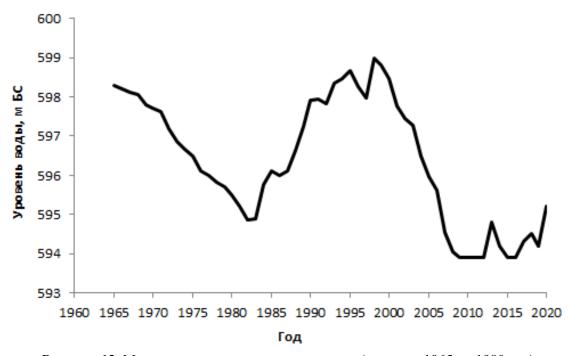


Рисунок 13. Многолетние изменения измеренных (период с 1965 по 1980 год) и восстановленных (период с 1981 по 2020 год) уровней воды озера Барун-Торей. Figure 13. Long-term changes in water levels of Barun-Torey lake: measured (1965–1980) and calculated by water balance and satellite images studying (1981–2020).

После достижения в 1965 году максимума, уровень воды Торейских озер понижался в течение 17 лет. Его спад завершился 1982–1983 годах. Последовавшее наполнение этих озер периодически прерывалось, тем не менее, в течение 15 лет сохранялась общая положительная тенденция. По воднобалансовым расчетам наибольшей отметки уровня воды Торейские озера достигли в 1998 году, что и показано на рисунке 13. Однако анализ космических снимков указывает на достижение наивысших величин площади этих озер в 1999 году (рисунок 14а). Данное противоречие возникло в связи с тем, что расчеты выполнялись на 1 ноября, а максимальный уровень воды отмечался в начале июля. После достижения максимального уровня воды происходило многолетнее его падение. В 2009 году в озере Барун-Торей он достиг абсолютного минимума – ложе озера полностью освободилось от воды (рисунок 14б). При этом площадь зеркала озера Зун-Торей за ЭТОТ период уменьшилась

несущественно (около 14%) за счет большей глубины и большей крутизны береговых склонов. Падение уровня наблюдалось 10 лет и весной 2019 года ванна озера Зун-Торей полностью высохла (рисунок $14_{\rm B}$). последующем почти настолько же сухие Торейские озера были только один раз – в мае – июне 2020 года.

В течение 12 лет (с 2009 по 2020 год) вода в озере Барун-Торей появлялась почти ежегодно во втором полугодии на срок от двух до десяти месяцев из-за выпадения ливневых осадков, чаще приходящихся на июль — август, или увеличения стока реки Ульдзы (рисунки 14в, 14г). Из-за плоской чаши малый объем воды временно покрывал большую площадь.

Корреляционный анализ показал сильную зависимость ежегодных приращений уровня воды (Δ H) озера Барун-Торей от основных элементов водного баланса: годового стока реки Ульдзы, осадков и испаряемости по данным метеостанции Соловьевск (таблица 2).

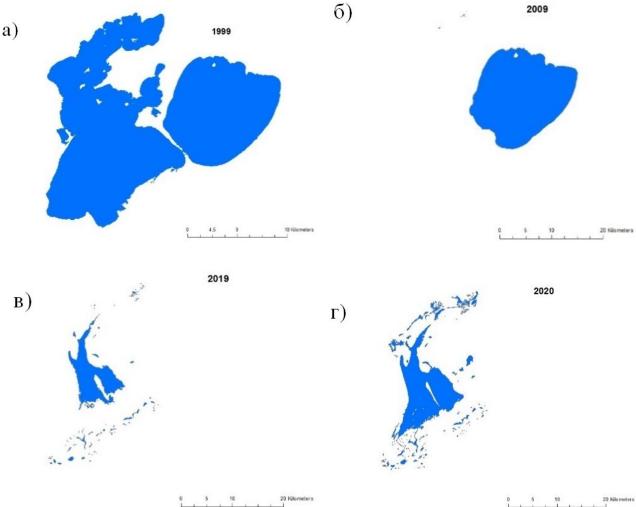


Рисунок 14. Изменение очертаний водной поверхности Торейских озер в июле – августе на разных этапах сухой фазы в период с 1999 по 2020 год.

Figure 14. Changes in the outlines of the Torey Lakes' water surface in July – August at different stages of the dry phase from 1999 to 2020.

Таблица 2. Корреляционные матрицы связи годовых приращений уровня воды озера Барун-Торей, годового стока реки Ульдзы и годовых сумм атмосферных осадков за два периода (с 1965 по 2009 год и с 1965 по 2020 год).

Table 2. Correlation matrices of the relationship of annual increments of Barun-Torey lake water level, the annual flow of the Uldza river and annual precipitation for two periods (1965–2009 and 1965–2020).

	ΔН	Сток	Осадки	Испаряемость		
	с 1965 по 2009 год					
ΔΗ	1					
Сток	0,79	1				
Осадки	0,62	0,56	1			
Испаряемость	-0,72	-0,55	-0,67	1		
	c	1965 по 2020 год				
ΔΗ	1					
Сток	0,63	1				
Осадки	0,62	0,50	1			
Испаряемость	-0,45	-0,58	-0,61	1		

До 2009 года зависимость уровня воды озера Барун-Торей от стока реки Ульдзы и испаряемости была существенно выше, чем за весь рассматриваемый период. Это связано, с одной стороны, со снижением стока в период с 2010 по 2020 год. За эти 11 лет суммарный объем стока реки Ульдзы (0,112 км³) оказался меньше, чем в среднем за год (0,186 км³) за весь период наблюдений (с 1965 по 2020 год). При этом сток в поступал не ежегодно, кратковременно во время прохождения дождевых паводков. С другой стороны, в периоды, когда ложе озера полностью высыхает, что, правило, приходится на апрель – июнь, испарение имеет значения близкие нулю, К испаряемость, показывающая потенциальное испарение, наивысшая. Поэтому испаряемость в эти периоды не соответствует испарению. Существует в этот период и менее значимый обратный процесс. При временном появлении воды малого объема плоское дно обоих озер способствует ее повышенному испарению и просачиванию в грунт. Это происходит из-за того, ветер, меняя направление, переносит небольшое количество воды на ранее высохшие и нагревшиеся участки дна, значительно увеличивая площадь испарения и инфильтрации.

В водном балансе озера Зун-Торей в периоды малой водности и разобщенного существования озер поверхностный приток отсутствует. Поскольку испарение с водной поверхности озера (около 700 мм) примерно в два раза превышает величину атмосферных осадков (около 300 мм), после высыхания протоки Уточи падение уровня воды озера Зун-Торей происходит интенсивнее, чем у озера Барун-Торей, но из-за большей глубины длится намного дольше. От последнего максимума уровня воды (1999 год) озеро Барун-Торей высыхало 11 лет, озеро Зун-

Торей – 21 год, поверхностная связь озер прекратилась в 2005 году.

Выявленное существенное снижение зависимости приращения уровня воды озера Барун-Торей ОТ испаряемости период длительного (с 2009 по 2020 год) чередования безводных фаз и маловодности подтверждает, что в это время не только неоднократно высыхало ложе озер, но и понижался уровень грунтовых вод под их дном, а его восстановление до отметки дна происходило без существенного испарения. Наиболее низкие уровни грунтовых вод вблизи Торейских озер (скважины у протоки Уточи в селе Соловьевск) отмечены в 1918 и 1919 годах. Необходимость восполнения уровня грунтовых вод при меньшей скорости подземного и подруслового стока объясняет отмеченное запаздывание периодов роста уровня воды Торейских озер по сравнению с аналогичными периодами увеличения стока реки. Затянувшиеся сухие периоды в бессточных озерных котловинах, подобных Торейской, в начале многоводной фазы могут требовать значительных объемов воды до начала устойчивого наполнения чаши.

Устойчивое наполнение Торейских озер зафиксировано с начала сентября 2020 года (рисунок 15). В первых числах сентября река принесла озеро Барун-Торей паводковую воду, собранную преимущественно главным левым притоком – рекой Дучийн-Гол. Расход воды в сентябре был столь значителен $(7,1 \text{ м}^3/\text{c})$, что, наполнив основное русло и мелкие старицы дельты, вода по руслу правого рукава дельты – реке Барахолой проникла через северную протоку в озеро Зун-Торей. Это произошло ранее, чем к протоке подошла вода из наполнявшегося озера Бурун-Торей (рисунки 16 и 17).

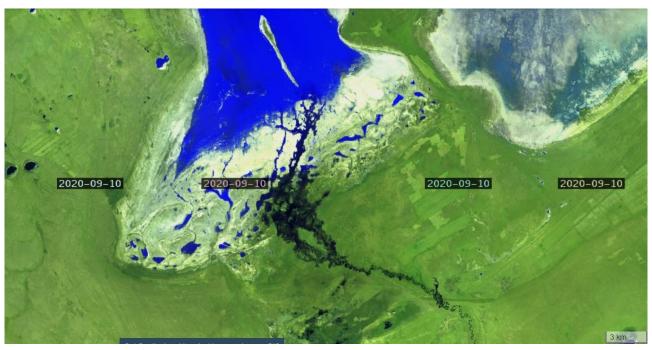


Рисунок 15. Начало заполнения чаши озера Барун-Торей водами реки Ульдзы в первых числах сентября 2020 года.

Figure 15. The beginning of filling Barun-Torey bowl with the Uldza river waters in early September 2020.

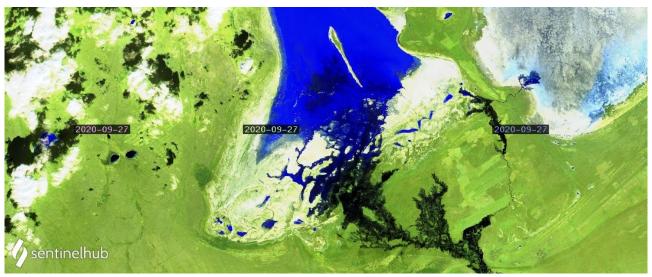


Рисунок 16. Начало заполнения чаши озера Зун-Торей водами реки Ульдзы по правому рукаву ее дельты – реке Барахолой – и далее по протоке Уточи в третьей декаде сентября 2020 года. Figure 16. The beginning of filling of Zun-Torey bowl with the Uldza river waters along the right branch of its delta – the river Barakholoy and further along the Utochi channel in the third decade of September 2020.



Рисунок 17. Северная протока Уточа во время наполнения ее водой, пришедшей из реки Барахолой 23 сентября 2020 года. Фото 24.09.2020 В.Е. Кирилюк.

Figure 17. The northern channel Utochi during its filling with water that came from the river Barakholoy, September 23, 2020. Photo by V. Kirilyuk dated 24.09.2020.

Наполнение озера Зун-Торей может происходить двумя путями. При расходе воды в Ульдзе в створе села Соловьевск, достаточного для наполнения озера Барун-Торей, но менее 6-7 м³/с, переток в озеро Зун-Торей происходит только при достижении уровнем воды отметки порога слива протоки Уточи (596,5 м БС), соединяющей эти озера. Это происходит при максимальной глубине озера Барун-Торей 2,6 м и площади зеркала озера, превышающей 420 км². В периоды появления интенсивного стока реки Ульдзы (более $6-7 \text{ м}^3/\text{c}$) вода по реке Барахолой стекает и в озеро Зун-Торей. В юго-восточной части чаши озера Барун-Торей имеется образованное течением русловое углубление, ведущее в северную протоку Уточи и по ней в озеро Зун-Торей, дно которого ниже дна озера Барун-Торей. В случае углубления и расширения течением реки Барахолой наблюдаемого замывания и зарастания основного русла реки Ульдзы перед озером Барун-Торей, порядок наполнения Торейских озер изменится: сначала будет наполняться озеро Зун-Торей, а затем – озеро Барун-Торей.

В периоды регрессии уровень воды падает в обоих озерах согласованно до достижения отметки порога слива протоки Уточи. При

разобщенном их существовании озеро Барун-Торей высыхает быстрее за счет меньших глубин. В трансгрессивную фазу наполнение начинается с озера Барун-Торей, но существует возможность более быстрого наполнения озера Зун-Торей или поочередного наполнения двух озер. Устойчивый объем воды в озере Зун-Торей появляется только после начала стока по протоке Уточи. После выравнивания уровней воды режим Торейских озер вновь становится согласованным.

Анализ имеющихся данных об уровне воды Торейских озер, в том числе качественных, указывает на циклический характер изменений. Многолетний уровенный режим Торейских озер хорошо согласуется с режимом атмосферных осадков и речного стока Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии. Торейские озера начали наполняться только в 2020 году, хотя влажная фаза цикла в Юго-Восточном Забайкалье должна начаться раньше – примерно с 2012 года. Причиной слабой выраженности периода или почти полного отсутствия его проявлений явились рост температуры воздуха в теплый период года и связанное с ним увеличение испаряемости, наряду с тенденцией уменьшения атмосферных осадков.

Таким образом, Торейские озера в полной мере могут считаться индикатором многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии.

Заключение

В Юго-Восточном Забайкалье с середины XX века происходит потепление, которое до начала 1990-х годов обеспечивалось ростом температуры воздуха в холодный период года, в основном в феврале - апреле, а в последующие годы – за счет повышения температуры теплого периода. Однако в течение последних трех десятилетий рост средней годовой температуры замедлился. Если за период с 1951 по 1990 год средняя годовая температура в среднем по исследуемой территории росла со скоростью 0,26°C/10 лет, то в период с 1990 по 2019 год темпы потепления составили лишь 0,09°С/10 лет. В многолетних колебаниях средней годовой температуры воздуха выявлено несколько циклических составляющих. Наиболее четко проявляются циклы продолжительностью около 4 и 11 лет, а также 20-25 лет.

режиме атмосферных осадков статистически достоверное их изменение за последние 70 лет произошло в южных районах Юго-Восточного Забайкалья, в том числе в районе Торейских озер. При продвижении на север величины тренда уменьшаются пределами степной зоны становятся положительными. Соответственно, с северовостока на юго-запад существенно выросла разница в увлажненности, отражающая сильную аридизацию приграничного участка Забайкалья, в том числе в районе Торейских озер. Однако в многолетних изменениях осадков лучше выражены их циклические колебания. Наиболее четко проявляются ритмы продолжительностью 25-30 лет.

Однозначной связи между многолетними изменениями атмосферных осадков и температуры воздуха не выявлено.

В последние два десятилетия существенно возросла испаряемость. Ее средняя величина в период с 1999 по 2020 год примерно на 20% больше чем в предшествующий период с 1951 по 1998 год.

Многолетние изменения стока рек на территории Юго-Восточного Забайкалья происходят с высокой степенью согласованности. В их многолетнем режиме хорошо выражена цикличность. Наиболее устойчивыми за весь период наблюдений за стоком в Забайкалье, начиная с конца XIX века, являются 25—30-летние циклы.

Многолетние изменения стока реки Ульдзы хорошо согласуются с изменениями стока других рек Юго-Восточного Забайкалья. Наибольшая статистически достоверная согласованность на протяжении анализируемых рядов приходится на частоты, соответствующим ритмам длительностью более 16 лет. Связь многолетних изменений среднего годового стока реки Ульдзы у села Соловьевск и годовых сумм атмосферных осадков Юго-Восточного Забайкалья несколько слабее, чем со стоком рек. не менее все полученные значения коэффициентов корреляции статистически достоверны. Как в ряду стока реки Ульдзы, так и осадков, выпадающих на ее водосбор, выявлено преобладание внутривековых циклов.

Для уровенного режима Торейских озер характерна внутривековая цикличность, обусловленная режимом атмосферных осадков и речного стока. Причиной слабой выраженности влажной фазы цикла, которая должна была начаться примерно с 2012 года, явились отмечаемые в последние годы рост температуры воздуха в теплый период года и связанное с ним увеличение испаряемости, наряду с тенденцией уменьшения атмосферных осадков.

Торейские озера в полной мере могут считаться индикатором многолетних изменений увлажненности Юго-Восточного Забайкалья и Северо-Восточной Монголии.

Литература

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145.

Баженова О.И., Мартьянова Г.Н. Реакция степных и лесостепных морфодинамических систем на современные изменения климата // География и природные ресурсы. 2000. № 4. С. 23–32.

Вахнина И.Л., Обязов В.А., Замана Л.В. Динамика увлажнения в степной зоне юговосточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 2. С. 28–33.

Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 58 с.

Дмитриева В.Т., Напрасников А.Т., Сизиков А.И. Зонально-поясные особенности и режим озер Забайкалья // Региональные особенности природы Забайкалья / Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. Вып. 103. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1976. С. 41–59.

Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.

Иванов А.В. Торейские озера // Гидрохимия рек и озер в условиях резко континентального климата. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 69–102.

Корнутова Е.И. История развития Торейских озер Восточного Забайкалья // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. М.: Наука, 1968. С. 74–88.

Красникова О.А. Карты в истории установления российско-китайской границы в XVII–XVIII вв. и карта Китая, присланная Петру I императором Кам-хи // Наука из первых рук. 2011. Т. 39. № 3. С. 54–69.

Кренделев Ф.П. Периодичность наполнения и высыхания Торейских озер (Юго-Восточное

References

Astafeva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1996, vol. 39, iss, 11, pp. 1085–1108.

DOI: 10.1070/PU1996v039n11ABEH000177.

(Russ. ed.: Astaf'eva N.M. Veivlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniya. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 166, iss. 11, pp. 1145–1170. DOI: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145).

Bazhenova O.I., Mart'yanova G.N. Reaktsiya stepnykh i lesostepnykh morfodinamicheskikh sistem na sovremennye izmeneniya klimata of forest-steppe [Reaction steppe and morphodynamic systems to modern climate Geografiya i prirodnye changes]. resursv [Geography and natural resources], 2000, iss. 4, pp. 23–32. (In Russian).

Chechel' A.P. Dinamika urovennogo rezhima ozer [Dynamics of the level regime of lakes]. *Sodovye ozera Zabaikal'ya [Soda lakes of the Transbaikalia]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1991, pp. 12–15. (In Russian).

D'Anville J.B. Atlas général de la Chine, de la Tartarie chinoise, et du Tibet: pour servir aux différentes descriptions et histoires de cet empire [General Atlas of China, Chinese Tartary, and Tibet: to be used for the various descriptions and histories of this empire.]. La Haye: H. Scheurleer, 1737. (In French).

Dmitrieva V.T., Naprasnikov A.T., Sizikov A.I. Zonal'no-poyasnye osobennosti i rezhim ozer Zabaikal'ya [Zonal-belt features and regime of the lakes of Transbaikalia]. Regional'nye osobennosti prirody Zabaikal'ya. Zapiski Zabaikal'skogo filiala geograficheskogo obshchestva SSSR. Vypusk 103. [Regional features of the nature of Transbaikalia. Notes of the Transbaikal branch of the USSR Geographical Society. Iss. 103.]. Irkutsk, East Siberian Book Publishing House, 1976, pp. 41–59. (In Russian).

Frish V.A. Toreiskii eksperiment [Torey experiment]. *Priroda* [Nature], 1972, iss. 2, pp. 60-66. (In Russian).

Забайкалье) // Доклады АН СССР. 1986. T. 287. № 2. C. 396–400.

Магидович И.П., Магидович В.И. Очерки по истории географических открытий в 5-ти т. Том 3. Географические открытия и исследования нового времени (середина XVII–XVIII века). М.: Просвещение, 1984. 319 с.

Некипелов Н.В. Климат Юго-Восточного Забайкалья и исторический обзор чумных эпизоотий на фоне климатических изменений // Известия Иркутского государственного научно-исследовательского противочумного института Сибири и Дальнего Востока. 1957. Т. XV. С. 19–56.

Обязов В.А. Связь колебаний водности озер степной зоны Забайкалья с многолетними гидрометеорологическими изменениями на примере Торейских озер // Известия Русского георграфического общества. 1994. Т. 126. Вып. 5. С. 48–54.

Обязов В.А. Пространственно-временная изменчивость атмосферных осадков в Юго-Восточном Забайкалье // Известия Русского георграфического общества. 1996а. Т. 128. Вып. 2. С. 73–80.

Обязов В.А. Многолетние изменения температуры воздуха в Юго-Восточном Забайкалье // Известия Русского георграфического общества. 1996б. Т. 128. Вып. 3. С. 66–73.

Обязов В.А. Многолетние колебания стока рек Юго-Восточного Забайкалья // Известия Русского георграфического общества. 1998. Т. 130. Вып. 3. С. 72–78.

Обязов В.А. Изменение увлажненности бассейна верхнего Амура в XX веке // Доклады академии наук. 1999а. Т. 366. № 4. С. 547–548.

Обязов В.А. Вековые тенденции изменений климата на юго-востоке Забайкалья и в сопредельных районах Китая и Монголии // Метеорология и гидрология. 1999б. № 10. С. 33–40.

Обязов В.А. Изменения климата в междуречье Аргуни и Онона в контексте глобального потепления // Вестник Читинского

Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, vol. 11, iss. 5–6, pp. 561–566. DOI: 10.5194/npg-11-561-2004.

Ivanov N.N. Ob opredelenii velichiny isparyaemosti [On the determination of the values of evaporation]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva [News of the All-Union Geographical Society]*, 1954, vol. 86, iss. 2, pp. 189–196. (In Russian).

Ivanov A.V. Toreiskie ozera [Torey lakes]. Gidrokhimiya rek i ozer v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata [Hydrochemistry of rivers and lakes in a sharply continental climate]. Vladivostok, Publ. of the Far East Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1977, pp. 69–102. (In Russian).

Kirilyuk V.E., Obyazov V.A., Tkachuk T.E., Kirilyuk O.K. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian ecoregion. In Werger M.J.A., van Staalduinen M.A. (eds.) *Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World.* Dordrecht, Publ. Springer, 2012, pp. 397–424. DOI: 10.1007/978-94-007-3886-7 15.

Kornutova E.I. Istoriya razvitiya Toreiskikh ozer Vostochnogo Zabaikal'ya [The history of the development of the Torey lakes of the Eastern Transbaikalia]. *Mezozoiskie i kainozoiskie ozera Sibiri [Mesozoic and Cenozoic lakes of Siberia]*. Moscow, Publ. Nauka, 1968, pp. 74–88. (In Russian).

Krasnikova O.A. Karty v istorii ustanovleniya rossiisko-kitaiskoi granitsy v XVII—XVIII vv. i karta Kitaya, prislannaya Petru I imperatorom Kamkhi [Maps in the history of the establishment of the Russian-Chinese border in the 17th-18th centuries. and a map of China sent to Peter the Great by Emperor Kam-khi]. *Nauka iz pervykh ruk [Science from first hand]*, 2011, vol. 39, iss. 3, pp. 54–69. (In Russian).

Krendelev F.P. Periodichnost' napolneniya i vysykhaniya Toreiskikh ozer (Yugo-Vostochnoe Zabaikal'e) [Frequency of filling and drying of the Torey lakes (South-Eastern Transbaikalia)].

государственного университета. 2011. № 7 (74). С. 78–85.

Обязов В.А. Изменение климата и гидрологического режима рек и озер в Даурском экорегионе // Проблемы адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты / Сборник научных трудов Государственного природного биосферного заповедника «Даурский». Вып. 5. Чита: Экспресс-издательство, 2012. С. 24–45.

Обязов В.А. Динамика увлажненности бассейна Верхнего Амура во второй половине XX — начале XXI веков // Материалы XV совещания географов Сибири и Дальнего Востока (г. Улан-Удэ, 10–13 сентября 2015 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. С. 127–130.

Обязов В.А., Смахтин В.К. Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 63–72. DOI: 10.35567/1999-4508-2012-1-5.

Паллас П.С. Путешествие по разным провинциям Российского государства в 3 ч. Часть 3 в 2 пол. Половина первая. 1772 и 1773 годы / Пер. с нем. В.Ф. Зуев. СПб.: Императорская Академия Наук, 1788. 655 с.

Потанин Г.Н. Путешествия по Монголии. М.: ОГИЗ, 1948. 484 с.

Прасолов Л.И. Южное Забайкалье: почвенногеографический очерк. Л.: Изд-во АН СССР, 1927. 422 с.

Радде Г.И. Дауро-Монгольская граница Забайкалья // Вестник Императорского русского географического общества. 1858. Ч. 22. С. 117–142.

Симонов Ю.Г. Озерный морфолитогенез в условиях Забайкалья // Вопросы озерного морфолитогенеза: материалы К Научному совещанию проблемам ПО озерного морфолитогенеза: сборник статей / Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. Вып. 31. Чита: Издательство географического Забайкальского филиала общества СССР, 1969. С. 3-15.

Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1986, vol. 287, iss. 2, pp. 396–400. (In Russian).

Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 2013, vol. 27, iss. 15, pp. 2171–2186. DOI: 10.1002/hyp.9740.

Linke S., Lehner B., Dallaire C.O., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Scientific Data*, 2019, vol. 6, art. number: 283. DOI: 10.1038/s41597-019-0300-6.

Magidovich I.P., Magidovich V.I. Ocherki po istorii geograficheskikh otkrytii v 5-ti t. Tom 3. Geograficheskie otkrytiya i issledovaniya novogo vremeni (seredina XVII–XVIII v). [Essays on the history of geographical discoveries in 5 volumes. Volume 3. Geographical discoveries and research of modern times (mid-17th–18th centuries)]. Moscow, Publ. Education, 1984. 319 p. (In Russian).

Klimat Nekipelov Yugo-Vostochnogo N.V. Zabaikal'ya i istoricheskii obzor chumnykh epizootii na fone klimaticheskikh izmenenii [Climate of Southeastern Transbaikalia and a historical review of plague epizootics against the background of climatic Izvestiya changes]. Irkutskogo gosudarstvennogo nauchno-issledovateľ skogo protivochumnogo instituta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Reports of the Irkutsk state anti-plague institut of Siberia and Far East], 1957, vol. XV, pp. 19–56. (In Russian).

Obyazov V.A. Svyaz' kolebanii vodnosti ozer stepnoi zony Zabaikal'ya s mnogoletnimi gidrometeorologicheskimi izmeneniyami na primere Toreiskikh ozer [On connection between lakes water masses fluctuation in Transcaikalia steppe zone and long-term hydrometeorological changes of Toreiskije lakes]. *Izvestiya Russkogo georgraficheskogo obshchestva [The Russian Geographical Society Herald]*, 1994, vol. 126, iss. 5, pp. 48–54. (In Russian).

Ткаченко Е.Э., Обязов В.А. Изменения уровня Торейских озер и гнездящиеся континентальные околоводные птицы // Наземные позвоночные Даурии / Сборник научных трудов государственного природного биосферного заповедника «Даурский». Вып. 3. Чита: Поиск, 2003. С. 44–59.

Фриш В.А. Торейский «эксперимент» // Природа. 1972. № 2. С. 60–66.

Чечель А.П. Динамика уровенного режима озер // Содовые озера Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1991. С. 12–15.

Шамсумдинов В.Х. История геологического развития района Торейских озер в антропогене (Юго-Восточное Забайкалье): Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Чита, 1971. 23 с.

Шамсутдинов В.Х. Особенности водного режима Торейских озер // Природа Цасучейско-Торейского заказника. Чита: Забайкальский филиал РГО СССР, 1983. С. 7–11.

D'Anville J.B. Atlas général de la Chine, de la Tartarie chinoise, et du Tibet: pour servir aux différentes descriptions et histoires de cet empire. La Haye: H. Scheurleer, 1737.

Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics. 2004. V. 11. Iss. 5–6. Pp. 561–566. DOI: 10.5194/npg-11-561-2004.

Kirilyuk V.E., Obyazov V.A., Tkachuk T.E., Kirilyuk O.K. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian eco-region // Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World. Plant and Vegetation, vol 6. / Eds. Werger M.J.A., van Staalduinen M.A. Dordrecht: Springer, 2012. Pp. 397–424. DOI: 10.1007/978-94-007-3886-7 15.

Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. Iss. 15. Pp. 2171–2186. DOI: 10.1002/hyp.9740.

Linke S., Lehner B., Dallaire C.O., Ariwi J., Grill G., Anand M., Beames P., Burchard-Levine V., Maxwell S., Moidu H., Tan F., Thieme M. Global

Obyazov V.A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivosť atmosfernykh osadkov v Yugo-Vostochnom Zabaikal'e [Spatio-temporal South-East changebility of precipitation in Transbaikalia]. Izvestiya Russkogo georgraficheskogo obshchestva [The Russian Geographical Society Herald], 1996a, vol. 128, iss. 2, pp. 73-80. (In Russian).

Obyazov V.A. Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozdukha v Yugo-Vostochnom Zabaikal'e [Long-term air temperature changes in the South-East Zabaikalie]. *Izvestiya Russkogo georgraficheskogo obshchestva [The Russian Geographical Society Herald]*, 1996b, vol. 128, iss. 3, pp. 66–73. (In Russian).

Obyazov V.A. Mnogoletnie kolebaniya stoka rek Yugo-Vostochnogo Zabaikal'ya [Long-term variations of rivers flow in south-east Zabaikalye]. *Izvestiya Russkogo georgraficheskogo obshchestva [The Russian Geographical Society Herald]*, 1998, vol. 130, iss. 3, pp. 72–78. (In Russian).

Obyazov V.A. Variations in the Humidity of the Upper Amur River Basin in the 20th Century. *Doklady Earth Sciences*, 1999, vol. 366, iss. 4, pp. 596–597. (Russ. ed.: Izmenenie uvlazhnennosti basseina verkhnego Amura v XX veke. *Doklady akademii nauk*, 1999a, no. 4, vol. 366, pp. 547–548).

Obyazov V.A. Secular trends of climate changes in the southeastern Transbaikal region and in the adjacent areas of China and Mongolia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1999b, iss. 10, pp. 23–28. (Russ. ed.: Obyazov V.A. Vekovye tendentsii izmenenii klimata na yugo-vostoke Zabaikal'ya i v sopredel'nykh raionakh Kitaya i Mongolii. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1999b, iss. 10, pp. 33–40).

Obyazov V.A. Izmeneniya klimata v mezhdurech'e Arguni i Onona v kontekste global'nogo potepleniya [Climate changes between the rivers Argun and Onon in the context of global warming]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta [Chita state university journal]*, 2011, vol. 7 (74), pp. 78–85. (In Russian; abstract in English).

Obyazov V.A. Izmenenie klimata i gidrologicheskogo rezhima rek i ozer v Daurskom ekoregione [Climate change and hydrological

hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // Scientific Data. 2019. Vol. 6. Art. number: 283. DOI: 10.1038/s41597-019-0300-6.

regime of rivers and lakes in the Dauria ecoregion]. Problemy adaptatsii k izmeneniyu klimata v basseine rek Daurii: ekologicheskie i vodokhozyaistvennye aspekty. Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika «Daurskii». Vyp. 5. [Adaptetion to climate change in the river basins of Dauria: ecology and water management. Collection of scientific papers of Daursky Bioshere Reserve. Vol. 5]. Chita, Express Publ., 2012, pp. 24–45. (In Russian).

Obyazov V.A. Dinamika uvlazhnennosti basseina Verkhnego Amura vo vtoroi polovine XX – nachale XXI vekov [Moisture dynamics of the Upper Amur basin in the second half of the XX – early XXI centuries]. *Materialy XV soveshchaniya geografov Sibiri i Dal'nego Vostoka (g. Ulan-Ude, 10–13 sentyabrya 2015 g.)* [Proceedings of the 15-th Scientific Meeting of Geographe rs of Siberia and the Far East (Ulan-Ude, 10–13 September, 2015)]. Irkutsk, Publishing house of the Institute of Geography named after V.B. Sochavy SB RAS, 2015, pp. 127–130. (In Russian).

Obyazov V.A., Smakhtin V.K. Mnogoletnii rezhim stoka rek Zabaikal'ya: analiz i fonovyi prognoz [The TransBaikalia Rivers' Many-yer Runoff Regime: Analysis and Background Forecast]. Vodnoe khozvaistvo Rossii: problemy. tekhnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management], 2012, iss. 1, pp. 63–72. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35567/1999-4508-2012-1-5.

