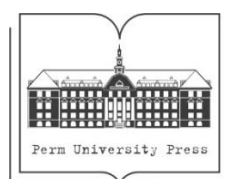


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ВОДОСБОРОВ

Труды IX Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
(г. Пермь, 25 мая–28 мая 2023 г.)

Том 1



Пермь 2023

УДК 556.552: 551.579

ББК 26.222

C568

Современные проблемы водохранилищ и их водосборов = Modern problems of reservoirs and their catchments [Электронный ресурс] : труды IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (г. Пермь, 25–28 мая 2023 г.) / науч. ред. А. Б. Китаев, О. В. Ларченко, В. Г. Калинин ; Пермский государственный национальный исследовательский университет – Пермь, 2023. – Электронные данные. – Пермь, 2023. – Т. 1. – 12,4 Мб ; 318 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/modern-problems-of-reservoirs-and-their-catchments-2023-tom1.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3972-4

ISBN 978-5-7944-3973-1 (том. 1)

Рассматриваются вопросы изменения уровня, скоростного, термического и ледового режима естественных и искусственных водных объектов под влиянием меняющегося климата и хозяйственной деятельности человека; особое внимание уделено оценке специфических черт гидродинамического режима водохранилищ (Куйбышевское, нижнекамское, Колымское и др.), переформированию берегов водоемов (Кармановское), а также исследованию термического режима и ледовых явлений на водных объектах (Саяно-Шушенское, Камское, Мамаканское и Можайское водохранилища, озеро Чаны, Глубокое, реки – Волга, Кама, Печора, Сылва, Нарын и др.).

В геоэкологических исследованиях особое внимание уделено оценке экологического благополучия природно-техногенных систем водных объектов, влиянию гидрометеорологических факторов на экологические характеристики водохранилищ, природным и антропогенным факторам деградации рек, вопросам рекреационного использования прибрежных зон водных объектов.

Конференция посвящена памяти Заслуженного деятеля науки и техники РФ, академика РАН, доктора географических наук, профессора Матарзина Юрия Михайловича.

Материалы конференции предназначены для специалистов в области гидрологии, водного хозяйства, геоэкологии и гидробиологии.

УДК 556.552: 551.579

ББК 26.222

Издается по решению оргкомитета конференции

Научные редакторы: А. Б. Китаев, О. В. Ларченко, В. Г. Калинин

Рецензенты: старший научный сотрудник Государственного гидрологического института, начальник отдела научно-технической информации, канд. геогр. наук **Л. С. Банищикова**

научный сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши Горного института УрО РАН, канд. техн. наук **Ю. С. Ляхин**

ISBN 978-5-7944-3972-4

ISBN 978-5-7944-3973-1 (том. 1)

© ПГНИУ, 2023

UDC 556.552: 551.579
LBK 26.222

Modern problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the IX All-Russian scientific-practical conference with international participation (Perm, May, 25-28, 2023) : Scientific editors A.B. Kitaev, O.V. Larchenko, V.G. Kalinin; Perm State University. – Perm, 2023. – V.1. – 318 pp.: ill.

ISBN 978-5-7944-3972-4
ISBN 978-5-7944-3973-1 (V. 1)

The issues of changing the level, speed, thermal and ice regime of natural and artificial water bodies under the influence of a changing climate and human economic activity are considered; special attention is paid to the assessment of the specific features of the hydrodynamic regime of reservoirs (Kuibyshev, Nizhnekamsk, Kolyma, etc.), the reformation of the banks of reservoirs (Karmanovskoye), as well as the study of the thermal regime and ice phenomena on water bodies (Sayano-Shushenskoye, Kamskoye, Mamakanskoye and Mozhaisk reservoirs, Lake Chany, Glubokoye, rivers – Volga, Kama, Pechora, Sylva, Naryn, etc.). In geoecological studies, special attention is paid to the assessment of the ecological well-being of natural and man-made systems of water bodies, the influence of hydrometeorological factors on the environmental characteristics of reservoirs, natural and anthropogenic factors of river degradation, and the recreational use of coastal zones of water bodies.

The conference is dedicated to the memory of Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Geographical Sciences, Professor Y. Matarzin.

The conference proceedings may be interesting for the specialists in hydrology and geoecology.

UDC 556.552: 551.579
LBK 26.222

Published on the decision of the Organization Committee

Scientific editors: A.B. Kitaev, O.V. Larchenko, V.G. Kalinin

ISBN 978-5-7944-3972-4
ISBN 978-5-7944-3973-1 (V. 1)

© Perm State University, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГИДРО- И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

<i>Акматов Р.Т., Чодураев Т.М., Почечун В.А.</i> Изменение стока за вегетационный период в верхнем течении реки Нарын в условиях глобального изменения климата.....	12
<i>Ахмерова Н.Д., Айзель Г.В., Ерина О.Н., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Соколов Д.И.</i> Ожидаемые изменения притока воды в Можайское водохранилище в XXI веке.....	18
<i>Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А.</i> Об оценках годового стока в условиях недостаточного увлажнения	24
<i>Возняк А.А.</i> Параметры редуционных формул в бассейне реки Белой.....	29
<i>Горелиц О.В., Ракчеева Е.А., Тимошенко А.А., Мишин Д.В., Борщенко Е.В.</i> Особенности гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища в 2021-2022 гг.....	35
<i>Горошкова Н.И., Стриженок А.В., Семенова Д.А.</i> Затопы на реках бассейна Печоры, как опасное гидрологическое явление.....	40
<i>Двинских С.А., Калюжный В.К., Ларченко О.В.</i> Особенности русловых деформаций в разных районах Камского водохранилища.....	45
<i>Дебольская Е.И., Грицук И.И., Дошина М.Е.</i> Лабораторное моделирование термоэрозионного размыва речных берегов.....	53
<i>Добровольский С.Г., Лебедева И.П.</i> Проблемы определения статуса рек, регулируемых водохранилищами	58
<i>Дрегваль М.С.</i> Изменение продолжительности ледовых явлений под влиянием антропогенных и климатических факторов в бассейне реки Печора.....	63
<i>Жуков И.А., Айбулатов Д.Н.</i> Водный режим малых рек бассейнов Волги и Урала.....	66
<i>Законнов В.В., Законнова А.В.</i> Изменения гидроморфометрических характеристик водохранилищ Волги.....	71
<i>Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кондакова О.В.</i> Моделирование уровня воды бессточного озера Чаны.....	76
<i>Игнатьева М.Н.</i> Применение дистанционных методов исследования для анализа изменения площади Чернореченского водохранилища (Севастополь, Крымский полуостров)	81
<i>Казанцева А.С., Красиков А.В.</i> Гидрологические наблюдения на р.Сылва (г.Кунгур).....	86

<i>Калашикова О.Ю., Ниязов Дж.Б., Почечун В.А.</i> Предупреждение опасных гидрологических и геоэкологических явлений в водных объектах.....	91
<i>Калинин В.Г., Микова К.Д.</i> О зависимостях сроков ледообразования от дат перехода температуры воды через 3°С и 2°С на Камском водохранилище.....	95
<i>Калинин В.Г., Шайдулина А.А.</i> О верификации расчетов снеготаяния с данными наблюдений на метеорологических станциях.....	100
<i>Карганолова И.Н., Жуков И.Г.</i> Русловые процессы в ложе водохранилищ (на примере Куйбышевского водохранилища).....	105
<i>Китаев А.Б., Ярославцева М.С.</i> Оценка интенсивности наполнения и сработки Нижнекамского водохранилища в характерные по водности годы настоящего столетия.....	111
<i>Копытов С.В., Санников П.Ю., Мехоношина Е.А.</i> Предварительные результаты палеолимнологических исследований на озере Новожилово (Камско-Кельтминская низменность, бассейн Верхней Камы).....	118
<i>Косицкий А.Г., Белозёров Е.В.</i> Оценка характеристик стока черноморских рек Краснодарского края с использованием данных АИУВ НПК "ЭМЕРСИТ"	123
<i>Лучников А.И., Мозгин А.В.</i> Оценка точности фотограмметрических моделей при решении геоморфологических задач с использованием БПЛА.....	127
<i>Магрицкий Д.В., Прокопьева К.Н.</i> Гидрологическая роль Мамаканского водохранилища.....	133
<i>Малюгин Н.Р.</i> Усиление эффекта отрицательной вязкости в реверсивных течениях за счет взаимодействия вихревых структур.....	138
<i>Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.</i> Исследование размыва меандра в условиях криолитозоны.....	143
<i>Микова К.Д., Соснина Д.А.</i> Влияние климатических изменений на зимний сток рек Пермского края.....	148
<i>Морейдо В.М., Гарцман Б.И.</i> Прогноз сезонного речного стока в детерминированной и вероятностной формах.....	153
<i>Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю., Соломатин Н.В., Мещерин В.А.</i> Режим стока реки Урал, проблемы и решения.....	158
<i>Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А.</i> Актуальные проблемы современных исследований водохранилищ и их водосборов.....	163

<i>Сапожникова А.А., Ракчеева Е.А.</i> Испарение с поверхности водохранилищ Крыма в различных гидрографических районах полуострова.....	169
<i>Смирнов А.И.</i> Переформирование берегов Кармановского водохранилища в Южном Предуралье.....	175
<i>Соколов Д.И., Ерина О.Н., Терешина М.А.</i> Термический режим озера Глубокого в 2018–2021 гг.....	180
<i>Сучилина З.А., Гарцман Б.И.</i> Краткосрочный прогноз дождевых паводков в бассейне р.Уссури на основе ИМК ЕСОМАГ.....	185
<i>Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И.</i> Оценка применимости одномерной модели GLM для воспроизведения термического режима долинного водохранилища.....	191
<i>Турутина Т.В.</i> Влияние изменения климата на годовое распределение некоторых гидрологических величин.....	196
<i>Ушаков М.В.</i> Годовой приток воды к водохранилищу Колымской ГЭС в условиях климатических изменений.....	200
<i>Шайдулина А.А., Сулимов А.Д.</i> Оценка достоверности моделирования скоростного режима полуруслового участка Камского водохранилища в программном комплексе НЕС-RAS.....	204
<i>Шмакова М.В.</i> Русловая и бассейновая составляющие стока наносов.....	208
<i>Шихов А.Н., Пищальникова Е.В., Калинин Н.А.</i> Расчет максимального снегонакопления в бассейне Камы по данным глобальных моделей численного прогноза погоды и реанализа в 2019–2023 гг.....	213
<i>Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.</i> Моделирование прорыва ледникового озера.....	217
<i>Ярославцева М.С., Китаев А.Б.</i> Оценка обмена вод в Нижнекамском водохранилище в современных условиях.....	222

ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Васькова Е.А., Дмитриев В.В.</i> Проблемы и опыт интегральной оценки экологического благополучия природно-техногенной системы.....	227
<i>Гареев А.М., Сайфуллина Е.Н., Галеева Э.М.</i> Методические положения оценки рекреационного потенциала малых и средних озер (на примере озер по территории Республики Башкортостан).....	232
<i>Гречушников М.Г., Репина И.А., Казанцев В.С.</i> Параметризация удельного потока метана с акватории водохранилищ.....	237

<i>Григорьева И.Л., Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Кременецкая Е.Р., Комиссаров А.Б., Федорова Л.П., Ломов В.А., Чекмарева Е.А.</i> Влияние гидрометеорологических факторов на гидроэкологические характеристики Иваньковского водохранилища в летний период.....	242
<i>Ермакова Г.С., Милютин И.Ю., Турсунова Г.Ш., Козлова М.В.</i> Пространственная неравномерность антропогенного освоения водосбора Ириклинского водохранилища.....	247
<i>Калинин В.Г., Беляева И.А.</i> Характеристика донных отложений на Камском водохранилище	254
<i>Курбатова И.Е., Афанасьева А.А.</i> Природные и антропогенные факторы риска деградации реки Казанка и ее притоков: эколого-географический подход	259
<i>Курбатова И.Е., Мулин М.О.</i> Оценка геоэкологического состояния водосборов боковых притоков Цимлянского водохранилища (на примере реки Россошь).....	265
<i>Магрицкий Д.В.</i> Водохозяйственная деятельность в Российской части бассейна р.Урала: прошлое и настоящее.....	270
<i>Малаев А.В.</i> Влияние изменений структуры ландшафтов водосборов малых водохранилищ и озер Зауралья на их геоэкологическое состояние..	276
<i>Рыбкина И.Д., Ловцкая О.В., Губарев М.С., Орлова Е.С.</i> Водотоки и гидротехнические сооружения бессточной области Оби и Иртыша: состояние и возможности использования.....	281
<i>Санин А.Ю.</i> К вопросу рекреационного использования прибрежных зон водохранилищ.....	286
<i>Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А., Козлова М.А.</i> Гидроэкологические ограничения использования водных ресурсов трансграничных рек степной зоны (на примере рр. Урал и Тобол).....	292
<i>Семенова А.А., Гончаров А.В., Милюкова И.П., Георгиади А.Г.</i> Пойменные нерестилища Нижнего Дона в условиях гидротехнического регулирования и изменения климата.....	298
<i>Слащев Д.Н.</i> Расчет индексов экологической связности речной сети водосбора Воткинского водохранилища.....	302
<i>Хайрулина Е.А., Чайковский И.И.</i> Особенности микроэлементного состава вод в районах разгрузки хлоридно-натриевых подземных вод.....	307
<i>Чередниченко Александр В., Чередниченко В.С., Чередниченко Алексей В.</i> Изменение климата и его последствия для дикой природы Джунгарского Алатау.....	311

CONTENT

HYDRO- AND GEODYNAMICS PROCESSES

<i>Akmatov R., Choduraev T., Pochechun V.</i> Change in runoff during the growing season in the upper reaches of the Naryn river in the context of global climate change	12
<i>Akhmerova N., Ayzel G., Erina O., Semenova N., Simonov Y., Sokolov D.</i> Expected changes in the inflow to the Mozhaysk reservoir in the XXI century...	18
<i>Bolgov M., Korobkina E., Filippova I.</i> On estimates of annual runoff under conditions of insufficient wetting.....	24
<i>Vozniak A.</i> Parameters of reduction formulas in the Belaya river basin.....	29
<i>Gorelits O., Rakcheeva E., Timoshenko A., Mishin D., Borshchenko E.</i> Features of the hydrological regime of the Sayano-Shushenskoye reservoir in 2021-2022	35
<i>Goroshkova N., Stirzhenok A., Semenova D.</i> Ice jams as a dangerous hydrological phenomenon on rivers of the Pechora river basin.....	40
<i>Dvinskikh S., Kalyuzhny V., Larchenko O.</i> Features of channel deformations in different areas of the Kama reservoir.....	45
<i>Debolskaya E., Gritsuk I., Doshina M.</i> Laboratory modeling of thermoerosion deformation of river bank.....	53
<i>Dobrovolski S., Lebedeva I.</i> Problems in identifying the status of rivers regulated by reservoirs.....	58
<i>Dregval M.</i> Changes in the duration of ice phenomena under the influence of anthropogenic and climatic factors in the Pechora river basin.....	63
<i>Zhukov I., Aybulatov D.</i> Water regime of small rivers in the Volga and Ural basins.....	66
<i>Zakonnov V., Zakonnova A.</i> Changes in hydromorphometric characteristics of the Volga reservoirs.....	71
<i>Zinoviev A.T., Dyachenko A.V., Kondakova O.V.</i> Modeling of water level of closed lake Chany.....	76
<i>Ignatieva M.</i> Application of remote research methods to analyze changes in the area of the Chernorechenskoe reservoir (Sevastopol, Crimean peninsula).	81
<i>Kazantseva A., Krasikov A.</i> Hydrological observations on the Sylva river (Kungur).....	86
<i>Kalashnikova O., Niyazov J., Pochechyun V.</i> Prevention of dangerous hydrological and geocological phenomena in water bodies.....	91
<i>Kalinin V., Mikova K.</i> About dependences of ice formation dates on the water's 3°C and 2°C isotherms dates on the Kama reservoir.....	95

<i>Kalinin V., Shaydulina A.</i> Verification of snow melt calculations to observation data of the meteorological stations.....	100
<i>Kargapolova I., Zhukov I.</i> River channel in the bed of reservoir (case of the Kuibyshev reservoir).....	105
<i>Kitaev A., Yaroslavtseva M.</i> Assessment of the intensity of filling and discharge of the Nizhnekamsk reservoir in the years characteristic of water content of the present century.....	111
<i>Kopytov S., Sannikov P., Mekhonoshina E.</i> Preliminary results of the paleolimnological study of the Novozhilovo lake (Kama-Keltma lowland, upper Kama basin).....	118
<i>Kositskiy A., Belozyorov E.</i> Evaluation of the runoff characteristics of the black sea rivers of the Krasnodar region using the data of the AWLM RPC "EMERCIT".....	123
<i>Luchnikov A., Mozgin A.</i> Definition of the precision of photogrammetric models in solution geomorphological problems using UAVS.....	127
<i>Magritsky D., Prokopieva K.</i> The hydrological role of the Mamakan reservoir...	133
<i>Maliugin N.</i> Strengthening the effect of negative viscosity in reversing flows due to the interaction of vortex structures.....	138
<i>Maslikova O., Gritsuk I., Ionov D.</i> Study of meander erosion in the cryolithic zone	143
<i>Mikova K., Sosnina D.</i> Climatic changes impact on the winter flow of rivers in the Perm Kray.....	148
<i>Moreido V., Gartsman B.</i> Seasonal runoff forecasting in deterministic and probabilistic form.....	153
<i>Nesterenko Yu., Nesterenko M., Solomatin N., Meshcherin V.</i> Flow regime of Ural river, problems and solutions.....	158
<i>Pozdnyakov Sh., Kondratiev S.</i> Current problems of modern research in reservoirs and their watersheds.....	163
<i>Sapozhnikova A., Rakcheeva E.</i> Evaporation from the surface of reservoirs in various hydrographic regions of Crimea.....	169
<i>Smirnov A.</i> Reshaping of the shores of the Karmanovsky reservoir in the Southern Urals.....	175
<i>Sokolov D., Erina O., Tereshina M.</i> Thermal regime of lake Glubokoye in 2018-2021.....	180
<i>Suchilina Z., Gartsman B.</i> Short-term forecast of rain floods in the Ussuri river basin based on the IMC ECOMAG.....	185
<i>Tereshina M., Erina O., Sokolov D.</i> Suitability of one-dimensional lake model GLM for simulation of thermal dynamics of a valley reservoir.....	191

<i>Turutina T.</i> The effect of climate change on the annual distribution of some hydrological quantities	196
<i>Ushakov M.</i> Annual water inflow to the reservoir of the Kolyma hydroelectric power station under climate change	200
<i>Shaydulina A., Sulimov A.</i> Reliability evaluation of simulation of the velocity mode of the half-course section of the Kama reservoir in the HEC-RAS software complex.....	204
<i>Shmakova M.</i> Channel and basin components of sediment runoff	208
<i>Shikhov A., Pischalnikova E., Kalinin N.</i> Calculation of maximum snow accumulation in the kama river basin according to the data of global numerical weather prediction models and reanalysis for 2019–2023.....	213
<i>Iudina V., Chernomorets S., Savernyuk E., Krylenko I., Kidyayeva V.</i> Modeling the glacial lake outburst.....	217
<i>Yaroslavtseva M., Kitaev A.</i> Assessment of exchange in Nizhnekamsk reservoir in modern conditions.....	222

GEOECOLOGY

<i>Vaskova E., Dmitriev V.</i> The main problems and experience of the integrated ecological well-being assessment of a natural-technogenic system.....	227
<i>Gareev A., Saifullina E., Galeeva E.</i> Methodological provisions for assessing the recreational potential of small and medium lakes (by the example of lakes on the territory of the Republic of Bashkortostan).....	232
<i>Grechushnikova M., Repina I., Kazantsev V.</i> Parametrization of specific methane flux from reservoirs.....	237
<i>Grigoryeva I., Grechushnikova M., Lomova D., Kremenetzskaya E., Komissarov A., Fiodorova L., Lomov V., Chekmareva E.</i> Influence of hydrometeorological factors on the hydroecological characteristics of the Ivankovo reservoir in summer.....	242
<i>Ermakova G., Milyutina I., Tursunova G., Kozlova M.</i> Spatial heterogeneity of anthropogenic pressure on the Iriklin'sky reservoir watershed	247
<i>Kalinin V., Beliaeva I.</i> Characteristics of bottom sediments in the Kama reservoir.....	254
<i>Kurbatova I., Afanasyeva A.</i> Natural and anthropogenic degradation risk factors for the Kazanka river and its tributaries: ecology-geographical approach.....	259
<i>Kurbatova I., Mulin M.</i> Assessing the geo-ecological condition of the watersheds of the Tsimlyan reservoir lateral tributaries (by the example of the Rossosh river basin).....	265
<i>Magritsky D.</i> Water management activities in the Russian part of the Ural river basin: past and present.....	270

<i>Malaev A.</i> Influence of changing landscape structure of water collecting in small reservoirs and lakes behind the Ural to their geological state.....	276
<i>Rybkina I., Lovtskaya O., Gubarev M., Orlova E.</i> Watercourses and hydraulic structures of the drainless region of the Ob and Irtysh: state and possibilities of use.....	281
<i>Sanin A.</i> On the issue of recreational use of coastal zones of reservoirs.....	286
<i>Sivohip Zh., Pavleichik V., Padalko Y., Kozlova M.</i> Hydroecological limitations of the use of water resources of transboundary rivers of the steppe zone (by the example of the Ural and Tobol rivers).....	292
<i>Semenova A., Goncharov A., Milyukova I., Georgiadi A.</i> Floodplain spawning grounds of the Lower Don in the conditions of hydrotechnical regulation and climate change.....	298
<i>Slashev D.</i> Ecological connectivity indices calculation the of the Votkinsk reservoir catchment	302
<i>Khayrulina E., Chaikovskiy I.</i> Features of the microelement composition of water in the areas of unloading of sodium chloride groundwater.....	307
<i>Cherednichenko Alexandr V., Cherednichenko V.S., Cherednichenko Alexey V.</i> Climate change and its impacts on wildlife in mountain areas of Kazakhstan.....	311

ГИДРО- И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.588

Р.Т. Акматов¹, Т.М. Чодураев¹, В.А. Почечун^{2,3}, viktoriyapochechun@mail.ru

¹Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева, г. Бишкек, Кыргызстан

²Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

ИЗМЕНЕНИЕ СТОКА ЗА ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ НАРЫН В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В работе внимание акцентировано на анализе тесноты связей между стоком за вегетационный период и главными климатическими факторами формирования стока рек за год и вегетационный период. Многолетние колебания стока за вегетационный период определяются выпадением осадков за холодный период на водосборах и температурным режимом летних месяцев. С 2000 по 2019 гг. количество осадков, выпадающих в верховьях р.Нарын в период с октября по апрель, значительно увеличилось. Сумма положительных температур воздуха наиболее значительно повысилась за последние двадцать лет в высокогорной зоне и за последние сорок лет – в нижнем течении водосбора. В то же время, по данным гидропоста р.Нарын – г.Нарын, наблюдается увеличение средних расходов воды за вегетационный период, начиная с 1992 г.

Ключевые слова: летний сток, сток за вегетационный период, формирующие сток климатические элементы.

R. Akmatov¹, T. Choduraev¹, V. Pochechun^{2,3}, viktoriyapochechun@mail.ru

¹Kyrgyz state University named after I. Arabaev, Bishkek, Kyrgyzstan

²Institute of Economics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

³Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

CHANGE IN RUNOFF DURING THE GROWING SEASON IN THE UPPER REACHES OF THE NARYN RIVER IN THE CONTEXT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

In this article, attention is focused on the analysis of the tightness of relationships between the runoff during the growing season and the main climatic factors of the formation of river flow in the annual and growing season. Long-term fluctuations in runoff during the growing season are determined by cold precipitation in the catchment areas and the temperature regime of the summer months. 2000 to 2019 the amount of precipitation in the upper reaches of the Naryn River between October and April increased significantly. The sum of positive air temperatures has increased most significantly over the past twenty years in the alpine zone and over the past forty years – in the lower reaches of the catchment. Therefore, the runoff of the upper reaches of the Naryn River during the

growing season, according to the data from the Naryn gauging station, Naryn city, has been increasing the average growing water discharge since 1992.

Keywords: summer runoff, growing season, average growing runoff, runoff-forming climatic elements.

Введение

Река Нарын является крупнейшей водной артерией Кыргызстана. Её сток используется для целей гидроэнергетики и управления водными ресурсами. В перспективе намечено сооружение в бассейне р. Нарын 24 гидроэлектростанций. При этом, на ближайшие годы планируется их строительство в верховьях реки. Этим определяется актуальность изучения водного режима р. Нарын.

Гидрологический режим верхнего течения р.Нарын описан по данным гидрологического поста расположенном в г. Нарыне; климатические характеристики определены по многолетним данным метеостанции «Тянь-Шань» (3614 м над уровнем моря) и Нарын (2040 м над уровнем моря).

Материалы и методы исследования

Для оценки ситуации в верховьях р.Нарын использовались гидрологические и метеорологические данные архива Гидрометслужбы Кыргызской Республики за период 1930-2020 гг. Применялись статистические, географические и гидрологические методы.

Полученные результаты

По данным гидропоста в г. Нарын за 1930-2020 гг. видно, что средние расходы воды за вегетационный период увеличивались с 1992 г. (рис. 1). Так, если средний вегетационный сток в 1931-1991 гг. составлял 144,7 м³/с, то за период с 1992 по 2020 г. увеличился до 173,9 м³/с, или на 120 %.

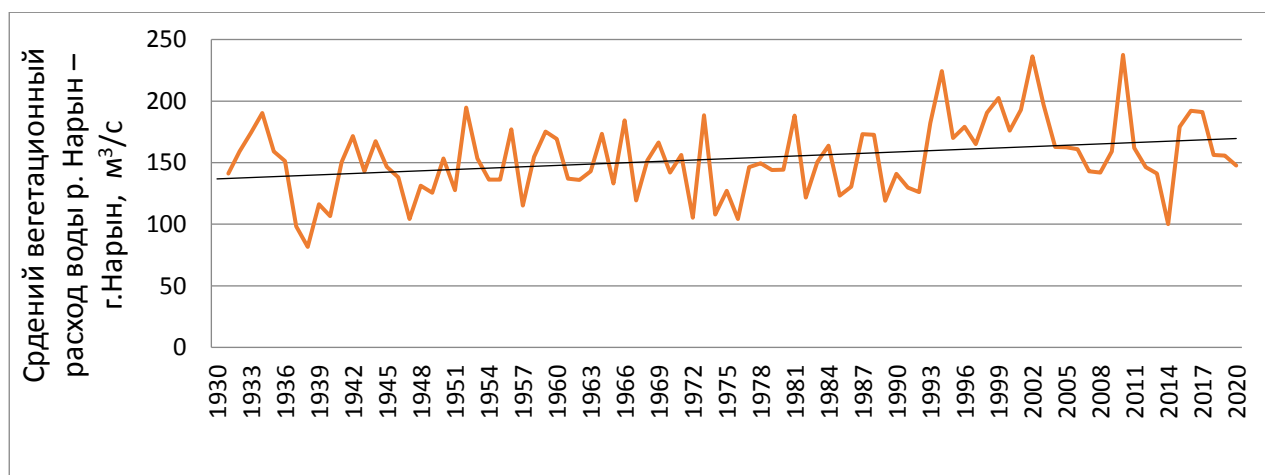


Рис. 1. Изменение расхода воды на р. Нарын (гидропост г. Нарын с 1930 по 2020 гг.)

Изучение источников питания р.Нарын за вегетационный период показало, что в её верховьях повышенный приток воды за апрель-июнь происходит преимущественно за счет таяния снега, а в период июль-сентябрь – за счет таяния льда и высокогорных снегов [3; 9-10]. Расчёты по данным за 1992-2020 гг. показали, что соотношение водности реки по месяцам вегетационного периода распределяется следующим образом: 26 % стока приходилось на июль, по 23 % на июнь и август, 13 % на май, 10 % на сентябрь и 5% в апреле (рис. 2). На рисунке 3, можно заметить, что обеспеченность реки ледниковой водой уменьшается по сравнению с ее обеспеченностью снеговой водой.