Pallas P.S. Reise durch verschiedene Provinzen des Russischen Reichs in den Jahren 1768–1773 [Journey through various provinces of the Russian Empire in the years 1768–1773]. St. Petersburg, Gedruckt bey der Kaiserlichen Academie der Wissenschaften, 1771–1776. (Russ. ed.: Pallas P.S. Puteshestvie po raznym provintsiyam Rossiiskogo gosudarstva v 3 ch. Ch. 3 v 2 pol. Polovina pervaya. 1772 i 1773 gody. St. Petersburg, Publ. of Imperial Academy of Sciences, 1788. 655 p.)

Potanin G.N. *Puteshestviya po Mongolii [Travels in Mongolia]*. Moscow, Publ. OGIZ, 1948. 484 p. (In Russian).

Prasolov L.I. Yuzhnoe Zabaikal'e. Pochvennogeograficheskii ocherk [Southern Transbaikalia. Soil-geographical sketch]. Leningrad, Publ. of the Academy of Sciences of the USSR, 1927. 422 p. (In Russian).

Radde G.I. Dauro-Mongol'skaya granitsa Zabaikal'ya [Dauria-Mongolian border of the Transbaikalia]. *Vestnik Imperatorskogo russkogo geograficheskogo obshchestva [The Imperial Russian Geographical Society Herald]*, 1858, part 22, pp. 117–142. (In Russian).

Shamsutdinov V.Kh. Istoriya geologicheskogo razvitiya raiona Toreiskikh ozer v antropogene (Yugo-Vostochnoe Zabaikal'e). Avtoref. diss. kand. geol-min. najuk. [The history of the geological development of the Torey Lakes region in the anthropogen (the South-Eastern Transbaikalia)]. Ph. D. (geological and mineralogical) Thesis]. Chita, 1971. 23 p. (In Russian).

Shamsutdinov V.Kh. Osobennosti vodnogo rezhima

Toreiskikh ozer [Features of the water regime of the Torey lakes]. Priroda Tsasucheisko-Toreiskogo zakaznika [Nature of the Tsasucheysko-Torey Nature Refuge]. Chita, 1983, pp. 7–11. (In Russian). Yu.G. Ozernyi morfolitogenez Simonov usloviyakh Zabaikal'ya [Lacustrine morpholithogenesis in the conditions of the Transbaikalia]. Voprosy ozernogo morfolitogeneza. Zapiski Zabaikal'skogo filiala geograficheskogo obshchestva SSSR. Vypusk 31. [Issues of lacustrine morpholithogenesis. Notes of the Transbaikal branch of the USSR Geographical Society. Iss. 31]. Chita, Publishing House of the Trans-Baikal Branch

of the Geographical Society of the USSR, 1969,

pp. 3–15. (In Russian).

Tkachenko E.E., Obyazov V.A. Izmeneniya urovnya Toreiskikh ozer i gnezdyashchiesya kontinental'nye okolovodnye ptitsy [Changes in the level of the Torey lakes and nesting continental semi-aquatic birds]. Nazemnye pozvonochnye Daurii. Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika «Daurskii». Vyp. 3. [Terrestrial vertebrates of Dauria. Collection of scientific papers Daursky Bioshere Reserve. Vol. 3]. Chita, Publ. Poisk, 2003, pp. 44–59. (In Russian).

Vakhnina I.L., Obyazov V.A., Zamana L.V. Dinamika uvlazhneniya v stepnoi zone yugovostochnogo Zabaikal'ya s nachala XIX stoletiya po kernam sosny obyknovennoi [Dynamics of humidification in the steppe zone of southeastern Transbaikalia since the beginning of the 19th century evidenced by the cores of Scots pine]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography], 2018, iss. 2, p. 28–33. (In Russian; abstract in English).

Vityazev V.V. Veivlet-analiz vremennykh ryadov [Wavelet analysis of time series]. St. Petersburg, Publ. of St. Petersburg State University, 2001. 58 p. (In Russian).

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 556.16

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.233

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЕГОТАЯНИЯ НА РЕЧНОМ **ВОДОСБОРЕ**

А.Н. Гельфан

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия hydrowpi@iwp.ru

Аннотация. Разработан метод геостатистического описания пространственной неоднородности залегания снежного покрова при расчете снеготаяния с помощью математической модели формирования снежного покрова (на примере водосбора реки Сейм). Средняя высота снежного покрова на площади расчетной сетки модели задается по данным наблюдений на метеорологических станциях региона с использованием для интерполяции метода стандартного крайгинга. Проведенный ранее анализ многолетних данных снегомерных наблюдений в Центрально-Черноземном регионе показал, что эмпирическая структурная функция снежного покрова может высоты аппроксимирована степенной зависимостью от расстояния между пунктами наблюдений. Это позволило получить на основе метода геостатистической регуляризации простую зависимость изменчивости высоты снежного покрова внутри каждой ячейки сетки (подсеточной изменчивости) OT отношения размера ячейки к размеру водосбора. С помощью модели формирования снежного покрова оценена чувствительность рассчитанной

GEOSTATISTICAL DESCRIPTION OF SNOW COVER **HETEROGENEITY IN A** PHYSICALLY BASED CATCHMENT-SCALE SNOW MODEL

Alexander N. Gelfan Institute for Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia hydrowpi@iwp.ru

Abstract. A method has been developed for geostatistical description of the spatial heterogeneity of snow cover when calculating snow melting using a physically based snow model over the catchment scale (by the example of the catchment area of the Seim River). The average snow depth within the computational grid cell is set according to snow observations at meteorological stations in the region using the ordinary kraging interpolation. An earlier analysis of long-term snow observation data in the Central Black Soil region showed that the empirical variogram of the snow depth can be approximated by a power-law dependence on the distance between the observation points. This made it possible to obtain, based on the method of geostatistical regularization, a simple dependence of the variability of the snow cover depth within each grid cell (subgrid variability) on the ratio of the cell size to the catchment size. Using the model of snow cover formation, the sensitivity of the calculated intensity of snow melting in the catchment area to the detail of the computational grid resolution was estimated. It is shown that the calculated snowmelt both in the entire catchment and within the cells turned out to be almost insensitive to changes in the spatial grid

интенсивности снеготаяния на площади водосбора к детальности дискретизации этой площади. Территория, расположенная Центрально-Черноземной области России включающая бассейн реки Сейм, разбивалась прямоугольной сеткой тремя способами с размерами ячеек порядка 800, 200 и 50 км². Показано, что рассчитанное снеготаяние на всем водосборе реки Сейм и на отдельных его участках оказалось малочувствительно изменению плотности пространственной сетки, то есть расчет снеготаяния по грубой сетке с более высокой подсеточной изменчивостью глубины снега мало отличается от расчета по детальной сетке, но с меньшей подсеточной изменчивостью. Сделан вывод, что подсеточной изменчивости компенсирует погрешности, вызванные нелостаточной детальностью сетки. Для расчетов гидрографа талого стока в замыкающем створе полученный результат означает возможность выбора, при описании снеготаяния, более грубой сетки, чем водосборной схематизация площади, используемая для расчетов склонового стока в моделях с распределенными параметрами.

Ключевые слова: снеготаяние; речной водосбор; пространственное распределение; физико-математическая модель; геостатистика; подсеточная изменчивость.

Введение

Отличия в характере залегания снега на разных частях водосборной площади в начале весны влияют в значительной степени на динамику снеготаяния и формирование весеннего половодья. При необходимости задания в физикоматематической модели в качестве начальных условий предвесеннего распределения снега по водосборной площади возникает проблема, связанная c недостаточной плотностью имеющейся сети наблюдений, которая обычно менее детальна, чем схематизация водосбора, используемая в модели (например до сокращения сети Гидрометслужбы, произошедшей после 1990-х годов, средняя площадь, приходившаяся на один снегомерный пункт УГМС Центральной resolution For calculating the hydrograph of snowmelt runoff in the river outlet, the result obtained means the possibility of choosing, when describing snow melting, a coarser grid than the schematization of the catchment area used for calculating overland runoff in physically based distributed models.

Keywords: snow melting; river catchment; spatial distribution; physically based model; geostatistics; subgrid variability.

и Центрально-Черноземной областей бывшего СССР — территорий с наиболее развитой в то время сетью наблюдений, — составляла более 1 000 км²). Возникает проблема переноса информации от имеющейся сети наблюдений к принятой схематизации водосборной площади.

Проблемы описания гидрометеорологических переменных или характеристик водосбора на пространственных масштабах, меньших характерных расстояний между имеющимися пунктами измерений этих величин, решаются методами объективного анализа. В западной литературе эти подходы объединены понятием скейлинга, понимаемого в широком смысле как совокупность методов передачи информации (содержащейся в

фактических данных или в модели) от одних пространственно-временных масштабов к другим [Blöschl, Sivapalan, 1995]. Принято разделять методы скейлинга на детерминистические и стохастические [Blöschl, Grayson, 2000].

Детерминистические методы скейлинга включают методы интерполяции, большинство из которых основаны только на имеющихся наблюдениях без учета какой-либо дополнительной информации характере 0 изучаемой пространственной переменной и могут применяться для любой переменной, независимо от природы и особенностей последней. При описании неоднородности снежного покрова в моделях талого стока чаще всего применяется метод Тиссена, заключающийся в разбиении пространства измерений на области (полигоны), тяготеющие к точкам измерений, причем внутри каждого полигона значение переменной измеренному считается равным соответствующей точке. Более реалистичная пространственная картина снежного покрова может быть получена по имеющимся данным измерений с использованием других способов детерминистической интерполяции: линейной, весовой, полиномиальной сплайновой [Чемеренко, 1971]. В работе [Meijerink et al., 1994] полиномиальная интерполяция признается наиболее эффективной при большом числе точек измерений. Вместе с тем, по данным [Чемеренко, 1971], точность полиномиальной интерполяции высоты снежного покрова невысока даже при относительно густой сети наблюдений. В работе [Blöschl, Grayson, 2000] указывается ограниченность методов детерминистической интерполяции для масштабов, намного меньших характерных между расстояний пунктами измерений; эти методы приводят существенному сглаживанию пространственных вариаций изучаемой переменной.

Стохастические методы скейлинга основаны на анализе стохастической структуры поля изучаемой переменной и свободны в значительной мере от недостатков, свойственных детерминистическим подходам. Исследования стохастической структуры поля снежного покрова для долгосрочного прогнозирования

объема половодья, основанные на методах объективного анализа, в нашей стране начаты Е.П. Чемеренко [Чемеренко, 1968; Чемеренко, 1973]. 1971; Чемеренко, Ранее методы объективного анализа применялись для оценки точности осреднения высоты снежного покрова и рационализации снегомерной сети в работах [Лайхтман, Каган, 1960; Гандин, Каган, 1962]. За рубежом стохастический подход к скейлингу получил широкое распространение геофизических исследованиях после работы [Матерон, 1968], заложившей основы Методические геостатистики. вопросы применения геостатистики в гидрологических задачах и, в частности, к исследованию снежного в работах рассмотрены [Blöschl, Sivapalan, 1995; Blöschl, Kirnbauer, 1992].

В настоящей статье рассмотрено применение геостатистических методов для оценки характеристик снежного покрова в узлах заданной расчетной сетки и изменчивости этих характеристик внутри ячеек сетки (подсеточной изменчивости) при физико-математическом моделирования снеготаяния на речном водосборе (на примере водосбора реки Сейм).

Методы

Согласно геостатистической теории собственных схем [Матерон, 1968], точечная пространственная переменная S=S(x)пространственная координата) (x)рассматривается как реализация случайной функции со стационарными (однородными и изотропными) приращениями

$$\varepsilon(x, x + h) = [S(x) - S(x + h)] = \varepsilon(h),$$

то есть распределение вероятности приращений $\varepsilon(h)$ зависит только от расстояния h между точками, но не зависит от их взаимного расположения. (Величины S могут представлять собой, например, поле снегозапасов, коэффициента фильтрации почвы и так далее). При этом априори не накладывается ограничений на вероятностные законы распределения величин S. Из стационарности приращений следует, что для любой пары точек дисперсия приращений также зависит только от расстояния между этими точками.

Функция

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}\sigma^2[\varepsilon(h)] \tag{1}$$

где σ^2] – дисперсия;

называется структурной функцией и характеризует корреляционную структуру поля пространственных переменных.

Структурная функция (полувариограмма в зарубежной литературе) играет ключевую роль в геостатистических исследованиях.

Для построения эмпирической структурной функции $\gamma^*(h)$ по имеющимся измерениям $S_i = S(x_i)$ в точках x_i определяются расстояния между всеми парами точек, и диапазон полученных расстояний разбивается на $\gamma^*(\bar{h})$ интервалы, после значения чего рассчитываются по формуле

$$\gamma^*(\bar{h}) = \frac{1}{2N(\bar{h})} \sum_{i=1}^{N(\bar{h})} [S(x_i + h) - S(x_i)]^2$$
 (2)

где $N(\bar{h})$ — число пар точек, попавших в интервал со средним расстоянием \bar{h} .

Наиболее распространенные методы интерполяции пространственной переменной, основанные на использовании структурной функции – методы оптимальной интерполяции, позволяющие воспроизвести поле изучаемой переменной наилучшим в определенном смысле образом, сохранив его вероятностные свойства.

При оптимальной интерполяции оценка $S^*(x_0)$ пространственной переменной $S(x_0)$ в некоторой точке поля x_0 ищется в виде линейной комбинации значений переменной в имеющихся N точках измерений $S(x_i)$ (i=1,2...,N), как

$$S^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \vartheta_i S(x_i)$$
 (3)

Из условия несмещенности оценки $S^*(x_\theta)$ и минимума дисперсии погрешностей

 $[S^*(x_0) - S(x_0)]$ следует, что веса θ_i могут быть найдены путем решения матричного уравнения:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1N} & 1\\ \gamma_{21} & \dots & \dots & \dots & \gamma_{2N} & 1\\ \gamma_{31} & \dots & \dots & \dots & \gamma_{3N} & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \gamma_{N3} & \dots & \gamma_{NN} & 1\\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vartheta_1\\ \vartheta_2\\ \vartheta_3\\ \vdots\\ \vartheta_N\\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{01}\\ \gamma_{02}\\ \gamma_{03}\\ \vdots\\ \gamma_{0N}\\ 1 \end{pmatrix} (4)$$

где $\gamma_{ij} = \gamma(x_i - x_j)$ — значение структурной функции для расстояния между точками i и j;

 μ – множитель Лагранжа.

В геостатистике рассмотренная процедура интерполяции оптимальной называется крайгингом (ordinary kriging). стандартным (Другие геостатистические методы интерполяции в применении к гидрологическим задачам описаны например в обзоре [Georgakakos et al., 1990]). теории объективного анализа аналогичная процедура называется оптимальной интерполяцией с нормировкой весов и впервые применялась для интерполяции характеристик снежного покрова в задачах прогноза талого стока в работе [Чемеренко, 1971] (заметим, что при оптимальной интерполяции с нормировкой весов используется корреляционная функция, которая для однородного изотропного поля однозначно связана со структурной).

В работе [Чемеренко, 1971] точность оптимальной интерполяции с нормировкой весов сравнивалась с некоторыми из перечисленных выше детерминистических способов интерполяции на основе данных о высоте 700 станциях, снежного покрова расположенных на Европейской части территории бывшего СССР. Автор показал, что оптимальная интерполяция дает более точные оценки по сравнению с детерминистическими методами интерполяции. Процедура стандартного крайгинга применялась также в работе [Шутов, 1994] для интерполяции данных о снегозапасах на водосборах Валдайской возвышенности. Значения снегозапасов в точках измерений, приведенные к некоторой постоянной высоте, интерполировались в узлы регулярной сетки, а затем в полученные интерполированные значения вводилась поправка местности. Показано, что эта поправка позволяет существенно улучшить точность оптимальной интерполяции. Аналогичное заключение об улучшении результатов стохастической интерполяции с учетом связи снегозапасов с высотой и уклонами местности сделано ранее в работе [Blöschl et al., 1991].

Несмотря на преимущества метода оптимальной интерполяции в сравнении с детерминистическими методами, он не решает проблему описания мелкомасштабной изменчивости, а именно: для масштабов, намного характерного расстояния меньших между пунктами измерений, поле получается слишком сглаженным [Journel, Huijbregts, 1978]. В тех ситуациях, когда требуется получить представление о подсеточной изменчивости, скейлинга может быть решена геостатистическими методами регуляризации, обоснованными в работе [Матерон, 1968] и разработанными детально для прикладных геофизических исследований в работе [Journel, Huijbregts, 1978]. Суть методов регуляризации состоит в оценке изменений вероятностных характеристик (обычно первых статистических моментов) переменной площади при на изменении размеров последней. Другими словами, при регуляризации осуществляется скейлинг, например дисперсии переменной, а не восстанавливаются отсутствующие измерения в конкретных точках, как это делается при интерполяции.

Дисперсия точечной переменной S(x) внутри некоторой площади F определяется по формуле

$$\sigma_F^2 = \frac{1}{F} \int_F [S(x) - m_F]^2 dx$$
 (5)

где m_F — среднее значение S(x) по площади F , равное

$$m_F = \frac{1}{F} \int_F S(x) dx \tag{6}$$

Для поля со стационарными приращениями дисперсия точечной переменной внутри площади F не зависит от среднего значения переменной на

этой площади и может быть определена через структурную функцию следующим образом:

$$\sigma_F^2 = \frac{1}{F} \int_F [S(x) - m_F]^2 dx =$$

$$= \frac{1}{F^2} \iint_F \gamma(x_i - x_j) dx_i dx_j$$
 (7)

где x_i и x_j — координаты произвольной пары точек внутри площади F.

Из (7), задаваясь видом структурной зависимость функции, онжом получить дисперсии точечной переменной от размеров и формы рассматриваемой площади. Для случайных полей разной структуры (степенной, экспоненциальной, логарифмической и других), такие зависимости приведены например в работах [Матерон, 1968; Journel, Huijbregts, 1978; Каган, 1979].

В случае степенной структурной функции (1), выражаемой как

$$\gamma \sim h^{\alpha} \ (0 < \alpha < 2) \tag{8}$$

дисперсия точечной переменной внутри прямоугольного участка площадью $F = a \times b$ $(a \ge b)$ равна [Матерон, 1968]:

$$\sigma_F^2 = \frac{2\sqrt{\pi}\Gamma\left(-\frac{1+\alpha}{2}\right)}{(\alpha+2)(\alpha+3)\Gamma\left(-\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{b^{1+\alpha}}{a} + \frac{4}{(\alpha+2)(\alpha+3)(\alpha+4)} \frac{b^{2+\alpha}}{a^2} + a^{\alpha} * \left[\frac{2}{(\alpha+1)(\alpha+2)} + \frac{2}{6(\alpha-1)} \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{\frac{\alpha}{2}\left(\frac{\alpha}{2}-1\right)\cdots\left(\frac{\alpha}{2}-k+2\right)}{(\alpha+1-2k)(2k+1)!} \left(\frac{b}{a}\right)^{2k}\right]$$
(9)

Бесконечный ряд в выражении (9) быстро сходится: как показали наши расчеты, уже при k > 5 уточнение дисперсии становится меньше 0.01%.

Записав выражение (9) для двух подобных прямоугольников со сторонами A, B и a, b, при условии

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{F}{f}}$$

где F и f – соответствующие площади,

и поделив одно выражение на другое, путем простых алгебраических преобразований получим, что отношение дисперсий σ_F^2 и σ_f^2 внутри этих прямоугольников выражается через отношение соответственных площадей следующим образом:

$$\frac{\sigma_F^2}{\sigma_f^2} = \left(\frac{F}{f}\right)^{\frac{\alpha}{2}} \tag{10}$$

Таким образом, если эмпирическая структурная функция некоторой переменной, измерения которой имеются на территории площадью F, близка к степенной (8), то соотношение (10) позволяет, оценив дисперсию σ_F^2 этой переменной и показатель степени α структурной функции, рассчитать дисперсию σ_f^2 на части этой территории площадью f. И наоборот: оценив, по имеющимся измерениям, вариацию искомой переменной на площади, по (10) можно рассчитать ее вариацию на всей площади. Естественно, приведенное соотношение (10) «работает» лишь в диапазоне пространственных масштабов, для которого может считаться постоянной величина α , определяемая по углу наклона эмпирической структурной функции (2), построенной логарифмических осях. В геостатистической случайных полей однородными теории c приращениями предполагается, что либо показатель α структурной функции поля остается постоянным для любых масштабов, либо на всех масштабах сохраняется только степенной характер структурной функции, а показатель α зависит от масштаба. Для однородных случайных полей со степенной структурой, рассматриваемых в теории объективного анализа, показатель α остается постоянным до расстояния, равного радиусу корреляции; это расстояние ограничивает диапазон пространственных масштабов, для которого может выполняться соотношение (10). Таким образом очевидно, что решение вопроса о возможности применения соотношения (10)ДЛЯ расчета вариации характеристик снежного покрова для некоторого диапазона пространственных масштабов (например от линейного размера подсеточных областей водосбора) ДО размера должно

опираться на анализ поведения структурной функции этих характеристик в выбранном диапазоне (для широкого диапазона масштабов такой анализ приведен в работе [Kuchment, Gelfan, 2001]).

В работах [Кучмент, Гельфан, 1997; Kuchment, Gelfan, 2001] формула (10) была получена другим способом — как следствие гипотезы самоподобия поля пространственной переменной.

Бенуа Мандельброт [Mandelbrot, 1982] показал, что случайное поле со степенной структурной функцией (8) является фракталом. Количественной стохастическим фрактальной поверхности, характеристикой определяющей соотношение между крупно- и мелкомасштабными вариациями, служит фрактальная размерность D_2 . Для двумерной поверхности эта величина всегда больше 2 (топологической размерности) и меньше 3 (размерности пространственного белого шума). Если $D_2 < 2,5$, то характеристики случайного поля проявляют персистентность - сохранение имеющейся тенденции изменения относительно малом шуме; приращения $\varepsilon(h)$ при этом оказываются положительно коррелированными. Если $D_2 > 2.5$, приращения отрицательно коррелированны, и преобладают мелкомасштабные вариации величин тенденции не сохраняются (антиперсистентность).

Фрактальная размерность D_2 может быть определена по фрактальной размерности D_1 любого сечения поверхности по формуле [Mandelbrot, 1982]:

$$D_2 = D_1 + 1 \tag{11}$$

Фрактальная размерность D_1 сечения случайной поверхности может быть определена по показателю степени структурной функции α , как:

$$D_1 = 2 - \frac{\alpha}{2} \tag{12}$$

Последнее соотношение использовалось для оценки фрактальной размерности почвенных характеристик [Burrough, 1983], рельефа [Mark, Aronson, 1984]. Согласно работе [Bruno, Raspa, 1989] если поверхность является фракталом, то

использование соотношения (12) дает более устойчивые оценки по сравнению с другими способами определения фрактальной размерности. Заметим, приведенные ЧТО соотношения верны для случая, когда случайное поле является простым фракталом, то есть показатель α остается постоянным для всего рассматриваемого диапазона пространственных масштабов. Поля с переменной величиной α , зависящей от масштаба, получили название мультифракталы (например в работе [Lovejoy, Mandelbrot, 1985] мультафрактал как рассматривается поле осадков).

разделе следующем показаны возможности геостатистических методов стандартного крайгинга и регуляризации для учета распределения высоты снежного покрова при описании неоднородности снеготаяния на водосборе реки Сейм с помощью математической модели снежного покрова, разработанной Ю.Г. Мотовиловым [Мотовилов, 1999]. Эта модель ранее использовалась нами в качестве блока физико-математических моделей формирования талого стока речных водосборах, расположенных в разных природных условиях: лесостепь и юг лесной зоны [Kuchment, Gelfan, 2002], тундровые и таежные водосборы зоны вечной мерзлоты [Кучмент, Гельфан, Демидов, 2000]. При проведении данного исследования использовались параметры модели, подобранные ранее по снегомерным измерениям в бассейне реки Сейм и приведенные в статье [Kuchment, Gelfan, 2002].

Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа данных снегомерных наблюдений в разных регионах бывшего СССР в работах [Kuchment, Gelfan, 2001; Гельфан, Морейдо, 2015] сделан вывод, что структурные функции высоты снежного покрова и снегозапасов на линейных

масштабах десятки и сотни метров (масштаб снегомерных маршрутов), а также десятки километров (речные водосборы), могут быть удовлетворительно описаны степенными зависимостями. Аналогичный вывод для разных масштабов содержится также в работах [Blőschl, Kirnbauer, 1992; Rozenthal and Dozier, 1996; Shook and Gray, 1996; Cline, Bales, Dozier, 1998].

В качестве подтверждения полученного вывода на рисунке 1 приведена эмпирическая структурная функция $\gamma^*(h)$ наблюденных значений высоты снежного покрова H_S на 1 марта, построенная нами по данным наблюдений на 30 метеорологических станциях Центрально-Черноземной области России и осредненная за 10 лет (с 1967 по 1976 год). Площадь района расположения станций — 31 000 км²; большей частью эти станции расположены в бассейнах рек Сосна и Сейм.

Для расчета величин $\gamma^*(h)$ по формуле (2) расстояний между 30 пунктами диапазон наблюдений (метеорологическими станциями) интервалов 10 разбивался на (середины интервалов от 8 до 142 км), в каждый из которых попало в среднем по 44 значения. Из рисунка 1 видно, что $\gamma^*(h)$ удовлетворительно описывается степенной зависимостью с показателем степени α =0,28. Фрактальная размерность D_2 поля значений H_S , определенная по формулам (11) – равна 2,86, что свидетельствует преобладании мелкомасштабной составляющей в пространственных изменениях глубины снега на рассматриваемой территории.

Из 30 станций, использовавшихся для построения $\gamma^*(h)$, были отобраны 12, расположенных на водосборе реки Сейм (до замыкающего створа в деревне Рышково) или в непосредственной близости от границ водосбора. Расположение отобранных станций показано на рисунке 2a.

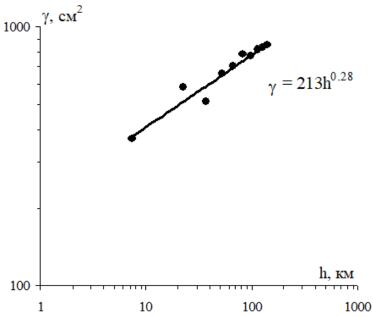


Рисунок 1. Структурная функция высоты снежного покрова, построенная по многолетним данным снегомерных измерений в Центрально-Черноземной области России и аппроксимированная степенной зависимостью.

Figure 1. Spatial semi-variogram of snow depth observed for the long-term period over the Central Black Soil Region (line is the fitted power function).

Физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния [Мотовилов, 1999] в сочетании с рассмотренными геостатистическими использовалась для описания пространственной изменчивости процессов снеготаяния на водосборе реки Сейм, обусловленной неоднородностью залегания снежного покрова перед началом таяния. Применялась следующая процедура:

Территория, показанная на рисунке 2, разбивалась прямоугольной сеткой. Высота снежного покрова H_S , измеренная в 12 пунктах наблюдений на дату начала расчетов (принятую 1 марта для каждого года из 10 лет наблюдений), интерполировалась в центры ячеек сетки, попадающих на рассматриваемый водосбор, методом стандартного крайгинга. Рассчитанные таким образом величины считались равными средней высоте снежного покрова m_i для каждой і-й ячейки. Принималось, что вариограмма величин H_S на водосборе реки Сейм может быть описана степенной функцией (рисунок 1) с показателем α =0,28. Отсюда, согласно формуле (10), стандартное отклонение (σ_i) величин H_S внутри i-й ячейки площадью f_i рассчитывается по

стандартному отклонению (σ_F) этих величин на всей площади водосбора с помощью зависимости

$$\sigma_i = \left(\frac{f_i}{F}\right)^{0.07} \sigma_F \tag{13}$$

Величина σ_F на площади водосбора оценивается по имеющимся данным.

Далее предполагалось, что высота снежного покрова внутри каждой і-й ячейки подчиняется логнормальному закону, параметры которого вычисляются по значениям m_i и σ_i , задаваемым описанным способом. Согласно экспериментальным данным, логнормальное распределение хорошо описывает изменения высоты снежного покрова для площадей порядка десятков и сотен квадратных километров (например [Gottshalk and Jutman, 1979; Killingtveit and Sand, 1991; Pomeroy, Gray, 1995]). Таким образом, по средней на площади ячейки высоте снежного покрова H_S (задается крайгингинтерполяцией данных измерений на дату начала расчетов) и подсеточной изменчивости этой величины (рассчитывается по формуле (13)), строится начальное распределение вероятности высоты снежного покрова для каждой ячейки выбранной сетки на дату начала расчетов.

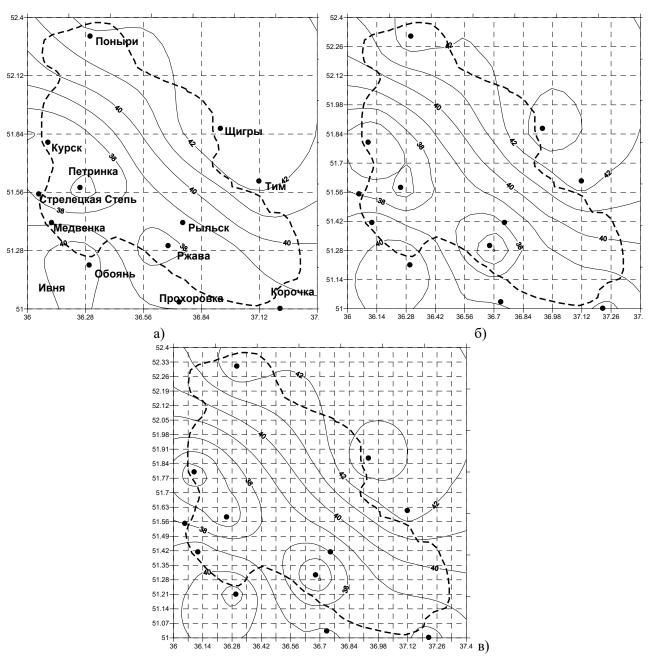


Рисунок 2. Распределение фактических глубин снега на 1 марта 1970 года, построенное методом стандартного крайгинга, при разной дискретизации территории:

а – ячейки 800 км²; б – 200 км²; в – 50 км²(пунктиром показаны границы водосбора реки Сейм). **Figure 2.** Spatial distribution of snow depth observed on March 1, 1970 and constructed by the ordinary kryging with different discretization of the territory: a – 800 km² cell area; b – 200 km² cell area; c – 50 km² cell area (the dotted line shows the boundaries of the catchment area of the Seim River).

При учитывается как крупномасштабная снежного изменчивость покрова (выражаемая в изменениях m_i от ячейки к ячейке), так и мелкомасштабная изменчивость σ_i внутри ячейки. Динамика характеристик снежного покрова во время снеготаяния внутри каждой ячейки рассчитывается ПО модели снеготаяния для нескольких участков внутри ячейки, покрытых снегом разной глубины H_S , при этом площади участков задаются по кривой логнормального распределения H_S . (Нами показано, что при величинах коэффициента вариации глубины снега, не превышающих 1,0-1,5, оказывается достаточным разбиения

кривой на 5 участков). В результате применения описанной процедуры определяется средняя по площади каждой ячейки интенсивность снеготаяния с учетом доли площади, покрытой перед началом снеготаяния снегом заданной глубины.

Описанная процедура была применена для оценки чувствительности рассчитанных характеристик снеготаяния на площади к детальности дискретизации этой площади. Территория, расположенная В Центрально-Черноземной области России и включающая бассейн реки Сейм, разбивалась прямоугольной сеткой тремя способами: 5х5, 10х10 и 20х20 ячеек с размерами ячеек порядка 800, 200 и 50 км² соответственно. Как было сказано фактические значения высоты снежного покрова, интерполированные в центры получившихся ячеек ДЛЯ каждого варианта разбиения, интерпретировались как средняя высота снежного покрова внутри ячейки. Оказалось, что картина начального распределения глубины снега по территории, построенного по полученным средним значениям, почти не различается при разбиении территории сеткой 10х10 или 20х20 ячеек. При более грубом разрешении (сетка 5х5) это распределение отличается заметнее, хотя в целом, общая картина остается похожей на полученную при более детальной сетке. На рисунке 2а – 2в в качестве иллюстрации этого сходства приведены карты глубины начального распределения снега, построенные методом стандартного крайгинга, для способов разбиения территории 1970 с наибольшими для года года снегозапасами за рассматриваемый период. Стандартное отклонение σ_i начальной высоты снежного покрова внутри каждой і-й ячейки, рассчитанное по формуле (13), уменьшается по

сравнению со стандартным отклонением σ_F глубины снега на всем бассейне на 20, 28 и 34%, при задаваемом уменьшении площади ячеек. По полученному распределению начальной глубины снега для каждой ячейки сетки, попавшей на водосбор реки Сейм, моделировалась динамика снежного покрова с 1 марта до схода снега на всем водосборе для периода с 1967 по 1976 год. По моделирования результатам оценивалась чувствительность рассчитанных характеристик снеготаяния К изменению размера используемой сетки. Сравнивался ход глубины снега, рассчитанный для разного разрешения сетки, а также ход водоотдачи снежного покрова. Для всех 10 лет оказалось, что рассчитанное среднее по водосбору снеготаяние очень слабо реагирует на изменение разрешения используемой сетки. В качестве примера на рисунках 3, 4 показан ход искомых характеристик для многоснежного и малоснежного годов (1970 и 1975 соответственно).

Как видно из верхних рисунков, различия графиков хода средней на водосборе глубины снега немного заметны только для малоснежного года, а графики хода средней водоотдачи, рассчитанной при разном разрешении сетки, сливаются. Сравнения производились также по результатам расчета в пределах отдельных участков водосборной площади: на нижних графиках показан расчет при разном разрешении сетки тех же характеристик, осредненных по площади ячейки, в границы которой попадает метеостанция Поныри. Чувствительность характеристик снеготаяния, осредненных территории отдельной ячейки, к изменению ее площади оказалась несколько выше, чем для характеристик, осредненных по всему водосбору, однако, по-прежнему, очень незначительной.

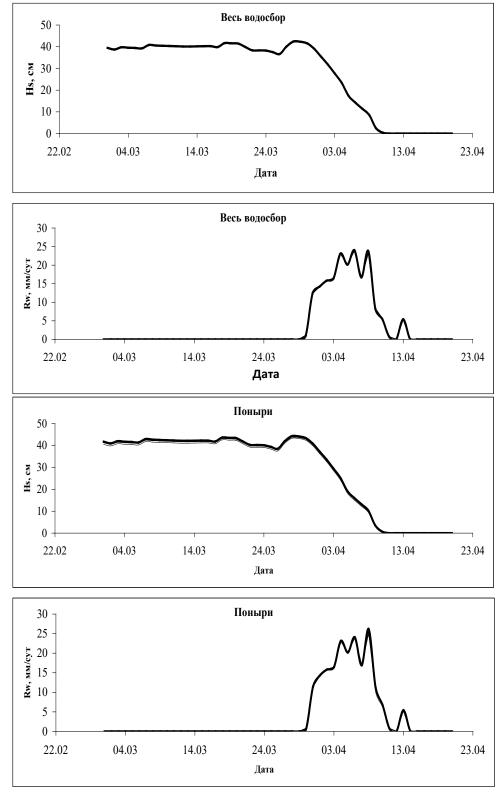


Рисунок 3. Рассчитанные глубина снега и водоотдача снежного покрова весной 1970 года, осредненные для всего водосбора и по ячейке сетки около метеорологической станции Поныри (жирная линия – расчет при ячейках 7х7 км; тонкая – 14х14 км; пунктир – 28х28 км). **Figure 3.** Simulated snow depth and snow melt rate, averaged for the entire catchment area and over a grid

cell near meteorological station Ponyri in the spring of 1970 (bold line – simulation with 7x7 km cells; thin line – 14x14 km; dotted line – 28x28 km).

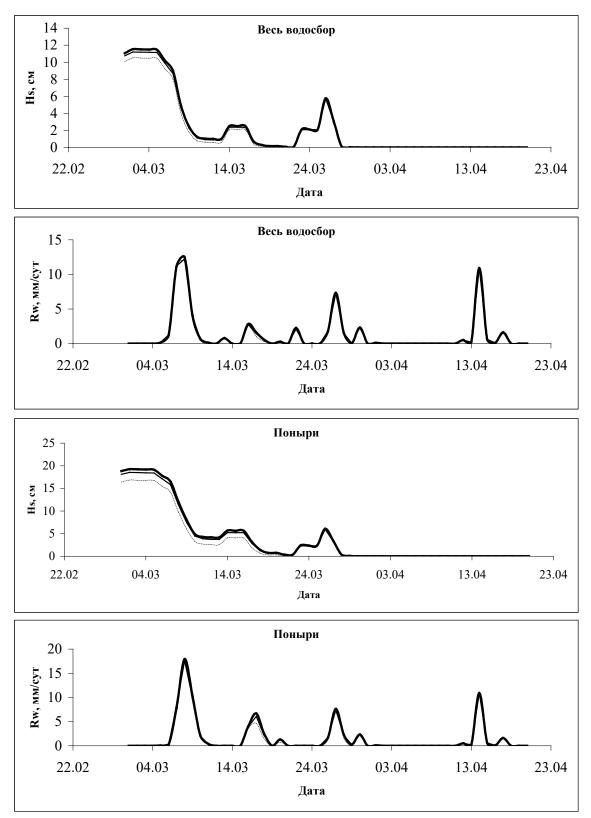


Рисунок 4. Рассчитанные глубина снега и водоотдача снежного покрова весной 1975 года, осредненные для всего водосбора и по ячейке сетки около метеорологической станции Поныри (жирная линия – расчет при ячейках 7х7 км; тонкая – 14х14 км; пунктир – 28х28 км).

Figure 4. Simulated snow depth and snow melt rate, averaged for the entire catchment area and over a grid cell near meteorological station Ponyri in the spring of 1975

(bold line – simulation with 7x7 km cells; thin line – 14x14 km; dotted line – 28x28 km).

Таким образом, рассчитанное снеготаяние на всем водосборе реки Сейм и на отдельных его участках оказалось малочувствительно изменению плотности пространственной сетки. Другими словами, расчет снеготаяния по грубой более сетке высокой подсеточной изменчивостью глубины снега мало отличается от расчета по детальной сетке, но с меньшей подсеточной изменчивостью - учет подсеточной изменчивости компенсирует погрешности, вызванные недостаточной детальностью сетки. гидрографа талого расчетов стока в полученный замыкающем створе результат означает возможность выбора, при описании более грубой сетки. снеготаяния, чем водосборной схематизация площади, используемая для расчетов склонового стока в

Литература

Гандин Л.С., Каган Р.Л. О точности определения средней высоты снежного покрова по дискретным данным // Методика метеорологических наблюдений (снегомерные наблюдения) / Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. Вып. 130. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. С. 3–10.

Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лед и Снег, 2015. Т. 55. №4. С. 61–72. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-61-72. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 213 с.

Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Статистическое самоподобие пространственных изменений снегозапасов и его применение при моделировании талого стока // Метеорология и гидрология. 1997. №6. С. 80–90.

Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Модель формирования стока на водосборах зоны многолетней мерзлоты (на примере верхней Колымы) // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 4. С. 435–444.

Лайхтман Д.Л., Каган Р.Л. Некоторые вопросы рационализации снегосъемок // Методика

моделях с распределенными параметрами. Этот вывод, естественно, относится к рассмотренной схеме пространственной здесь описания изменчивости снеготаяния в зависимости только от начального распределения снежного покрова и пространственного распределения метеорологических факторов В период снеготаяния. Если в модели учитывать например влияние экспозиции склонов на снеготаяние, то требуемая в этом случае сетка должна отражать характер рельефа территории и может оказаться более детальной.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках Государственного задания Института водных проблем РАН (тема №FMWZ-2022-0001).

References

Blöschl G., Grayson R. Spatial observations and interpolation. In Grayson R., Blöschl G. (Eds.) *Spatial Pattern in Catchment Hydrology: Observations and Modeling*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000, pp. 17–50.

Blöschl G., Gutknecht D., Kirnbauer R. Distributed Snowmelt Simulations in an Alpine Catchment: 2. Parameter Study and Model Predictions. *Water Resources Research*, 1991, vol. 27, iss. 12, pp. 3181–3188. DOI: 10.1029/91WR02251.

Blöschl G., Kirnbauer R. An analysis of snow cover patterns in a small alpine catchment. *Hydrological Processes*, 1992, vol. 6, iss. 1, pp. 99–109. DOI: 10.1002/hyp.3360060109.

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.

Bruno R., Raspa G. Geostatistical characterization of fractal models of surfaces. In Armstrong M. (Ed.) *Proceedings of the Third International Geostatistics Congress (September 5–9, 1988, Avignon, France)*. Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 77–89. DOI: 10.1007/978-94-015-6844-9 5.

Burrough P.A. Multiscale sources of spatial variation of in soil. I: The application of fractal concept to nested levels of soil variation. *Journal of*

метеорологических наблюдений / Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. Вып. 108. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. С. 3–18.

Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики / Перевод Ю.В. Рощиной. М.: Мир, 1968. 407 с.

Мотовилов Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / Под ред. Л.С. Кучмент, Е.Л. Музылев. М.: Изд-во НГК РАН, 1993. С. 9–37.

Чемеренко Е.П. Статистические характеристики поля высоты снежного покрова // Численные модели прогноза стока / Труды Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР. Вып. 25. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 63–74.

Чемеренко Е.П. Сравнение различных методов интерполяции для поля высоты снежного покрова // Расчет и прогноз стока рек / Труды Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР. Вып. 72. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. С. 63–74.

Чемеренко Е.П. Об ошибках осреднения по площади данных о водосодержании снежного покрова // Расчет и прогноз стока рек / Труды Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР. Вып. 113. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. С. 65–75.

Шутов В.А. Распределение запасов воды в снежном покрове на водосборах лесной зоны // Метеорология и гидрология. 1994. № 9. С. 85–92. Blöschl G., Grayson R. Spatial observations and interpolation // Spatial Pattern in Catchment Hydrology: Observations and Modeling / Eds. R. Grayson, G. Blöschl. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Pp. 17–50.

Blöschl G., Gutknecht D., Kirnbauer R. Distributed Snowmelt Simulations in an Alpine Catchment: 2. Parameter Study and Model Predictions // Water Resources Research. 1991. Vol. 27. Iss. 12. Pp. 3181–3188. DOI: 10.1029/91WR02251.

Blöschl G., Kirnbauer R. An analysis of snow cover patterns in a small alpine catchment // Hydrological

Soil Science, 1983, vol. 34, iss. 3, pp. 577–597. DOI: 10.1111/J.1365-2389.1983.TB01057.X.

Chemerenko E.P. Statisticheskie kharakteristiki polya vysoty snezhnogo pokrova [Statistical characteristics of the snow depth field]. *Trudy Gidrometeorologicheskii nauchno-issledovatel'skii tsentr SSSR. Vypusk. 25. Chislennye modeli prognoza stoka [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the USSR. Issue 25. Numerical models of runoff forecast].* Leningrad, Publ. of Gidrometeoizdat, 1968, pp. 63–74. (In Russian).

Chemerenko E.P. Sravnenie razlichnykh metodov interpolyatsii dlya polya vysoty snezhnogo pokrova [Comparison of various interpolation methods for the field of snow depth] *Trudy Gidrometeorologicheskii nauchno-issledovatel'skii tsentr SSSR. Vypusk 72. Raschet i prognoz stoka rek [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the USSR. Issue 72. Calculation and forecast of river runoff]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971, pp. 63–74. (In Russian).

Chemerenko E.P. Ob oshibkakh osredneniya po ploshchadi dannykh o vodosoderzhanii snezhnogo pokrova [On the errors of averaging over the area of data on the water content of the snow cover]. *Trudy Gidrometeorologicheskii nauchno-issledovatel'skii tsentr SSSR. Vypusk 113. Raschet i prognoz stoka rek [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the USSR. Issue 72. Calculation and forecast of river runoff]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1973, pp. 65–75. (In Russian).

Cline D.W., Bales R.C., Dozier J. Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. *Water Resources Research*, 1998, vol. 34, iss. 5, pp. 1275–1285. DOI: 10.1029/97WR03755.

Gandin L.S., Kagan R.L. O tochnosti opredeleniya srednei vysoty snezhnogo pokrova po diskretnym dannym [On the accuracy of determining the average height of snow cover from discrete data]. In: Metodika meteorologicheskikh nablyudenii (snegomernye nablyudeniya) [Methods of (snow meteorological observations measurements)]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1962, pp. 3–10. (In Russian).

Processes. 1992. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 99–109. DOI: 10.1002/hyp.3360060109.

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.

Bruno R., Raspa G. Geostatistical characterization of fractal models of surfaces // Proceedings of the Third International Geostatistics Congress (September 5–9, 1988, Avignon, France) / Armstrong M. (Ed.) Kluwer Academic Publishers, 1989. Pp. 77–89. DOI: 10.1007/978-94-015-6844-9_5. Burrough P.A. Multiscale sources of spatial variation of in soil. I: The application of fractal concept to nested levels of soil variation // Journal of Soil Science. 1983. Vol. 34. Iss. 3. Pp. 577–597. DOI: 10.1111/J.1365-2389.1983.TB01057.X.

Cline D.W., Bales R.C., Dozier J. Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling // Water Resources Research. 1998. Vol. 34. Iss. 5. Pp. 1275–1285. DOI: 10.1029/97WR03755.

Georgakakos A.P., Kitanidis P., Loaiciga H., Rouhani S., Olea R. Yates S. Review of Geostatistics in Geohydrology. I: Basic Concepts // Journal of Hydraulic Engineering. 1990. Vol. 116. Iss. 5. Pp.612–658. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:5(612).

Gottschalk L., Jutman T. Statistical analysis of snow survey data // SMHI Report SMHI Rapporter «Hydrologi och Oceanografi» No. RHO-20. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, 1979. 41 p.

Journel A.G., *Huijbregts C.J.* Mining Geostatistics. London: Academic Press, 1978. 600 p.

Killingtveit Å, Sand K. On areal distribution of snowcover in a mountainous area // Proceedings of the Northern Hydrology Symposium (10–12 July 1990, Saskatoon, Saskatchewan) «Northern hydrology: selected perspectives» / Prowse T.D., Ommanney C.S.L. (eds.). Saskatoon: National Hydrology Research Centre, 1991, pp. 189–204.

Kuchment L.S., Gelfan A.N. Statistical selfsimilarity of spatial variations of snow cover: verification of the hypothesis and application in the Gelfan A.N., Moreydo V.M. Opisanie makromasshtabnoi struktury polya snezhnogo pokrova ravninnoi territorii s pomoshch'yu dinamiko-stokhasticheskoi modeli formirovaniya [Describing macro-scale structure of the snow cover by a dynamic-stochastic model]. Led i sneg [Ice and snow (Russia)], 2015, vol.55, iss. 4, pp. 61–72. DOI: <u>10.15356/2076-6734-2015-4-61-72</u>. (In Russian; abstract in English).

Georgakakos A.P., Kitanidis P., Loaiciga H., Rouhani S., Olea R. Yates S. Review of Geostatistics in Geohydrology. I: Basic Concepts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, vol. 116, iss. 5, pp.612–658. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:5(612).

Gottschalk L., Jutman T. Statistical analysis of snow survey data. *SMHI Report SMHI Rapporter «Hydrologi och Oceanografi» No. RHO-20.* Norrköping, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, 1979. 41 p.

Journel A.G., Huijbregts C.J. *Mining Geostatistics*. London, Publ. Academic Press, 1978. 600 p.

Kagan R.L. Osrednenie meteorologicheskikh polei [Averaging of meteorological fields]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1979. 213 p. (In Russian; abstract in English).

Killingtveit Å, Sand K. On areal distribution of snowcover in a mountainous area. In: Prowse T.D., Ommanney C.S.L. (eds.) *Proceedings of the Northern Hydrology Symposium (10–12 July 1990, Saskatoon, Saskatchewan) «Northern hydrology: selected perspectives»*. Saskatoon, Publ. National Hydrology Research Centre, 1991, pp. 189–204.

Kuchment L.S., Gelfan A.N. Statistical self-similarity of spatial snow accumulation variations and its application to snowmelt runoff models. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, iss. 7, pp. 53–60. (Russ. ed.: Kuchment L.S., Gel'fan A.N. Statisticheskoe samopodobie prostranstvennykh izmenenii snegozapasov i ego primenenie pri modelirovanii talogo stoka. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, iss. 6, pp. 80–90).

Kuchment L.S., Gelfan A.N. Statistical self-similarity of spatial variations of snow cover: verification of the hypothesis and application in the snowmelt runoff generation models. *Hydrological*

snowmelt runoff generation models // Hydrological Processes. 2001. Vol. 15. Iss. 18. Pp. 3343–3355. DOI: 10.1002/HYP.1032.

Kuchment L.S., Gelfan A.N. Estimation of extreme flood characteristics using physically based models of runoff generation and stochastic meteorological inputs // Water International. 2002. Vol. 27. Iss. 1. Pp. 77–86. DOI: 10.1080/02508060208686980.

Lovejoy S, Mandelbrot B.B. Fractal properties of rain, and a fractal model. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 1985. Vol. 37. Iss. 3. Pp. 209–232. DOI: 10.3402/TELLUSA.V37I3.11668.

Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. San Francisco: Freeman, 1982. 460 p.

Mark D.M., Aronson P.B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping // Journal of the International Association for Mathematical Geology. 1984. Vol. 16. Iss. 7. Pp.671–683. DOI: 10.1007/BF01033029.

Meijerink A.M.J., De Brouwer H.A.M., Mannaerts C.M., Valenzuela C.R. Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology // UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publication No. 23. Enschede: ITC, 1994, 243 pp.

Pomeroy J.W., Gray D.M. Snowcover accumulation, relocation and management // NHRI. Science Report No. 7. Saskatoon: National Hydrology Research Centre, 1995. 135 p.

Rozenthal W., Dozier J. Automated mapping of Montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper // Water Resources Research. 1996. Vol. 32. Iss. 1. Pp. 115–130. DOI: 10.1029/95WR02718.

Shook K., Gray D.M. Small-scale spatial structure of shallow snowcovers // Hydrological Processes. 1996. Vol. 10. Iss. 10. Pp. 1283–1292. DOI: 10.1002/(SICI)1099-

<u>1085(199610)10:10<1283::AID-</u> <u>HYP460>3.0.CO;2-M</u>. *Processes*, 2001, vol. 15, iss. 18, pp. 3343–3355. DOI: 10.1002/HYP.1032.

Kuchment L.S., Gelfan A.N. Estimation of extreme flood characteristics using physically based models of runoff generation and stochastic meteorological inputs. *Water International*, 2002, vol. 27, iss. 1, pp. 77–86. DOI: 10.1080/02508060208686980.

Kuchment L.S., Gel'fan A.N., Demidov V.N. A model of runoff formation on watersheds in the permafrost zone: case study of the upper Kolyma river. *Water Resources*, 2020, vol. 27, iss. 4, pp. 392–400. (Russ. ed.: Kuchment L.S., Gel'fan A.N., Demidov V.N. Model' formirovaniya stoka na vodosborakh zony mnogoletnei merzloty (na primere verkhnei Kolymy). *Vodnye resursy*, 2000, vol. 27, iss. 4, pp. 435–444).

Laikhtman D.L., Kagan R.L. Nekotorye voprosy ratsionalizatsii snegos"emok [Some questions of rationalization of snow surveys]. In: *Metodika meteorologicheskikh nablyudenii [Methods of meteorological observations]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1960, pp. 3–18. (In Russian).

Lovejoy S, Mandelbrot B.B. Fractal properties of rain, and a fractal model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1985, vol. 37, iss. 3, pp. 209–232. DOI: 10.3402/TELLUSA.V37I3.11668.

Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*. San Francisco, Publ. Freeman, 1982. 460 p.

Mark D.M., Aronson P.B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1984, vol. 16, iss. 7, pp. 671–683. DOI: 10.1007/BF01033029.

Matheron G. Traité de géostatistique appliquée. Paris, Éditions Technip, 1962. 650 p. (Russ. ed.: Materon Zh. Osnovy prikladnoi geostatistiki. Moscow, Mir Publ., 1968. 407 p).

Meijerink A.M.J., De Brouwer H.A.M., Mannaerts C.M., Valenzuela C.R. Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. *UNESCO*, *International Hydrology*

Programme and ITC publication No. 23. Enschede, Publ. ITC, 1994, 243 pp.

Motovilov Yu.G. Modelirovanie snezhnogo pokrova i snegotayaniya [Simulation of snow cover and snow melting]. In: L.S. Kuchment, E.L. Muzylev (eds.) *Modelirovanie gidrologicheskogo tsikla rechnykh vodosborov [Modeling of the hydrological cycle of river catchments]*. Moscow, Publ. of NGK RAN, 1993, pp. 9–37. (In Russian).

Pomeroy J.W., Gray D.M. Snowcover accumulation, relocation and management. *NHRI. Science Report No.* 7. Saskatoon, Publ. National Hydrology Research Centre, 1995. 135 p.

Rozenthal W., Dozier J. Automated mapping of Montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resources Research*, 1996, vol. 32, iss. 1, pp. 115–130. DOI: 10.1029/95WR02718.

Shook K., Gray D.M. Small-scale spatial structure of shallow snowcovers. *Hydrological Processes*, 1996, vol. 10, iss. 10, pp. 1283–1292. DOI: 10.1002/(SICI)1099-

1085(199610)10:10<1283::AID-HYP460>3.0.CO;2-M.

Shutov V.A. Raspredelenie zapasov vody v snezhnom pokrove na vodosborakh lesnoi zony [Distribution of water reserves in the snow cover on the catchments of the forest zone]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and hydrology]*, 1994, iss. 9, pp. 85–92. (In Russian).

УДК 556.166.4:627.512

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ 2005 ГОДА В БАССЕЙНЕ РЕКИ КАМЫ

А.Л. Ветров¹, А.А. Тиунов^{2,3}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия; ²ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия; ³Горный институт Уральского отделения Российской академии наук— филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия vetrov@psu.ru

Аннотация. Глобальное потепление климата увеличивает общее влагосодержание атмосферы, создает благоприятные условия формирования интенсивных обложных осадков и ливней. Современные системы предупреждения о паводках все еще недостаточно эффективны, особенно местах редкой сетью метеорологических наблюдений. Математические атмосферы, модели построенные уравнениях на полных гидродинамики, позволяют c достаточной заблаговременностью рассчитать интенсивность осадков с высокой детализацией. В данной работе изучен вопрос объединения региональной негидростатической модели атмосферы Weather Research and Forecasting Model (динамическое ядро Advanced Research) с гидрологической моделью RiverFlow 2 Dimension Graphics Processing Unit с целью оценки точности воспроизведения дождевых паводков 23 и 24 июня 2005 года на двух реках Уральского Прикамья: реке Усьве и реке Обве. Подъем уровней воды В реках был обусловлен конвективными и обложными осадками на системах глубокого фронтальных отонжо циклона. В отдельных пунктах наблюдения выпало до 50 мм осадков за период в 12 часов. На первом этапе исследования были получены

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.250

FLOOD SIMULATION IN THE KAMA RIVER BASIN 2005

Andrey L. Vetrov¹, Aleksei A. Tiunov^{2,3}

¹Perm State University, Perm, Russia

²Kama branch of FSBI Russian Research Institute
for the Integrated Use and Protection of Water
Resources, Perm, Russia

³Mining Institute of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences – a branch of the Federal State
Budgetary Institution of Science of the Perm Federal
Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, Perm, Russia

vetrov@psu.ru

Abstract. Climate warming is causing an increase in the total moisture content on the planet and in the number of heavy rainfall cases. Modern flood warning systems are still not effective enough, especially in places with a sparse network of meteorological observations. Mathematical models of the atmosphere based on complete equations of hydrodynamics allow us to calculate the intensity of precipitation with high detail with sufficient advance. This paper examines the issue of combining a regional atmospheric model WRF-ARW with a hydrological model for RiverFlow 2D GPU size in order to assess the accuracy of reproduction of rain floods on two rivers of the Ural Kama region: Usva and Obva on June 23-24, 2005. The rise of water levels in the rivers was caused by convective and frontal precipitation on the frontal systems of a deep southern cyclone. In some observation points, up to 50 mm of precipitation fell during the period of 12 hours. At the first stage of the study, model precipitation fields were obtained in nodes of a regular grid with a step of 3 km. The simulation was performed under the condition of non-hydrostatic approximation and direct (without parameterization) simulation of convection on the calculated grid. Then the procedure of preliminary assimilation of precipitation by the hydrological model was carried out. For a mountainous, an underestimation of flood

модельные поля осадков в узлах регулярной сетки с шагом 3 км. Моделирование выполнялось при условии негидростатического приближения и прямого (без параметризаций) моделирование конвекции на расчетной сетке. Затем была проведена процедура предварительного усвоения осадков гидрологической моделью. Для горной территории обнаружено занижение расходов воды в паводок по сравнению с фактическими данными. Для водосбора реки Обвы выявлено завышение максимальных расходов воды по сравнению с фактическими данными. Для увеличения точности прогноза максимальных требуется учесть уровней воды процессы испарения инфильтрации период, предшествующий развитию паводка. Полученные результаты могут учитываться при подготовке прогнозов возникновения сильных дождей, разработке технологий прогноза паводков.

Ключевые слова: паводки; моделирование; сильный дождь; WRF_ARW; численная гидрологическая модель; RiverFlow 2D GPU.

Введение

Современные гидрологические исследования использовании строятся на численных гидрологических моделей. В ряде работ [Беликов и др., 2020; Васильева и др., 2021] предложено сочетание численного моделирования быстроразвивающихся дождевых паводков в горных районах на двух моделях: STREAM 2D CUDA, основанной на численном решении уравнений мелкой воды в двухмерной оригинальному (плановой) постановке по KW-GIUH-модели алгоритму, геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанной уравнении Кроме кинематической волны. этого, Черноморского побережья Кавказа предложена физико-статистическая модель формирования талого и дождевого стока для шести водосборов [Христофоров, Юмина, Белякова, 2015]. Итогом исследования стала система краткосрочного water consumption was found in comparison with the actual data. For the Obva River catchment, an overestimation of the maximum costs compared to the actual costs was revealed. To increase the accuracy of the forecast of maximum levels, it is necessary to take into account the processes of evaporation and infiltration for the period preceding the development of the flood. The results obtained can be taken into account when preparing forecasts of heavy rains occurrence and when developing flood forecast techniques.

Keywords: floods; simulation; heavy rain; WRF-ARW; numerical hydrological model; RiverFlow 2D GPU.

прогнозирования расходов и уровней воды для предупреждения наводнений стокового происхождения.

Среди существующих в настоящее время информационно-моделирующих систем следует особо отметить разработку «Европейской системы информирования о наводнениях» (European Flood Awareness System, EFAS), которая предназначена для прогнозирования наводнений в речных бассейнах Европы [Smith et al., 2016].

В целом, несмотря на обширный набор гидрологических моделей паводков, исследователями мало уделяется внимания возможностям использовать прогностические данные региональных моделей атмосферы для увеличения точности и заблаговременности прогноза. Цель данного исследования – провести оценку качества двойного моделирования развития паводков: в атмосфере и на водосборе.

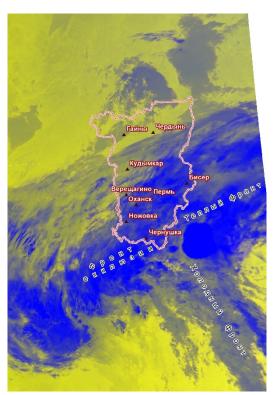


Рисунок 1. Спутниковый снимок облачности над Уральским Прикамьем 21 июня 2005 года в 17:35 ВСВ. Снимок с сайта «База данных опасных явлений погоды Пермского края» (http://accidentbase.maps.psu.ru/accidentinfo.php?id=669).

Figure 1. Satellite image of cloud cover over the Ural Prikamye on June 21, 2005 at 17:35 UTC. The picture was taken from the website Database of dangerous weather phenomena of the Perm Territory (http://accidentbase.maps.psu.ru/accidentinfo.php?id=669).

Таблица 1. Оценка качества прогноза осадков моделью WRF-ARW. **Table 1.** Assessment of the quality of precipitation forecast by the WRF-ARW model.

№ п/п	Метеостанция/Агропост	Наблюдение (12 ч)	Прогноз	
1	Чайковский	55,8	14,5	
2	Ножовка	33,2	50,1	
3	Оханск	30,0	14,1	
4	Бисер	35,6	30	
5	Пермь	46,7	18,3	
6	Калинино	38,2	19,2	
7	Кудымкар	1,0	10,9	
8	Чердынь	0,0	0,0	
9	Гайны	0,3	0,1	

Материалы и методы исследования

Для исследования были выбраны летние дождевые паводки 23–24 июня 2005 года на реках Уральского Прикамья. Их причиной были сильные осадки в ночь с 21 на 22 июня 2005 года

из-за глубокого южного циклона с атмосферным давлением в центре 994 гПа (давление приведено к уровню моря). Циклон находился в стадии окклюдирования и на бассейн реки Камы оказывал влияние интенсивный фронт окклюзии рисунок 1.

Осадки с интенсивностью более 50 мм за 12 часов (таблица 1) спровоцировали паводки на многих реках бассейна реки Камы, в том числе на реке Обве и реке Усьве.

Физико-географические условия Уральского Прикамья неоднородны: ландшафты переходят от равнины к горам, распаханные территории сочетаются c таежными смешанными лесами. Наиболее типичны умеренно-расчлененные, холмисто-увалистые ландшафты и низкогорные ландшафты Среднего Урала. Представляет интерес сравнение развития паводков на водосборах разного характера при общем синоптическом контексте формируемых осадков.

Иньвенско-Река Обва находится В Обвинском гидрологическом округе правобережья реки Камы. Основная покатость ландшафта с запада на восток, от увалов Верхнекамской возвышенности к долине реки Рельеф умеренно-расчлененный. Камы. В исследовании рассматривалась только водосбора реки до гидрологического Карагай. Средний уклон реки в пределах водосбора 0,5‰, лесистость 58%. Исследуемый водосбор реки покрыт лесами южнотаежного типа с преобладанием ели, пихты, липы, с мелколиственными породами на гарях и вырубках. Средняя высота водосбора – 200 м.

Река Усьва в гидрологическом отношении — река Уральской горной страны и Западно-Уральского горного округа. Река протекает по уральскому низкогорью в межгорной котловине. В исследовании рассматривалась только часть водосбора реки до гидрологического поста Усьва. Средний уклон реки — 1,4‰. Площадь водосбора покрыта типичной горной тайгой (елово-пихтовая с примесью лиственницы и кедра), лесистость — 83%. Средняя высота водосбора — 456 м.

Для моделирования полей осадков использовался программный комплекс WRF (версия 3.9.1.1) с динамическим ядром ARW, установленный на суперкомпьютере «ПГНИУ-Кеплер». Для получения начальных и граничных условий использовались данные реанализа NCEP-GFS и NCEP-CFS (США), представленные в коде GRIB-2. При этом технические возможности суперкомпьютера позволяли реализовать негидростатическое приближение и прямое (без параметризаций) моделирование конвекции на расчетной сетке с шагом 3,0 км. Счет модели проводился с продолжительностью 27 ч, начиная с 00 ч ВСВ.

Для автоматического получения, обработки и визуализации выходных данных модели WRF применялись специально разработанные скрипты для операционной системы Linux и программного комплекса OpenGrADS. Обработка выходных проводилась С использованием данных геоинформационной системы QGIS. Точность восстановления полей осадков по модельным путем данным оценивалась сопоставления расчетного количества осадков с фактически наблюдавшимся на метеостанциях.

Расчет расходов воды проводили использованием гидрологической И гидравлической модели в среде RiverFlow 2D GPU ¹ . Для исследования применялась треугольная нерегулярная сетка со средней длиной ребра – 30 м. Цифровая модель рельефа водосборов рек Обвы и Усьвы строилась на топографических карт масштаба 1:100 000, которые есть в свободном доступе. Карты были подвергнуты оцифровке и обработке в географической информационной системе ArcMap.

¹ Reference Manual «RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model» August, 2016, Hydronia LLC. URL: http://www.hydronia.com (дата обращения: 04.09.2021).

Таблица 2. Характеристики модели RiverFlow 2D GPU для разных водосборов. **Table 2.** Characteristics of the RiverFlow 2D GPU model for different watersheds.