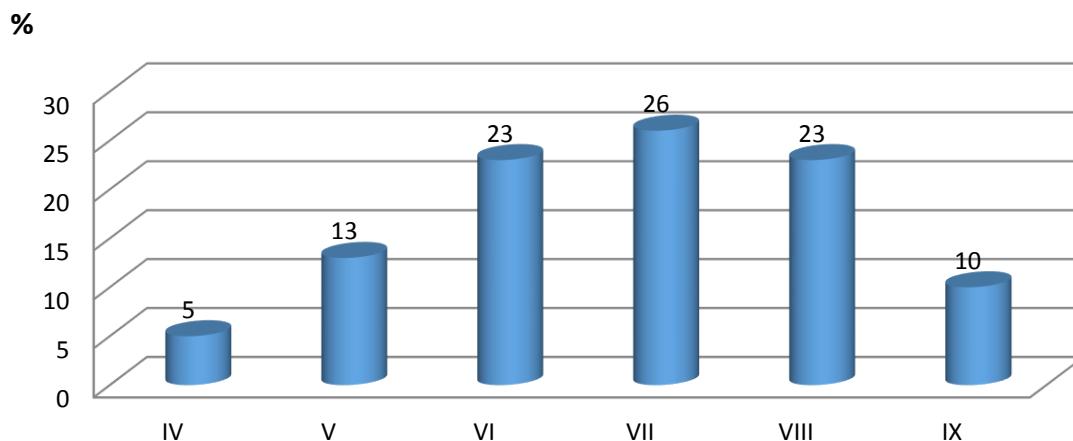


Рис.2. Процентное соотношение месячного стока к вегетационному стоку (г/п г. Нарын)

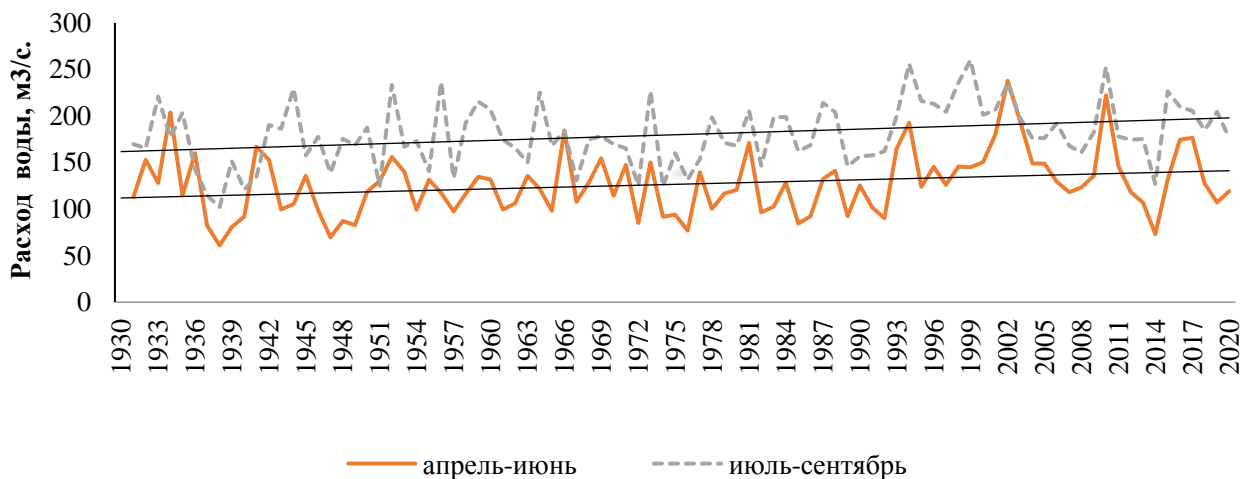


Рис. 3. Соотношение питания реки талой снеговой водой (апрель-июнь) и талой ледниковой водой (июль-сентябрь)

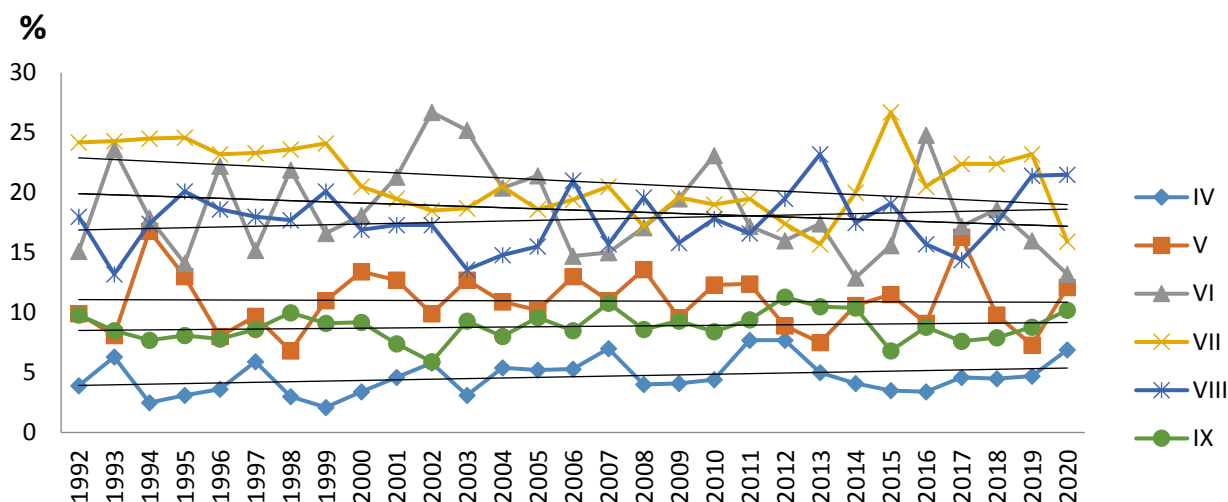


Рис. 4. Изменение доли месячного стока в общем стоке вегетационного периода

Как видно из рисунка 4, с 1992 г. доля июльского стока в вегетационном периоде от общего стока уменьшилась на 10%. В работах [4; 6], В.А. Кузьмиченко и А.Н. Диких связывают относительное уменьшение доли ледниковой воды в реке с уменьшением площади ледника и притяжением нижней границы фирна вверх. В августе доля стока не изменилась, а в сентябре, наоборот, увеличилась (около 1%). На рисунке 4 видно, что доля питания река за счет талых вод (апрель-июнь), наоборот, увеличивается. Следуя этой тенденции, максимальный приток воды постепенно перемещается с июля на май-июнь.

Температурный режим летних месяцев и слой осадков, выпадающих на водосбор реки в холодное время года, играют ключевую роль в формировании многолетних колебаний стока в течение вегетационного периода. Другими словами, климатические факторы определяют формирование стока. Например, за последние 20 лет, по сравнению с 1930-1999 гг., количество осадков в холодные сезоны года увеличилось (рис.5). Так, в октябре-апреле в 1930-2019 гг. количество осадков в верховьях р. Нарын увеличилось с 646,8 мм до 1168 мм на метеостанции Тянь-Шань и с 977,5 мм до 1401,8 мм на метеостанции Нарын. В результате сток реки Нарын также увеличивается (рис.1). А.Н. Диких [4] отмечал снижение уровня воды в верховьях р. Нарын в связи с уменьшением количества осадков в холодные периоды года в 1930-1998 гг.

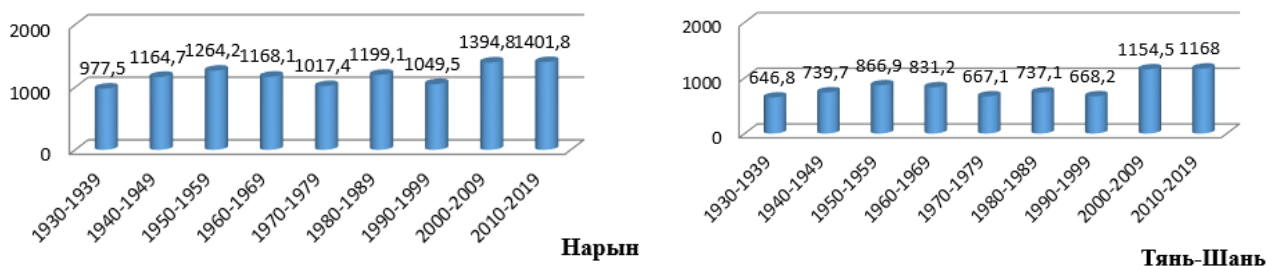


Рис. 5. Изменения количества осадков (в мм) с октября по апрель на метеостанциях Нарын и Тянь-Шань

Анализируя данные метеостанций Нарын и Тянь-Шань, замечаем изменения климатических условий в верховьях р. Нарын за последние 20-40 лет. Сумма положительных температур воздуха на метеостанции Тянь-Шань увеличилась с 95,4 до 168,7⁰С, на метеостанции Нарын с 827,4 до 947 ⁰С (рис. 6).

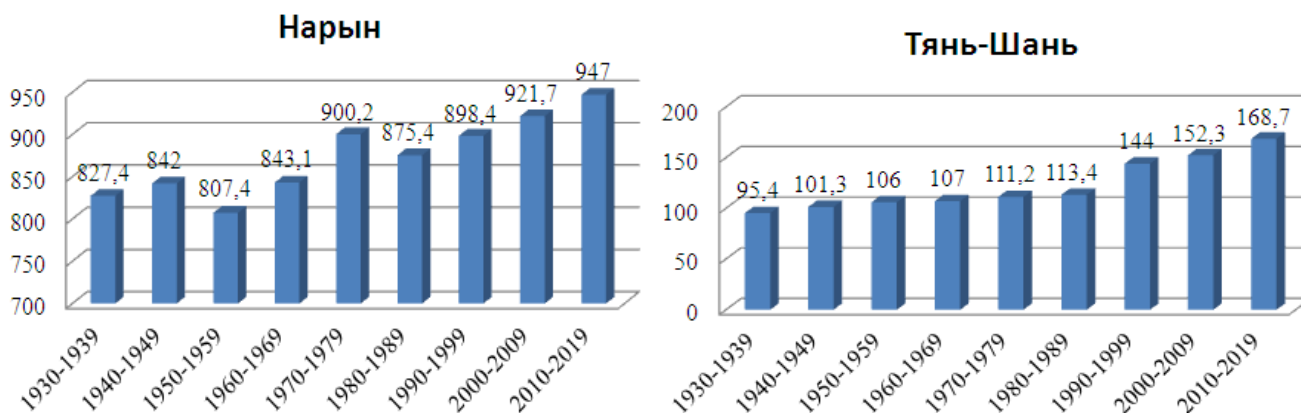


Рис. 6. Сумма среднегодовых положительных температур воздуха на метеостанциях Нарын и Тянь-Шань

Количество дней с положительной температурой также увеличивается. Например, в высокогорной зоне за последние 20 лет она увеличилась со 109 до 122 дней, а в среднегорном поясе реки – с 220 до 236 дней за последние 40 лет. В результате температура воздуха выше 0⁰С сместилась с середины мая-июня на апрель-май на Тянь-Шанской метеостанции, с середины марта на первую половину марта на Нарынской метеостанции [1; 2; 8].

В исследованиях О.Ю. Калашниковой [5] сделан вывод о том, что летний сток верхнего течения р. Нарын в вегетационный период составляет 72% годового объема. В летние месяцы наблюдается тенденция к повышению температуры воздуха. На метеостанции Тянь-Шань температура воздуха в летние месяцы 1930-2019 гг. повысилась на 1,2⁰С.

Выводы

По данным Нарынского гидропоста с 1992 г. расходы воды в верховьях р.Нарын увеличились. Средний вегетационный сток составлял 144,7 м³/с в 1931-1991 гг., а за период с 1992 по 2017 г. увеличился на 173,9 м³/с или 120 %. В 1992-2017 годах доля стока в июле (питание от таяния ледников) уменьшилась на 10% на Нарынском гидропосту. В 1930-2019 гг. в верховьях р.Нарын количество осадков в октябре-апреле увеличилось с 646,8 мм до 1168 мм на метеостанции Тянь-Шань и с 977,5 мм до 1401,8 мм на метеостанции Нарын. Сумма положительных температур воздуха на метеостанции Тянь-Шань увеличилась с 95,4 до 168,7 ⁰С, а на метеостанции Нарын с 827,4 до 947 ⁰С.

Библиографический список

1. *Акматов Р.Т., Аламанов С.К., Чодураев Т.М.* Многолетний режим стока р. Нарын // Приоритетные направления развития образования и науки: сб. материалов III Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2017. С. 43-44.
2. *Акматов Р.Т., Аламанов С.К., Чодураев Т.М.* Ледниковый сток р.Нарын // Научные исследования: теория, методика и практика: сб. материалов III Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2017. Т.1. С. 19-22.
3. *Большаков М.Н.* Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. Фрунзе, «Илим», 1974, 306 с.
4. *Диких А.Н.* Ледниковый сток реки Нарын и сценарий возможного его изменения при потеплении климата//Изв. НАН КР. Проблемы геологии и географии в Кыргызстане. Бишкек: Илим, 1999. – С. 74-79
5. *Калашикова Ю.И.* К вопросу о гидрологических прогнозах весенне-летнего стока горных рек // Метеорология и гидрология в Кыргызстане. Бишкек, КРСУ. Вып. 3. 2003.
6. *Кузьмиченок В.А.* Оледенение и сток в бассейне реки Нарын. Инвентаризация, временные изменения, прогноз// Изучение факторов формирования и оценка влияния водохранилищ Нижне-Нарынского каскада ГЭС на качество водных ресурсов бассейна реки Нарын изотопными методами. МНТЦ НАН КРИВПиГЭ. Бишкек, 2010. Ч.1. С. 19-39.
7. Отчет устойчивое развитие горных территорий, их потенциал и реакция на различные виды воздействия (бассейн р.Нарын). Руководитель проекта к.г.н., С.К.Аламанов. Институт геологии им. М.М.Адышева НАН КР. Бишкек, 2005. С. 116-123.
8. Отчет гидрологический прогноз реки Нарын. Руководитель проекта д.г.н., профессор Т.М.Чодураев. Департамент науки МОиН КР. Бишкек, 2017. – С. 23-26.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14. Вып. 1. Бассейн р. Сыр-Дарьи /Под ред. И.А. Ильина. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 439 с.
10. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 680 с.

Н.Д. Ахмерова¹, Г.В. Айзель², О.Н. Ерина¹, Н.К. Семенова^{1,3},
Ю.А. Симонов³, Д.И. Соколов¹, akhmerova.natali@gmail.com

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² Потсдамский университет, г. Потсдам, Германия

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, г. Москва, Россия

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ В МОЖАЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В XXI ВЕКЕ

Можайское водохранилище – важная составная часть системы водоснабжения г. Москвы, в связи с чем прогнозирование его гидрологического режима в XXI веке в условиях климатических изменений имеет большое значение. В данной работе на основе результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей при разных сценариях антропогенного воздействия прошлого (RCP 26, 60, 85) и последнего поколения (SSP 126, 370, 585) выполнены прогнозные оценки притока воды в Можайское водохранилище с использованием модели HBV ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$ на периоде калибровки). Согласно полученным результатам, в соответствии с уточненными сценариями SSP ожидается снижение притока в среднем на $1,4 \text{ км}^3/100$ лет, тогда как по сценариям RCP ожидалось увеличение притока в среднем на $2,32 \text{ км}^3/100$ лет.

Ключевые слова: Можайское водохранилище, река Москва, моделирование стока, модель HBV, климатические изменения, изменения стока

N. Akhmerova¹, G. Ayzel², O. Erina¹, N. Semenova^{1,3}, Y. Simonov³, D. Sokolov¹,
akhmerova.natali@gmail.com

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute for Environmental Sciences and Geography,
University of Potsdam, Potsdam, Germany

³ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

EXPECTED CHANGES IN THE INFLOW TO THE MOZHAYSK RESERVOIR IN THE XXI CENTURY

Mozhaysk reservoir is one of the most important components of the water supply system of Moscow. Therefore the study and prediction of its hydrological regime in the XXI century related to the changes of climatic conditions has great importance. It was done in this work using the results of ensemble calculations of global climate models under different scenarios of anthropogenic impact of the past (RCP 26, 60, 85) and the latest generation (SSP 126, 370, 585). The HBV model ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$ on calibration period) was used to simulate the inflow of water into the Mozhaysk reservoir. According to the results, the inflow will decrease at a rate of $1.4 \text{ km}^3/100$ years; according to the previous family of RCP scenarios, on the contrary, an increase in inflow was expected by an average of $2.32 \text{ km}^3/100$ years.

Keywords: Mozhaysk reservoir, Moscow River, hydrological models, HBV model, climate change, runoff changes.

Введение

Глобальное потепление – одна из самых серьезных и исследуемых проблем в мире на данный момент. Потепление климата влечет за собой изменение количества выпадающих осадков и таяние ледников, что вызывает изменения в гидрологических системах, оказывая влияние на количество и качество водных ресурсов [10]. Во всем северном полушарии, в том числе на обширной территории России, в зонах избыточного и нормального увлажнения отмечается увеличение годового стока рек.

Москва – один из 25 крупнейших мегаполисов мира, и вопрос водоснабжения города является насущной проблемой на протяжении нескольких веков. Более 65% питьевой воды поступает благодаря Москворецкой системе, в которой важную роль играет Можайское водохранилище, созданное для водоснабжения г. Москвы и многолетнего регулирования стока р. Москвы [2].

Моделирование притока воды для данного водохранилища производилось в работе [4], однако в ней использовалась проприетарная модель ЕСОМАГ, и, кроме того, отсутствует прогноз климатически обусловленных изменений в будущем.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы оценить изменения притока воды в Можайское водохранилище в XXI веке, связанные с вероятными изменениями климатических условий региона, основываясь на прогнозных данных.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных в работе использовались данные реанализа EWMВI и расходы воды р. Москва (г/п Барсуки). Для моделирования стока на основе сценариев RCP 26, 60, 85 и SSP 126, 370, 585 применялась модель гидрологического стока HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), разработанная Бергстрёмом [7].

Модель HBV была выбрана из-за ее гибкости, вычислительной эффективности, доказанной в широком диапазоне климатических и физико-географических условий [1; 5], и успешного применения на реках Восточно-Европейской равнины [3; 6]. HBV представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует атмосферные осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение в снеготаяние, водоотдачу и затем в сток воды.

В качестве исходных метеорологических данных (суточных температур воздуха и осадков) были использованы результаты реанализа EWMВI с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за период 1979-2016 гг. [9]. Также для входных данных необходимо потенциальное испарение, которое вычислялось в соответствии с формулой, предложенной [11]:

$$\begin{cases} PE = \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_a + 5}{100}, & \text{если } T_a + 5 > 0 \\ PE = 0, & \text{если } T_a + 5 < 0 \end{cases},$$

где PE – потенциальное испарение (мм/сут), R_e – внеземное излучение (МДж/м²·сут), T_a – средняя суточная температура (°C), λ – скрытый тепловой поток (МДж/кг), ρ – плотность воды (1000 кг/м³).

Калибровка модели производилась методом дифференциальной эволюции на основе рядов суточных расходов воды р. Москва (г/п Барсуки), которые были пересчитаны в объемы стока. Результат калибровки модели HBV можно считать удовлетворительным ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$), а для последних 5 лет периода валидации – хорошими ($NSE=0,773$, $|BIAS|=3,19\%$). При этом величина относительной систематической ошибки не превышает 10% за весь рассматриваемый период, что является хорошим результатом.

В качестве исходных данных для моделирования притока воды в XXI в. использовались данные GCMs (Global circulation model), участников проекта CMIP5: RCP (26, 60, 85) и CMIP6: RCP (26, 60, 85) [8]. Для того, чтобы получить более точные результаты, были выбраны только 3 глобальные климатические модели: IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M из проекта CMIP5 и IPSL-CM6A-LR, MIROC6, GFDL-ESM4 из проекта CMIP6. Модели имеют различное разрешение и структуру сеток, учитывают различные физические процессы и созданы в различных научных организациях.

Анализ результатов

На основе данных трех глобальных климатических моделей для трех сценариев будущих антропогенных воздействий RCP (прошлое поколение) и SSP (последнее поколение) был получен ансамбль траекторий возможных изменений метеорологических величин в XXI веке.

Для оценки возможных изменений климата использовались две климатические характеристики: среднегодовая температура воздуха и сумма осадков за год. В результате были выделены следующие тренды потепления (с учетом того, что в последнее десятилетие среднегодовая температура составляет $6,1^{\circ}\text{C}$). Для сценариев прошлого поколения прогнозируемое изменение температуры воздуха составит: RCP26 – $1,6^{\circ}\text{C} / 100$ лет; RCP60 – $3,7^{\circ}\text{C} / 100$ лет; RCP85 – $5,8^{\circ}\text{C} / 100$ лет; для нового поколения сценариев: SSP126 – $1,0^{\circ}\text{C} / 100$ лет; SSP370 – $4,0^{\circ}\text{C} / 100$ лет; SSP585 – $5,6^{\circ}\text{C} / 100$ лет.

Таким образом, только согласно наиболее консервативным сценариям темпы роста температуры воздуха замедлятся по сравнению с современными ($0,3^{\circ}\text{C} / 10$ лет); причем, согласно новому сценарию, среднегодовая температура воздуха к концу века останется меньше $7,0^{\circ}\text{C}$.

При этом, согласно остальным сценариям, темпы роста температуры увеличатся и будут достигать от $0,37$ до $0,58^{\circ}\text{C} / 10$ лет. Впрочем, подобные темпы роста температуры воздуха на рассматриваемой территории уже наблюдаются с 2000-х годов.

Согласно новым сценариям, средняя среднегодовая температура воздуха увеличится не так значительно и будет достигать от $6,5$ до $8,2^{\circ}\text{C}$, тогда как предыдущие сценарии прогнозировали большее увеличение среднегодовой температуры: от $7,25$ до $8,8^{\circ}\text{C}$.

Количество осадков, в среднем выпадающих за год, как и среднегодовая температура, продолжит увеличиваться: согласно сценарию RCP26 – на 238 мм / 100 лет; RCP60 – 263 мм / 100 лет; RCP85 – 262 мм / 100 лет; по сценариям

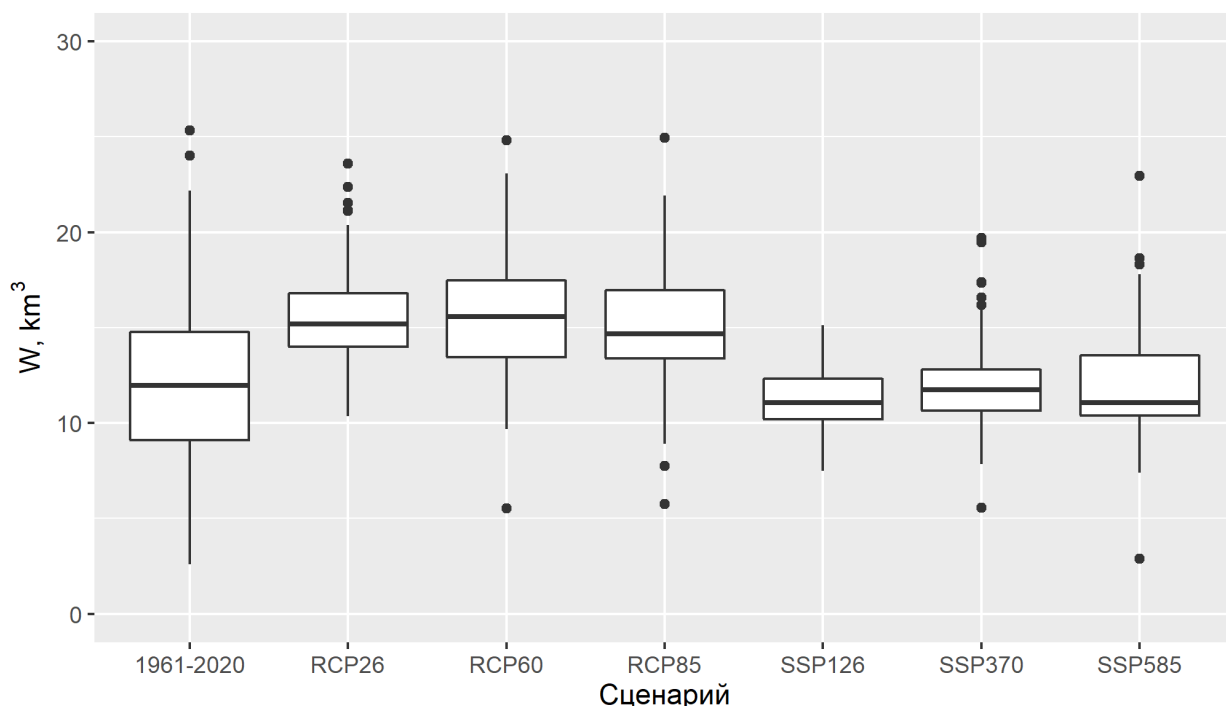
SSP126 – на 88 мм / 100 лет; SSP370 – 148 мм / 100 лет; SSP585 – 138 мм / 100 лет.

Таким образом, темпы увеличения годовых сумм осадков согласно новым сценариям значительно ниже, чем в прошлых (примерно в два раза); кроме того, они ниже наблюдаемых за последние 80 лет (17 мм за 10 лет). При этом темпы изменения температуры практически совпадают по обеим версиям сценариев.

Согласно новым сценариям, в среднем в 2020-2100 гг. суммарно в год будет выпадать от 889 до 892 мм осадков согласно сценариям RCP и от 749 до 762 мм согласно сценариям SSP, тогда как в последнее десятилетие в среднем за год выпадает 662 мм, а в среднем за последние 80 лет – 630 мм.

Согласно прошлым сценариям, в среднем наблюдается тенденция к увеличению стока, тогда как согласно последним, наоборот, к уменьшению (рис.), что вероятно связано с меньшими темпами увеличения количества осадков по новым сценариям, тогда как темпы изменения температуры в обеих версиях примерно совпадают.

Согласно прежним сценариям RCP ожидается увеличение суммарного годового притока в Можайское водохранилище со скоростью от 2,26 до 2,37 км³ / 100 лет; согласно последним сценариям – уменьшение со скоростью от 0,62 до 2,17 км³ / 100 лет.



Изменение объема притока воды в Можайское водохранилище в XXI в.

Максимальные за год расходы, согласно большинству сценариев, будут уменьшаться. Однако максимальные расходы, вызванные зимними паводками, увеличатся согласно сценариям RCP60 и RCP85 на 23,2 и 37,4% соответственно.

Минимальные расходы, наоборот, значительно увеличатся согласно всем сценариям, особенно в летний период: в 3,7-3,9 раз по сценариям RCP и в 3,2-3,5

раз по сценариям SSP. В зимний период минимальные расходы также будут увеличиваться, но меньшими темпами: в 1,8-2,1 раз по прошлым сценариям и в 1,4-1,8 раз по новым.

Таким образом, внутригодовая изменчивость стока, согласно произведенной оценке, уменьшится, особенно согласно последним сценариям (SSP).

Выводы

1. Согласно обновленным климатическим сценариям (SSP) в XXI веке ожидается уменьшение среднесуточного объема притока воды в Можайское водохранилище со скоростью от 0,62 до 2,17 км³ / 100 лет, тогда как согласно прошлым сценариям (RCP), наоборот, ожидалось увеличение притока со скоростью от 2,26 до 2,37 км³ / 100 лет.

2. Уменьшится внутригодовая изменчивость годового стока.

3. Максимальные за год расходы, согласно большинству сценариев, будут уменьшаться.

4. Минимальные расходы, наоборот, значительно увеличатся согласно всем сценариям, особенно в летний период.

Библиографический список

1. *Копысов С.Г., Земцов В.А., Мацуяма Х., Елисеев А.О.* Моделирование гидрографов стока арктических рек Западной Сибири в программе HBV-light для оценки экстремальных расходов половодья // Геосферные исследования. 2020. Т. 4. С. 108-120.

2. Отчётность – Мосводоканал [Электронный ресурс]: годовые отчеты акционерного общества «Мосводоканал» за 2011-2019 годы. Электрон. дан. (9 файлов). М., [2011-2019]. Режим доступа: <https://www.mosvodokanal.ru/forinvestors/reporting/#annual-tab>. Загл. с экрана.

3. *Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В.* Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 66-65.

4. *Сучкова К.В.* Моделирование генетических составляющих речного стока для водосбора Можайского водохранилища: автореф... дис. кан. геогр. наук. М.: 2020. 24 с.

5. *Ayzel G., Izhitskiy A.* Climate change impact assessment on freshwater inflow into the small aral sea // Water (Switzerland). 2019. Vol. 11. № 11. 2377.

6. *Ayzel G.V.* Runoff Predictions in Ungauged Arctic Basins Using Conceptual Models Forced by Reanalysis Data // Water Resources. 2018. Vol. 45. P. 1-7.

7. *Bergström S.* The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH No. 4. SMHI, Norrköping. 1992. 32 p.

8. *Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. № 5. P. 1937-1958.

9. *Frieler K.* et al. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10. № 12. P. 4321-4345.

10. *Jarraud M., Steiner A.* Summary for policymakers / In Field, C., Barros, V., Stocker, T. & Dahe, Q. (Eds). Cambridge: Cambridge University Press. 2012. P. 3-22.

11. Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F., Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 303. № 1-4. P. 290-306

М.В. Болгов, Е.А. Коробкина, И.А. Филиппова, bolgovmv@mail.ru
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ОБ ОЦЕНКАХ ГОДОВОГО СТОКА В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Представлены результаты изучения многолетних колебаний годового стока рек бассейна трансграничной р. Урал. Для определения нормы стока получены зависимости годового стока от факторов подстилающей поверхности, а также определены районы с синхронными колебаниями годового стока.

Ключевые слова: годовой сток, норма стока, трансграничная река, река Урал, климатические изменения, оценка параметров неизученных рек, синхронность многолетних колебаний.

M. Bolgov, E. Korobkina, I. Filippova, bolgovmv@mail.ru
Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

ON ESTIMATES OF ANNUAL RUNOFF UNDER CONDITIONS OF INSUFFICIENT WETTING

The results of a study of long-term fluctuations in the annual runoff of rivers in the basin of the transboundary Ural River are presented. To determine the normal annual runoff, the dependences of the annual runoff on the factors of the underlying surface were obtained, and areas with synchronous fluctuations in the annual runoff were also identified.

Keywords: annual runoff, normal annual runoff, transboundary river, Ural River, climate change, unexplored rivers, parameters evaluation, synchronicity of long-term runoff fluctuations.

Введение

Определение принципов водodelения между Российской Федерацией и Республикой Казахстан (РК) в бассейне трансграничной реки Урал должно базироваться на расчетах водохозяйственного баланса на территории двух независимых государств. Отправной точкой расчетов являются надежные оценки располагаемых водных ресурсов. Такие оценки были приведены в монографии «Ресурсы поверхностных вод» [6], однако, с момента ее опубликования прошло более полувека, бассейн р. Урал стал трансграничным, на водосборе изменились условия формирования стока, связанные с растущим антропогенным вмешательством и климатическими изменениями. Несмотря на то, что за последние десятилетия выполнено много работ по оценке происходящих изменений гидрологического режима р. Урал [3;5;7-9], результаты этих работ являются достаточно разрозненными и отражают, в основном, только локальные изменения. Для ре-

шения задачи оценки ресурсов по всему бассейну необходимо привлекать максимальное количество данных о стоке как для российской, так и для казахской частей водосбора, проанализировать динамику стока и предложить схему расчета с учетом произошедших изменений гидрологического режима рек бассейна. В современных условиях при обновлении расчетной схемы необходимо обосновывать гипотезу о климатических нарушениях.

В данной работе представлены результаты изучения многолетних колебаний годового стока рек бассейна р.Урал и их связи с климатическими изменениями в регионе в рамках всего бассейна. Получены зависимости годового стока от факторов подстилающей поверхности, отражающие современное гидрологическое состояние бассейна, а также определены районы с синхронными колебаниями годового стока, которые можно использовать в гидрологической практике для определения нормы стока.