Параметры модели	река Обва	река Усьва
Количество элементов сетки	9 513 312	5 014 200
Число узлов сетки	4 763 605	2 512 806

Подготовка цифровой модели рельефа и разграничение водосборного бассейна Усьвы реки Обвы проведения для гидрологических расчетов производилась приложении ArcMAP 10.4 с помощью группы инструментов «Гидрология» набора инструментов Spatial Analyst с использованием трехмерных снимков SRTM (Shuttle topography mission), полученных на сайте SRTM Data – CGIAR-CSI SRTM². В нашем случае это был файл растровых данных размерами 5х5 градусов «srtm 48 01.tif» в географической системе координат WGS-84.

По водосборному бассейну реки Усьвы площадь моделируемой земной поверхности на местности составила 2 230 км², изменение по высоте от 196,5 до 1 094,1 м БС. По водосборному бассейну реки Обвы площадь моделируемой земной поверхности на местности составила 4 280 км², изменение по высоте от 120,0 до 330,7 м БС. Дополнительные характеристики приведены в таблице 2.

Результаты и их обсуждение

Для моделирования внезапного паводка были использованы данные WRF-ARW о количестве осадков за 12 часов (с 15 часов ВСВ 21 июня до 03 часов ВСВ 22 июня 2005 года). Распределение осадков было принято неравномерным по всей площади бассейна (рисунки 2, 3).

На представленных рисунках видно, что области максимальных осадков располагались юго-восточнее, в случае водосбора реки Усьвы, и зона с максимальными осадками от 25 до 30 мм за 12 часов затронула только крайний восток бассейна. В целом водосбор попал воздействие ливневых осадков с интенсивностью от 15 до 30 мм за 12 часов. Достоверность такой картины распределения осадков подтверждается данными наблюдениями на метеостанции Губаха. Здесь за 12 часов выпало менее 30 мм осадков. Спутниковый снимок облачности. представленный на рисунке 1, подтверждает прогностическое распределение осадков.

Иная ситуация сложилась на водосборе реки Обвы. Максимальная зона осадков охватила центральные и южные районы водосбора. Практически треть водосборной площади попало под проливной ливень интенсивностью 30 мм за 12 Менее часов. значимые осадки интенсивностью 10 мм за 12 часов прошли на севере водосбора. По данным метеостанции Верещагино выпало 56,9 мм за 24 часа. Можно предположить, что большая часть осадков выпала в ночь между 21 и 22 июня 2005 года. Удовлетворительное соответствие прогностических модельных данных и данных наблюдений можно также обнаружить в ранее представленной таблице 1. Для таких сложных для прогнозирования процессов средняя абсолютная ошибка составила 21 мм.

² Download Manager [Электронный ресурс] // SRTM Data – CGIAR-CSI SRTM. URL: https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/ (дата обращения: 04.09.2021)

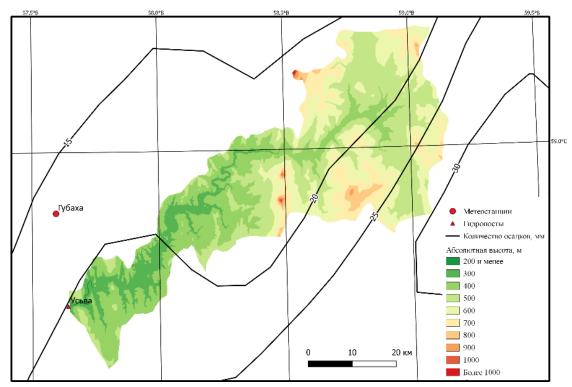


Рисунок 2. Водосбор реки Усьвы и прогностические изогиеты по данным модели WRF-ARW на 22 июня 2005 года 03 часа BCB.

Figure 2. The catchment of the Usva River and prognostic isohyets based on the WRF-ARW model data for June 22, 2005 03:00 UTC

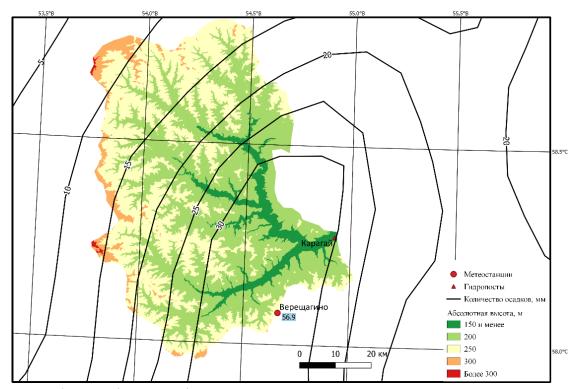


Рисунок 3. Водосбор реки Обва и прогностические изогиеты по данным модели WRF-ARW на 22 июня 2005 года 03 часа BCB.

Figure 3. The catchment of the Obva River and prognostic isohyets based on the WRF-ARW model data for June 22, 2005 at 03:00 UTC.

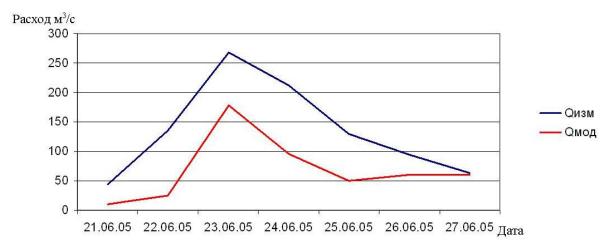


Рисунок 4. Расчетный гидрограф расхода воды ($Q_{\text{мод}}$) по створу гидрологического поста Усьва и данные наблюдений ($Q_{\text{изм}}$).

Figure 4. Calculated hydrograph of water discharge (Q_{MOJI}) of the Usva hydrological station and observation data (Q_{HSM}).

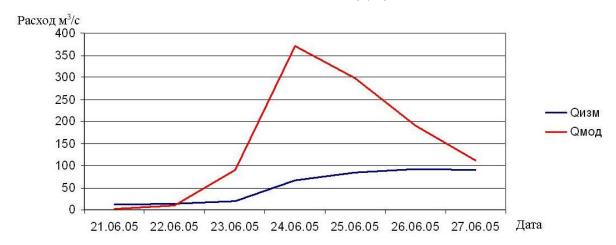


Рисунок 5. Расчетный гидрограф расхода воды ($Q_{\text{мод}}$) по створу гидрологического поста Карагай и данные наблюдений ($Q_{\text{изм}}$).

Figure 5. Calculated hydrograph of water discharge (Q_{MOZ}) of the Karagai hydrological station and observation data (Q_{MSM}) .

На следующем этапе ставилась задача моделирования сбора выпавших осадков по площади водосбора и моделирование движения паводочной волны по руслу рек. На нижней границе модели по створу гидрологических постов Усьва и Карагай ставилось условие свободного вытекания воды. При моделировании стока испарение и инфильтрация почвы не учитывались. В результате расчета получены гидрографы расходов воды по створам гидрологических постов Усьва и Карагай (рисунки 4, 5).

В целом для гидрографа по створу гидрологического поста Усьва можно заключить, что модельные данные точно воспроизводят время наступления пика паводка, но значительно занижают его интенсивность. Расчетный среднесуточный расход воды на пике составил 178 м³/с на 23 июня 2005 года, что на 43% меньше измеренного расхода воды по данным сайта «Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России»³. Для повышения точности расчетов в данном случае требуется учесть предыдущие и последующие

³ Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России [Электронный ресурс] // ГИС-портал Центра Регистра и Кадастра. URL: http://gis.vodinfo.ru/ (дата обращения: 04.09.2021).

ливни на территории водосбора. Кроме того, требуется уточнение коэффициента шероховатости русла реки. Так, в работе [Виноградов и др., 2019] отмечается важность корректной оценки этого параметра.

Обратная ситуация сложилась при моделировании паводка на водосборе реки Обвы (рисунок 5). Несмотря на малые уклоны по исследуемому водосбору, расчетные паводочные расходы воды значительно превысили фактически Расчетный измеренные. среднесуточный расход воды на пике составил 369,7 м³/с на 23 июня 2005 года, а реальный наблюдался 26 июня 2005 года и был в четыре раза меньше -91,2 м $^{3}/с$. Игнорирование в модели перехвата осадков инфильтрации растительностью привело к большой ошибке прогноза и чрезмерной быстроте формирования и движения паводочной волны. В будущем для рассматриваемого водосбора необходимо уточнить типы землепользования и учесть задерживающие и инфильтрующие способности водосбора, что позволит сгладить модельный пик паводка и растянуть его длительность.

Благодарности

Авторы благодарят Сергея Владимировича Костарева за помощь при подготовке рисунков. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596031.

Литература

Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С., Белякова П.А. Новый подход к численному моделированию быстроформирующихся паводков на горных водосборах // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: познания мировоззрению» (г. Санкт-Петербург, 23 - 31октября 2020 года). СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 35-40.

Васильева Е.С., Белякова П.А., Алексюк А.И., Селезнева Н.В., Беликов В.В. Моделирование быстроразвивающихся паводков на малых реках

Выводы

В ходе исследования установлено:

- использование региональной модели атмосферы WRF-ARW позволяет уточнить информацию о характере распределения осадков значительной интенсивности.
- совместное использование региональной модели атмосферы WRF-ARW и гидрологической RiverFlow 2D GPU в целом дает удовлетворительные результаты по расчету величины паводка для водосборов с разными физико-географическими условиями.

При дальнейшей настройке моделей требуется учесть неравномерность по времени выпадения количества осадков на водосборном бассейне, инфильтрацию и коэффициент шероховатости водотока рек. Важным моментом является учет дополнительных случаев осадков, выпавших после начала формирования паводка, что потребует увеличить заблаговременность прогноза по численной модели атмосферы.

Acknowledgments

The authors are grateful to Sergei Vladimirovich Kostarev for his help in preparing the figures. The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 20-45-596031.

References

Belikov V.V., Aleksyuk A.I., Vasil'eva E.S., Belyakova P.A. Novyi podkhod k chislennomu modelirovaniyu bystroformiruyushchikhsya pavodkov na gornykh vodosborakh [A new approach to numerical modeling of rapidly forming floods in mountain catchments]. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova «Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya: poznaniya k mirovozzreniyu» (g. Sankt-Peterburg, 23-31 oktyabrya 2020 goda) [Proceedings of international scientific conference in memory of outstanding Russian scientist Yury Vinogradov

Северного Кавказа с использованием современных данных автоматизированной гидрометеорологической сети // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 135–146. DOI: 10.31857/80321059621020164.

Виноградов А.Ю., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кадацкая М.М. Оценка значения коэффициента шероховатости // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 4. С. 462–476. DOI: 10.34753/HS.2019.1.4.462.

Христофоров А.В., Юмина Н.М., Белякова П.А. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 50–57.

Smith P.J., Pappenberger F., Wetterhall F., del Pozo J.T., Krzeminski B., Salamon P., Muraro D., Kalas M., Baugh C. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) // Flood Forecasting: A Global Perspective / T.E. Adams, T.C. Pagano (eds.). Elsevier Inc., 2016. Pp. 313–348. DOI: 10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6.

«Fourth Vinogradov Conference «Hydrology: from Learning to Worldview» (St. Petersburg, Russia, October 23–31, 2020]. St. Petersburg, Publ. VVM, 2020, pp. 35–40. (In Russian; abstract in English). Khristoforov A.V., Yumina N.M., Belyakova P.A. Prognoz pavodkovogo stoka rek Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza s zablagovremennost'yu odni sutki [A one-day lead time flood forecast for rivers of the Black sea coast of the Caucasus]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography], 2015, iss. 3, pp. 50–57. (In Russian; abstract in English).

Smith P.J., Pappenberger F., Wetterhall F., del Pozo J.T., Krzeminski B., Salamon P., Muraro D., Kalas M., Baugh C. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) In: Adams T.E., Pagano T.C. (eds.) *Flood Forecasting: A Global Perspective*. Elsevier Inc., 2016, pp. 313–348. DOI: 10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6.

Vasil'eva E.S., Belyakova P.A., Aleksyuk A.I., Belikov V.V., Selezneva N.V. Simulating flash floods in small rivers of the Northern Caucasus with the use of data of automated hydrometeorological network. Water resources, 2021, vol. 48, iss. 2, pp. 182–193. DOI: 10.1134/S0097807821020160. (Russ. ed.: Vasil'eva E.S., Belyakova P.A., Aleksyuk A.I., Selezneva N.V., Belikov V.V. Modelirovanie bystrorazvivayushchikhsya pavodkov na malykh rekakh Severnogo Kavkaza s sovremennykh ispol'zovaniem dannykh avtomatizirovannoi gidrometeorologicheskoi seti. Vodnye resursy, 2021, vol. 48, iss. 2, pp. 135–146. DOI: 10.31857/S0321059621020164.)

Vinogradov A.Yu., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Kadatskaya M.M. Otsenka znacheniya koeffitsienta sherokhovatosti [Assessment of roughness coefficient value]. Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena], 2019, vol. 1, pp. 462–476. iss. DOI: 10.34753/HS.2019.1.4.462. (In Russian; abstract in English).

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.259

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ISSUES OF IMPROVING REGULATORY DOCUMENTATION

УДК 556, 502.05, 630*3

ESTIMATION OF THE POSSIBILITY OF USING SP 33-101-2003 FOR CALCULATION OF THE MAXIMUM RUNOFF ON THE **EXAMPLE OF THE WATER BALANCE STATION**

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СП 33-101-2003 ДЛЯ РАСЧЁТОВ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА НА ПРИМЕРЕ ВОДНОБАЛАНСОВОЙ СТАНЦИИ МЕЖДУРЕЧЬЕ

А.Ю. Виноградов^{1,2}, А.Ф. Шакиров¹, Е.А. Парфенов¹, О.В. Зубова², И.А. Виноградов¹

 ^{1}OOO НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; ²ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург,

Россия.

gd@npogtp.ru

Аннотация. Достоверное определение основных расчётных гидрологических характеристик территории процессе инженерных изысканий и проектирования на сегодняшний день сопряжено co многими проблемами. Олна ИЗ таких проблем: противоречивость несовершенство И законодательной и нормативной документации, на основании которой осуществляются данные расчёты. Другая проблема: отсутствие актуальной гидрологической информации и неудовлетворительная точность данных мониторинга. Расчёты выполняются на основании характеристик наблюдений И прошлого века, зачастую отражающих современное состояние подстилающей поверхности. Сопоставление и анализ различных методических подходов и их сравнение с реальными характеристиками даётся В настоящей статье на примере открытой в 2014 году ООО НПО «Гидротехпроект» на

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2}, Amir F. Shakirov¹, Evgeniy A. Parfenov¹, Oksana V. Zubova², Ivan A. Vinogradov¹ ¹Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; ²Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia.

MEZDURECHE

gd@npogtp.ru

Abstract. Reliable determination of the main calculated hydrological characteristics of the territory in the process of engineering surveys and design today is associated with many problems. One of such problems is the imperfection and inconsistency of the legislative and regulatory documentation on the basis of which these calculations are carried out. Another problem is the lack of up-to-date hydrological information and unsatisfactory accuracy of monitoring Calculations are performed based characteristics and observations of the last century, which often do not reflect the current state of the underlying surface. Comparison and analysis of various methodological approaches and their comparison with real characteristics is given in this article on the example of the Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt opened in 2014 on the border of the Valdai and Smolensk-Moscow hills of the water balance station "Mezhdurechye". Active economic activity (or vice

Виноградов А.Ю., Шакиров А.Ф., Парфенов Е.А., Зубова О.В., Виноградов И.А. Оценка возможности использования СП 33-101-2003 для расчётов максимального стока на примере воднобалансовой станции Междуречье // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. Вып. 3. С. 259-274. DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.259.

границе Валдайской и Смоленско-Московской возвышенностей водно-балансовой «Междуречье». Активная хозяйственная деятельность (или наоборот её прекращение) значительное влияние оказывает гидрологические характеристики территорий и требует учёта при выполнении расчётов. Климатические изменения не учитываются при использовании расчётах материалов наблюдений выполненных более 50 лет назад. В настоящей статье оценены изменения характеристик водосборов за последние 100 лет крупномасштабным картографическим материалам и проанализировано влияние этих изменений на расчёты максимального стока по используемым методикам и реальным данным водно-балансовой станции. Также была оценена правомерность общепринятых методических подходов использования понятия «гидрологической аналогии» при расчётах стока Ha лесной зоны. основании рек проведённых наблюдений и расчётов делается вывод о неправомерности выбора бассейнааналога ПО критериям, прописанным регламентирующих документах. Полученные расчётные значения по используемым методикам могут на порядки расходиться с реальными значениями, что недопустимо к применению в проектировании и расчёте сооружений и требует выработки более адекватных подходов к данным расчётам, учитывающих происходящие ландшафтные и гидрографические изменения на территории, в том числе и на протяжении периода эксплуатации строящихся сооружений.

Ключевые слова: водно-балансовые станции; малые реки; меженный сток; паводковый сток; подстилающая поверхность; физико-географические факторы.

Введение

Комплексные исследования бассейнов малых водотоков в последние десятилетия практически полностью приостановлены. На сегодняшний день можно констатировать серьёзный разрыв между теоретическими

versa, its termination) has a significant impact on the hydrological characteristics of territories requires consideration when performing calculations. Climate changes are not taken into account when using observations made more than 50 years ago in calculations. This article evaluates changes in watershed characteristics over the past 100 years based on large-scale cartographic materials and analyzes the impact of these changes on the calculations of maximum runoff using the methods used and real data of the water balance station. The validity of generally accepted methodological approaches and the use of the concept of "hydrological analogy" in calculating the flow of small rivers of the forest zone was also evaluated. Based on the observations and calculations carried out, a conclusion is made about the illegality of choosing an analog pool according to the criteria prescribed in the regulatory documents. The calculated values obtained according to the methods used may differ by orders of magnitude from the actual values, which is unacceptable for use in the design and calculation of structures and requires the development of more adequate approaches to these calculations, taking into account the landscape and hydrographic changes taking place on the territory, including during the period of operation of structures under construction.

Keywords: water-balance stations; small rivers; low-water flow; flood flow; underlying surface; physical and geographical factors.

достижениями в области гидроэкологического моделирования и стационарными наблюдениями за процессами формирования стока и изменениями его составных частей. Один из видов такого мониторинга — наблюдения на водно-балансовых станциях.

Vinogradov A.Yu., Shakirov A.F., Parfenov E.A., Zubova O.V., Vinogradov I.A. Estimation of the possibility of using SP 33-101-2003 for calculation of the maximum runoff on the example of the water balance station Mezdureche. *Hydrosphere*. *Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 259–274. DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.259.

Первые исследования водности малых рек, преимущественно для целей лесосплава, начали выполняться организациями Министерства лесного хозяйства с начала 1920-х годов. Большой размах они получили в северо-западных районах Европейской части СССР. В 1929 году с целью централизации и упорядочения стационарных исследований и наблюдений была создана единая гидрометеорологическая служба [Соколов, 1952].

На европейской части СССР в лесной зоне создаётся специализированная сеть стоковых станций, ведущих углубленные наблюдения за речным стоком, — Подмосковная (13 постов), Оксочи (8), Валдайская (43), Прибалтийская (6) и Болховская (16).

К середине 1930-х годов ставится задача создания сети станций на малых реках для изучения водного режима малых рек в процессе его формирования с учётом местных физикогеографических условий. После войны, в связи со строительством энергетики малой утверждением Программы Международного гидрологического десятилетия, утверждённой в ноябре 1964 года 13-й Генеральной конференцией ЮНЕСКО, количество постов на малых реках в одной только Новгородской области достигало образом, наблюдениями были Таким охвачены 0,01% малых рек.

В настоящее время [Фролов, 2013] в центральных областях зоны смешанных лесов Европейской части Российской Федерации количество гидрологических постов на малых реках не превышает 20. Исследования на воднобалансовых станциях практически не ведутся.

Все вновь разрабатываемые расчётные методики могут быть апробированы только на материалах старых наблюдений. Ошибки прямых наблюдений за стоком даже на малых реках, по экспертной оценке, в настоящее время достигают в период паводка 20–50%. В то же время, при текущих изменениях климата и ландшафтных характеристик — зарастании полей, замены

хвойных широколиственных лесов мелколиственные, гибели малых рек – собранной к середине 1980-х годов информации явно недостаточно [Виноградов, Смирнова, 2009; Виноградов, Салминен, 2010; Виноградов, Салминен, Чомаев, 2011; Антонова, Салминен, Виноградов, 2014]. К тому же ошибки [Виноградов, Никифоровский, 2014] при расчётах максимального стока при использовании методик расчёта, регламентируемых СП 33-101-2003 «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» 1 (далее – СП 33-101-2003), на малых неизученных реках достигают 1 000% и более [Гарцман и др., 2008; Салминен, Виноградов, 2009; Виноградов, Никифоровский, 2014; Виноградов, 2015].

Подобное состояние дел на сегодняшний день признать удовлетворительным невозможно.

Объекты

С целью продолжения изучения формирования стока малых рек, ООО НПО «Гидротехпроект» в 2013-2014 годах были открыты водно-балансовые станции (далее – ВБС) «Междуречье» и «Беленец».

В настоящей работе рассматривается ВБС «Междуречье» (рисунок 1a).

Согласно классификации Всемирной метеорологической организации ², ВБС представляет собой гидрологическую станцию для специальных целей, то есть включает в себя посты, данные по которым используются для определения водного баланса водосборов и его составляющих.

ВБС «Междуречье» создана с целью апробирования новых расчётных методик для проектирования, адаптации новых приборов и методов наблюдений; разработки новых методов гидроэкологических расчётов, в том числе методов математического моделирования; выполнения научных исследований природных процессов, проведения производственных

¹ СП 33-101-2003. Свод Правил по определению расчётных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

 $^{^2}$ ВМО №49. Технический регламент ВМО: Сборник основных документов № 2. в 4 томах. Том 3. Гидрология. Женева, Секретариат ВМО, 2006. 130 с.

практик студентов соответствующих специальностей.

ВБС «Междуречье» расположена на границе Валдайской и Смоленско-Московской возвышенностей. Местоположение станции выбрано с целью дополнительного изучения влияния крупных лесных и болотных массивов на формирование стока малых рек.

В состав ВБС «Междуречье» (с 2014 года) входит 5 постов ООО НПО «Гидротехпроект» (рисунок 1б): реки Осуга и Раменка — деревня Красное Ржевского района, реки Обша, Кремёна

и ручей Молявня – деревня Городок Оленинского района Тверской области и пост Смоленского ЦГМС на реке Днепр – село Болшево Сычевского района Смоленской области. Посты оборудованы метеоплощадками, которых ведутся на двухсрочные наблюдения за температурой воздуха и осадками. В деревне Красное оборудована метеостанция c измерениями температуры и влажности почвы и сетью гидрогеологических скважин. Далее приведены описания постов, основные характеристики водосборов даны в таблице 1.

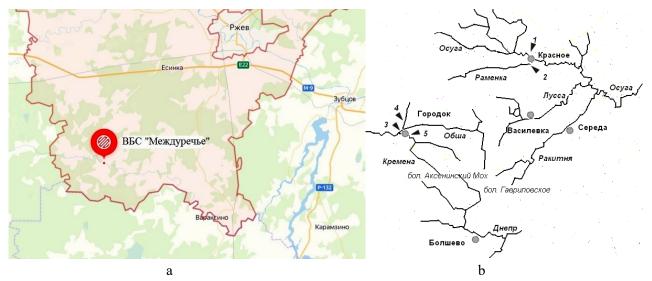


Рисунок 1. Расположение центральной базы ВБС «Междуречье»(а) и гидрометрических постов (b). **Figure 1.** Location of the central base of WBS "Mezhdurechye" (a) and hydrometric posts (b).

Река Кремёна – деревня Городок

Пост свайный, открыт 09.07.2014. Оборудован 3 металлическими сваями и одним репером. Расположен на левом берегу реки Кремёны посреди деревни Городок в 120 м ниже пешеходного моста. От поста до устья реки Кремёны около 1,3 км.

Река Кремёна – левый приток реки Обши. корытообразное, Русло реки средней извилистости, чередованием нешироких c (до 10 м) плёсов и мелких перекатов. Дно песчаное, на перекатах – галечное, в плёсах суглинистое, заиленное. Летом река зарастает водной растительностью. Берега невысокие, до 0,5 м, средней крутизны. Пойма в районе поста левобережная, шириной до 10 м, густо заросшая травой и кустарником. Долина реки V-образная, шириной по дну 50 м, по верху – около 150 м.

Коренной берег высотой 5-6 средней зарос крутизны, кустарником И ольхой. Наблюдается склоновая приточность – ключи, родники. В межень поддерживается практически неизменный уровень. Вода родниках железистая, большинство родников вытекает из склона долины на высоте примерно 1,5-2,0 м над меженным уровнем.

Река Обша – деревня Городок

Пост свайный, открыт 09.07.2014. Оборудован 5 металлическими сваями и одним репером. Расположен на левом берегу реки Обши в 30 м выше автодорожного моста дороги Оленино — Городок в 200 м на северо-запад от деревни Городок.

Река Обша — левый приток реки Межи (бассейн реки Западной Двины). Русло реки Обши в районе водомерного поста

корытообразное, средней извилистости, умеренно засорённое карчами, летом зарастает водной растительностью. Ширина русла в районе водомерного поста в межень около 8 м, глубина не превышает 10–15 см. Дно плоское, галечнопесчаное, берега средней крутизны, высотой 0,5–0,7 м, вдоль русла густо заросли ивняком. В районе створа пойма двухсторонняя, шириной до 50 м, заросшая кустарником. Долина реки V-образная, густо заросшая мелколиственным лесом. Ширина долины по дну около 50 м, по верху 150–200 м. Склоны коренного берега умеренно пологие, высотой 6–8 м.

Ручей Молявня – деревня Городок

Пост свайный, открыт 06.04.2015, расположен на правом берегу ручья, в 100 м от устья. Оборудован 2 металлическими сваями и одним репером. Ручей Молявня является правым притоком реки Обши. Место впадения – 0,8 км выше водомерного поста река Обша – деревня Городок. Русло ручья извилистое, корытообразное, умеренно засорённое карчами. В представляет собой чередование небольших плёсов и перекатов между ними. Ширина русла в районе водпоста порядка 4 м. Берега ручья крутые, высотой 0,5-0,7 м. Протекает по перелеску (ольха, единично берёза), посреди зарастающего колхозного поля. В районе поста пойма двухсторонняя, шириной около 40 м, заросшая кустарником. Дно плоское, галечное, в плёсах песчано-галечное.

Река Осуга – деревня Красное

В период с 01.01.1974 по 2001 год водомерный пост функционировал под эгидой Госкомгидромета СССР.

Наблюдения возобновлены 06.04.2015 ООО НПО «Гидротехпроект».

Водомерный пост расположен на правом берегу реки Осуги в деревне Красное, в 0,8 км выше автодорожного моста Павлюки — Горня, примерно в 65 км от устья. Оборудован 8 металлическими сваями ГМС СССР типа ПИ-20 (СВГ-47) и двумя реперами.

Река Осуга – левый приток реки Вазузы (бассейн реки Волги). Русло реки извилистое, корытообразное, в межень представляет собой

каскад заросших водной растительностью омутов и коротких мелких перекатов между ними. В районе поста русло прямое на протяжении 70 м, шириной 10–12 м. Дно плоское, галечно-песчаное, на перекатах галечное. Берега русла крутые, высотой 0,7–1,0 м. Пойма в створе поста отсутствует. Долина реки в районе поста U-образная, по дну шириной 30–50 м, по верху порядка 150 м. Левый берег долины крутой, густо заросший берёзой, ольхой и ивняком. Правый берег пологий, представляет собой зарастающее поле.

Река Раменка – деревня Красное

Пост свайный, открыт 06.04.2015. Оборудован 5 металлическими сваями и одним репером. Расположен на левом берегу реки Раменки в 100 м от устья.

Река Раменка — правый приток реки Осуги. Место впадения — 0,8 км ниже по течению от водомерного поста река Осуга — деревня Красное, в 50 м ниже автодорожного моста Павлюки — Горня. Русло реки извилистое, корытообразное, засорённое карчами, в межень зарастает травой и водной растительностью. Ширина русла в районе водпоста около 6 м. Берега реки крутые, высотой 0,5—0,7 м. В половодье может разливаться до 30—40 м. Дно реки плоское, галечно-песчаное. Пойма левосторонняя, шириной до 10 м, заросшая травой.

Долина реки выраженная, берега пологие, высотой 4–5 м, ширина по верху до 100 м.

Река Днепр – село Болшево

Пост открыт в 1936 году, действует по настоящее время и подчинён Смоленскому ЦГМС. Расположен на правом берегу реки Днепр в черте села Болшево в 300 м ниже автодорожного моста дороги Днепровское — Домашенка. Оборудован 11 металлическими сваями ГМС СССР типа ПИ-20 (СВГ-47) и двумя реперами.

Работниками ООО НПО «Гидротехпроект» проводятся регулярные измерения расхода воды, пост оборудован гидростатическим самописцем уровня воды.

Русло реки средней извилистости, долина выраженная, с пологими склонами высотой

до 8 м. Левый склон в районе водомерного поста порос густым кустарником и смешанным лесом, на правом — зарастающие огороды. Ширина долины по низу — 150—170 м. Пойма в районе поста левобережная, шириной около 50 м, заросшая кустарником. Берега крутые, высотой 1,0—1,5 м, дно плоское, песчаное, местами галечно-песчаное, в межень зарастает водной растительностью.

Нормативная документация

С 01.09.2021 и до 01.09.2027 будет действовать Постановление от 28 мая 2021 года №815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе соблюдение обеспечивается требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» ³, с признанием утратившим силу (действовало с 01.08.2020 01.09.2021) ДО постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 года №9854.

Как в Постановлении №815 (пункт 36), так и в Постановлении №985 (пункт 31) есть ссылка на СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания ДЛЯ строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96» ⁵ (далее – СП 47.13330.2016) с Изменением №1, утвержденном и введенном в действие приказом Министерства строительства жилищнокоммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 30 декабря 2020 г. №909/пр c 01.07.2021.

В указанном СП 47.13330.2016 есть глава 2, гласящая:

«Нормативные ссылки.

В настоящем своде правил использованы нормативные ссылки на следующие документы: ...СП 482.1325800.2020 Инженерногидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ...».

В свою очередь, в СП $482.1325800.2020^6$ есть пункт 5.5.6, гласящий: «факторы, которые необходимо учитывать при выборе репрезентативных гидрологических станций (постов)-аналогов, приведены в СП 33-101-2003 «Определение расчётных основных гидрологических характеристик» (одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России №218 26 декабря 2003 года).

Вроде бы все просто и понятно, но существует письмо Министерства юстиции Российской Федерации от 13 октября 2004 года N 07/9703-ЮД «О рассмотрении представленного на государственную регистрацию Федеральным агентством по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству постановления Госстроя России от 26.12.2003 0 0218 «О своде правил «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» 07, в котором указано:

«Министерство юстиции Российской Федерации рассмотрело представленное на государственную регистрацию Федеральным агентством по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (письмо от 20.09.2004

264

_

 $^{^{3}}$ Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 года №815. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/603700806.

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 года №985. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/565270059.

⁵ СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 с изменениями №1. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456045544.

⁶ СП 482.1325800.2020. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/565278461.

⁷ Министерство юстиции Российской Федерации. Письмо от 13 октября 2004 года №07/9703-ЮД «О рассмотрении представленного на государственную регистрацию Федеральным агентством по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству постановления Госстроя России от 26.12.2003 №218 «О своде правил «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/901926316.

№АП-4655) постановление Госстроя России от 26.12.2003 №218 «О своде правил «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» и сообщает, что данный документ не может быть зарегистрирован...».

Также не составляет труда найти письмо Министерства регионального развития Российской Федерации от 25 сентября 2009 года $Noline{2}31531$ -ИП/08 «О применении строительных норм и правил» 8 , где сказано:

«...Кроме того, своды правил по существу системы нормативных документов в строительстве — это документы добровольного применения. В этой связи ... СП 33-101-2003 «Определение основных расчётных гидрологических характеристик»... являются документами добровольного применения».

Итак, неожиданный вывод: в нашей стране на сегодняшний день нет юридически значимых обязательных документов, на основании которых можно было бы проводить гидрологические расчёты.

Тем не менее, эксперты Главгосэкспертизы не примут отчёт по гидрометеорологическим изысканиям, если он будет составлен по иным, не прописанным в СП 33-101-2003, методикам.

Не зацикливаясь на юридической стороне вопроса, рассмотрим в настоящей статье некоторые проблемы методик, регламентируемых СП 33-101-2003, и сравним расчёты с наблюденными данными.

Задачи

На первом этапе работ для объектов ВБС поставлены следующие научные задачи:

- 1. оценить изменения уклонов водотоков, густоты речной сети и характеристик подстилающей поверхности водосборов за последние 100 лет по крупномасштабным картографическим материалам и влияние этих изменений на расчёты максимального стока;
- 2. оценить правомерность использования методики по использованию метода

гидрологической аналогии при расчётах стока малых рек лесной зоны.

Задача 1

Согласно пункту 7.7 СП 33-101-2003, основными гидрографическими и физико-географическими факторами водосборов являются следующие:

- 1) площадь водосбора F, км²;
- 2) гидрографическая длина водотока L, км;
- 3) относительная лесистость водосбора f_n , доля общей площади водосбора (лес и кустарники на проходимых болотах в лесные угодья не включают);
- 4) средневзвешенный уклон водотока I_{ck} , ‰;
- 5) густота речной сети водосбора ρ_p , км/км², которая определяется как отношение суммарной длины всех водотоков (реки, каналы, канавы) на водосборе к общей площади водосбора;
- 6) густота русловой сети водосбора ρ_0 , км/км², которая определяется как отношение суммарной длины речных долин, сухих русел, оврагов, балок и логов к общей площади водосбора.

определения гидрографических характеристик реки и её водосбора рекомендуется пользоваться крупномасштабными картами от 1:100 000 до 1:25 000, в зависимости от площади водосбора. В нашем распоряжении имеются топографические карты 1930-х и 1980-х годов масштаба 1:50 000 и 1:100 000, с помощью которых мы опенивали изменения гидрографических И физико-географических характеристик водосборов. При подобном анализе необходимо иметь виду, инструментальные измерения высотных отметок рельефа проводились только в 1920-1930 годах и уточнялись в начале 1950-х. В последующие годы большинство корректировок на картах являются плановыми, проводимыми ПО материалам Изменения некоторых аэрофотосъемок. параметров последние десятилетия уточнениями, полученными после проведённых рекогносцировочных и топографических работ в 2015-2016 годах представлены в таблице 1.

⁸ Министерство регионального развития Российской Федерации Письмо от 25 сентября 2009 г. №31531-ип/08 «О применении строительных норм и правил» [Электронный ресурс]. URL: https://www.alppp.ru/law/hozjajstvennaja-dejatelnost/stroitelstvo/12/pismo-minregiona-rf-ot-25-09-2009--31531-ip08.html

Таблица 1. Изменения морфологических характеристик малых лесных водосборов.

Table 1. Changes in morphological characteristics of small forest watersheds.

№ п/п	Водоток	Год	Площадь водосбора	Густота речной сети	Густота русловой сети	Залесённость, доли единицы	Заболоченность, доли единицы
1	Обша	1938	216	0,4	1,3	0,81	0,03
		1986	228	0,6	1,3	0,91	0,12
2	Кремёна	1938	126	0,3	1,5	0,65	0,05
		1986	130	0,8	1,4	0,87	0,38
3	Молявня	1938	20,5	0,56	2,85	0,86	0
		1986	20,5	1,28	3,55	0,94	0,08
4	Осуга	1939	-	0,25*	1,95*	0,39*	0*
		1982	304	0,72	2,21	0,79	0,05
5	Раменка	1939	-	-	-	-	-
		1982	79	0,29	1,55	0,88	0,19
6	Днепр	1938	255	0,21	1,54	0,28	0,03
		1982	262	0,31	1,65	0,67	0,09

^{* -} данные неполные ввиду ограниченности картографического материала.

Сумма долей залесённости и заболоченности водосборов на картах 1980-х годов может превышать единицу в связи с заболоченностью лесопокрытой территории

Рассмотрим упрощённые (без статистических и переходных коэффициентов) формулы расчёта максимальных расходов, регламентируемые СП 33-101-2003. Расчёт максимальных расходов весеннего половодья заданной повторяемости $Q_{P\%}$, м³/с, при наличии рек-аналогов выполнялся по редукционной формуле (1):

$$Q_{P\%} = \frac{K_0 h_{P\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 A}{(A_1 + A)^n}$$
 (1)

где K_0 — параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;

 $h_{P\%}$ — расчётный слой суммарного весеннего стока ежегодной вероятности превышения $P_{\%}$ (без срезки грунтового питания), мм;

 μ — коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоёв стока и максимальных расходов воды;

 δ , δ_1 , δ_2 — коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озёр (δ), залесённости (δ_1) и заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды;

A — площадь водосбора исследуемой реки до расчётного створа, км 2 ;

 A_1 — дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км²;

n — показатель степени редукции.

Для лесной зоны европейской территории России согласно таблице 10 Пособия по определению расчётных гидрологических характеристик⁹ (далее – Пособие) коэффициенты приняты равными A_1 =1; n=0,17.

Расчёт наибольших расходов воды дождевых паводков выполняется по эмпирической редукционной формуле (2), при отсутствии рек-аналогов и площади водосбора, для которого производится расчёт, более 200 км²:

$$Q_{p\%} = q_{200} \left(\frac{200}{A}\right)^n \delta \delta_2 \delta_3 \lambda_{p\%} A \tag{2}$$

где q_{200} — модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения P=1%, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км², определяемый по листу 12 Атласа расчётных

⁹ Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик / Составители: А.В. Рождественский, В.Е. Водогрецкий, А.П. Копылов и др. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 448 с.

гидрологических карт и номограмм ¹⁰ (далее – Атлас) и равный 0,2 при $\delta = \delta_3 = 1,0$;

 δ_3 — поправочный коэффициент, учитывающий изменение параметра q_{200} с увеличением средней высоты водосбора в горных районах;

n – степенной коэффициент, отражающий редукцию максимального модуля стока дождевого паводка, значение которого определяется по листу 10 Атласа и составляет 0,3; переходный коэффициент $\lambda_{p\%}$ максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятностью превышения Р=1% к значениям другой вероятности превышения.

В соответствии с приложением Б таблицы 7 СП 33-101-2003 для расчёта максимальных расходов дождевых паводков для водосборов с площадью менее 200 км², применяется формула предельной интенсивности ливня

$$Q_{p\%} = q'_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta \lambda_{p\%} A \tag{3}$$

где ${q'}_{1\%}$ — относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения P=1%, представляющий отношение ${q'}_{1\%}=q_{1\%}/\varphi H_{1\%}$, определяется для исследуемого района в зависимости от гидроморфометрической характеристики русла Φ_p и продолжительности склонового добегания $\tau_{\rm CK}$ (мин.);

 φ – сборный коэффициент стока;

 $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков вероятности превышения P=1%, мм.

Параметры

- 1. Площадь водосбора. Площадь водосбора напрямую участвует во всех расчётных зависимостях. Выявленные изменения укладываются в планиметрическую погрешность измерения, оцененную нами в 5%.
- 2. Гидрографическая длина водотока. Максимальные изменения для рассматриваемых рек достигают 8%. При расчётах максимальных расходов в створе проектируемого водоотвода на малых неизученных реках рекомендуется использовать методику предельной интенсивности ливня согласно пункту 7.44

СП 33-101-2003. Одним из определяющих в этой методике параметров является Φp — гидроморфометрическая характеристика русла, определяемая по формуле

$$\Phi_{\rm p} = \frac{1000L}{\left[m_p \left(I_p\right)^m A^{0.25} (\varphi H_{1\%})^{0.25}\right]} \tag{4}$$

где L — длина главного водотока, км; I_p — средневзвешенный уклон главного водотока, ‰; m_p и m — гидравлические параметры, характеризующие состояние и шероховатость русла водотока, значения которых определены согласно Таблицы 8 Приложения Б Пособия в зависимости от I_p и состояния водотока. Для дальнейшего расчёта приняты значения $m_p=11$ и m=1/3.

Параметр Φp участвует в расчётах максимального расхода воды опосредованно. Его увеличение, например, в три раза влечет уменьшение соответствующее расчётного расхода воды на 5-10% (таблица 10 приложения 2 Пособия) в зависимости от площади водосбора. Таким образом, погрешность изменения длины русла для расчётов максимального стока незначима.

3. Относительная лесистость водосбора f_{π} . Коэффициент δ_l , учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесённых бассейнах, согласно пункту 7.35 СП 33-101-2003, определяют по формуле

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{(f_{\pi} + 1)^{n'}} \tag{5}$$

где n' — коэффициент редукции, равный 0,22 для лесной зоны;

 α — параметр, учитывающий расположение леса на водосборе (таблица 2). Данный параметр с ростом f_{Π} уменьшается при расположении леса в верхней части водосбора и растёт, если лесистая часть в устьевой и прирусловой части. При этом максимальное значение f_{Π} , приводимое в регламентирующих документах не превышает 30%. При $f_{\Pi} > 30\%$ значение данного параметра a принимается равным 1, что противоречит логике (рисунок 2).

¹⁰ Атлас расчётных гидрологических карт и номограмм / Приложение 1 к Пособию по определению расчётных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 25 отд. л. карт.

Таблица 2. Значения коэффициента a в зависимости от расположения леса на водосборе.

Table 2. Values of the coefficient a depending on the location of the forest in the watershed.

Разма намачие нада на разрабара	а при площади, %, занятой лесом, до			
Расположение леса на водосборе	10	20	30	
равномерное	1	1	1	
в верховье	0,85	0,8	0,75	
в устьевой и прирусловой частях	1,2	1,25	1,3	

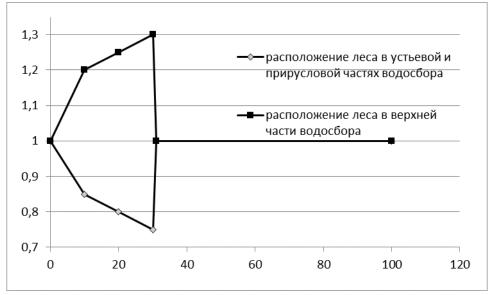


Рисунок 2. Значение коэффициента a в зависимости от площади, %, занятой лесом на водосборе.

Figure 2. The value of the coefficient a depending on the area, %, occupied by forest in the watershed.

Таблица 3. Изменения коэффициентов лесистости и заболоченности.

Table 3. Changes in forest cover and swamp cover coefficients.

№ п/п	Водоток	Год	Залесённость, %	а	δ_{l}	Заболоченность, %	β	δ_2
1 Обша	Обила	1938	81	1	0,38	3	0,4	0,95
	Ооша	1986	91	1	0,37	12	0,4	0,86
2	2 Кремёна	1938	65	1	0,40	5	0,4	0,93
2		1986	87	1	0,37	38	0,4	0,73
3	3 Молявня	1938	86	1	0,37	0	0,7	1,00
3	KHAKITOIM	1986	94	1	0,37	8	0,7	0,82
4	Осуга	1939	39	1	0,44	0	0,7	1,00
4	Ocyra	1982	79	1	0,38	5	0,7	0,88
5 Раменка	Ромонию	1939	88	1	0,37	19	0,7	0,68
	Гаменка	1982	88	1	0,37	19	0,7	0,68
6	Днепр	1938	28	1	0,48	3	0,4	0,95
		1952	67	1	0,40	9	0,4	0,89

4. Увеличение площади болот учитывается коэффициентом δ_2 , определяемым по формуле

$$\delta_2 = 1 - \beta \lg(0.1f_6 + 1) \tag{6}$$

где β — коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почвы вокруг болот и заболоченных земель (со слоём торфа не менее 30 см);

 f_{6} – относительная заболоченность водосбора, %.

Изменения коэффициентов для рассматриваемых объектов приведены в таблице 3.

5. Средневзвешенный уклон водотока $I_{\rm ck}$. Уклон — одна из важнейших ландшафтных характеристик водотока — участвует в расчётах как напрямую, так и опосредованно.

От уклона зависит величина гидроморфометрической характеристики русла (4), русловое время добегания согласно СП 33-101-2003.

Между тем даже за период 30–50 лет местные изменения уклонов могут составлять значительную величину. Например, на приустьевом участке ручья Молявня, уклон понизился с 7,9 до 4,1‰ (рисунок 3).

6. Густота речной сети водосбора $ho_{
m p}$. Участвует в расчётах гидроморфометрической характеристики склонов $\Phi_{
m ck}$:

$$\Phi_{\rm ck} = k \left(\frac{1}{\rho_{\rm p}}\right)^{0.5} \tag{7}$$

где k – множитель, зависящий от характеристик склонов водосбора согласно пункту 7.46 СП 33-101-2003.

Параметр $\Phi_{c\kappa}$, как и в пункте 2, участвует в расчётах опосредованно. Увеличение густоты речной сети в три раза влечет увеличение расчётного расхода воды в полтора раза.

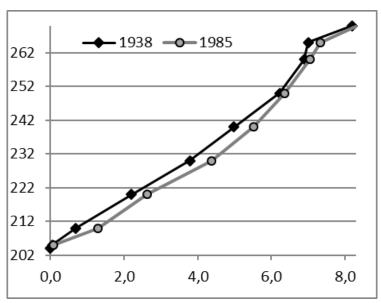


Рисунок 3. Местные изменения уклонов на ручье Молявня от устья к истоку, м/км.

Figure 3. Local slope changes on the Molyavnya creek from mouth to source, m/km.

Задача 2

Реки Обша, Кремёна и Днепр начинаются в верховом болотных обширном Аксенинский мох и Гавриловское, имеют общие водоразделы. Реки Осуга и Раменка, ручей Молявня – на заболоченной слаборасчленённой равнине между урочищами Петровские Татаринские Дачи, граничат с бассейном реки Обши. Реки являются естественными аналогами точки соблюдения друг другу, зрения следующих требований пункта 4.10 СП 33-101-2003:

1. Однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки.

Тип (от греч. *typos*) – вид, модель, форма, образец. Процесс типизации можно рассматривать как подбор признаков, общих для ряда явлений.

В литературе встречаются следующие типизации рек:

- Русловые и нерусловые типы водных потоков [Маккавеев, 2003].
- Однотипные потоки потоки одного порядка [Хортон, 1948].

Согласно первой классификации, все рассматриваемые в данной статье реки – одного типа. Согласно второй – разного. Во втором случае, исходя из опыта гидрометеорологических изысканий, можно констатировать, что ни одна река, взятая как аналог исследуемой для проведения расчётов, регламентированных СП 33-101-2003, не являлась однотипной к последней. Стандарт должен четко разъяснять, что имеется в виду в каждом конкретном случае.

- 2. Географической близости расположения водосборов. В нашем случае это требование соблюдено полностью.
- 3. Однородности условий формирования стока, сходства климатических условий, однотипности почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкую степень озёрности, залесённости, заболоченности и распаханности водосборов.
- 4. Район равнинный, средние высоты укладываются в градацию от 100 до 200 м.
- 5. Искусственная зарегулированность стока на всех реках до 2010 года отсутствовала. Выбор рек-аналогов осуществляется при соблюдении следующих эмпирических соотношений:

$$\frac{L}{A^{0,56}} \approx \frac{L_a}{A_a^{0,56}}$$

$$JA^{0,50} \approx J_a A_a^{0,50}$$

где L и L_a — длина исследуемой реки и рекианалога соответственно, км;

J и J_a — уклон водной поверхности исследуемой реки и реки-аналога, ‰;

A и A_a — площади водосборов исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км².

Как и в предыдущей задаче, результаты подбора аналогов с помощью вышеуказанного условия неоднозначны. Так, река Ока в створе города Дзержинска (245 000 км²) не является аналогом самой себе в створе города Калуги (54 900 км²) $19.8 \neq 9.4$, но является аналогом ручью Молявня (таблица 4) поскольку $19.8 \approx 17.4$.

То же самое можно сказать в отношении рек Кремёны и Осуги, которые при оценке уточнённых эмпирических соотношений по результатам выхода новых карт перестали быть аналогами сами себе.

Однако уже первый год наблюдений показал, что модули меженного стока для рек ВБС «Междуречье» различаются на порядок, а весеннего половодья — в два раза (таблица 5).

Различие в меженных расходах может быть объяснено выходами грунтовых вод в бассейне реки Обша и её притоков. При обследовании бассейна были обнаружены подземные источники, выходящие из провалов в почве, глубиной до 3 м и дебитом до 20 л/с.

Причины несоответствия паводкового стока на сегодняшний день не объяснены. На основании изложенного можно сделать вывод, что в целях минимизации возможных ошибок в расчётах, для обоснования использования метода гидрологической аналогии необходимы дополнительные проработки. Выбор бассейнааналога на основании критериев, прописанных в регламентирующих документах (СП 33-101-2003), требование неправомерен, основное необходимости учёта процесса формирования стока и влияющих на него факторов в условиях массовых расчётов никогда не реализуется.

Выводы

Большинство ландшафтных И гидрографических характеристик мы определяем по топографическим, почвенным и таксационным картам. Априори считается, что все характеристики, по крайней мере на период эксплуатации проектируемого сооружения, будут неизменны. На основании этого производится расчёт максимальных расходов дождевых и водопропускных паводков И половодья отверстий инженерных дорожных сооружений.

Однако изменения, в том числе и в результате антропогенного воздействия, настолько велики, что результат расчёта на одном и том же объекте может меняться в разы.

Таблица 4. Сравнительная величина $L_a/A_a^{0,56}$ и $J_aA_a^{0,50}$ для водотоков полигона «Междуречье». **Table 4.** Comparative values of $L_a/A_a^{0,56}$ and $J_aA_a^{0,50}$ for watercourses of the "Mezhdurechye" polygon.

№	Водоток	Год	Площадь водосбора,	Длина водотока,	Уклон,	$L_a/A_a^{0.56}$	$J_a A_a^{0,50}$
п/п			KM ² KM		‰		
1 Обша	1938	216	38	0,46	1,9	6,8	
	Обща	1986	228	35	0,59	1,7	8,9
2	2 1/2225	1938	126	22	0,37	1,5	4,2
2	Кремёна	1986	130	24	0,81	1,6	9,2
3	2	1938	20,5	8,2	3,55	1,5	16,1
3 [MOJ]	Молявня	1986	20,5	8,32	3,85	1,5	17,4
4	4 Осуга	1939	304	34,2*	0,97	1,4	16,9
4		1982	304	34,2	0,39	1,4	6,8
5 Раменка	1939	79	26,5*	1,22	2,3	10,8	
	Раменка	1982	79	26,5	1,26	2,3	11,2
6	Днепр	1938	255	40,3	0,49	1,8	7,8
		1952	262	40,9	0,69	1,8	11,2

Таблица 5. Сравнительные величины максимального и минимального модуля стока для водотоков полигона «Междуречье».

Table 5. Comparative values of maximum and minimum flow modulus for watercourses of the "Mezhdurechye" polygon.

Водоток	Площадь, км ²	Меженный модуль стока, лето 2014 года, л/с·км²	Модуль стока весеннего половодья, весна 2015 года, л/с \cdot км ²
Обша – Городок	228	0,54	72,17
Кремёна – Городок	130	0,78	40,23
Молявня – Городок	20,5	2,08	63,89
Осуга – Красное	304	3,62	127,30
Раменка – Красное	79	0,38	73,80
Днепр – Болшево	262	0,08	56,68

Таким образом, принципиальное отсутствие учёта текущих, обусловленных в первую очередь антропогенным воздействием, ландшафтных изменений приводит к ошибкам в расчетах основных данных, определяющих размеры водопропускных дорожных и водоотводных мелиоративных сооружений, в два раза и более.

Кроме того, оставляет желать лучшего методическая и нормативная составляющая,

Литература

Антонова Т.С., Салминен Э.О., Виноградов А.Ю. Проектирование водопропускных сооружений с учетом географических особенностей местности // Материалы одиннадцатой международной научно-технической интернет-конференции, посвященной 85-летию Лесоинженерного

законодательно регламентирующая порядок расчётов в проектировании и строительстве сооружений.

Все эти проблемы требуют скорейшего решения и разработки новых подходов к расчётам исходных данных, с учётом текущих изменений на определённой территории, а также более четкого законодательного регулирования в этой сфере.

References

Antonova T.S., Salminen E.O., Vinogradov A.Yu. Proektirovanie vodopropusknykh sooruzhenii s uchetom geograficheskikh osobennostei mestnosti [Designing culverts taking into account the geographical features of the area]. *Materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-*

факультета СПбГЛТУ и 95-летию кафедры Сухопутного транспорта леса «Леса России в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 8–10 октября 2014 года). СПб.: СПбГЛТУ, 2014. С. 14–17.

Виноградов А.Ю. Ошибки гидрометрических измерений // ГеоРиск. 2014. №3. С. 10–11.

Виноградов А.Ю. Влияние леса на снегонакопление и расходы воды весеннего половодья при расчетах инженерных дорожных сооружений // Естественные и технические науки. 2015. № 11 (89). С. 651–655.

Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А. К вопросу о применимости статистических методов в расчетах максимального стока малых рек // Сборник трудов III Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (г. Южно-Сахалинск, 22–26 сентября 2014 года). Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2014. С. 242–246.

Виноградов А.Ю., Салминен Э.О. изменения максимальных расходов воды малых рек в результате хозяйственной деятельности и его влияние на проектирование дорожного // водоотвода Материалы Всероссийского симпозиума международным c участием «Лесное хозяйство комплексное И природопользование» (г. Великий Новгород – 2010 г. Валдай, 20-23 июля г.). СПб.: СПбНИИЛХ, 2010. Вып. 2 (22). С. 268-277.

Виноградов А.Ю., Салминен Э.О., Чомаев А.А. Изменение максимальных расходов малых рек в результате хозяйственной деятельности и его влияние на проектирование дорожного водоотвода // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного «Опыт лесопользования университета условиях Северо-Запада РФ и Фенноскандии» (г. Петрозаводск, 20-22 сентября 2011 года). Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. С. 5-6.

Виноградов A.Ю., Смирнова Л.Н. Влияние изменения хозяйственной деятельности на плодородие почв лесной зоны $Р\Phi$ // Материалы

tekhnicheskoi internet-konferentsii, posvyashchennoi Lesoinzhenernogo 85-letiyu fakul'teta SPbGLTUi 95-letivu kafedry Sukhoputnogo transporta lesa «Lesa Rossii v XXI veke» (g. Sankt-Peterburg, 8-10 oktyabrya 2014 goda) [Materials of the eleventh international scientific and technical Internet conference dedicated to the 85th anniversary of the Faculty of Forestry, St. and the 95th anniversary of the Department of Forest Land Transport "Forests of Russia in the XXI century" (St. Petersburg, October 8–10, 2014)]. St. Petersburg, Publ. SPbGLTU, 2014, pp. 14–17. (In Russian; abstract in English).

Frolov A.V. Sostoyanie i tendentsii izmeneniya kachestva vod v Rossiiskoi Federatsii [Status and trends of water quality in the Russian Federation and the north-west region]. *Okhrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie [Environmental protection and environmental management]*, 2013, iss. 1, pp. 8–11. (In Russian; abstract in English).

Gartsman B.I., Bugayets A.N., Tegai N.D., Krasnopeyev S.M. Analysis of the structure of river systems and the prospects for modeling hydrological processes. Geography and natural resources, 2008, 116-123. vol. 29. iss. 2, pp DOI: 10.1016/j.gnr.2008.06.017. (Russ. ed.: Gartsman B.I., Bugaets A.N., Tegai N.D., Krasnopeev S.M. Analiz struktury rechnykh sistem i perspektivy modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov. Geografiya i prirodnye resursy, 2008, iss. 2, pp. 20-29).

Horton R.E. Erosional development of streams and their drainage basins Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological society of America*, 1945, vol. 56, iss. 3, pp. 275–370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2. (Russ. ed.: Khorton R.E. *Erozionnoe razvitie rek i vodosbornykh basseinov. Gidrofizicheskii podkhod k kolichestvennoi morfologii.* Moscow, Publ. Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1948. 159 p).

Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee basseine [River bed and erosion in its basin]. Moscow, Publ. Faculty of Geography MSU, 2003. 353 p. (In Russian).

научно-технической конференции «Сухопутный транспорт леса». СПб.: СПбГЛТУ, 2009. С. 179–184.

Гариман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 20–29.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Геогр. фак. МГУ, 2003. 353 с.

Салминен Э.О., Виноградов А.Ю. Сравнительная оценка результатов расчетов по модели «водный переход» и СП 33-101-2003 // Материалы научно-технической конференции «Сухопутный транспорт леса». СПб.: СПбГЛТУ, 2009. С. 175–179.

Соколов А.А. Гидрография СССР: воды суши: Учеб. пособие для гидрометеорол. техникумов. Л.: Гидрометеоиздат, 1952. 472 с.

Фролов А.В. Состояние и тенденции изменения качества вод в Российской Федерации // Охрана окружающей среды и природопользование. 2013. №1. С. 8-11.

Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии / Пер. с англ. Д.Л. Арманд и В.А. Троицкого. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. 159 с.

Salminen E.O., Vinogradov A.Yu. Sravnitel'naya otsenka rezul'tatov raschetov po modeli «vodnyi perekhod» i SP 33-101-2003 [Comparative evaluation of the results of calculations by the model "water passage" and SP 33-101-2003]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sukhoputnyi transport lesa» [Materials of the scientific and technical conference "Land transport of the forest"]*. St. Petersburg, Publ. SPbGLTU, 2009, pp. 175–179. (In Russian; abstract in English).

Sokolov A.A. *Gidrografiya SSSR: vody sushi* [Hydrography of the USSR]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1952. 472 p. (In Russian).

Vinogradov A.Yu. Oshibki gidrometricheskikh izmerenii [Hydrometric measurements errors]. *GeoRisk [GeoRisk]*, 2014, iss. 3, pp. 10–11. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu. Vliyanie lesa. na snegonakoplenie i raskhody vody vesennego raschetakh inzhenernykh polovoďya pri dorozhnykh sooruzhenii [Influence of forest on snow accumulation and water discharge of spring floods in calculations of engineering road structures]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences], 2015., iss. 11 (89), pp. 651–655. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu., Nikiforovskiy A.A. K voprosu o primenimosti statisticheskikh metodov v raschetakh maksimal'nogo stoka malykh rek [On applicability of statistical methods in the calculation of maximum flow of small rivers]. Sbornik trudov III Mezhdunarodnoi konferentsii «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita» (g. Yuzhno-22–26 sentyabrya Sakhalinsk, 2014 [Proceedings III International Conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Yuzhno-Sakhalinsk, September 22–26, 2014)]. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. Sakhalin Department of Far East Geological Institute FEB RAS., 2014, pp. 242–246. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu., Salminen E.O. Raschet izmeneniya maksimal'nykh raskhodov vody malykh rek v rezul'tate khozyaistvennoi deyatel'nosti i ego vliyanie na proektirovanie dorozhnogo vodootvoda [The variation of maximum water discharge of small rivers from anthropogenic activities and its

influence on the design of cross road drainage]. Materialy Vserossiiskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem «Lesnoe khozyaistvo i kompleksnoe prirodopol'zovanie» (g. Velikii Novgorod – g. Valdai, 20–23 iyulya 2010 g.) [Materials of the All-Russian symposium with international participation "Forestry and integrated environmental management" (Veliky Novgorod - Valdai, July 20–23, 2010]. St. Petersburg, Publ. SPbNIILKh, 2010, iss. 2 (22), pp. 268–277. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov A.Yu., Salminen E.O., Chomaev A.A. Izmenenie maksimal'nykh raskhodov malykh rek v rezul'tate khozyaistvennoi deyatel'nosti i ego vliyanie na proektirovanie dorozhnogo vodootvoda [Changes in the maximum flow rates of small rivers as a result of economic activities and its impact on the design of road drainage systems]. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 60-letiyu lesoinzhenernogo fakul'teta Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta «Opytlesopol'zovaniya v usloviyakh Severo-Zapada RF i Fennoskandii» (g. Petrozavodsk, 20–22 sentyabrya 2011 goda) [Materials of the International Scientific and Technical Conference Devoted to the 60-th Anniversary of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University "Forest Cluster in North-Western Russia, Finland and Sweden" (Petrozavodsk, September *20*–*22*, 2011)]. Petrozavodsk, Publ. PetrGU, 2011, pp. 5-6. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Smirnova L.N. Vliyanie izmeneniya khozyaistvennoi deyatel'nosti na plodorodie pochv lesnoi zony RF [The influence of changes in economic activity on soil fertility in the forest zone of the Russian Federation]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sukhoputnyi transport lesa» [Materials of the scientific and technical conference "Land transport of the forest"]*. St. Petersburg, Publ. SPbGLTU, 2009, pp. 179–184. (In Russian; abstract in English).

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

УДК 556.3.04:556.34

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.275

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВОДОПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ НА СКЛОНАХ ДОЛИН МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК

В.В. Шамов¹, Е.А. Шекман¹, Т.С. Губарева^{2,1}, Б.И. Гарцман^{2,1}, С.Ю. Лупаков¹, Г.А. Челноков³, Н.К. Кожевникова⁴, М.Л. Бурдуковский⁴, А.В. Орляковский⁵

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; ²Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; ³Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; ⁴Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; ⁵Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

vlshamov@yandex.ru

Аннотация. Дан анализ проведенных в горных речных долинах южного Сихотэ-Алиня Верхнеколымского нагорья систематических исследований крупных предпочтительных водопроводящих путей – залегающих на глубине до 1 м от поверхности подземных дрен склонового масштаба, которых концентрируется основная часть склоновых вод. Приведены оценки стока и скорости движения воды дренах соответственно 0.041-7.36 л/с и 0.1-7.2 см/с, которые по величине близки к таковым в руслах рек первого порядка в периоды межени. Выявлена их приуроченность к реликтовым или активным каменным потокам. Выдвинута гипотеза, что

PROPERTIES OF PREFERENTIAL WATER FLOW PATHS NETWORKS AND BACKGROUND FOR THEIR GENESIS IN THE SLOPES OF SMALL MOUNTAIN VALLEYS

Vladimir V. Shamov¹, Evgeniy A. Shekman¹,
Tatiana S. Gubareva^{2,1}, Boris I. Gartsman^{2,1},
Sergei Yu. Lupakov¹, Georgiy A. Chelnokov³,
Nadezhda K. Kozhevnikova⁴,
Maksim L. Burdukovskii⁴,
Aleksandr V. Orlyakovskiy⁵

¹Pacific Geographical Institute of FEB RAS,
Vladivostok, Russia;

²Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia;

³Geological Institute RAS, Moscow, Russia;

⁴Federal Scientific Center for East Asia Terrestrial
Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia;

⁵Far Eastern Federal University, Vladivostok,
Russia.

vlshamov@yandex.ru

Abstract. For the case of small valleys in South Sikhote-Alin Ridge and Verkhnekolymskoye Highlands (Pacific Russia, Northeast Asia), there is given an analysis of systematic observations of big preferential flow paths of slope-scale, - subsurface shallow (not deeper than 1 m) watercourses, in which the most water migrates fast. The watercourses occur most often within the bodies of relic or active stony stripes ("block streams"). In some of the studied watercourses, there were estimated discharges (0.041-7.36 l/s) and velocities (0.1-7.2 cm/s) that are quite comparable to the 1-order streamflow rates when low water periods. We suggest the biggest among such subsurface watercourses are to be controlled by geological structures of slope scale,

наиболее крупные дрены масштаба склона могут структурно-геологическими определяться условиями, а именно разрывными нарушениями сублокального масштаба, оперяющими локальные разломы. На основе характера движения воды в дренах, с учетом результатов предшествующих исследований других авторов, предложен вариант их типизации, включающий три основные структурные группы: 1) главные проводники, имеющие длину порядка сотен и первых тысяч метров и ширину несколько метров; 2) домены фильтрационного потока длиной от 0,1 до первых десятков метров и шириной до 10 см, 3) пути матричного потока, характеризующиеся длиной намного менее 10 см и поперечными размерами менее 0,1 Детальное изучение строения склонового чехла и динамики склоновых водотоков позволит обосновать гипотезу о значительной роли малых разломов и связанных с ними активных или реликтовых каменных потоков в концентрации склонового стока. Это позволит глубже понять механизмы формирования паводков в реках, особенно в районах с резкими внутрисезонными колебаниями увлажнения, такими как районы Азии вблизи Тихоокеанского побережья.