Материалы и методы исследования

В качестве исходной информации использованы данные многолетних наблюдений на сети Росгидромета и Казгидромета за стоком в бассейне р. Урал за период от начала наблюдений до 2020 г. Для более полного анализа стока дополнительно привлекались данные по р. Эмба и рекам бессточной части Урало-Эмбинского междуречья. Всего анализировались данные 74 гидрологических постов (41 – на российской части, 33 – на территории РК).

Гидрологическая изученность района неравномерная. Российская часть бассейна Урала достаточно хорошо освещена наблюдениями за стоком, средняя продолжительность наблюдений более 50 лет. На 11 постах ряды наблюдений длиной более 80 лет.

Продолжительность наблюдений за стоком на казахской части бассейна Урала и Урало-Эмбинском междуречье существенно меньше вследствие того, что большая часть гидрологических постов была открыта в послевоенный период до 1964 г. Посты расположены по территории района неравномерно. Ряды характеризуются большим количеством пропусков, что затрудняет применение статистических методов для выявления многолетних закономерностей в характере стока.

Все имеющиеся ряды проанализированы на стационарность (однородность) с использованием критериев Стьюдента (однородность по среднему) и Фишера (однородность по дисперсии). Хронологические графики и разностные интегральные кривые (РИК) в совокупности со статистическим анализом рядов использовались для окончательного вывода относительно влияния климатических изменений на сток рек бассейна Урала и прилегающей территории.

Анализ результатов

Исследование однородности (стационарности) рядов годового стока в бассейне р.Урал показало стационарность большинства временных рядов. Хаотичное расположение по водосбору пунктов наблюдений с неоднородными рядами не позволяет провести территориальное обобщение по признаку нарушения

однородности, и, соответственно, не позволяет утверждать о наличии климатически обусловленных изменений годового стока в бассейне р. Урал.

При выполнении расчетов основных гидрологических характеристик, в частности годового стока, при отсутствии гидрометрических наблюдений, возникает вопрос обоснования поправок на базе продленных данных. На малых реках и временных водотоках, норма стока определяется косвенными методами, в основном по данным о средних реках. В величину нормы, полученную для средних рек, вносятся различные поправки на различие физико-географических факторов формирования стока. Начиная с работ К.П. Воскресенского, А.Н. Бефани, Б.Д. Зайкова, в гидрологии обсуждается вопрос о возможном виде зависимостей нормы стока от площади водосбора. Для установления вида таких зависимостей в регионе и обоснования соответствующих поправок для гидрологических расчетов, необходимо изучить влияние физико-географических факторов на годовую сток в бассейне р. Урал.

Влияние основных физико-географических факторов на норму стока

Различие в стоке малых и средних рек определяется разной долей участия в годовом стоке подземного питания. Основным фактором при этом является площадь водосбора, косвенно определяющая глубину эрозионного вреза водосбора, которая в свою очередь, определяет величину подземного стока.

В районах, где подземное питание практически отсутствует – сухие степи Казахстана – основным фактором становится густота овражно-балочной сети, определяющая перераспределение снежного покрова на водосборе и формирующая обратную зависимость, а именно уменьшение стока с увеличением площади водосбора [2].

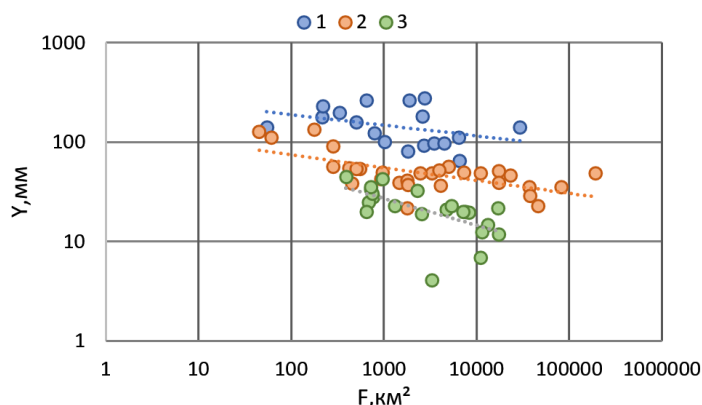


Рис. 1. Зависимости нормы стока от площади водосбора для рек бассейна р.Урал
(1 – правобережные притоки Верхнего Урала и реки бассейна Сакмары, 2 – реки Подуральского плато, 3 – реки Подуральского плато (бессточная область))

Для Урало-Эмбинского района выделены три области, для которых обнаруживаются зависимости слоя годового стока Y от площади водосбора, которые могут быть использованы для определения стока с неизученных водосборов. Эти зависимости для каждой из областей приведены на рисунке 1 в логарифмических координатах. Получены коэффициенты редукции n , равные 0,11; 0,12; 0,25 для 1-й, 2-й и 3-й областей, соответственно. Коэффициент редукции возрастает в направлении с севера на юг.

Зависимость нормы годового стока от средней высоты водосбора изучена для 57 водосборов рек Урало-Эмбинского района. На рисунке 2 приведены зависимости для отдельных географических районов исследуемой территории.

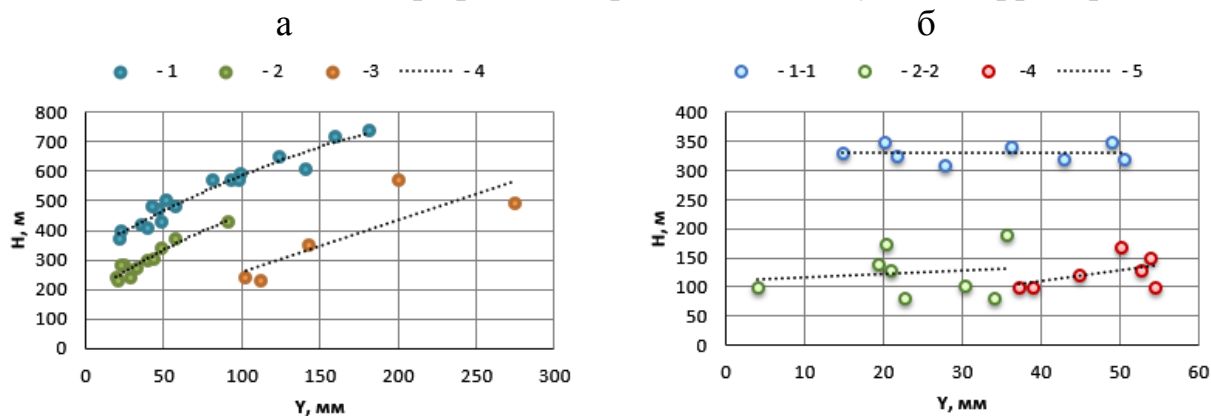


Рис. 2. Зависимость нормы годового стока (Y) от средней высоты водосбора (H) для различных частей бассейна р. Урал:

- а) 1 – правобережные притоки Верхнего Урала и р. Сакмара до Акьюлово, 2 – реки Подуральского плато, 3 – реки Зилаирского плато и р. Салмыш, 4 – линия тренда;
 б) 1-1 – левобережные притоки Верхнего Урала, 2-2 – реки Подуральского плато (бессточная область), 4 – реки Общего Сырта, 5 – линия тренда

Выделение однородных районов по синхронности колебаний стока

С использованием данных гидрологических наблюдений на выбранных 48 водосборах, расположенных в Урало-Эмбинском районе выполнен анализ пространственной связности и выделены районы с синхронными колебаниями годового стока. В качестве метода выделения однородных районов был взят один из вариантов автоматического алгоритма классификации полей гидрометеорологических характеристик по синхронности их многолетних колебаний (типа кластер-анализа) [1;4]. Процесс последовательного образования кластеров выполняется последовательно с заданным шагом до достижения критического уровня коэффициента парной корреляции. Приняв в качестве наименьшего коэффициента парной корреляции внутри групп с однородными колебаниями годового стока $R_{кр} = 0,5$, получили 12 районов с количеством постов в них больше двух. Положение шести районов оправдано географически, три из них сохраняют устойчивое положение при критическом коэффициенте автокорреляции 0,6.

В целом можно отметить, что пространственная связность на территории российской части водосбора характеризуется более высокими средними значениями коэффициента корреляции.

Выводы

1. По результатам исследования однородности временных рядов годового стока сделан вывод об отсутствии влияния климатических изменений на структуру его многолетних колебаний.

2. Показано, что для частей водосбора Урала, где преимущественно осуществляется формирование стока, сохраняется зависимость стока от высоты, которая может быть использована в гидрологических расчетах.

3. Один из проблемных вопросов гидрологии – зависимость нормы стока от площади водосбора. В исследуемом регионе показано, что с ростом аридизации норма стока снижается с ростом площади, что вызвано неоднородностью условий его формирования в пределах водосбора, наличием русловых потерь, высотной зональностью.

4. Районирование по синхронности многолетних колебаний стока позволило выделить на территории бассейна шесть однородных районов, отражающих особенности формирования водных ресурсов.

Работа частично выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Библиографический список

1. *Болгов М.В., Коробкина Е.А.* Исследование закономерностей многолетних колебаний годового стока рек Сибири и Дальнего Востока // География и природные ресурсы, 2011. №2. С. 5-11.

2. *Воскресенский К.П.* Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. – Л: Гидрометеиздат, 1956. 467 с.

3. *Давлетгалиев С.К.* Поверхностные водные ресурсы рек Жайык-Каспийского бассейна в границах Республики Казахстан // Гидрометеорология и экология, 2011. № 1. С. 56-65.

4. *Жук В.А., Романова Е.А.* Об одном методе автоматических классификаций гидрометеорологических величин // Вестник Московского университета. Сер. География, 1981. №5. С. 33-38.

5. *Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С.* Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2018. № 1. С. 90-101.

6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Гидрометеиздат: Л., 1970. 512 с.

7. *Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А.* Изменения водного режима рек бассейна реки Урал // ДАН, 2019. Т. 488. № 5. С. 545–549.

8. *Фатхутдинова Р.Ш., Гареева Д.Р.* Изменчивость речного стока водотоков бассейна реки Урал // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сб. докл. Междун. науч. конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург, 2020. С. 821-826.

9. *Цыценко К.В., Владимирова Т.И.* Водные ресурсы бассейна р. Урал и их изменения // Гидрометеорология и экология, 2011. №1. С. 75-83.

А.А. Возняк, aavoznyak@gmail.com

*Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов, Камский филиал, г. Пермь, Россия
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ПАРАМЕТРЫ РЕДУКЦИОННЫХ ФОРМУЛ В БАССЕЙНЕ РЕКИ БЕЛОЙ

Рассчитаны параметры редукционных формул для расчета максимального расхода весеннего половодья на реках бассейна реки Белой. Произведено сравнение рассчитанных параметров и опубликованных в Пособии по определению расчетных гидрологических характеристик. Проведен анализ причин несовпадения старых и новых параметров.

Ключевые слова: редукция максимального стока по площади водосбора, параметры редукционных формул.

А.А. Vozniak, aavoznyak@gmail.com

*Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources,
Kama Branch, Perm, Russia
Perm State University, Perm, Russia*

PARAMETERS OF REDUCTION FORMULAS IN THE BELAYA RIVER BASIN

The parameters of reduction formulas for calculating the maximum discharge of the spring flood on the rivers of the Belaya River basin are calculated. A comparison of the calculated parameters and those published in the Handbook for determining the calculated hydrological characteristics was made. The reasons for the discrepancy between the old and new parameters are analyzed.

Keywords: reduction of maximum runoff by catchment area, parameters of reduction formulas.

Введение

При проектировании речных гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, сооружений мелиоративных систем, систем водоснабжения, планировки и застройки населенных пунктов, генеральных планов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также мероприятий по борьбе с наводнениями необходимо рассчитывать основные расчетные гидрологические характеристики.

Основным нормативным документом, который используется для таких расчетов в настоящее время, является СП-33-101-2003 [4]. Для расчета максимальных расходов половодья и паводков различной обеспеченности для неизученных водосборов в нем приняты редукционные формулы: для весеннего половодья – основанные на убывании модуля максимального стока с возрастанием площади водосбора, для дождевого паводка – отражающие убывание модуля максимального стока с возрастанием площади водосбора или времени добега

стока до замыкающего створа и, дополнительно, основанные на убывании максимальной интенсивности дождя с увеличением интервала осреднения расчетных осадков по времени.

Все эти формулы содержат параметры, которые были рассчитаны по эмпирическим зависимостям и опубликованы в [2] еще в 1984 г. для всех районов СССР. С тех пор прошло 40 лет. Было интересным посмотреть, изменились ли параметры редуционных формул, если их рассчитать по существенно удлиненным рядам наблюдений. Этот вопрос и стал целью настоящего исследования.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран бассейн р. Белой. Были взяты створы на реках бассейна, имеющие продолжительность наблюдений более 40 лет. Было использовано также 11 створов с продолжительностью наблюдений менее 40 лет, из них 4 – менее 20 лет. Короткие ряды удлинялись с использованием рек-аналогов. Анализировались ряды максимальных расходов половодья.

Редуционные формулы основаны в явном или неявном виде на генетической теории формирования поверхностного стока и генетической формуле стока. Генетическая теория отражает причинно-следственные связи, возникающие при формировании поверхностного стока на водосборах рек. Она позволяет учесть ход водоотдачи с водосбора (или водоподачи к расчетному створу) в результате снеготаяния или выпадения дождей, а также некоторые индивидуальные особенности речных бассейнов и в результате получить схематизированный гидрограф половодья или паводка [1].

Редуционные формулы выводятся из общего закона редукиции (уменьшения) максимальных модулей стока половодий и паводков с увеличением времени добега и применимы для районов, где наблюдается сток по поверхности почвы и где малые водотоки имеют достаточно глубокий врез русла для перехвата всех стекающих талых и дождевых вод.

Согласно [4] расчетный максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{p\%}$, м³/с, заданной вероятности превышения $P\%$ при наличии рек-аналогов определяют по редуционной формуле

$$Q_{p\%} = K_0 h_{p\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 F / (F + f_0)^n, \quad (1)$$

где K_0 – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;

$h_{p\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока (без срезки грунтового питания), мм, ежегодной вероятности превышения $P\%$;

μ – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды;

$\delta, \delta_1, \delta_2$ – коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ), залесенности (δ_1) и заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды;

F – площадь водосбора исследуемой реки до расчетного створа, км²;

f_0 – дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукиции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км²;

n – показатель степени редукиции.

Показатель степени редукции n и параметр f_0 в формуле (1) определяют на основе зависимости $q_{max p\%} = f(F)$ по данным наблюдений на изученных реках исследуемого района, где $q_{max p\%}$ – модуль максимального стока.

Однако в практических расчетах редко строят подобные зависимости. Чаще всего параметры n и f_0 берут из таблиц Приложений к Пособию по определению расчетных гидрологических характеристик [2]. Это Пособие было специально разработано сотрудниками ГГИ в помощь проектировщикам как дополнительный инструмент расчета гидрологических характеристик по СНИП 2.01.14-83 [3].