Ключевые слова: малый горный водосбор; склоновый сток; каменный поток; курум; предпочтительные водопроводящие пути; разрывное нарушение; Дальний Восток России.

Введение

Процессы генезиса стока воды, механизмы взаимодействия грунтовых склоновых и русловых вод остаются ключевой проблемой гидрологии и гидрогеологии, несмотря на обилие данных стандартных наблюдений, результатов специальных исследований на экспериментальных и репрезентативных водосборах, а также научных публикаций в этой области.

В горных ландшафтах в зоне избыточного увлажнения благодаря задернованности и высокой водопроницаемости склонов

namely sub-local fractures, which feather local fractures. Accounting for the results of relevant investigations by other authors and the water movement features revealed in the studied subsurface watercourses, we offer a variant of their division onto three main structural groups: 1) the main paths (conduits) with a length of hundreds to 1–2 thousand meters and width of several meters; 2) the filtration flow domains with a length of 0.1 meters to several dozen meters and width of up to 0.1 meters; and 3) the matrix flow paths with a length of much less 10 centimeters and width of less 0.1 centimeters. Detailed studies for talus texture and water regime of the hillside watercourses would make it possible to prove a hypothesis on the significant role of small faults (fractures) and related to them the active or relic block streams in the concentration of slope flow. It could allow a deeper understanding of the flood generation in river basins, especially in the areas where severe intra-annual moistening fluctuations as Pacific Asia.

Keywords: small mountain catchment, slope flow, block stream; kurum; preferential flow paths, fault, Far East of Russia (Pacific Russia).

поверхностные временные водотоки на склонах образуются крайне редко [Гарцман, Лыло, Черненко, 1971; Жильцов, 2008; Шепелев, 2011; Глотова, Глотов, 2012]. Атмосферная вода, как правило, быстро проникает в толщу склоновых отложений и далее стекает в виде более или менее концентрированных подповерхностных водных потоков. Эти потоки обозначаются в литературе различными терминами: «быстрый грунтовый сток» [Виноградов, 1967], «контактный сток», «дренажно-пластовый сток» [Бефани и др., 1966], «подповерхностный (приповерхностный) сток» [Кулаков, 1973], «сток по макропорам» [Ріегсе, Stewart, Sklash, 1986], «сток по трубкам»

Shamov V.V., Shekman E.A. Gubareva T.S., Gartsman B.I., Lupakov S.Yu., Chelnokov G.A., Kozhevnikova N.K., Burdukovskii M.L., Orlyakovskiy A.V. Properties of preferential water flow paths networks and background for their genesis in the slopes of small mountain valleys. *Hydrosphere*. *Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 275–296 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.275.

(pipeflow) [Uchida, van Meerveld, McDonnel, 2005], «сток по подповерхностным временным 2013], [Василенко, руслам» «быстрый подповерхностный дождевой сток» (rapid subsurface storm flow) [Uhlenbrook, 2006], «дрены - подповерхностные потоки» [Тарбеева, Гарцман, 2017]. Эти формы склонового стока в настоящее время остаются слабо изученными [Brutsaert, 2006; Гарцман и др., 2020] и, очевидно в связи с этим, обычно не рассматриваются в рамках теории стокоформирования. Нет также ясности в понимании условий и причин концентрации стока на склонах. Вместе с тем, изучение механизмов концентрации склонового стока согласуется с современной концепцией предпочтительных водопроводящих путей (preferential flow paths) в бассейнах, а их недоучет может приводить к ошибкам в расчетах и прогнозах экстремальных характеристик паводков, основанных на популярных моделях стока [Brutsaert, 2006; Uhlenbrook, 2006; Gerke, German, Niebel, 2010; Василенко, 2013; Weiler, 2017]. За счет образования подповерхностных потоков осуществляется быстрый сброс склоновых вод в реки, тем самым способствуя формированию экстремальных паводков на горных реках, особенно В области распространения внетропического летнего муссона. Данный факт подтверждается установленным возрастанием доли подповерхностных склоновых дождевом паводковом стоке низкопорядковых притоков реки Правая Соколовка [Губарева и др., 2016; Губарева и др., 2019], а также два пика в дождевых паводках, вызванных одним дождем [Гарцман, Шамов, 2015].

Характеристика обследованных в период с 2015 по 2017 год сравнительно устойчивых подповерхностных водных потоков на склонах горных речных долин и анализ геологогеоморфологических условий формирования этих потоков представляют собой предмет данной статьи.

Объекты, методы и результаты исследований

В пределах бассейнов рек Правая Соколовка и Падь Васькова (Южный Сихотэ-

Алинь, соответственно Чугуевский Дальнегорский районы Приморского края), а также в бассейне ручья Контактовый (верховья реки Колымы, Тенькинский район Магаданской области) в в период с 2015 по 2017 год авторами обследованы склоны речных долин, сложенные с поверхности относительно узкими (метры - первые десятки метров) полосами грубообломочных отложений, нисходящими вдоль склона. На юге Дальнего Востока эти полосы часто, особенно в нижних частях склонов, задернованы и покрыты плотной древесной и растительностью, кустарниковой выполняющие их глыбы при низкой скорости их сползания по склону могут быть покрыты только лишайниками. В некоторых из этих образований при закладке шурфов на глубине 70-100 см наблюдалось свободное или практически свободное течение воды. Некоторые из шурфов были использованы в качестве контрольных для выполнения серии измерений динамических характеристик склоновых водных потоков. Районы работ, обозначенные на схеме (рисунок 1), объединяет их приуроченность к областям мезозойской складчатости.

Согласно схеме тектонического районирования Приморского края, бассейн реки Соколовка находится в Самаркинской подзоны Центральной структурноформационной зоны Сихотэ-Алинской геосинклинальной складчатой системы [Назаренко, Бажанов, 1989] или Самаркинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Наиболее молодые отложения района распространены в левобережье Соколовка представлены реки Правая позднемеловыми эффузивами кислого состава туфопесчаниками, игнимбритами, (туфами, этих риолитами). Мощность образований достигает 600-650 м. Верхняя трещиноватая зона, обусловленная процессами выветривания, прослеживается до глубины 30 м в долинах и более – на водоразделах. Глубже трещиноватость связана с разломами. Правый борт долины реки характеризуется преимущественно более древними осадочными породами юры и триаса (песчаники, алевролиты с обломками и глыбами известняков, кремней) [Триас..., 2004].

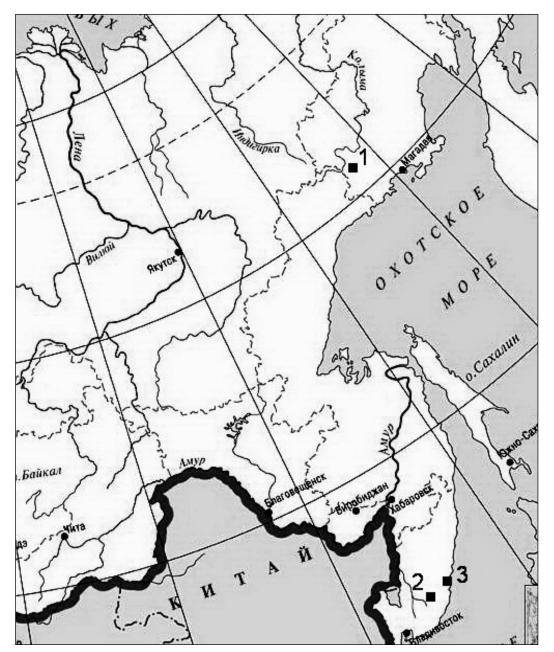


Рисунок 1. Расположение районов исследований. Обозначения: 1 – ручей Контактовый, 2 – река Правая Соколовка, 3 – река Падь Васькова.

Figure 1. A layout of the observations sites location: 1 – Kontaknovyi Creek, 2 – Pravaya Sokolovka River, 3 – Pad Vas'kova River.

Эффузивные породы основного состава имеют локальное распространение. В гидрогеологическом отношении — это Сихотэ-Алинский гидрогеологический массив, характеризующийся широким распространением трещинных и трещинно-жильных подземных вод. Более подробная ландшафтная характеристика данной территории приводится в [Болдескул и др., 2014].

Бассейн реки Падь Васькова причленяется к устьевому району реки Рудная. Он расположен в пределах одной из крупных структурнофациальных зон — Прибрежном антиклинории или Таухинском террейне [Ханчук и др., 1995]. Породы террейна представлены осадочными кремнисто-терригенными формациями каменноугольного, пермского и мезозойского возрастов, обнажения которых на современном уровне эрозионного среза занимают небольшую

площадь. Основная часть данной территории сложена эффузивами, интрузивами вулканогенно-осадочными образованиями Эффузивы верхнего мела И палеогена. представлены комплексами пород среднего и состава (кварцевые порфириты риолиты, их лавы и туфы); интрузивные разности - гранитоидами палеогена, образующие крупные массивы среди пород эффузивного комплекса [Аржанова, Елпатьевский, 1990].

Мерзлотные ландшафты экспериментального бассейна ручья Контактовый сформированы в основном верхнепермскими осадочными породами (глинистыми сланцами). На высоте 1 000 м над уровнем моря и выше здесь распространены каменные осыпи и россыпи интрузивных гранодиоритовых пород, мелкозернистый заполнитель которых практически отсутствует, грубообломочный слой хорошо аэрируется, в связи с чем в некоторых местах глубина протаивания достигает 2,5 метров и более, при этом у подножий склонов лед обнаруживается под камнями вблизи дневной поверхности даже в конце лета [Алексеев и др., 2011; Михайлов, 2013].

В период с 2015 по 2017 год авторами выполнено более 70 определений дебитов некоторых из выявленных подповерхностных потоков на склонах [Гарцман и др., 2020]. Измерения проводились методом смешения индикатора или методом ионного паводка, применяемого обычно для случая валуннокаменистых открытых русел горных рек [Карасев, Шумков, 1985]. Применялся используемый искусственный трассер – раствор NaCl с заданной концентрацией, обычно равной 100 г/л. Непрерывная продолжительная – от 6 до 24 часов – регистрация минерализации воды в контрольном створе потока (шурфе) осуществлялась c помощью мультипараметрической системы контроля качества воды YSI Professional Plus. Временной шаг записи выбирался равным 5, 10 или 20 с в зависимости от водности потока и расстояния контрольного створа от места налива трассера, объем раствора в этой же зависимости варьировал от 0,5 до 2 л. В бассейне ручья Контактовый в подповерхностных потоках на вскрытых участках были измерены поплавковым методом только скорости течения воды.

Во избежание ошибок в расчетах для последующего анализа использовались те результаты экспериментов, в которых гидравлическая связь потока в месте налива раствора с потоком в контрольном створе была достоверно установлена.

Измеренные дебиты и скорости воды Величины приведены таблице. дебитов изменялись в диапазоне 0,041-7,36 л/с при средних скоростях течения 0,1-7,2 см/с. Эти величины оказались сопоставимы с расходами и скоростями течения в прилегающих первичных поверхностных водотоках в состоянии межени. В экспериментальные объекты был включен регулярно пересыхающий ручей Сухой, который площадь водосбора $0,37 \text{ km}^2$, морфологически выраженную долину и русло. Он представляет собой переходную форму подповерхностного склонового открытому водотоку, в связи его динамические характеристики в ряду полученных данных ожидаемо максимальны.

Наиболее значительные и, очевидно, устойчивые В безморозный период подповерхностные потоки склоновых вод имеют постоянное положение и приурочены к линейным концентрации склонового стока естественным подземным каналам или дренам. Об устойчивости таких водных потоков может указывать обнаружение авторами в них особей уссурийских безлегочных тритонов (Onychodactylus fischeri) даже при длительном отсутствии дождей, учитывая, эти земноводные не могут обитать вне воды.

небольшой объем сведений, Даже полученных авторами при обследовании десятка обнаруживает подземных дрен, приуроченность к хорошо промытым вытянутым вдоль склонов крупнообломочным отложениям эффузивных пород, которые можно отнести к каменным потокам (курумам), описанным в литературе [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982; Короткий, Никольская, Скрыльник, 1984; Говорушко, 1986; Шепелев, 2011].

Таблица. Динамические характеристики склоновых подповерхностных потоков по данным натурных измерений

Table. Water discharges and flow rates of the slope subsurface watercourses based on in-situ tracer measurements

Условное название потока	Даты измерений	Количество измерений	Дебит, л/с*	Скорость течения, м/с*					
Бассейн реки Правая Соколовка, Южный Сихотэ-Алинь, Приморский край, Россия									
2016 : 11.08, 04.09, 17.09,									
Ботаническая дрена	19.09, 22.09, 24.09, 25.09,	1.0	0,48	0,004					
	26.09;	10	0,148–1,19	0,002-0,008					
	2017 : 05.08, 09.08								
	2016 : 05.08, 08.08 (2), 18.08,								
	28.08, 29.08, 30.08 (2), 31.08,			0,010 0,001–0,042					
Антропогенная	01.09, 03.09, 14.09, 18.09,	10	<u>1,19</u>						
дрена	22.09;	18	0,056–6,95						
_	2017 : 07.07, 04.08, 08.08,								
	09.08								
	2015 : 26.05;		1,24 0,15–4,81						
	2016 : 07.08, 09.08, 11.08,			0,018 0,003–0,039					
Жильцовская дрена	13.08, 16.08, 17.08, 18.08,	15							
*	01.09, 15.09, 18.09, 21.09;								
	2017 : 05.08, 06.08, 13.08								
	2016 : 05.08, 11.08, 15.08,								
П.,	16.08, 19.08, 02.09, 03.09,	12	<u>0,23</u>	0,007					
Дремучая дрена	15.09, 20.09, 21.09;	12	0,041-1,55	0,002-0,030					
	2017 : 04.08, 10.08								
Бассейн	реки Падь Васькова, Южный С	Сихотэ-Алинь, Прим	орский край, Ро	ссия					
Моргодо дугод драгу	2016 : 05.07, 11.07 (2), 12.07	4	0,82	0,022					
Мармеладная дрена		4	0,504-1,27	0,012-0,034					
Вафельная дрена**	2016 : 06.07, 10.07 (2), 14.07	4	4,12-6,32	0,020-0,030					
Кисельная дрена	2016 : 15.07, 16.07	2	5,85-7,36	0,031-0,050					
Марципановая	2016 : 06.07, 13.07, 17.07	3	<u>1,94</u>	<u>0,020</u>					
дрена	2010. 00.07, 13.07, 17.07		1,51–2,44	0,008-0,029					
Ручей Сухой	2016 : 07.07	1	3,91	0,072					
Бассейн ручья Контактовый, Верхнеколымское нагорье, Магаданская область, Россия									
Беличья дрена	2016 : 29.07	4	Не	<u>0,006</u>					
			определялся	0,005-0,008					

^{*} в числителе – среднее арифметическое, в знаменателе – пределы изменения.

^{**} результаты двух из четырех экспериментов выбракованы из-за нарушения условия бесприточности исследуемого участка подповерхностного потока.

Обсуждение результатов

Согласно определению каменный поток [Мудров, 2007] представляет собой линейновытянутое вниз по склону скопление каменных глыб и щебня (коллювия), обычно медленно движущееся вдоль склона под влиянием криогенной десерпции, солифлюкции, дробления и других процессов¹. Часто под скоплением глыб формируется водный поток. Каменные потоки широко распространены в гольцовой зоне и часто спускаются далеко в лесную зону нижнего высотного пояса Сихотэ-Алиня и других горных стран Дальнего Востока, образуя так называемые каменные реки. Различают каменные потоки активные (block streams), то есть движущиеся и практически обнаженные, и неактивные неподвижные (block fields). Последние, унаследованные от холодной эпохи позднего плейстоцена данным датировок, располагаются ниже по склону по отношению к активным, зарастают лесом перекрыты слаборазвитым почвенным слоем [Короткий, 1984]. Они, по терминологии работы [Тимофеев, 1978], представляют собой скрытые каменные потоки. Они далеко не всегда отчетливо выражены в рельефе, что в сочетании с плотным лесным покровом серьезно осложняет выявление с помощью методов дистанционного Земли. зондирования В частности, расходящиеся выявлены слабоврезанные двойные тальвеги, определяющие W-образные формы поперечных сечений «долин» каменных потоков в нижних частях склонов, при этом сами каменные потоки выполняют конусы выноса выпуклой формы, обрамленные тальвегами и достигающие ширины десятков метров в нижней части.

Нужно отличать каменные потоки от выделяемого в почвенном профиле ненарушенных горных ландшафтов юга Дальнего

Востока типичный декольматированный фрактолитовый элювиальный по мелкозему горизонт вымывания, где количество щебня размерами крупнее 10 см достигает 38-52% [Аржанова, Елпатьевский, 1990]. Каменные потоки имеют гораздо большую мощность и преимущественно каменно-глыбовый (преобладание размеров глыб более 30 см), что указывает на существенно более высокую их водопроницаемость (хотя к крупнообломочным образованиям относятся фракции размером более 10 см [Говорушко, 1986]). Вскрытые дорожными выемками в верховьях реки Уссури (южный Сихотэ-Алинь) такие каменные потоки, практически не выраженные в рельефе и покрытые густой растительностью, представляют собой U или V-образные практически лишенные песчано-суглинистого заполнителя глыбовые «линзы» в толще щебнистых склоновых отложений. Ширина таких линз составляет от 1-3 до первых десятков метров, мощность - в пределах 1–2 метров (рисунок 2). В верхних наблюдаются частях некоторых склонов слабозадернованные плащеобразные грубообломочные отложения, промытые мелкозема.

В бассейне реки Падь Васькова на склонах северной экспозиции верхние части крупных каменных потоков (Вафельная и Кисельная дрены) – зоны их питания – в основном обнажены и могут идентифицироваться на снимках со спутников и беспилотных летательных аппаратов.

В тундровых и редколесных ландшафтах Верхнеколымского нагорья каменные потоки, как правило, открыты (рисунки 3–5) и могут быть приурочены к дайковым и штокообразным интрузивным телам раннемелового возраста, которые, согласно [Говорушко, 1986], часто встречаются в этом районе.

_

¹ Геологический словарь: в 2-х томах. Том 1. А-М. М.: Недра, 1978. 486 с.



Рисунок 2. Задернованный каменный поток, вскрытый дорожной выемкой. Бассейн реки Изюбринка, верховья реки Уссури. Фото В.В. Шамова.

Figure 2. A turfed block stream outcropped during a road construction. The Izyubrinka River basin, the Ussuri River headwaters. Photo by V. Shamov.



Рисунок 3. Каменные полосы вод (отмечены белыми стрелками), почти не выраженные в рельефе и выделяющиеся на общем фоне более густой растительностью благодаря неглубокому расположению грунтовых вод. Бассейн ручья Контактовый, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой.

Figure 3. Stone stripes (marked with white arrows) that almost have no their own hollows and stand out with more dense vegetation due to shallow groundwater. The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands.

Photo by O. Makaryeva.



Рисунок 4. Измерение скорости течения воды в каменном потоке (дрена Беличья). Бассейн ручья Контактовый, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой.

Figure 4. A flow rate measurement in a block stream (Belichya subsurface watercourse). The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands. Photo by O. Makaryeva.

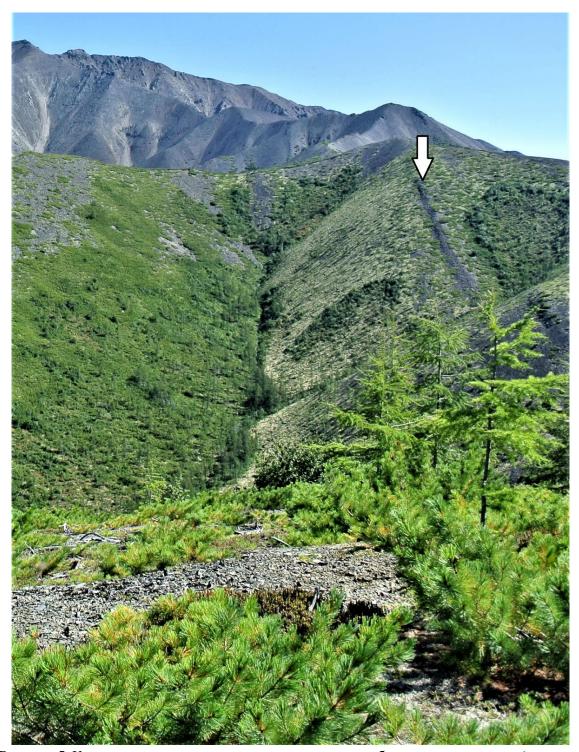


Рисунок 5. Каменная полоса с залеганием, не согласным с общим уклоном склона (отмечена стрелкой). Бассейн ручья Контактовый, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой. Figure 5. A stone stripe disagreeing with the general slope (marked with a white arrow). The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands. Photo by O. Makaryeva.

По нашим наблюдениям мелкозем, накапливающийся в нижней части профиля тела каменного потока, формирует слабопроницаемую поверхность, на которой стекающая по склону и просочившаяся с поверхности вода быстро

концентрируется. Благодаря этому в каменных потоках свободно текут, по сути, приповерхностные подземные ручьи, которые авторы условно обозначили термином «*дрены*» [Тарбеева, Гарцман, 2017].

Любой каменный поток имеет зону формирования, зону транспортировки и зону аккумуляции вещества [Полунин, 1989]. Эти зоны могут отличаться специфической фациальной и субфациальной структурой [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982], которая определяет микрорельеф поверхности каменного потока (рисунок 6). В зоне аккумуляции рыхлого

материала глубина склонового потока существенно возрастает. Такие потоки – как на Сихотэ-Алине, так и в Колымском нагорье – не вскрываются разрезами глубиной 1 м, в связи с чем на схемах (рисунок 6) они показаны «теряющимися» в мощных обломочных чехлах нижних частей склонов.

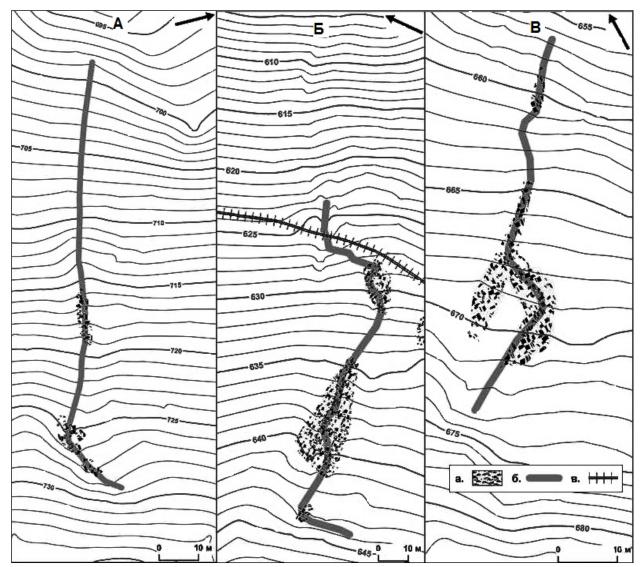


Рисунок 6. Схемы склонов с задернованными каменными потоками в бассейне реки Правая Соколовка по данным тахеометрических съемок: А – Ботаническая дрена; Б – Жильцовская дрена; В – Дремучая дрена. Условные обозначения: а. – слабозадернованные участки поверхности, сложенные крупнообломочным материалом; б. – склоновый подповерхностный водный поток; в. – грунтовая дорога. Стрелками показано направление на север.

Figure 6. The schemes of the turfed block streams as based on tachymetric survey of the slopes:
A – Botanicheskaya subsurface watercourse; Б – Zhil'tsovskaya subsurface watercourse;
B – Dremuchaya subsurface watercourse. Legend: a. – weakly turfed block stripes, δ. – a subsurface watercourse, в. – a wood trail. The arrows point the North direction.

Можно предположить, что в горах Сихотэ-Алиня оползневое происхождение имеют многие задернованные каменные потоки. Оползни могут быть вызваны как гидрологическими эксцессами [Короткий, 1984], так и подвижками земной коры. На вероятный оползневый генезис указывают стенки отрыва высотой от 1 до 5 м, выявленные авторами данной статьи в истоках некоторых каменных потоков - в верхних и средних частях склонов. У подножий таких стенок часто формируются уступы и выходят родники, ниже по склону теряющиеся в крупнообломочных отложениях. Такие уступы в рельефе, по терминологии работы [Кулаков, 1990], могут характеризовать локальные ступени разгрузки подземных вод.

Отдельной задачей остается генезис каменных потоков, их эволюция и связь с геотектоническими И геоморфологическими процессами на склонах [Тюрин, 1982; Короткий, 1984; Seto, 2011; Suzuki et al., 2013]. Выше было сказано, что образование каменных потоков в Сихотэ-Алине реликтовых курумов связывают с холодным климатом в позднем плейстоцене [Короткий, 1984]. Вместе с тем, в горах Корейского полуострова и Японского архипелага в условиях более теплого и влажного современного муссонного климата механизм формирования каменных потоков, обусловленный вымыванием заполнителя из изначально сформировавшегося оползневого тела водным потоком, сосредоточенным по стенке отрыва оползня [Seto, 2011; Seto, Kim, Tanaka, 2015].

По данным некоторых авторов [Полунин, 1989; 2014] Гаврилов, гравитационные геоморфологические процессы (в том числе оползни, обвалы, осыпи, каменные потоки) тесно связаны с процессами дробления, катаклаза, милонитизации пород в зонах разломов, на границе дифференцированно перемещающихся блоков. Вне выраженных долин водотоков и ложбин стока эти зоны контролируют также места миграции разгрузки трещинных подземных вод, обусловливая образование конусов выноса в нижних частях склонов и формирование линейных кор выветривания.

Последние, согласно Геологическому словарю¹, возникают вдоль тектонических трещин или на контакте разных по составу пород и имеют форму вытянутых жилообразных тел. Такие тела простираются в плане на сотни метров, а на глубину – обычно на несколько десятков метров и более.

На приуроченность каменных (курумных) потоков к зонам тектонических нарушений и морозобойных трещин, вытянутых вниз по склону, указывается также другими авторами [Короткий, Никольская, Скрыльник, Тюрин, Романовский, Полтев, 1982]. Отмечается, что в условиях многолетней или длительной сезонной мерзлоты в морозобойных трещинах, которые проникают на значительную глубину в скальные породы, наследуя их первичную тектоническую трещиноватость, концентрируются потоки атмосферных склоновых вод [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982; Глотова, Глотов, 2012].

Известно, что региональная структура гидрогеологических резервуаров генетически и пространственно связана с долгоживущими тектоническими нарушениями и их узлами, которые контролируют зоны сочленения гидрогеологических массивов и артезианских бассейнов [Кулаков, 1990; Сорокина, 1992; Саіпе, Evans, Forster, 1996; Сорокина, 2006; Bense et al., 2013]. Можно полагать, что в районах влияния крупных региональных разломов (в нашем случае в осевой части хребта Сихотэ-Алинь [Захаров и др., 2020]) небольшие, имеющие масштабы склона, разрывные нарушения, оперяющие локальные разломы, в свою очередь могут контролировать устойчивые подповерхностные водопроводящие каналы (дрены) такого же масштаба. Каменные потоки на склонах речных долин, по нашему мнению, могут индицировать «сублокальные» такие нарушения существенную, наиболее следовательно, развитую часть приповерхностной дренажной сети, которой происходит быстрая концентрация и разгрузка склоновых вод в горные реки и озера. Скорости течения воды и дебиты при этом, как показывают авторские эксперименты, вполне сопоставимы с таковыми в открытых первичных водотоках в периоды межени.

Ha основе результатов наших наблюдений - с учетом обобщенной методики анализа режима и строения областей питания родников в карстовых районах Пьемонта, Италия [Galeani et al., 2011] и данных анализа среднего времени добегания (mean transit time) склоновых вод к дренирующему склон водотоку в Скалистых горах, Орегон, США [McGuire, McDonnel, 2010] предлагается условно разделить сеть подземных предпочтительных водопроводящих путей масштаба три склонового основные структурные группы:

- 1) система дрен главных проводников-каналов (conduits);
- 2) система доменов фильтрационного потока (macropore flow);
- 3) система путей матричного потока (matrix flow).

Дренажная сеть первого из перечисленных типов наиболее быстро (за несколько часов первые десятки часов) и непродолжительное время обеспечивает реакцию водотока выпадение дождя (event water) и, как правило, происходит их потепление и разбавление дождевыми водами. В этой сети наблюдается свободное стекание склоновых вод, причем по авторским наблюдениям водность таких потоков после выпадения серии обильных дождей (с 100-150 mm/cytсуммарным слоем может возрастать на 2 порядка и более, при этом наблюдается выход потоков на поверхность.

Система фильтрационных доменов воду вбирает и отдает медленнее (от нескольких до многих суток), вытесняя накопленный ранее влагозапас по принципу поршневого механизма (piston effect) [Uchida, van Meerveld, McDonnel, Galeani et al., 2011]. Содержание растворенных веществ в речной воде при этом возрастает по мере вытеснения более холодной «старой воды» просачивающейся «новой водой» силу достаточности времени выщелачивания этих веществ из дренируемых пород и понижения температуры [Galeani et al., 2011].

Система путей матричного (дисперсного) стока соответствует предпочтительным

водопроводящим путям в масштабе почвенного профиля [Умарова, 2011; Galeani et al., 2011], контролирует малоподвижную часть почвенных вод и, вообще говоря, не является значимой для стокоформирования в том смысле, что практически не различима в отклике рек на межгодовой и многолетний режим атмосферного увлажнения. Скорость движения воды в системе путей дисперсного стока составляет порядка 0,01 мм/с [Angermann et al., 2017].

С учетом классификаций трещин горных пород [Степанов, 1989] есть основание полагать, что каменные потоки, а следовательно и связанные с ними системы подземных дрен, вероятно, приурочены к относительно крупным — в масштабе склона — локальным разрывным нарушениям или, по В.Н. Жиленкову [1975], разломам. Линейные размеры таких структур в данном случае исчисляются сотнями и первыми тысячами метров, ширина — первыми метрами.

Системы доменных предпочтительных водопроводящих путей, очевидно, сосредоточены в местах развития трещин (macropore flow [Weiler, 2017]) и почвенных трубок различного генезиса (pipeflow [Uchida, van Meerveld, McDonnel, 2005]) в пределах элювиальных почвенных горизонтов. фильтрационные Такие каналы имеют протяженность от 10 см до первых десятков метров (в районах распространения трещинных вод) и ширину от 0,1 до десятков сантиметров [Степанов, 1989; Гаврилов, 2014].

Системы дисперсных водопроводящих путей контролируются, по всей вероятности, сетью микротрещин и капиллярных пор длиной существенно менее 10 см и шириной менее 0,1 см [Мудров, 2007], определяя «фестонный» (в виде отдельных «языков») вид фронта вертикального промачивания в почвенном профиле [Умарова, 2011], но с учетом маломощности аккумулятивного горизонта и высокой каменистости почв.

Выводы

Полученные авторами данные показывают, что склоновый сток осуществляется в виде постоянной сети подповерхностных потоков – дрен, контролируемых системой

преимущественных водопроводящих путей. Наиболее крупные из этих потоков по своим динамическим характеристикам сопоставимы с первичными поверхностными водотоками горных районов в периоды межени и, по всей видимости, представляют собой основную форму взаимодействия склонового и руслового стока в пределах речного бассейна. Крупные предпочтительные водопроводящие пути масштаба склона часто приурочены к каменным потокам – узким полосам крупнообломочных отложений, которые могут быть связаны с небольшими разрывными нарушениями, вероятно тектонического генезиса. Они далеко не всегда выражены в рельефе и под пологом леса трудно выявляются средствами дистанционного зондирования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного темам НИР 0272-2019-0027 задания ПО (ТИГ ДВО РАН) и 0147-2019-0001 (ИВП РАН) финансовой поддержке РФФИ (гранты 20-35-70027, 19-05-00353, 17-05-00217). Авторы выражают благодарность А.М. Тарбеевой (МГУ им. M.B. к.г.н. Ломоносова), к.г.н. П.А. Беляковой (ИВП РАН), к.г.н. Л.С. Лебедевой и к.г.н. О.М. Макарьевой (ИМЗ СО РАН), к.г.-м.н. А.А. Абрамову (ИФХиБПП РАН), студентам МГУ им. М.В. Ломоносова Э.-Л.Д. Ликарь, А.А. Мироненко, К.М. Панышевой, К.К. Жбакову, 3.А. Сучилиной, а также студенту ДВФУ Д.А. Касурову за активное участие в полевых экспериментах и наблюдениях.