В связи с тем, что редукционные формулы основаны на генетической теории, и параметры их определяются как климатическими факторами (подчиняющимися закону географической зональности), так и факторами подстилающей поверхности (азональными, присущими конкретному району исследования), все реки делятся на горные и равнинные, а равнинные, в свою очередь, на реки тундровой и лесной зон, реки лесостепной зоны, реки степной зоны и реки засушливых степей и полупустынь. В зависимости от географической зоны, согласно [2], меняются параметры редукционной формулы.

Анализ результатов

Среди рек, выбранных для исследования, половина является равнинными реками, половина – горными (в соответствии с [2]). Для равнинных рек параметры n и f_0 зависят от географической зоны, для горных рек Урала в [2] также рассчитаны параметры n и f_0 , они равны, соответственно, 0,15 и 1.

Территория бассейна р. Белой включает 4 географические зоны [5]: горно-лесную зону, зону хвойно-широколиственных лесов, зону лесостепи, степную зону.

Согласно генетической теории формирования стока редукция максимального стока характерна для поверхностного стока, однако поверхностный сток в чистом виде происходит лишь в степной зоне. На облесенных водосборах стекание вод по склонам происходит в основном в почвенной толще. В этих случаях для малых рек отношение времени добегания к времени водообразования (водоотдачи) становится очень небольшим, и модуль максимального стока может не убывать с ростом площади водосбора, а оставаться неизменным или даже возрастать в связи с увеличением глубины вреза русла и, одновременно, действующей площади водосбора, дренируемой водотоком. Размер площади, начиная с которой модуль максимального стока постоянно убывает, колеблется в зависимости от местных условий и может составлять 300 км² и более, но чаще до 100 км² [1]. Для горных рек, даже не очень малых, отношение времени добегания к времени водообразования также очень мало, и отсутствие редукции для них также может иметь место.

В таблице представлены все выбранные створы в бассейне р. Белой, у каждого отмечена природная зона, к которой он относится, в соответствии с зоной выписаны из [2] параметры редукционных формул. Там же представлены и параметры, рассчитанные по удлиненным рядам.

Параметры редуccionных формул в бассейне р. Белой

№ п/п	Река-пост	Площадь водосбора, км ²	Модуль стока, л/с км ²	Болота, %	Лес, %	Природная зона	Из Посо- бия [2]		Расчетный п
							п	f ₀	
1	Белая-Махму- тово	649	94,3	3	62	горно-лесная	0,15	1	0,32
2	Белая-Шушпа	1670	83,1	3	62	горно-лесная	0,15	1	0,32
3	Белая-Арский камень	2300	80,4	3	64	горно-лесная	0,15	1	0,32
4	Белая-Сыртла- ново	10100	85,3	1	75	горно-лесная	0,15	1	0,22
5	Белая-Стерлита- мак	21000	66,2	0	53	лесостепь/степь горно-лесная	0,25- 0,35	2- 10	0,22
6	Мелеуз-Мелеуз	346	125,0	0	5	лесостепь/степь	0,25- 0,35	2- 11	0,22-26
7	Нугуш-Новосей- тово	353	240,3	0	83	горно-лесная	0,15	1	0,11
8	Нугуш-Андреев- ский	2870	195,8	0	89	горно-лесная	0,15	1	0,11
9	Ашкадар-Ново- Фёдоровка	2090	86,0	0	6	степь	0,35	10	0,26
10	Стерля-Отра- довка	595	95,8	0	8	степь	0,35	10	0,26
11	Селеук-Нижне- иткулово	141	152,9	0	74	лесостепь	0,25	2	0,22
12	Б.Авзян-Н.Авзян	507	185,2	0		горно-лесная	0,15	1	0,17
13	Тор-Воскресен- ское	325	182,7	0		лесостепь	0,25	2	0,22
14	Зиган-Янгискаин	1450	163,8	0	92	горно-лесная	0,15	1	0,17
15	Сим-Серпиевка	274	163,6	0	87	горно-лесная	0,15	1	0,09(-0,26)
16	Сим-Миньяр	1810	150,4	0	73	горно-лесная	0,15	1	0,09
17	Лемеза-Нижние Лемезы-	1680	218,8	0	88	горно-лесная	0,15	1	0,08 (0,17)
18	Инзер-Курманай	455	191,9	0	91	горно-лесная	0,15	1	0,08 (-0,26)
19	Инзер-Калышта	1030	144,5	2	81	горно-лесная	0,15	1	0,09
20	Инзер-Азово	4260	180,7	0	87	горно-лесная	0,15	1	0,17
21	М.Инзер-Айгир	815	217,5	1	81	горно-лесная	0,15	1	0,08 (-0,26)
22	Дема-Дюсаново	4030	71,6	0	10	лесостепь/степь	0,25- 0,35	2- 10	0,22-0,26
23	Дема-Бочкарева	12500	36,0	0	12	лесостепь/степь	0,25- 0,35	2- 10	0,22-0,26
24	Уршак-Ляхово	3130	74,4	0	8	степь	0,35	10	0,26
25	Мияки-Мияки- Тамак	564	95,5	0	16	степь	0,35	10	0,26
26	Чермасан-Но- воюмраново	3570	91,6	1	9	степь	0,35	10	0,26
27	Чекмагуш-Чек- магуш	99,1	62,2	0	1	лесостепь	0,25	2	-0,11
28	Ай-Златоуст	1120	90,5	3	83	лесная-горная	0,15	1	0,18
29	Уфа-Дол- гобродки	973	105,8	8	83	лесная-горная	0,15	1	0,18
30	Уфа-Н.Уфалей	1930	83,8	5	75	лесная-горная	0,15	1	0,18
31	Уфа-Нязепет- ровск	3560	100,3	6	82	лесная-горная	0,15	1	0,19
32	Уфа-Михай- ловск	5650	84,0	4	71	лесная-горная	0,15	1	0,19
33	Уфа-Красной- фимск	14200	73,4	3	65	лесная	0,17	1	0,19
34	Уфа-В.Суян	32400	54,5	2	58	лесная	0,17	1	0,19

№ п/п	Река-пост	Площадь водосбора, км ²	Модуль стока, л/с км ²	Болота, %	Лес, %	Природная зона	Из Пособия [2]		Расчетный n
							n	f ₀	
35	Ай-Веселовка	586	95,1	2	83	лесная-горная	0,15	1	0,18
36	Ай-Орловский	803	73,1	1	75	лесная-горная	0,15	1	-0,11
37	Ай-Лаклы	6440	83,9	1	73	лесная-горная	0,15	1	0,19
38	Ай-Метели	14200	51,6	0	48	лесная-горная	0,15	1	0,18
39	Тесьма-Златоуст	143	161,3	0	94	лесная-горная	0,15	1	0,19
40	Киги-Конда- ковка	1240	78,0	1	46	лесная-горная	0,15	1	-0,11
41	Б. Ик-Таишево	1450	88,7	1	42	лесная	0,17	1	0,18
42	Б. Арша-Возне- сенская	277	171,9	0	84	лесная-горная	0,15	1	0,19
43	Куса-Магнитка	287	135,0	0	94	лесная-горная	0,15	1	0,18
44	Б.Куторка-Сулея	16	202,6	0	100	лесная-горная	0,15	1	0,19
45	Б.Куторка-Пара- моновка	81,9	133,5	1	78	лесная-горная	0,15	1	0,18
46	Каменка-ж/д мост	41,2	295,6	0	96	лесная-горная	0,15	1	0,24
47	Юрюзань-Екате- риновка	1740	116,0	2	78	лесная-горная	0,15	1	0,19
49	Юрюзань-Вязо- вая	2430	110,6	2	76	лесная-горная	0,15	1	0,19
50	Юрюзань-Чул- пан	4850	96,3	1	65	лесная-горная	0,15	1	0,19
51	Юрюзань-Атняш	6930	79,2	2	64	лесная-горная	0,15	1	0,19
52	Яманелга-Устье	718	65,7	0	93	лесная	0,17	1	-0,11
53	Тюлюк-Тюлюк	136	155,4	2	91	лесная	0,17	1	0,19
54	Тюй-Гумбино	2180	99,5	0	57	лесная	0,17	1	0,19
55	Сарс-Султанбе- ково	1300	77,2	0	66	лесная	0,17	1	-0,11
56	Бирь-Малосухо- язово	1210	149,0	0	32	лесная	0,17	1	0,19
57	Б.Танып-Чер- нушка	667	144,2	1	27	лесная	0,17	1	0,19
58	Б.Танып-Алта- ево	4860	77,1	0	28	лесная	0,17	1	0,19
59	База-Рсаево	885	94,7	0	21	лесостепь	0,25	2	0,22
60	Сюнь-Минья- рово	4140	91,4	1	22	лесостепь	0,25	2	0,22

Выводы

Показатель степени редукции n для равнинных рек лесной и лесостепной зон существенно не изменился, отклонение составило 12-14%. Исключение касается 4-х водосборов, которые находятся в разных частных бассейнах и зонах, но имеют близкий по значениям модуль стока, существенно ниже, чем у других рек этих бассейнов. Показатель степени редукции n для равнинных рек степной зоны на 35% ниже значения из [2]. В горнолесной зоне в среднем течении реки Белой расчетный показатель степени редукции n выше среднего из [2] на 32-36%, а в верхнем течении р. Белой – выше в 2 раза.

Эмпирический параметр f_0 , учитывающий снижение интенсивности редукции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, по [2] равен 1 км² в горнолесной и лесной зонах, 2 км² в лесостепной и 10 км² в степной зонах. В представленных расчетах 4 водосбора из лесной и лесостепной зон

имеют растущую зависимость модуля стока от площади водосбора, то есть f_0 там приближается к 1000 км².

Отдельно следует рассмотреть бассейн р. Сим. Внутри бассейна 2 очень разных подбассейна: сама р. Сим и ее приток р. Инзер. Несмотря на то, что показатель степени редукции n у них близок по значениям, модуль стока в створах р. Сим на 36% ниже модуля стока в створах р. Инзер. Таким образом, несмотря на близкое расположение, близкие по значениям площади водосбора, одинаковые высоты водосбора, использовать их в качестве аналогов друг для друга нельзя. Кроме того, здесь также наблюдается положительный показатель степени зависимости модуля стока от площади для малых водосборов до 815 км².

Библиографический список

1. *Владимиров А.М.* Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 366 с.
2. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. /под ред. Т.С. Шмидт, Л. Гидрометеиздат. 1984. 449 с.
3. СНиП 2.01.14-83 Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1985. 36 с.
4. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик (одобрен Постановлением Госстроя РФ от 26.12.2003 № 218). М.: ФГУП ЦПП, 2004. 85 с.
5. <https://znanio.ru/media/respublika-bashkortostan-kraj-v-kotorom-ya-zhivu-2562507> (дата обращения 07.04.2023)

О.В. Горелиц, Е.А. Ракчеева, А.А. Тимошенко, Д.В. Мишин, Е.В. Борщенко
gorelits@mail.ru

*Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
г. Москва, Россия*

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА САЯНО-ШУШЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 2021-2022 ГГ.

Рассматриваются параметры гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища и метеорологические параметры на водосборе в период 1966-2022 гг. Дана оценка многолетней и сезонной изменчивости притока к водохранилищу и осадков на территории бассейна. Показано, что годовые и сезонные значения характеристик режима водохранилища в 2021 и 2022 гг. являются абсолютно экстремальными за весь период с начала сооружения Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: водохранилище, приточность, уровень воды, сбросы ГЭС

O.V.Gorelits, E.A.Rakcheeva, A.A.Timoshenko, D.V.Mishin, E.V. Borshchenko
gorelits@mail.ru

N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

FEATURES OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE SAYANO-SHUSHENSKOYE RESERVOIR IN 2021-2022

The parameters of the hydrological regime of the Sayano-Shushenskoye reservoir and meteorological parameters in the catchment area in the period 1966-2022 are considered. An estimate of the long-term and seasonal variability of the inflow to the reservoir and precipitation in the territory of the basin is given. It is shown that the annual and seasonal values of the characteristics of the reservoir regime in 2021 and 2022 are absolutely extreme for the entire period since the beginning of the construction of the Sayano-Shushenskaya HPP.

Key words: reservoir, water inflow, water level, HPP water discharges

Введение

Енисей – одна из крупнейших рек России, образованная слиянием у г. Кызыл рек Бий-Хем (Большой Енисей) и Каа-Хем (Малый Енисей), берущих начало в горных хребтах Саян. Водосборный бассейн р. Енисей – один из крупнейших в России, его общая площадь 2580 тыс. км², из них 328,4 тыс. км² (часть водосбора озера Байкал и истоки Малого Енисея) находятся в пределах Монголии.

Саяно-Шушенское водохранилище – долинное, русловое, его полезный объем позволяет осуществлять сезонное и многолетнее регулирование. Строительство Саяно-Шушенского гидроузла было начато в середине 1960-х гг., перекрытие р. Енисей состоялось в 1975 г., в сентябре 1990 г. водохранилище впервые было заполнено до проектной отметки [2; 4].

Водосбор Саяно-Шушенского водохранилища расположен в южной части бассейна р.Енисей, относится к Саянской области Алтае-Саянской горной страны [7; 8]. Площадь водосбора водохранилища в створе Саяно-Шушенской ГЭС составляет 179,9 тыс.км².

Для Саянской области характерен восточносибирский тип умеренного климата с продолжительной и суровой зимой, значительной амплитудой температур зимы и лета, а также большими различиями в режиме увлажнения. Максимальное количество осадков получают северные склоны хребтов Западного Саяна и Западные хребты Восточного Саяна, подверженные воздействию западных циклонов [7; 8]. Самые засушливые районы Саянской области – межгорные котловины, которые получают до 250-300 мм осадков при сравнительно высоких летних температурах.

Материалы и методы исследования

Водосбор Саяно-Шушенского водохранилища имеет значительную протяженность как в меридиональном, так и в широтном направлении, и большую часть его площади занимает горная местность, для которой характерно преобладание локальных климатических процессов. Поэтому данных метеорологических станций государственной наблюдательной сети на водосборе не всегда достаточно для детальной климатической характеристики, в особенности в те периоды, когда наблюдаются экстремальные параметры гидрологического режима и притока к водохранилищу.

Для анализа сезонной и многолетней изменчивости климатических параметров – температуры воздуха и осадков за период с начала сооружения Саяно-Шушенской ГЭС по настоящее время (1966-2022 гг.) были использованы дискретные данные Росгидромета по метеостанциям, расположенным на водосборе водохранилища и в непосредственной близости от него, полученные с помощью специализированной технологии АИСОРИ [5]. Также использованы интерполированные сеточные данные о температуре воздуха и осадках (*CRU TS 0,5°x0,5°*), осредненные по территории водосбора Саяно-Шушенского водохранилища [6; 9] (рис.1).

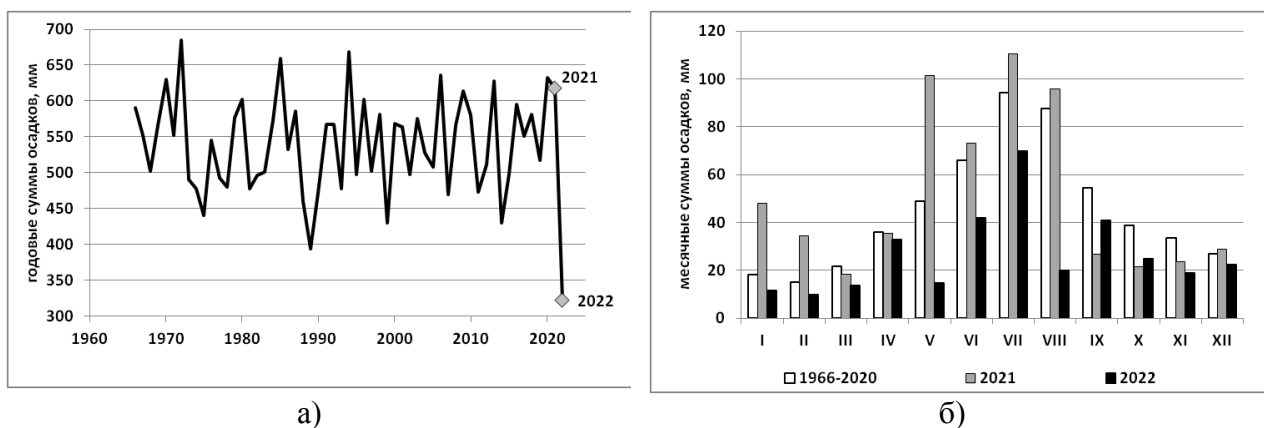


Рис. 1. Средние годовые (а) и месячные (б) суммы осадков на водосборе Саяно-Шушенского водохранилища (1966-2022 гг.)

Анализ изменчивости общего притока к водохранилищу в створе Саяно-Шушенской ГЭС за период 1966-2022 гг. проведен на основе данных Росгидромета, ПАО «РусГидро», Енисейского БВУ и других открытых информационных ресурсов [1; 3-8] (рис. 2).

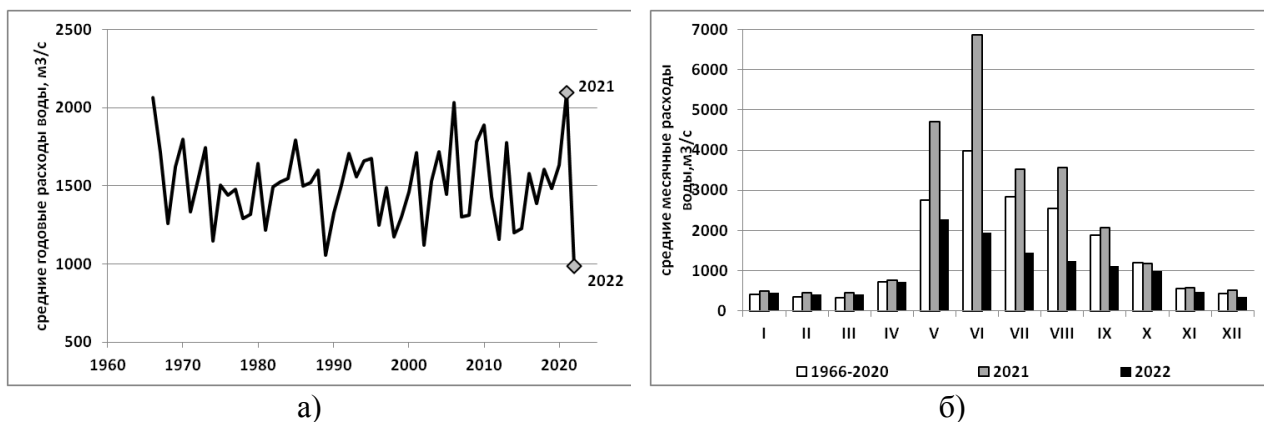


Рис. 2. Средние годовые (а) и месячные (б) расходы притока к Саяно-Шушенскому водохранилищу (1966-2022 гг.)

Анализ результатов

Среднегодовой общий приток к Саяно-Шушенскому водохранилищу за рассматриваемый период относительно стабилен, хотя были отмечены как мало-водные (1989, 2002), так и многоводные (1966, 2006) годы [3]. На этом фоне 2021 и 2022 годы выделяются экстремальными величинами притока за весь период наблюдений (рис. 2).

В 2021 г. годовой приток к водохранилищу составил 66,5 км³, что является абсолютным максимумом за период сооружения и эксплуатации ГЭС. Экстремально низкий годовой приток был отмечен в 2022 г. и составил 31,2 км³, что является абсолютным минимумом (рис. 2а, таблица).

Приток к Саяно-Шушенскому водохранилищу и осадки на водосборе в весенне-летний период (1966-2022 гг.)

Период	Общий приток к водохранилищу, км ³		Осадки на водосборе, мм	
	Год, км ³	Приток за май-август, км ³ / Доля, % к годовому	Год, мм	Осадки за май-август, мм / Доля, % к годовому
1966-2020	47,4	32,2 / 68	541	296 / 55
2021	66,5	49,6 / 75	618	381 / 62
2022	31,1	18,4 / 59	322	146 / 45

Анализ внутригодового распределения притока (рис. 2б) показал, что основной объем поступает к водохранилищу в весенне-летний период, его доля в среднем за период 1966-2020 гг. составила 68% годового объема притока (табл.1). В соответствии с установленным режимом регулирования ежегодно с начала мая до начала сентября происходит наполнение водохранилища от минимальных отметок УМО 500,0 м БС до принятых в настоящее время отметок НПУ 539,0 м БС [2; 4] (рис. 3).

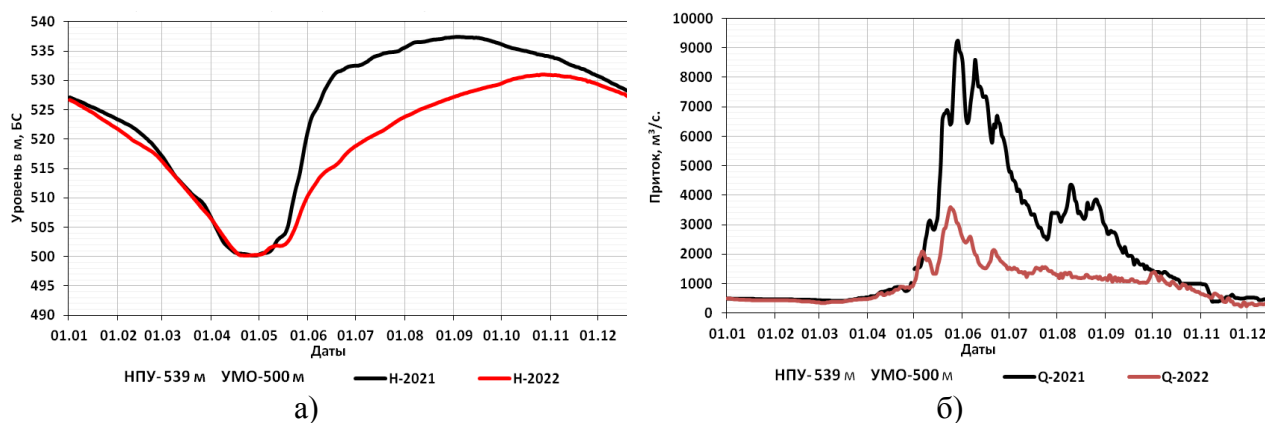


Рис. 3. Ежедневные уровни воды верхнего бьефа Саяно-Шушенского водохранилища (а) и ежедневные расходы притока (б) в 2021 и 2022 годах [4]

Условия, сложившиеся на водосборе водохранилища в 2021г., вызвали необычайно быстрый рост объема притока в мае и июне, который привел к интенсивному повышению уровня воды (рис.3). Такой мощный и дружный приток был обусловлен резким потеплением в мае, сопровождавшимся абсолютным максимумом месячной суммы осадков, в два раза превысившим средние многолетние значения для мая (рис. 2б). Месячные суммы осадков в летние месяцы также превысили средние значения на 10-17%, что обеспечило высокую приточность в течение июня-августа и общее повышение доли весенне-летнего объема притока до 75% его годового объема (табл.1).

В 2022 г. на водосборе водохранилища сложилась противоположная ситуация. Годовая сумма осадков на водосборе водохранилища составила лишь 61% среднего многолетнего значения (рис.2а, табл.1), что обусловило минимальный годовой приток за весь период наблюдений. В мае 2022 г. была зафиксирована минимальная месячная сумма осадков – в три раза меньше среднего значения для мая за рассматриваемый период (рис. 2б). Низкий приток в мае 2022 г. привел к резкому снижению интенсивности роста уровня воды. Месячные суммы осадков в июне-июле были ниже средних многолетних на 25-35%, минимального значения месячная сумма достигла в августе (на 75% ниже среднего). Недостаточное увлажнение в июне-августе на фоне повышенных температур воздуха привело к продолжительному устойчивому снижению объема притока (рис. 3б). В результате отметки уровня воды к началу сентября были значительно ниже установленного НПУ (рис. 3а). Оптимальный режим регулирования в условиях маловодья, который устанавливался в соответствии с текущей гидрометеорологической обстановкой, обеспечил постепенное наполнение водохранилища и выход на отметки уровня воды, соответствующие расчетным режимам работы Саяно-Шушенской ГЭС, к началу декабря 2022 г.

Выводы

Проведен анализ многолетней изменчивости основных параметров гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища на основе данных наблюдений. Показана уникальность сложившейся ситуации, когда два года подряд были превышены зафиксированные ранее критические – максимальные и

минимальные – значения общего притока к Саяно-Шушенскому водохранилищу. Результаты показали, что климатические условия 2021-2022 гг. не только вызвали значительные изменения годовых объемов притока к водохранилищу, но и привели к его существенному внутригодовому перераспределению. Экстремальные объемы притока к водохранилищу в 2021-2022 гг. обусловили значительные изменения в режиме уровней воды и сбросов в нижний бьеф Саяно-Шушенской ГЭС.

Библиографический список

1. *Автоматизированная* информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 21.01.2023).
2. *Возобновляемая* энергия. Гидроэлектростанции России. Справочник. М. И. Дворецкая, А. П. Жданова, О. Г. Лушников, И. В. Слива / под общей ред. к. т. н., проф. В. В. Берлина. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. — 224 с.
3. *Многолетние* характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ. Под. ред. В.Ю. Георгиевского. Научно-прикладной справочник. Москва: ООО «РПЦ Офорт», 2017 — 132 с.
4. *Официальный* сайт ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sshges.rushydro.ru/> (дата обращения 14.01.2023).
5. *Официальный* сайт специализированной технологии АИСОРИ / ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД". [Электронный ресурс]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения 01.02.2023).
6. *Ретина И.А., Мишин Д.В., Тимошенко А.А., Землянов И.В., Горелиц О.В., Ракчеева Е.А.* «Специализированный мониторинг параметров гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища» // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и центральной Азии». Барнаул, 2022. Т.3. С.158-165.
7. *Ресурсы* поверхностных вод СССР. Том 16. Ангаро-Енисейский район, Выпуск 1 – Енисей. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 374 с.
8. *Схема* комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р.Енисей – СКИОВО. Информационный ресурс Енисейского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: <http://skiovo.enbv.ru> (дата обращения 26.11.2022)
9. *University of East Anglia. Climatic Research Unit.* URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/data> [Электронный ресурс]. (дата обращения 28.01.2023).

Н.И. Горошкова goroshnat@yandex.ru, А.В. Стриженок, Д.А. Семенова
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

ЗАТОРЫ НА РЕКАХ БАССЕЙНА ПЕЧОРЫ, КАК ОПАСНОЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

В статье выполнен анализ ледового режима рек бассейна р. Печоры с использованием данных многолетних наблюдений на гидрологических постах, с установленными критериями опасных и неблагоприятных гидрологических явлений, превышение которых приводит к негативным последствиям.

Ключевые слова: наводнения, опасное гидрологическое явление, заторы, ущерб

N. Goroshkova goroshnat@yandex.ru, A. Stirzhenok, D. Semenova
State Hydrological Institute, St.Petersburg, Russia

ICE JAMS AS A DANGEROUS HYDROLOGICAL PHENOMENON ON RIVERS OF THE PECHORA RIVER BASIN

In the article, an analysis of the ice regime of the rivers of the Basin of the river was carried out. Pechora using long-term observational data at hydrological stations, for which criteria have been established for dangerous and adverse hydrological phenomena, deviation from which leads to negative consequences.

Keywords: floods, dangerous hydrological phenomenon, ice jam, damage.

Введение

На реках бассейна Баренцева моря наиболее распространенное опасное гидрологическое явление – наводнения, обусловленные заторами льда, формирующимися в период весеннего половодья на реках, текущих преимущественно с юга на север. При заторах происходит подъем уровня воды в месте затора и выше его по течению, что приводит к затоплению территории. Несмотря на то, что заторные наводнения достаточно кратковременны, ущерб от них, как правило, намного больше ущерба от наводнений в период свободного русла. Практически на всех участках р. Печоры высшие заторные уровни являются наивысшими в году и достаточно часто соответствуют уровням опасных (ОГЯ) и неблагоприятных (НГЯ) гидрологических явлений, приводящим к экономическим ущербам. Интенсивность процессов заторо- и зажорообразования зависит от взаимодействия как постоянных местных факторов, определяющих условия движения льда по реке, так и переменных: теплового, с которым связана интенсивность образования и таяния льда, его сопротивление воздействию внешних сил – кинетической энергии потока, вскрывающего реку. С увеличением доли механического фактора, что имеет место на участках рек, замерзающих снизу вверх по течению, а вскрывающихся сверху вниз, увеличивается мощность скопления льда на затороопасном участке и вероятность значительного наводнения. Преобладание механического фактора характерно для нижних течений всех больших

рек севера, где на низких и широких поймах в ряде случаев располагаются городские строения, часто затопляемые при заторах, что сопровождается большим материальным ущербом [1].

Материалы и методы исследования

Ледовый режим рек бассейна р. Печоры исследован по данным многолетних наблюдений на 21 гидрологическом посту Росгидромета, для которых установлены критерии опасных и неблагоприятных гидрологических явлений.

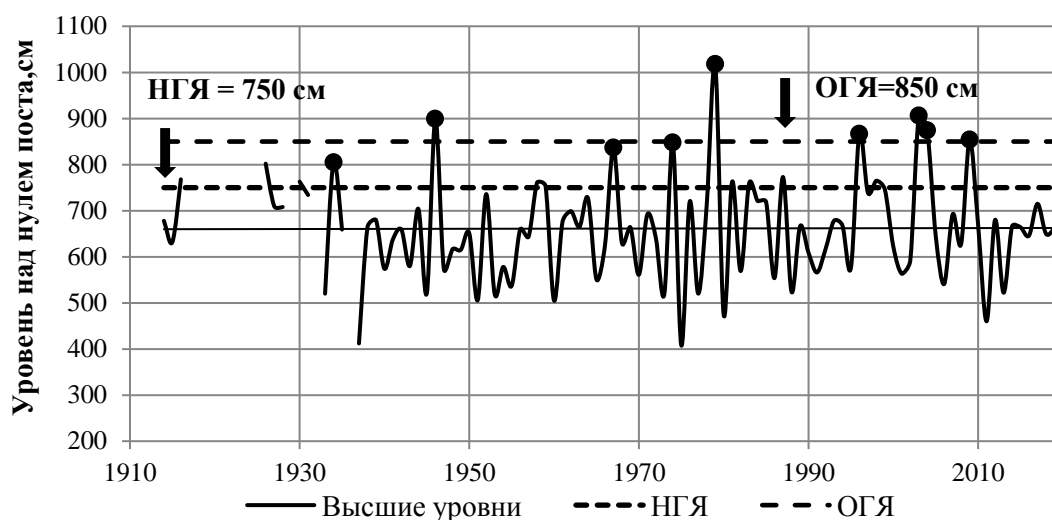
Анализ результатов

Анализ данных об опасных гидрологических явлениях (ОГЯ), наблюдавшихся на реках бассейна Баренцева моря, показал, что ежегодно здесь отмечается, в среднем, около одного ОГЯ. Затопление территорий в бассейне р. Печоры происходит в основном в период весеннего половодья. По данным, предоставленным Северным УГМС, территориальными управлениями МЧС России и администрациями муниципальных районов [2] в исследуемом бассейне около 60 населенных пунктов затопляется (подтапливается) в период половодья; численность населения, проживающего в зоне негативного воздействия вод – около 13 тыс. человек.