Литература

Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Гопченко Е.Д., Сербов Н.Г., Завалий Н.В. Механизм криогенного регулирования стока в

Для развития исследований в данном направлении предполагается адаптация развитие технических и модельных аспектов трассерной методологии [Гарцман, Шамов, 2015; Губарева и др., 2019], а также географическое расширение исследований предпочтительных водопроводящих путей в масштабе склонов. Детальное изучение строения склоновых отложений с позиций структурной гидрогеологии и водного режима горных склонов в различных физико-географических условиях проверить гипотезу о существенной роли активных и реликтовых каменных потоков в концентрации гравитационных склоновых вод и, следовательно, формировании В дождевых паводков в бассейнах горных рек, особенно в районах резкими внутрисезонными колебаниями атмосферного увлажнения.

Acknowledgments

The work was implemented in the framework of the state assignments within the Research Topic No. 0272-2019-0027 (Pacific Geographical Research Institute) and the Topic No. 0147-2019-0001 (Water Problems Institute) and, also, at financial support by the Russ. Foundation for Basic Research (grants No. 20-35-70027, 19-05-00353, and 17-05-00217). The authors express their gratitude Dr. A. Tarbeeva (Lomonosov Moscow State University), Dr. P. Belyakova (Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences), Dr. L. Lebedeva and Dr. O. Makaryeva (Mel'nikov Permafrost Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), Dr. A. Abramov (Institute for Physical, Chemical and Biological Problems in Soil Science of Russian Academy of Sciences), the students E.-L. Likar, A. Mironenko, K. Panysheva, K. Zhbakov and Z. Suchilina (Lomonosov Moscow State University) and D. Kasurov (Far Eastern Federal University) for their active participation in field experiments and observations.

References

Alekseev V.R., Boiaryntsev Ye.L., Gopchenko Ye.D., Serbov M.G., Zavaliy N.V. Mekhanizm kriogennogo regulirovaniya stoka v формировании водного баланса малых горных рек зоны многолетнемерзлых пород // Український гідрометеорологічний журнал. $2011. \, N\!\!\!_{\, 2} \, 8. \, C. \, 182–194.$

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.

Бефани А.Н., Урываев П.А., Бефани Н.Ф., Одрова Т.В., Федорей В.Г. Экспериментальные исследования дождевого стока в Приморье (1962 год) // Вопросы формирования паводков на реках Дальнего Востока (по материалам экспедиционных исследований 1962 года) / Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института. Вып. 22. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. С. 3–123.

Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Кожевникова Н.К. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101.

Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб: Нестор-История, 2013. 672 с.

Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 262 с.

Гаврилов А.А. Разрывные нарушения южного Приморья как зоны геодинамического риска (по данным геолого-геоморфологического изучения побережий залива Петра Великого) // Вестник Дальневосточного отделения Российской Академии Наук. 2014. № 4 (176). С. 75–86.

Гариман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132.

DOI: <u>10.31857/S0321059620020042</u>.

Гариман И.Н., Лыло В.М., Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока / Труды

formirovanii vodnogo balansa malykh gornykh rek zony mnogoletnemerzlykh porod [The mechanism of cryogenic runoff control at the formation of water balance of small mountain rivers in the area of permafrost rocks]. *Ukrains'kii gidrometeorologichnii zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal*], 2011, no. 8, pp. 182–194. (In Russian; abstract in English).

Angermann L., Jackisch C., Allroggen N., Sprenger M., Zehe E., Tronicke J., Weiler M., Blume T. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, iss. 7, pp. 3727–3748. DOI: 10.5194/hess-21-3727-2017.

Arzhanova V.S., Elpatyevskii P.V. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez* [Geochemistry of landscapes and technogenesis]. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 196 p. (In Russian).

Befani A.N., Uryvaev P.A., Befani N.F., Odrova T.V., Fedorey V.G. Eksperimental'nye issledovaniya dozhdevogo stoka v Primor'e (1962 g.) [Experimental investigation into rain runoff in Primorye (1962)]. In: Voprosy formirovaniya pavodkov na rekakh Dal'nego Vostoka (po materialam ekspeditsionnykh issledovaniy 1962 g.) [Issues of flood generation in rivers of Far East (based on the field studies in 1962)]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1966, pp. 3–123. (In Russian).

Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 127, pp. 171–192. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2013.09.008.

Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K. Ionnyi sostav geneticheskikh tipov vod malogo rechnogo basseina: statsionarnye issledovaniya v tsentral'nom Sikhote-Aline [Main ions in water of different genetic types in a small river basin: case experimental studies in Central Sikhote-Alin]. *Tikhookeanskaya Geologia [Pacific Geology]*, 2014, vol. 33, iss. 2, pp. 90–101. (In Russian; abstract in English).

Brutsaert W. *Hydrology: an Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 p. DOI: 10.1017/CBO9780511808470.

Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института. Вып. 34. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 264 с.

Гариман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599. DOI: 10.7868/S0321059615060048.

Глотова Л.П., Глотов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колымы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1 (9). С. 2321–2324.

Говорушко С.М. Курумовый морфолитогенез. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 120 с.

Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В. Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 4. С. 387–399. DOI: 10.7868/S0321059616040064.

Губарева Т.С., Гариман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 6. C. 126-140. DOI: 10.31857/S2587-556620196126-140.

Жиленков В.Н. Руководство по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений. Л.: Энергия, 1975. 75 с.

Жильцов А.С. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2008. 332 с. Захаров В.С., Симонов Д.А., Гильманова Г.З., Диденко А.Н. Фрактальная геометрия речной сети и неотектоника южного Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 6. С. 48–64. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64. Карасев И.Ф., Шумков И.Г. Гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 384 с.

Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 1996, vol. 24, iss. 11, pp. 1025–1028. DOI: 10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2. Galeani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S. Validation of vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index. *Journal of Hydrology*, 2011, vol. 396, iss. 3–4, pp. 233–245. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012.

Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote-Alin // Water Resources, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 179-188. DOI: 10.1134/S0097807820020049. (Russ. Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Shekman E.A. Formy lineinoi organizatsii sklonovogo stoka v srednegor'e (na primere Sikhote-Alinya). Vodnye resursy, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 123–132. DOI: 10.31857/S0321059620020042). Gartsman I.N., Lylo V.M., Chernenko V.G. Pavodochnyi stok rek Dal'nego Vostoka [Flood runoff of the Far East rivers]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 264 p. (In Russian).

Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the Far East Region based on modern observational instruments. Water Resources, 2015, vol. 42, 6, pp. 766-775. iss. DOI: 10.1134/S0097807815060044. (Russ. ed.: V.V. Naturnye Gartsman B.I., Shamov issledovaniya stokoformirovaniya Dal'nevostochnom regione na osnove sovremennykh sredstv nablyudenii Vodnye resursy, 2015, vol. 42, iss. 6, pp. 589-599. DOI: 10.7868/S0321059615060048).

Gavrilov A.A. Razryvnye narusheniya yuzhnogo Primor'ya kak zony geodinamicheskogo riska (po dannym geologo-geomorfologicheskogo izucheniya poberezhii zaliva Petra Velikogo) [Faults of the South Primorye as zone of geodynamic risks (according to the data of geologic and geomorphologic investigation of shores in the Peter the Great Bay)]. Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi Akademii Nauk [Vestnik of

Короткий А.М. Оледенения и псевдогляциальные образования юга Дальнего Востока СССР // Плейстоценовые оледенения Востока Азии. Магадан: Изд-во Северо-вост. комплексного института ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 186–192.

Коромкий А.М., Никольская В.В., Скрыльник Г.П. Сходство и различие в общем и частном морфолитогенезе в условиях муссонного и континентального климата // Климатическая геоморфология Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 124–138.

Кулаков В.В. Формирование и методы оценки естественных ресурсов подземных вод Комсомольского горнорудного района // Природные воды Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока. Сборник 13. Хабаровск: Хабаровский КНИИ ДВНЦ АН СССР, Приамурский (Хабаровский) фил. геогр. об-ва СССР, 1973. Хабаровск: Книжное издательство, 1973. С. 274—283.

Кулаков В.В. Месторождения пресных подземных вод Приамурья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 152 с.

Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск: ГЕО, 2013. 244 с. Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в

криолитозоне равнин и гор: основные понятия и определения. М.: Научный мир, 2007. 316 с.

Назаренко Л.Ф., Бажанов В.А. Геология Приморского края. Ч. 1. Стратиграфия. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. 68 с.

Полунин Г.В. Динамика и прогноз экзогенных процессов: физические аспекты экзогенных процессов. М.: Наука, 1989. 232 с.

Сорокина А.Т. Гидрогеологические структуры Приамурья, их эволюция и флюидный режим // Тихоокеанская геология. 1992. Т. 11. № 3. С. 123–133.

Сорокина А.Т. Роль разломов в формировании обводненных зон Алданской гидрогеологической области // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25, № 6. С. 57–66.

Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences], 2014, iss. 4 (176), pp. 75–86. (In Russian; abstract in English).

Gerke H.H., German P., Niebel J. Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale. *Vadose Zone Journal*, 2010, vol. 9, iss. 2, pp. 207–212. DOI: 10.2136/VZJ2010.0059.

Glotova L.P., Glotov V.E. Rol' podzemnykh vod v obshchem stoke malykh gornykh rek basseina reki Kolymy [Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma River]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*], 2012, vol. 14, iss. 1 (9), pp. 2321–2324. (In Russian; abstract in English).

Govorushko S.M. *Kurumovyi morfolitogenez* [Kurum morpholithogenesis]. Vladivostok, Publ. of Far East Science Center of the USSR Academy of Sciences, 1986. 120 p. (In Russian).

Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. Water Resources, 2016, vol. 43, 4, 629-639. iss. pp. DOI: 10.1134/S0097807816040060. (Russ. Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analiz prirodnykh trasserov i geneticheskikh sostavlyayushchikh stoka modelyakh smesheniya (na primere malykh basseinov v Primor'e). Vodnye resursy, 2016, pp. 387-399. vol. 43, iss. 4, DOI: 10.7868/S0321059616040064).

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling. Izvestiva Rossiiskoi akademii nauk. geograficheskaya [Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya], 2019, iss. 6, pp. 126–140. DOI: 10.31857/S2587-<u>556620196126-140</u>. (In Russian; English).

Степанов В.М. Введение в структурную гидрогеологию. М.: Недра, 1989. 229 с.

Тарбеева А.М., Гарцман Б.И. Морфогенез первичных звеньев гидрографической сети: натурные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 114–121. DOI: $\underline{10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121)}$.

Тимофеев Д.А. Терминология денудации и склонов. М.: Наука, 1978. 242 с.

Триас и юра Сихотэ-Алиня. Книга 1. Терригенный комплекс. Владивосток: Дальнаука, 2004. 417 с.

Тюрин А.И., Романовский Н.Н., Полтев Н.Ф. Мерзлотно-фациальный анализ курумов. М.: Наука, 1982. 150 с.

Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 266 с.

Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.

Худяков Г.И., Денисов Е.П., Короткий А.М., Кулаков А.П., Никонова Р.И., Чернобровкина Е.И. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Юг Дальнего Востока. М.: Наука, 1972. 424 с.

Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.

Angermann L., Jackisch C., Allroggen N., Sprenger M., Zehe E., Tronicke J., Weiler M., Blume T. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. Vol. 21. Iss. 7. P. 3727–3748. DOI: 10.5194/hess-21-3727-2017.

Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 127. P. 171–192. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2013.09.008.

Brutsaert W. Hydrology: an Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 p. DOI: 10.1017/CBO9780511808470.

Karasev J.F., Shumkov I.G. *Gidrometriya* [*Hydrometry*]. Leningrad, Publ. Gidrometeizdat, 1985. 384 p. (In Russian; abstract in English).

Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D., Golozubov V.V., Gonokhova N.G. *Geology and minerals deposites of Primorsky krai (territory)*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka. 1996. 91 p. (Russ. ed.: *Geologiya i poleznye iskopaemye Primorskogo kraya: ocher*k. Vladivostok, Publ. Dal'nauka. 1995. 68 p.).

Khudyakov G.I., Denisov E.P., Korotkii A.M., Kulakov A.P., Nikonova R.I., Chernobrovkina E.I. Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka. Yug Dal'nego Vostoka [Evolution history of the Siberia and Far East terrain: the South of Far East]. Moscow, Publ. Nauka, 1972. 424 p. (In Russian).

Korotkii A.M. Oledeneniya i psevdoglyatsial'nye obrazovaniya yuga Dal'nego Vostoka SSSR [Glatiation and pseudo-glacial formations of the South of the Far East of the USSR]. In: *Pleistotsenovye oledeneniya Vostoka Azii [Pleistocene glaciations of the East of Asia]*. Magadan, Publ. of North-East Integrated Scientific Research Institute of Far East Science Center of the Academy of sciences of the USSR, 1984, pp. 186–192. (In Russian).

Korotkii A.M., Nikol'skaya V.V., Skryl'nik G.P. Skhodstvo i razlichie v obshchem i chastnom morfolitogeneze v usloviyakh mussonnogo i kontinental'nogo klimata [Similarity and differences in general and partial morpholithogenesis under monsoon and continental climate conditions]. In: *Klimaticheskaya geomorphologiya Dal'nego Vostoka [Climatic geomorphology of the Far East]*. Vladivostok, Far East Science Center of the Academy of sciences of the USSR Publ. 1976, pp. 124–138. (In Russian).

Kulakov V.V. Formirovaniye i metody otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod Komsomol'skogo gornorudnogo rayona [Formation and methods of assessing the natural groundwater resources of the Komsomolsk mining region]. In: *Prirodnye vody Dal'nego Vostoka [Natural waters of the Far East]*. Khabarovsk, 1973, pp. 274–283. (In Russian).

Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. Fault zone architecture and permeability structure // Geology. 1996. Vol. 24. Iss. 11. P. 1025–1028. DOI: 10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2.

Galeani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S. Validation of vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 396. Iss. 3–4. P. 233–245. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012.

Gerke H.H., German P., Niebel J. Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale // Vadose Zone Journal. 2010. Vol. 9. Iss. 2. P. 207–212. DOI: 10.2136/VZJ2010.0059.

McGuire K.J., McDonnel J.J. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities // Water Resources Research. 2010. Vol. 46. Iss. 10. W10543. DOI: 10.1029/2010WR009341.

Pierce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from? // Water Resources Research. 1986. Vol. 22. Iss. 8. P. 1263–1272. DOI: 10.1029/WR022i008p01263.

Seto M. Geomorphic processes since the later last glacial indicated by the formation of block deposition features in mid-latitude temperate zones // Weathering: Types, Processes and Effects / Matthew J.C. (ed.). New York: Nova Science Publishers, 2011. P. 69–128.

Seto M., Kim S-H., Tanaka Y. Hydrological survey of the block stream in Mt. Maneo, South Korea // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием) «Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии» (г. Якутск, 22–28 июня 2015 г.). Издательство Якутск: Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2015. C. 352-355.

Suzuki M., Inagaki H., Ueno S., Ujihara M., Ohno H., Ogawa K., Goto S., Nakamura Y., Hara S., Mima K. Large-scale slope failures and their mechanism due to heavy rainfall by Typhoon No.12 in 2011 in the Kii Peninsula of Japan // Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in the Asian

Kulakov V.V. Mestorozhdeniya presnykh vod Priamurya [Fresh groundwater deposits at the Amur Region]. Vladivostok, Publ. of FEB AS USSR, 1990. 152 p. (In Russian).

McGuire K.J., McDonnel J.J. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities. *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, iss. 10, W10543. DOI: 10.1029/2010WR009341.

Mikhailov V.M. *Poymennye taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain taliks of the Northeast of Russia]*. Novosibirsk, Publ. GEO, 2013. 244 p. (In Russian).

Mudrov Yu.V. Merzlotnye yavleniya v kriolitozone ravnin i gor: osnovnye ponyatiya i opredeleniya. [Permafrost phenomena in cryolithozone of plains and mountains: basic concepts and definitions]. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2007. 316 p. (In Russian).

Nazarenko L.F., Bazhanov V.A. Geologiya Primorskogo kraya. Chast' 1. Stratigrafiya [Geology of Primorsky Territory. Part 1. Stratigraphy]. Vladivostok, Far East Branch of the Academy of Sciences of the USSR. 1989. 68 p. (In Russian).

Pierce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. Storm runoff generation in humid headwater catchments.

1. Where does the water come from? *Water Resources Research*, 1986, vol. 22, iss. 8, pp. 1263–1272. DOI: 10.1029/WR022i008p01263.

Polunin G.V. Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov: fizicheskie aspekty ekzogennykh protsessov [Dynamics and prediction of exogenous processes: physical aspects of exogenous processes]. Moscow, Publ. Nauka, 1989. 232 p. (In Russian).

Seto M. Geomorphic processes since the later last glacial indicated by the formation of block deposition features in mid-latitude temperate zones. In: Matthew J.C. (ed.) *Weathering: Types, Processes and Effects.* New York: Nova Science Publishers, 2011, pp. 69–128.

Seto M., Kim S-H., Tanaka Y. Hydrological survey of the block stream in Mt. Maneo, South Korea. *Proceedings of the National conference on*

Region (CECAR6) «Embracing the Future through Sustainability» (Jakarta, Indonesia, 20-22 August, 2013). P. 35–42.

Uchida T., van Meerveld I., McDonnell J.J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response // Journal of Hydrology. 2005. Vol. 311. Iss. 1–4. P. 117–133. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012. *Uhlenbrook S.* Catchment hydrology – a science in which all processes are preferential // Hydrological Processes. 2006. Vol. 20. Iss. 16. P. 3581–3585. DOI: 10.1002/hyp.6564.

Weiler M. Macropores and preferential flow − a love-hate relationship // Hydrological Processes. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 15–19. DOI: 10.1002/hyp.11074.

groundwater in Eastern Russia (XXI conference on groundwater in Siberia and Far East with international participation) «Fundamental and applied problems in hydrogeology». (Yakutsk, June 22–28, 2015). Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press, 2015, pp. 352–355.

Shepelev V.V. *Nadmerzlotnye vody kriolitozony* [Suprapermafrost waters in the cryolithozone]. Novosibirsk, Publ. Geo, 2011. 169 p. (In Russian).

Sorokina A.T. Gidrogeologicheskie struktury Priamur'ya, ikh evolyutsiya i flyuidnyi rezhim [Hydrogeological structures at the Amur region, their evolution and fluid conditions]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*, 1992, vol. 11, iss. 3, pp. 123–133. (In Russian).

Sorokina A.T. Rol' razlomov v formirovanii obvodnyonnykh zon Aldanskoy gidrogeologicheskoy oblasti [The role of faults in the formation of inundated zones within the Baikal-Aldan hydrogeological fold region]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*, 2006, vol. 25, iss. 6, pp. 57–66. (In Russian; abstract in English).

Stepanov V.M. *Vvedenie v strukturnuyu gidrogeologiyu [Introduction in structural hydrogeology]*. Moscow, Publ. Nedra, 1989. 229 p. (In Russian).

Suzuki M., Inagaki H., Ueno S., Ujihara M., Ohno H., Ogawa K., Goto S., Nakamura Y., Hara S., Mima K. Large-scale slope failures and their mechanism due to heavy rainfall by Typhoon No.12 in 2011 in the Kii Peninsula of Japan. *Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR6) «Embracing the Future through Sustainability» (Jakarta, Indonesia, 20-22 August, 2013)*. P. 35–42.

Tarbeeva A.M., Gartsman B.I. Morfogenez pervichnykh zven'ev gidrograficheskoi seti: naturnye issledovaniya v Tsentral'nom Sikhote-Aline [Morphogenesis of primary components of the hydrographic network: field investigations in central Sikhote-Alin]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]*, 2017, iss. 4, pp. 114-121. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121). (In Russian; abstract in English).

Timofeev D.A. *Terminologiya denudatsii i sklonov* [Denudation and slope terminology]. Moscow, Publ. Nauka, 1978. 242 p. (In Russian).

Trias i yura Sikhote-Alinya. Kniga 1. Terrigennyi kompleks [Triassic and Jurassic of the Sikhote-Alin. Book 1. Terrigenous assemblage]. Vladivostok, Publ. Dalnauka, 2004. 417 p. (In Russian; abstract in English).

Tyurin A.I., Romanovskii N.N., Poltev N.F. *Merzlotno-fatsial'nyi analiz kurumov [Permafrost facies analysis of kurums]*. Moscow, Publ. Nauka, 1982. 150 p. (In Russian).

Uchida T., van Meerveld I., McDonnell J.J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 311, iss. 1–4, pp. 117–133. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012. Uhlenbrook S. Catchment hydrology – a science in which all processes are preferential. *Hydrological Processes*, 2006, vol. 20, iss. 16, pp. 3581–3585. DOI: 10.1002/hyp.6564.

Umarova A.B. Preimushchestvennye potoki vlagi v pochvakh: zakonomernosti formirovaniya i znachenie v funktsionirovanii pochv [Preferential flow in soils: formation regularity and significance in soil functioning]. Moscow, Publ. GEOS, 2011. 266 p. (In Russian; abstract in English).

Vasilenko N.G. Gidrologiya rek zony BAM: ekspeditsionnye issledovaniya [Hydrology of the BAM Zone Rivers: Field Researchers]. St. Petersburg, Publ. Nestor-Historia, 2013. 672 p. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov Yu.B. Voprosy gidrologii dozhdevykh pavodkov na malykh vodosborakh Sredney Azii i Yuzhnogo Kazakhstana [Discussions on hydrology of rain floods at small watersheds in Middle Asia and South Kazakhstan]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1967. 262 p. (In Russian).

Weiler M. Macropores and preferential flow – a love-hate relationship. *Hydrological Processes*, 2017, vol. 31, iss. 1, pp. 15–19. DOI: 10.1002/hyp.11074.

Zakharov V.S., Simonov D.A., Gilmanova G.Z., Didenko A.N. The fractal geometry of the river network and neotectonics of south Sikhote-Alin.

Russian Journal of Pacific Geology, 2020, vol. 14, 6, 526-541. pp. DOI: 10.1134/S181971402006007X. (Russ. ed.: Zakharov V.S., Simonov D.A., Gil'manova G.Z., Didenko A.N. Fraktal'naya geometriya rechnoi seti i neotektonika yuzhnogo Sikhote-Alinya. Tikhookeanskaya geologiya, 2020, vol. 39, iss. 6, pp. 48-64. DOI: <u>10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64</u>). Zhilenkov V.N. Rukovodstvo po metodike opredeleniya fil'tratsionno-suffozionnykh svoistv gidrotekhnicheskikh skal'nykh osnovanii sooruzhenii [Guidelines for the methodology for determining the filtration-suffusion properties of rocky bases of hydraulic constructions]. Leningrad, Publ. Energiya, 1975, 75 p. (In Russian).

Zhil'tsov A.S. *Gidrologicheskaya rol' gornykh khvoino-shirokolistvennykh lesov Yuzhnogo Primor'ya* [Hydrological role of mountain coniferous-broad-leaved forests of the Southern Primorye]. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 2008. 332 p. (In Russian).

HAУЧНЫЕ ДИСКУССИИ SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 556.51:551.34+911.9(571.651)

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.297

РЕАКЦИЯ СТОКА МАЛЫХ РЕК И НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД АНАДЫРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ НА ПЕРЕПАДЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

О.Д. Трегубов¹, Б.И. Гарцман^{2,3}, В.В. Шамов^{3,4}, Л.С. Лебедева⁴, А.М. Тарбеева⁵

¹Северо-Восточный комплексный научноисследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, Россия; ²Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; ³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; ⁴Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия; ⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

gartsman@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования источников питания и суточного режима стока рек и ручьев Анадырской низменности в меженный период 2019 года. На примере полевых материалов рассмотрена проблема воздействия скачков атмосферного водно-физические давления на свойства торфяных почв и режим стока малых рек низменностей криолитозоны. Установлено, что перепад атмосферного суточный амплитудой 1,2 кПа в районе реки Угольная-Дионисия, расположенной границах Анадырской низменности на Чукотке, привел к синхронному понижению, а затем повышению надмерзлотных уровня подземных поверхностных речных вод в бассейне реки на 2,5-7,8 см. Описаны водно-физические свойства торфяных почв, предложен механизм воздействия атмосферного давления на влагоемкость тундровых почв и сток малых рек в фазу летней Рассмотрены межени.

RESPONSE OF STREAMS AND SUPRAPERMAFROST WATERS OF THE ANADYR LOWLAND TO ATMOSPHERIC PRESSURE DROP

Oleg D. Tregubov¹, Boris I. Gartsman^{2,3}, Vladimir V. Shamov^{3,4}, Ludmila S. Lebedeva⁴, Anna M. Tarbeeva⁵

¹North-Eastern Complex Research Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia; ²Institute for Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ³Pacific Institute of Geography, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia; ⁴Melnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; ⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

gartsman@inbox.ru

Abstract. The article presents the results of a study of water supply sources and the daily flow regime of rivers and streams of the Anadyr lowland in the lowwater period of 2019. Regarding the field materials, the problem of the impact of atmospheric pressure surges on the water-physical properties of peat soils and the runoff regime of small rivers in the cryolithozone lowlands is considered. It was found that the daily atmospheric pressure drop with an amplitude of 1.2 kPa in the Ugolnaya-Dionisiya River watershead, located within the Anadyr Lowland in Chukotka, led to a synchronous decrease and then an increase in the level of suprapermafrost and river waters by 2.5–7.8 cm. The water-physical properties of peat soils are described, the mechanism of the influence of atmospheric pressure on the tundra soils moisture capacity and the small rivers runoff during the summer dry season is proposed. The geocryological, hydrogeological and hydrological conditions necessary the manifestation of discovered effect are considered.

гидрогеологические геокриологические, И гидрологические условия необходимые для проявления обнаруженного эффекта воздействия скачков атмосферного давления на речной сток. Известные механические свойства торфяного покрова тундр и водно-физические свойства органогенного горизонта тундровых почв позволили предложить гипотезу воздействия атмосферного давления на уровень надмерзлотных вод посредством изменения влагоемкости торфа при его пластично-упругой деформации. Условием положительной реакции надмерзлотного и речного стока на скачки атмосферного давления являются: контактное с торфяным горизонтом почв залегание зеркала подземных вод; неполная влагоемкость органогенного горизонта почв; преимущественное питание реки надмерзлотными водами наличие И разветвленной дренажной сети. Представляется перспективным дальнейшее изучение атмосферных барических эффектов в подземных низменностей И поверхностных водах криолитозоны, а также в болотных ландшафтах более южных широт, где имеются условия для их проявления. ландшафтных условиях Анадырской низменности при отсутствии атмосферных осадков барические скачки уровня надмерзлотных вод могут рассматриваться как механизм дополнительной подпитки влагой корнеобитаемого слоя почв в период активной вегетации тундровой растительности.

Ключевые слова: криолитозона; надмерзлотные воды; речной сток; колебания атмосферного давления; барический эффект; Анадырская низменность.

Введение

Явления изменения уровня подземных и поверхностных вод в результате естественных флуктуаций внешнего давления достаточно давно упоминаются как в российской [Каменский и др., 1938; Зырянов, Хубларян, 2006; Фомин, 2016; Штенгелов, Филимонова, Шубин, 2017; и другие], так и в мировой научной литературе

The known mechanical properties of the tundra peat cover and the water-physical properties of the organogenic horizon of tundra soils made allow to propose a hypothesis of the effect of atmospheric pressure on the level of suprapermafrost waters by changing the moisture capacity of peat during its plastic-elastic deformation. The condition for a positive reaction of suprapermafrost and river runoff to fluctuations in atmospheric pressure are: the bedding of the groundwater table in contact with the peat horizon; incomplete moisture capacity of the organogenic soil horizon; predominant feeding of the river by suprapermafrost waters and the presence of an extensive drainage network. It seems promising to further study the atmospheric baric effects of baroeffects in the underground and surface waters of the lowlands of the permafrost zone, as well as in the bog landscapes of more southern latitudes, where there are conditions for their manifestation. In the landscape conditions of the Anadyr Lowland, in the absence of atmospheric precipitation, pressure jumps in the level of suprapermafrost waters can be considered as a mechanism for additional moisture replenishment of the root layer of soils during the period of active vegetation of tundra vegetation.

Keywords: permafrost zone; suprapermafrost waters; river runoff; atmospheric pressure fluctuations; baroeffect; Anadyr lowland.

[Hylckama, 1968; Turk, 1975; Salama, Bartle, Farrington, 1994; Moraetis et al., 2010; и другие]. Например, в работе [Штенгелов, Филимонова, Шубин, 2017] было рассмотрено воздействие перепадов атмосферного давления на крупные артезианские бассейны — барические эффекты (далее — бароэффекты). Фомин Ю.Ф. [Фомин, 2016] изучал влияние приливов и ветровых нагонов на колебания уровней подземных и

Tregubov O.D., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lebedeva L.S., Tarbeeva A.M. Response of streams and Suprapermafrost waters of the Anadyr lowland to atmospheric pressure drop. *Hydrosphere*. *Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 297–309 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.297.

поверхностных вод в прибрежной зоне, так называемый пампинг-эффект. Различные аспекты влияния атмосферного давления на речной сток и дебит родников рассматриваются в относительно недавних публикациях [Соколов, Завилейский, 1994; Марунич, Марунич, Завилейский, Ливанова, 1998; Zhuravin, Markov, 2010; Лавров, Марков, 2018]. Несмотря на довольно давнюю известность указанного явления, его нельзя считать хорошо изученным. Научные публикации, отражающие специальные исследования данного крайне явления. немногочисленны. Представления о различных проявлениях бароффектов пока не включены в концептуальный базис теории речного стока, что проявляется практическом отсутствии математических моделей речного стока, отражающих данный аспект гидрологического режима.

Т.Е.А. Хилкама [Hylckama, 1968] на основе измерений в Аризоне установил тесную связь между внутрисуточными изменениями уровня грунтовых вод и атмосферным давлением воздуха. Л. Тюрк [Turk, 1975], исследуя внутрисуточную динамику уровня грунтовых вод в регионе Бонневиль, штат Юта, в качестве ее наиболее вероятной причины назвал вариации давления воздуха. Р.Б. Салама с соавторами [Salama, Bartle, Farrington, 1994] также сообщил о разнонаправленных внутрисуточных изменениях уровней подземных вод и давления воздуха на исследовательском полигоне В Австралии. [Lautz, 2008], проанализировав Л.К Лаутц внутрисуточные колебания уровня грунтовых вод в пойменной области Ред-Каньон-Крик, штат Вайоминг, называет динамику давления и температуры воздуха возможными причинами суточного ритма помимо транспирации. Д. Мораетис с соавторами [Moraetis et al., 2010] уровня подземных обнаружили связь карстового массива на Крите в Греции с атмосферным давлением.

В данной статье представлены результаты исследования источников питания и суточного режима стока рек и ручьев Анадырской

низменности в меженный период 2019 года. В ходе полевых наблюдений было обнаружено воздействие на сток реки Угольная-Дионисия перепада атмосферного давления амплитудой 1,2 кПа. По результатам полевых экспериментов были установлены возможные механизмы и реализации влияния атмосферного давления на сток тундровых рек. Обсуждается роль и значимость обнаруженного воздействия атмосферного давления на надмерзлотный водоносный горизонт и сток малых рек в области распространения тундровых и болотных почв криолитозоны.

Природные условия

Анадырская низменность представляет собой равнину с отметками высот от 2 до 150 м, расчлененную и обрамленную по краям горными обособленными сооружениями, поднятиями в виде кряжей и хребтов. Реки низменности отличаются весенним половодьем, летне-осенним паводком прерывистым устойчивой зимней меженью. Питание рек преимущественно атмосферное, слой стока по данным многолетних наблюдений составляет порядка 250 мм. Климат на большей части описываемой территории субарктический морской. Среднегодовая температура по данным метеостанции Анадырь ¹ за период с 1981 по 2010 год составила -5°C. Осадков выпадает 382 мм в год, из них большая часть в зимний За период с 1976 по 2016 год среднегодовая температура воздуха повысилась 2,2°C, годовое количество осадков увеличилось на 66 мм.