Для каждого гидрологического поста с установленными критериями ОГЯ и НГЯ, по программе HydroStatCalc рассчитаны обеспеченные характеристики, позволяющие выполнить анализ особенностей затопления хозяйственно освоенных прибрежных территорий.

В качестве примера приведен расчет всех характеристик для створа с. Усть – Кожва на р. Печора. Гидрологический пост расположен в 3,5 км выше впадения р. Кожвы, в 0,5 км ниже железнодорожного моста. При достижении отметки уровня 750 см (НГЯ) происходит затопление части территории речного порта, ПАО «Печорский судостроительный завод», затона Печора (10 км выше поста у правого берега). В период ледохода в затоне могут повреждаться суда. Подтапливается затон Путеец. При достижении уровня превышающего отметку в 850 см (ОГЯ) кроме перечисленных объектов происходит затопление: 2-х АЗС, части взлетной полосы аэропорта г. Печора, Печоро-Кожвинского газоконденсатного месторождения и еще более 10 объектов хозяйственной инфраструктуры, автодороги, школы и жилые дома с. Усть-Кожва и прилегающих к нему поселков. При уровне 900 см могут затопляться участки автодороги г. Печора – п. Белый-Ю (2 км), городской водозабор, очистных сооружений и КНС МУП «Горводоканал», ж/д станции «Припортовая». При уровне в 950 см происходит затопление жилых домов в Сосновоборском микрорайоне.

На рисунке 1 представлен ход высших в году уровней воды и их превышение над отметками ОГЯ и НГЯ. Расчеты обеспеченных значений высших уровней в створе с. Усть-Кожва выполнены в программе Hydrostatcalc и их результаты представлены в таблице 1.



Высшие уровни воды на р. Печора – с. Усть-Кожва

Таблица 1

Обеспеченные значения высших уровней воды р. Печора – с. Усть-Кожва

Период наблюдений	Среднее значение Н, см	Cv расч.	Cs расч.	Обеспеченные значения высших уровней воды, см					
				1%	2%	5%	10%	20%	50%
1914-2019	661	0,17	0,33	946	907	853	806	752	655

В таблице 2 для уровней воды, превышающих отметку ОГЯ, представлен ряд характеристик, позволяющих объективно охарактеризовать опасное гидрологическое явление (наводнение) в момент наибольшего затопления.

Таблица 2

Категории опасности наводнений при уровнях воды, превышающих отметку ОГЯ по гидрологическому посту р.Печора – с.Усть – Кожва

Дата	Наивысший уровень воды, см	Обеспеченность%	Категория опасности по показателям обеспеченности	Превышение над отметкой ОГЯ, см	Категория опасности по показанию превышения над ОГЯ	Причина наводнения
15.05.1946	899	2,6	опасное	49	умеренно опасное	половодье
10.05.1979	1018	0,28	чрезвычайно опасное	168	весьма опасное	затор
12.05.1996	867	4,3	опасное	17	умеренно опасное	половодье
14.05.2003	906	2,2	опасное	56	опасное	затор
21.05.2004	874	3,9	опасное	24	умеренно опасное	затор
18.05.2009	854	5,1	умеренно опасное	4	умеренно опасное	затор

Как следует из анализа данных, представленных в таблице 2, высшие уровни воды были зафиксированы в мае и сформированы по большей части вследствие заторов льда. Так, в мае 1979 г., был зафиксирован максимальный уровень воды (168 см над отметкой ОГЯ), вызванный затором льда; по обеспеченности этот год относится к чрезвычайно опасным, а по категории опасности превышающую отметку над ОГЯ – весьма опасным.

Аналогичные расчеты были выполнены и для высших уровней воды, когда они превышали отметку НГЯ (табл.3). Из 12 наводнений, при которых уровни воды превысили данную отметку в створе с. Усть-Кожва, 10 сформированы ледовыми заторами, в том числе уровень наблюдавшийся в 1974 г., обеспеченностью 6% и превысивший отметку НГЯ на 98 см.

Таблица 3

Повторяемость лет с превышением уровня воды критериев ОГЯ и НГЯ

Код поста	Река-пост	Установленные критерии		Количество лет с превышением критериев ОГЯ и НГЯ		Повторяемость лет с превышением критериев ОГЯ и НГЯ, %	
		ОГЯ см	НГЯ см	ОГЯ	НГЯ	ОГЯ	НГЯ
70410	р.Печора – д.Якша		750		3		2,8
70414	р.Печора – с.Тройцко – Печорск		750		3		2,8
70421	р.Печора – с.Усть – Шугор		1200		2		1,9
70425	р.Печора – с.Усть- Кожва	850	750	6	12	6,2	12,3
70427	р.Печора – с.Усть – Уса		1120		15		21
70429	р.Печора – д.Мутный Материк		1060		14		16,3
70432	р.Печора – р.п.Щелья -юр		1145		27		31,8
70436	р.Печора – с.Ермицы		1030		22		25,8
70466	р.Уса – с.Петрунь		840		20		20,0
70494	р.Адзъва – д.Харута		920		10		16,6
70499	р.Колва – с.Хорей-Вер		1150		4		6,5
70509	р.Ижма – с.Усть-Ухта		800		3		3,5
70514	р.Ижма – с.Ижма		600		6		6,6
70522	р.Ухта – г.Ухта		590		8		9,4
70531	р.Пижма – д.Боровая		750		12		14,6
70533	р.Цильма – с.Трусово		700		31		50,0
70540	р.Сула – д.Коткина		800		1		1,1
70570	р.Печеора – пос.Щердино		800		1		2,4
70621	Колва – с.Усть – Колва		1100		4		19,0
70827	р.Печора – с.Оксино		740		29		32,6
70850	р.Печора – с.Усть-Цильма		1030		22		25,0

В рассматриваемом створе в 58 из 106 лет наблюдений отмечались заторы с максимумами разной величины. Наибольшая продолжительность затора составила 8 дней (1985, 2011 гг.). Затор 1984 г. продолжался 7 дней и был взорван на 8-ой день [3].

Выводы

Большое количество заторов наблюдается как на самой Печоре, так и на ее притоках. Например, в с. Ермицы за 106 лет наблюдений отмечено 35 заторов, в с. Ижма на р. Ижма из 90 лет – 44 затора. Многим из этих заторов соответствуют высшие уровни, относящиеся к критическим отметкам (ОГЯ и НГЯ) (табл. 3). Начиная с 80-х годов количество таких заторов уменьшилось, что связано с происходящими климатическими изменениями.

Однако заторы продолжают формироваться и оставаться характерными для рек бассейна Печоры, в связи с сохраняющимся влиянием морфометрических факторов, например, резкие повороты реки, переломы продольного профиля, косы и острова.

Полученные результаты, безусловно, имеют важное значение для понимания масштабов негативных последствий ОГЯ и НГЯ.

Библиографический список

1. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб, 2015. 240 с.
2. Перечень и критерии опасных природных явлений в зоне ФГБУ «Северное УГМС» – URL: <http://sevmeteo.polarpost.ru/dangerous/index.html> (дата обращения 19.10.2021).
3. Анализ, обобщение и оценка опасных гидрологических явлений в различных регионах страны: Отчет о НИР ФГБУ ГГИ; Руководитель С.А.Журавлев 2.2.2.1 №ГР АААА-А20-120112690064-2. – СПб.2021. – 155с.

¹С.А. Двинских, ²В.К. Калюжный, ¹О.В. Ларченко

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

²Администрация «Камводпуть», г. Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЗНЫХ РАЙОНАХ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В статье рассмотрены участки переменного подпора и нижнего бьефа Камского гидроузла, где формы проявления деформаций котловины отличаются рядом особенностей, связанных с особенностями водного режима. Релаксационные изменения русла на участке устье Вишеры – Тюлькино продолжают и при отсутствии дноуглубления в ближайшие годы можно ожидать соединения островов Соломинский и Верхний Тюлькинский, нежелательного развития левобережной воложки за островом Тюлькинский.

Разработка Гайвинского месторождения в нижнем бьефе Камского водохранилища привела к изменению его гидравлических характеристик, распределения их в пространстве, изменению условий транспорта наносов, определяющих ход руслового процесса.

Ключевые слова: нижний бьеф водохранилища, район переменного подпора, Камское водохранилище, русловые процессы, излучина, рельеф русла.

¹S.A. Dvinskikh, ²V.K. Kalyuzhny, ¹O.V. Larchenko

¹Perm State University, Perm, Russia

²Kamvodput Administration, Perm, Russia

FEATURES OF CHANNEL DEFORMATIONS IN DIFFERENT AREAS OF THE KAMA RESERVOIR

The article deals with the areas of variable backwater and downstream of the Kama reservoir, where the forms of manifestation of depression deformations differ in a number of features associated with the peculiarities of the water regime. Relaxation changes in the channel at the mouth of the Vishera – Tyulkino continue and in the absence of dredging in the coming years, we can expect the connection of the islands of Solominsky and Verkhny Tyulkinsky, the undesirable development of the left-bank volozhka behind the island of Tyulkinsky.

The development of the Gaivinskoye field in the downstream of the Kama reservoir led to a change in its hydraulic characteristics, their distribution in space, and a change in the conditions for the transport of sediments that determine the course of the channel process.

Keywords: downstream of the reservoir, area of variable backwater, Kama reservoir, channel processes, bend, relief of the channel.

Водохранилища являются сравнительно молодыми и развивающимися системами, в отличие от рек, на которых они созданы. Их отличительной чертой является ускоренный режим протекания всех гидрологических процессов, которые стремятся прийти в состояние равновесия, что заключается в постоянном регулировании стока посредством контроля уровня режима. Последнее ис-

ключает полную стабилизацию нового водного объекта, степень которой различна на разных участках водохранилища. Эта разница особенно ярко проявляется при сравнении района переменного подпора и нижнего бьефа.

Район переменного подпора находится в верхней части водохранилища и выходит из подпора при его сработке. Протяженность его на Камском водохранилище составляет примерно 135 км (45% длины). В зависимости от колебания уровня происходит постоянное перемещение границы выклинивания подпора, что сказывается на гидравлике потока и режиме наносов. Формы проявления деформаций котловины здесь отличаются рядом особенностей, связанных с внутригодовым характером регулирования уровня режима.

Наиболее интересным для научных и практических исследований является верхний участок района выклинивания подпора протяженностью 72 км, от Боровской воложки до 46 км р.Вишера, соответствующий диапазону наполнения выше отметки минимального навигационного уровня водохранилища 106,0 м. Дополнительным анализом изменения положения кривой свободной поверхности воды при отметке НПУ 108,5 м и меженных уровнях на Вишере было обнаружено, что вследствие образования «тела заиления» на 16-42 км от устья верхней граница зоны выклинивания подпора поднялась на 4-5 км до 46 км при верхней границе водохранилища, находящейся на 26 км от устья.

Анализ материалов современных русловых съемок и спутниковых снимков показал, что существует тенденция ускорения размыва пойменных и побочневых протоков с образованием новых островов.

На спутниковом снимке 1985 г. пойменная протока Редикорской излучины, расположенная на 34-40 км р.Вишеры, почти не прослеживалась. Рост левобережных побочней перекатов, расположенных в верхнем и нижнем крыльях излучины, ограничивался ежегодным дноуглублением (рис. 1). Прекращение с 1994 г. дноуглубительных работ привело к быстрому росту верхнего левобережного побочня, отклонению динамической оси потока к верхней части пойменной протоки и ее интенсивному развитию. На представленном спутниковом снимке 2020 г. (рис. 1) побочень практически перекрывает старое русло, ширина протоки увеличилась до 100 м при меженной глубине до 4 м, а вынос из протоки продуктов размыва частично перекрыл судовой ход на Нижнередикорском перекате, уменьшив здесь ширину меженного русла от 130 до 40 м. С навигации 2018 г. развитие излучины полностью прекратилось. Более того, отмечается начало развития левобережной пойменной протоки с выносом продуктов размыва в район вершины излучины.

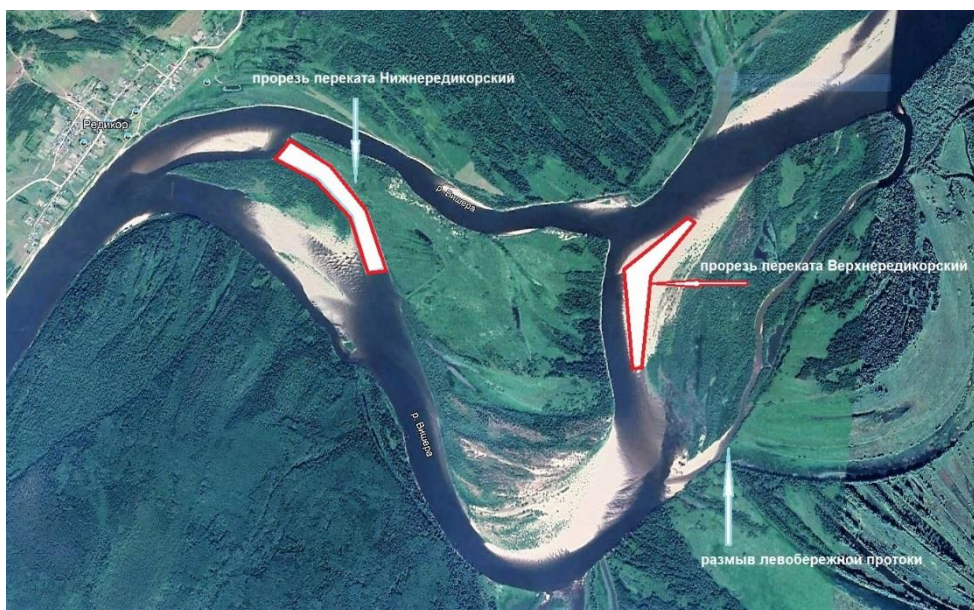


Рис. 1. Редиторская излучина 2020 г.

Совмещение лоцманских карт 2006 и 2023 г. на участке р.Вишера между 5 и 8 км (рис.2) показало, что на Верхнекондратьевском перекате после прекращения дноуглубительных работ и продолжения релаксации русла меженные глубины уменьшились от 1,3 до 0,7 м. В результате размыва правобережная побочная протока с образованием нового крупного острова.