Мощность сплошной многолетней мерзлоты с севера на юг уменьшается от 300 до 50 м, в южных районах территории она становится прерывистой. Температура мерзлых грунтов уменьшается с севера на юг от -7,1 до -1,0°С. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0,45–0,6 м на пологих склонах тундровых увалов до 0,6–1,5 м на склонах крутизной более 3° и в поймах рек. В период с 1994 по 2019 год глубина сезонного протаивания

¹ Здесь и далее информация по климату с сайта Гидрометцентра России. https://meteoinfo.ru/forecasts/russia/chukotskij-ar/anadyr

в автономных ландшафтах возросла на 15 см или 36% от начального значения, в днище озерноболотных котловин увеличение составило 34%, на склонах и в подножье тундровых увалов – 27% [Трегубов, Уяганский, Нутевекет, 2020]. В пределах низменности наибольшее распространение имеют тундровые глеевые и оглеянные торфянистые и торфяные почвы. Надмерзлотный водоносный горизонт образуется в первую декаду июня и существует до полного промерзания деятельного слоя поздней осенью. Мощность (0-45 см) и глубина залегания надмерзлотного водоносного слоя (0-120 см) изменяются в зависимости от ландшафта и глубины сезонного протаивания в течение теплого периода года.

Объекты и методы исследований

Объекты наблюдений и экспериментов Угольнаярасположены бассейне реки Дионисия, площадью 96 км² (рисунок 1). Река находится на восточных границах Анадырской низменности в 15 км к западу от города Анадыря. Протяженность реки 24 км. Отметки высоты уреза воды – от 100 и 180 м в истоках до 2,5 м в устье, которое расположено на правом берегу Анадырского лимана. Наблюдения за речным стоком проводились в 6 км от устья и в истоках реки на ручье Ягодный. В бассейне ручья Ягодный на пологом склоне тундрового увала в двух шурфах глубиной 35 см измерялся уровень воды. Параметры стока реки и уровня надмерзлотных вод изучались с 29 июня по 10 июля 2019 года. Среднесуточная температура во время полевых работ составила 12,1°C. Сплошной снежный покров в бассейне реки, как и в Анадырской низменности в целом, сошел за 2 недели до начала наблюдений. После схода снежного покрова до начала работ выпало 2,2 мм осадков, за время полевых наблюдений – 1,5 мм. По данным метеостанции Анадырь средняя температура за 4 месяца теплого периода 2019 года составила 10,1°C. При этом выпало 95,6 мм осадков. Метеорологические условия в 2019 году, по данным многолетних наблюдений на метеостанции Анадырь, в целом близки к норме.

Измерения расхода реки Угольная-Дионисия на опорном створе производились с частотой 4 раза в сутки. Автоматизированные измерения уровня воды в шурфах и водотоках на створах, температуры почв и воды производились с интервалом 30 минут. При производстве измерений использовались следующие приборы и оборудование: приборы записи скорости течения «ПОТОК-мкр ГР-100» и «ПОТОК ГР21М»; автоматические логгеры производства фирмы HOBO Onset - измерители уровней «U20L-04» температуры «U23-003». Первичная обработка данных проводилась согласно рекомендациям производителей приборов. В обработке данных режимных наблюдений использовались инструменты Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение

За время наблюдений глубина протаивания доминирующих в бассейне торфянистых почв увеличилась с 20–25 до 30–35 см. Торфяные почвы протаяли на 6–8 см. Расход воды на опорном створе уменьшился с 709 до 145 л/с (рисунок 2).

Автоматизированные измерения температуры, уровней воды в шурфах и водотоках, скорости течения реки Угольная-Дионисия показали субгармоничные суточные циклы значений параметров. Выявленные колебания уровней и температуры речных вод, температуры почв и воды находились в противофазе. Это позволило сделать вывод, что основным источником питания реки в отсутствие атмосферных осадков являются талые воды внутрипочвенных сезонных льдов, которых в 30-сантиметровом верхнем слое почв оценены для тундровых ландшафтов бассейна в количестве 100-200 мм [Трегубов и др., 2020; Трегубов и др., 2021].

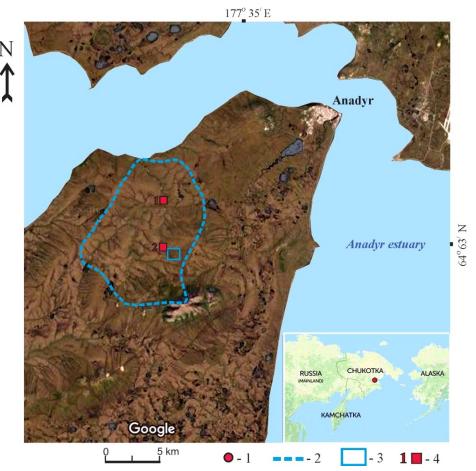


Рисунок 1. Район и объекты исследований: 1 – район работ на мелкомасштабной карте-врезке;

- 2 граница бассейна реки Угольная-Дионисия; 3 участок расположения шурфов;
- 4 гидрологические створы на реке Угольная-Дионисия (1) и ручье Ягодный (2).

Figure 1. Area and objects of research: 1 – area of work on the inset map;

- 2 border of the Ugolnaya-Dionisia river basin; 3 area of the location of the pits;
- 4 hydrological sections on the river Ugolnaya-Dionisia (1) and Yagodny creek (2).

В ходе первичной обработки данных автоматизированных измерений было обнаружено нарушение амплитуды суточных колебаний значений уровня воды в период с 2 по 5 июля 2019 года. С небольшой разницей во времени нарушения суточных циклов были зафиксированы на всех измерителях уровня воды шурфах И водотоках. Это исключало техническую неисправность аппаратуры. При этом каких-либо значимых отклонений суточных циклов температуры воды и почв выявлено не было. Прибор записи скорости течения («ПОТОК ГР21М») прервал непрерывные измерения в 23:00 и был вновь запущен 04.07.2019 (рисунок 3). С учетом технических особенностей устройства можно предположить, что прибор отключился, когда скорость воды упала до минимума (0,03 м/с) и сохранялась такой в течение 5 минут, в результате чего лопасти вертушки прекратили вращение.

Фактически наблюдалось почти синхронное падение уровней в шурфах и в реке в целом территории около 60 KM^2 , сопровождавшееся практически остановкой течения реки, так что даже отключилась вертушка, поставленная на непрерывную запись. При обсуждении причин зафиксированного нарушения режима стока реки было обращено внимание на резкое ухудшение погодных условий в период с 2 по 5 июля 2019 года, сопровождаемое туманом, низкой облачностью и падением атмосферного давления с 101 до 100,2 кПа, с последующим его ростом ДО 101,4 (рисунок 4).

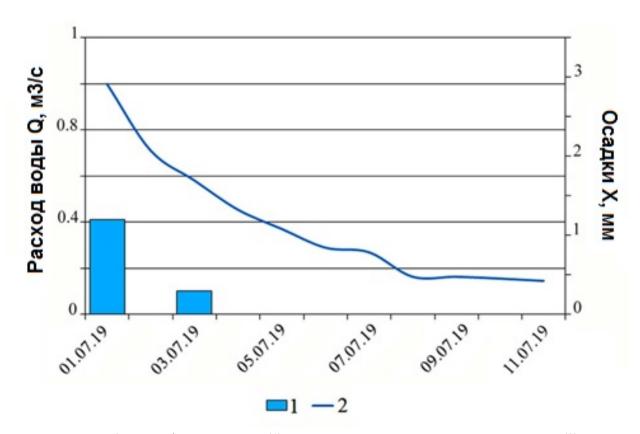


Рисунок 2. Атмосферные осадки (1) и динамика стока реки Угольная-Дионисия (2) в период наблюдений.

Figure 2. Atmospheric precipitation (1) and dynamics of the flow of Ugolnaya-Dionysia river (2) during the observation period.

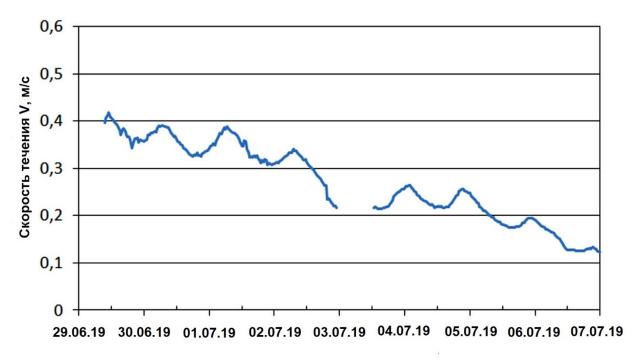


Рисунок 3. Суточная динамика скорости течения реки Угольная-Дионисия. **Figure 3**. Daily dynamics of the flow velocity of Ugolnaya-Dionysia river.

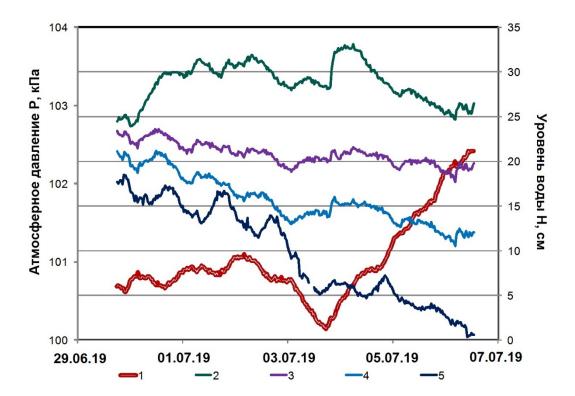


Рисунок 4. Динамика уровня надмерзлотных вод и поверхностных водотоков при изменении атмосферного давления: 1 – атмосферное давление; 2 – шурф в торфяной почве в борту склоновой ложбины; 3 – шурф в торфянистой почве в днище склоновой ложбины; 4 – уровень воды в ручье Ягодный; 5 – уровень воды в реке Угольная-Дионисия.

Figure 4. Dynamics of the level of suprapermafrost waters and surface watercourses with a change in atmospheric pressure: 1 – atmospheric pressure; 2 – pit in peat soil in the side of the slope hollow; 3 – pit in peaty soil in the bottom of the slope hollow; 4 – water level in the Yagodny brook; 5 – level of water in the Ugolnaya-Dionisia river.

В период снижения атмосферного давления уровень воды в шурфах, в зависимости от их положения на склоне, упал на 2,5 и 4,4 см. После низкого стояния уровней в течение примерно суток произошел их довольно резкий компенсационный рост на 2,6 и 5,2 см. Перепад уровня воды (падение/подъем) в ручье Ягодный составил 3,5 и 3 см, в реке Угольная-Дионисия – 7,8 и 2 см. В качестве рабочей была принята гипотеза воздействия давления атмосферы (барического эффекта) на влагоемкость органогенных горизонтов тундровых Согласно выдвинутому предположению при уменьшении атмосферного давления возрастает капиллярная влагоемкость тундровых почв, вмещающих водоносный горизонт, его водоотдача уменьшается, а это понижает уровень воды в шурфах и снижает надмерзлотный сток. При резком повышении давления и сокращении

сброс влагоемкости почв происходит удерживаемой влаги, что, с учетом текущего питания горизонта талыми водами, приводит к скачку надмерзлотного И восстановлению речного стока. Описываемый механизм соответствует наблюденной динамике уровня воды в шурфах и водотоках.

В частности подтверждением принятого объяснения механизма бароэффекта являются некоторые особенности его проявления. Как видно на рисунке 4, наиболее отчетливо аномалия записи уровней выражена в шурфе в торфяной почве, расположенном в борту склоновой ложбины. Остальные наблюдения, привязанные к элементам дренажной сети (ложбина – ручей – река), демонстрируют различную степень затушевывания и трансформации этой аномалии. При этом наблюдается сдвиг аномалии по времени в различных точках бассейна, что

естественно объяснить влиянием добегания стока по дренажной сети.

Расчет скользящих коэффициентов корреляции хода уровней в замыкающем створе и в вышележащих точках позволил оценить величины сдвига по времени, соответствующих максимумам корреляции, то есть оценить времена добегания. Для створа на ручье Ягодном добегание до замыкающего створа на реке Угольная-Дионисия оценено в 10 часов, для шурфа в днище ложбины – 12,5 часов, для шурфа на борту ложбины – 17 часов. Таким образом, наблюдения соответствуют гидрологического события, формирующегося «в точке» (почвенном профиле), но происходящем синхронно на всей площади водосбора. бассейновом уровне оно проявляется соответствии с закономерностями добегания стока до замыкающего створа.

ЛИ амплитуды колебаний Достаточно атмосферного давления для изменения воднофизических свойств тундровых почв и каким образом изменение внешнего давления может увеличить или уменьшить их влагоемкость? По компрессионных результатам испытаний известно, что предел внешней нагрузки, до которого поверхностный торф сохраняет пластично-упругие свойства, равен 15 кПа. Уплотнение и остаточные деформации торфяного грунта фиксируются только при внешнем давлении 200 кПа и более. Данные показатели используется при определении допустимых нагрузок транспортных средств на тундровый покров и в дорожном строительстве [Иванов, 1975; Амарян, 1990; Ермичев и др., 2006]. Предельная величина упругости сопоставима с фиксируемыми метеорологами перепадами атмосферного давления при циклонической погоде (8 кПа) и в 500 раз больше суточных колебаний давления В высоких широтах (0,03 кПа). Это означает, что поверхностный торфяной покров пластичен, то есть восприимчив к внешнему даже незначительному давлению и проявляет упругие свойства в границах суточных и непериодических колебаний атмосферного давления – восстанавливает форму и объем после снятия нагрузки. Пористость (порозность)

торфяных почв высока и достигает 90%. Уменьшение атмосферного давления по существу означает снятие внешнего давления, которое приведет к изменению баланса сил между внешней нагрузкой и упругостью торфяного покрова. В результате за счет компенсационного поверхности подъема объем торфяных горизонтов почв увеличится, что приведет к увеличению размеров макропор и образованию новых капилляров. Количество захваченной и удерживаемой почвой влаги при условии близ поверхностного залегания подземных увеличится. При повышении атмосферного давления будет наблюдаться обратный процесс: с уменьшением эффективной пористости связанная вода большей частью перейдет в состояние свободной. Несмотря на множество сделанных допущений, описанная модель представляется вполне реалистичной.

Рассмотрим возможные естественные ограничения проявления бароэффекта. В первую обязательно распространение значительной площади торфяного горизонта почв и залегание на его подошве зеркала подземных вод. Второе условие касается неполного насыщения влагой верхних органогенных горизонтов почвы (нереализованная влагоемкость) В условиях незначительных осадков или их отсутствия. Именно такие условия сложились в бассейне реки Угольная-Дионисия в первой декаде июля 2019 года при протаивании деятельного слоя на глубину 20-30 см и выпадению 3,7 мм осадков. Для проявления бароэффекта в режиме стока малых низменностей криолитозоны действует третье условие – наличие разветвленной дренажной сети на склонах тундровых увалов, верховых и низинных болот. При ее отсутствии бароэффект вероятно будет проявляться только через подъем и понижения зеркала подземных вод и уровня воды на болотах.

Необходимо отметить, что отмеченный эффект находится в противоречии с приводимыми в литературе описаниями бароэффекта, которые проявляются в росте уровней грунтовых вод и увеличении дебитов родников при возрастании атмосферного

давления и, наоборот, в их снижении при падении Приводятся давления. даже сведения прохождении паводков на малых реках, не связанных с выпадением существенных осадков на водосборах [Каменский и др., 1938; Лавров, Марков, 2018; и другие]. Объяснения этого эффекта основывается в целом на признании существенной изоляции воздуха, заключенного в зоне аэрации, от свободной атмосферы, что вызывает различные изменения напоров в зоне аэрации, на зеркале грунтовых вод и поверхности свободных потоков. Как и сам эффект, этот физический механизм существенно отличается от развиваемой нами концепции.

Как представляется, сложность И разнообразие строения почвенно-грунтового профиля зоны активного водообмена в различных регионах и условиях вполне способно порождать столь сложные И разнообразные гидрофизические и гидрологические эффекты, связанные с различными механизмами влияния атмосферного давления на речной сток. Данная тематика заслуживает расширения специальных исследований, включающих натурные наблюдения, лабораторные эксперименты развитие физико-математических моделей стока. С точки зрения экологии тундровых и болотных ландшафтов в целом, реализация описанного бароэффекта обеспечивает дополнительное увлажнение корнеобитаемого слоя почв условиях недостатка атмосферных осадков, снижает риск возникновения тундровых и торфяных пожаров. Каковы возможные следствия колебаний речного стока, связанных атмосферного перепадами давления для пресноводных экосистем, непонятно. Следует зафиксированный заметить, что полевым экспериментом бароэффект на опорном створе реки Угольная-Дионисия привел к уменьшению в течение получаса скорости течения с 0,25 до 0.05 m/c.

Выводы

1. В ходе наблюдений суточного режима надмерзлотных подземных и поверхностных речных вод в бассейне реки Угольная-Дионисия (Анадырская низменность, Чукотка)

зафиксирована существенная реакция уровней перепад атмосферного на давления. Одновременно с понижением давления 0,8 кПа, а затем его повышением на 1,2 кПа произошло падение, а затем рост, уровней надмерзлотных вод примерно на 3-5 см и речных - на 2-7 см. В целом отмеченное проявление прямой связи уровней грунтовых вод и малых рек с атмосферным давлением не совпадает с преимущественно отмечаемыми гидрогеологической литературе фактами обратной связи тех же показателей. В области же речной гидрологии данным связям практически уделяется внимания, вопрос атмосферного давления в формировании речного стока следует признать совсем проработанным.

- Известные свойства механические торфяного покрова тундр и водно-физические свойства органогенного горизонта тундровых позволили предложить гипотезу воздействия атмосферного давления на уровень надмерзлотных вод посредством изменения влагоемкости торфа при его пластично-упругой деформации. Условием положительной реакции надмерзлотного и речного стока на скачки атмосферного давления являются: контактное с торфяным горизонтом почв залегание зеркала подземных вод; неполная влагоемкость органогенного горизонта почв; преимущественное питание реки надмерзлотными водами наличие разветвленной дренажной сети.
- Представляется перспективным 3. дальнейшее изучение атмосферных бароэффектов в подземных и поверхностных водах низменностей криолитозоны, а также в болотных ландшафтах более южных широт, где имеются условия для их проявления. ландшафтных условиях Анадырской отсутствии атмосферных низменности при барические осадков скачки уровня надмерзлотных вод могут рассматриваться как механизм дополнительной подпитки влагой корнеобитаемого слоя почв в период активной вегетации тундровой растительности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-05-60036, а также в рамках темы

Литература

Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. М.: Недра, 1990. 219 с.

Ермичев В.А., Лобанов В.Н., Кривченкова Г.Н., Артемов А.В. Прогнозирование осадки и плотности лесных почв после проезда гусеничных машин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2006. № 2. С. 48–51.

Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // Доклады академии наук. 2006. Т. 408. № 4. С. 535–538.

Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 280 с.

Каменский Г.Н., Биндеман Н.Н., Вевиоровская М.А., Альтовский М.Е. Режим подземных вод. М.-Л.: ГОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1938. 192 с.

Лавров С.А., Марков М.Л. Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 11-12. С. 44-51. DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51.

Марунич С.В., Завилейский С.В., Ливанова Н.А. Влияние изменения атмосферного давления на формирование речного стока // Известия Академии наук. Серия географическая. 1998. № 1. С. 111–115.

Соколов Б.Л., Завилейский С.В., Марунич С.В. Экспериментальные исследования процессов формирования речного стока малых водосборов // Метеорология и гидрология. 1994. $\mathbb{N} = 10$. С. 82-91.

Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Лебедева Л.С., Нутевекет М.А., Тарбеева А.М., Уяганский К.К., Шекман Е.А., Шепелев В.В. Ландшафтномерзлотные условия и факторы формирования летнего стока малых рек приморской низменности криолитозоны // Сборник докладов международной научной конференции памяти №0147-2019-0001 Государственного задания ИВП РАН.

References

Amaryan L.S. Svoistva slabykh gruntov i metody ikh izucheniya [Properties of Soft Soils and Methods for Their Studying]. Moscow, Publ. Nedra, 1990. 220 p. (In Russian).

Ermichev V.A., Lobanov V.N., Krivchenkova G.N., Artemov A.V. Prognozirovaniye osadki i plotnosti lesnykh pochv posle proyezda gusenichnykh mashin [Forecasting of forest soil settlement and density after tracked machines pass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2006, iss. 2, pp. 48–51. (In Russian).

Fomin Yu.V. Priroda pamping-effekta pribrezhnoy zone [Nature of the pumping-effect in the coastal zone]. *Trudy gidrometeorologicheskogo* nauchno-issledovatel'skogo Rossivskov tsentra Federatsii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation], 2016, vol. 361. pp. 203–230. (In Russian; abstract in English).

Hylckama T.E.A.V. Water level fluctuations in evapotranspirometers. *Water Resources Research*, 1968, vol. 4, iss. 4, pp. 761–768. DOI: 10.1029/WR004i004p00761.

Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landshaftakh* [Water movements in mirelands]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975. 280 p. (In Russian; abstract in English).

Kamensky G.N., Bindeman N.N., Veviorovskaya M.A., Altovsky M.E. *Rezhym podzemnykh vod [Groundwater regime]*. Moscow – Leningrad, Publ. Stroitelnaya literatura, 1938. 192 p. (In Russian).

Lautz L.K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in semi-arid riparian zone. *Hydrogeology Journal*, 2008, vol. 16, iss. 3, pp. 483–497. DOI: 10.1007/s10040-007-0239-0.

Lavrov S.A., Markov M.L. Otsenka vliyaniya atmosfernogo davleniya na uroven' i stok

выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: OT познания мировоззрению» (г. Санкт-23 - 31октября Петербург, года). 2020 СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 805-810.

Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Шепелев В.В. Пространственная и временная динамика источников питания и водного режима рек Анадырской низменности // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 427–438. DOI: 10.31857/S0321059621040180.

Трегубов О.Д., Уяганский К.К., Нутевекет М.А. Мониторинг мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности // География и природные ресурсы. 2020. № 2 (161). С. 143–152. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-2(143-152).

Фомин Ю.В. Природа пампинг-эффекта в прибрежной зоне // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 361. С. 203–230.

Штенгелов Р.С., Филимонова Е.А., Шубин И.С. Обработка откачки из напорного водоносного горизонта переменном дебите при атмосферном давлении // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 3. C. 50–58. DOI: <u>10.33623/0579-9406-2017-3-50-58</u>. Hylckama T.E.A.V. Water level fluctuations in evapotranspirometers // Water Resources Research. 1968. Vol. 4. Iss. 4. 761-768. Pp. DOI: 10.1029/WR004i004p00761.

Lautz L.K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in semi-arid riparian zone // Hydrogeology Journal. 2008. Vol. 16. Iss. 3. Pp. 483–497. DOI: 10.1007/s10040-007-0239-0.

Moraetis D., Efstathiou D., Stamati F., Tzoraki O., Nikolaidis N.P., Schnoor J.L., Vozinakis K. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 389. Iss. 1-2. Pp. 127–136. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.037.

gruntovykh vod [Assessment of the effect of atmospheric pressure on the level and ground waters flow]. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2018, vol. 12, iss. 11–12, pp. 44–51. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51.

Marunich S.V., Zavilejsky S.V., Livanova N.A. Vliyaniye izmeneniya atmosfernogo davleniya na formirovaniye rechnogo stoka [Influence of changes in atmospheric pressure on the formation of river runoff]. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [*Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*], 1998, iss. 1, pp. 111–115. (In Russian).

Moraetis D., Efstathiou D., Stamati F., Tzoraki O., Nikolaidis N.P., Schnoor J.L., Vozinakis K. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin. *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 389, iss. 3–4, pp. 127–136. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.037.

Salama R.B., Bartle G.A., Farrington P. Water use of plantation Eucalyptus camaldulensis estimated by groundwater hydrograph separation techniques and heat pulse method. *Journal of Hydrology*, 1994, vol. 156, no. 1–4, pp. 163–180. DOI: <u>10.1016/0022-1694(94)90076-0</u>.

Shtengelov R.S., Filimonova E.A., Shubin I.S. Analysis of multiwell pumping tests in a confined aquifer under variations in the production rate and atmospheric pressure. *Moscow University Geology Bulletin*, 2017, vol. 72, iss. 4, pp. 279–289. DOI: 10.3103/S0145875217040068. (Russ. ed.: Shtengelov R.S., Filimonova E.A., Shubin I.S. Obrabotka otkachki iz napornogo vodonosnogo gorizonta pri peremennom debite i atmosfernom davlenii. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2017, iss.3, pp. 50–58. DOI: 10.33623/0579-9406-2017-3-50-58).

Sokolov B.L., Zavilejsky S.V., Marunich S.V. Eksperimental'nyye issledovaniya protsessov formirovaniya rechnogo stoka malykh vodosborov [Experimental studies of the processes of formation of river runoff in small catchments]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology (Russian)]*, 1994, iss. 10, pp. 82–91. (In Russian).

Salama R.B., Bartle G.A., Farrington P. Water use of plantation Eucalyptus camaldulensis estimated by groundwater hydrograph separation techniques and heat pulse method // Journal of Hydrology. 1994. Vol. 156. Iss. 1–4. Pp. 163–180. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90076-0.

Turk L.J. Diurnal fluctuations of water tables induced by atmospheric pressure changes // Journal of Hydrology. 1975. Vol. 26. Iss. 1–2. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/0022-1694(75)90121-3.

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks // Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins» (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009). IAHS Publ., 2010. No. 336. P. 219–224.

Tregubov O., Gartsman B., Lebedeva Nuteveket M., Tarbeeva A., Uyagansky K., Shekman E., Shepelev V. Landscape-permafrost conditions and factors of summer runoff formation of small coastal lowland rivers. E3S Web of Conferences. Fourth Vinogradov Conference «Hydrology: from Learning to Worldview» in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov (St. Petersburg, Russia, March 20–27, 2020), 2020, art. numb. 05015. DOI: 10.1051/e3sconf/202016305015. (Russ. ed.: Tregubov O.D., Gartsman B.I., Lebedeva L.S., Nuteveket M.A., Tarbeeva A.M., Uyaganskii K.K., Shekman E.A., Shepelev V.V. Landshaftnomerzlotnye usloviya i faktory formirovaniya letnego malykh rek primorskoi nizmennosti kriolitozony. Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriva Borisovicha Vinogradova «Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya: ot poznaniya k mirovozzreniyu» (g. Sankt-Peterburg, 23–31 oktyabrya 2020 goda). St. Petersburg, Publ. VVM, 2020, pp. 805–810).

Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Spatial and temporal dynamics of sources and water regime of the Ugol'naya-Dionisiya river (Anadyr lowland, Chukotka). Water Resources, 2021, vol. 48, iss. 4, pp. 521–531. DOI: 10.1134/S0097807821040187. (Russ. ed.: Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Prostranstvennaya i vremennaya dinamika istochnikov pitaniya i vodnogo rezhima rek Anadyrskoj nizmennosti. Vodnye resursy, 2021, vol. 48, pp. 427-438. iss. 4. DOI: 10.31857/S0321059621040180).

Tregubov O.D., Uyagansky K.K., Nuteveket M.A. Monitoring merzlotno-klimaticheskikh usloviy Anadyrskoy nizmennosti [Monitoring of permafrost and climate conditions of the Anadyr lowland]. *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]*, 2020, no. 2, pp. 143–152. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-2(143-152).

Turk L.J. Diurnal fluctuation of water tables induced by atmospheric pressure changes. *Journal of*

Hydrology, 1975, vol. 26, iss. 1–2, pp. 1–16. DOI: 10.1016/0022-1694(75)90121-3.

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. *Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins»* (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March – 2 April 2009). IAHS Publ., 2010, no. 336, pp. 219–224.

Zyryanov V.N., Khublaryan M.G. Pumping effect in the theory of nonlinear processes of the thermal conductivity equation type and its application in geophysics. Doklady Earth Sciences, 2006, vol. 408, iss. 4, pp. 674-677. DOI: 10.1134/S1028334X06040374. (Russ. ed.: Zyryanov V.N., Khublaryan M.G. Pamping-effekt v teorii nelineinykh protsessov tipa uravneniya teploprovodnosti i ego prilozhenie v geofizike. Doklady akademii nauk, 2006, vol. 408, iss. 4, pp. 535-538).

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 взымается. 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);
- <u>полное название организации</u>, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
 - e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- <u>аннотация</u> 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:

- <u>введение</u> (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:

<u>Ссылка на книгу:</u> *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:

<u>Ссылки на диссертацию или автореферат</u>: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

<u>Ссылки на статью в книге</u>: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

<u>Ссылки на статью в периодическом издании</u>: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

<u>Ссылки на материалы в сборнике конференции</u>: *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:

<u>Ссылки на электронный источник:</u> Φ *амилия 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;
- <u>author (s)' name</u> (alignment in the centre);
- <u>organization affiliation</u>, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- <u>abstract</u> up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
 - <u>keywords</u> 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

<u>Introduction</u> – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

<u>Methods</u> – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

<u>Results</u> – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

<u>Discussion</u> – 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 figuries 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 curent 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:

<u>Book chapter reference</u>: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book*. City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

<u>Dissertation reference</u>: Author A.A. *Title of thesis. Thesis type*. City, year. 100 p. DOI:

<u>Jornal article reference</u>: 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 А.Х. Хайдарова рисунки Н.А. Казакова

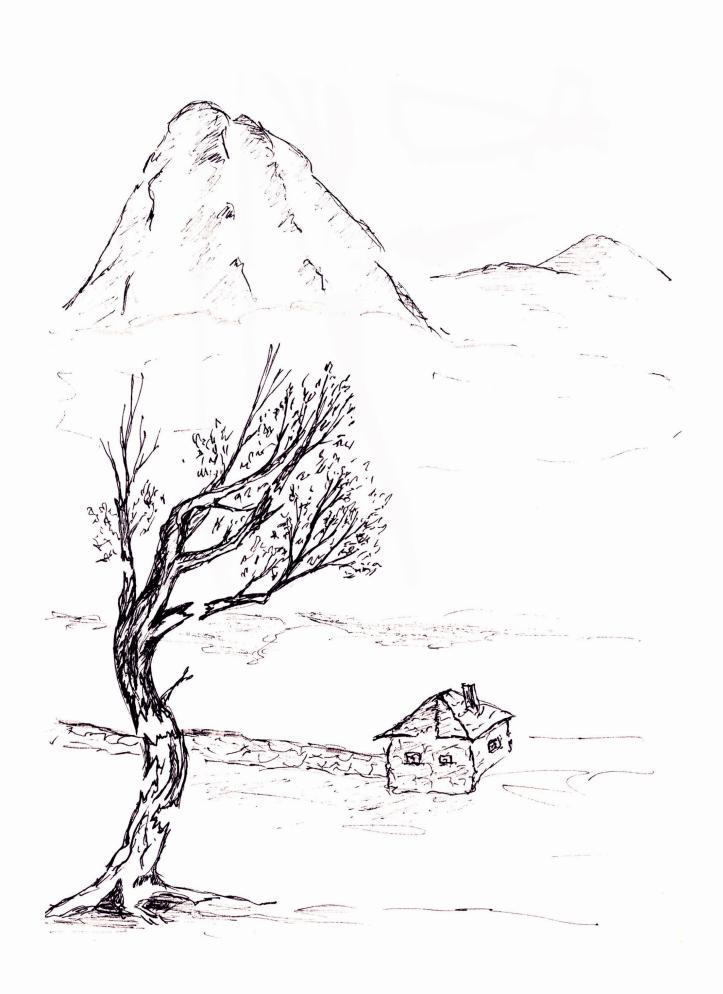
Подписано в печать 26.11.2021. Формат: 60х84/8 Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № _____ Выход в свет ___.__.2021

Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект» г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н Для почтовых отправлений: 199155, г. 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» г. Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28





© 2021 «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены.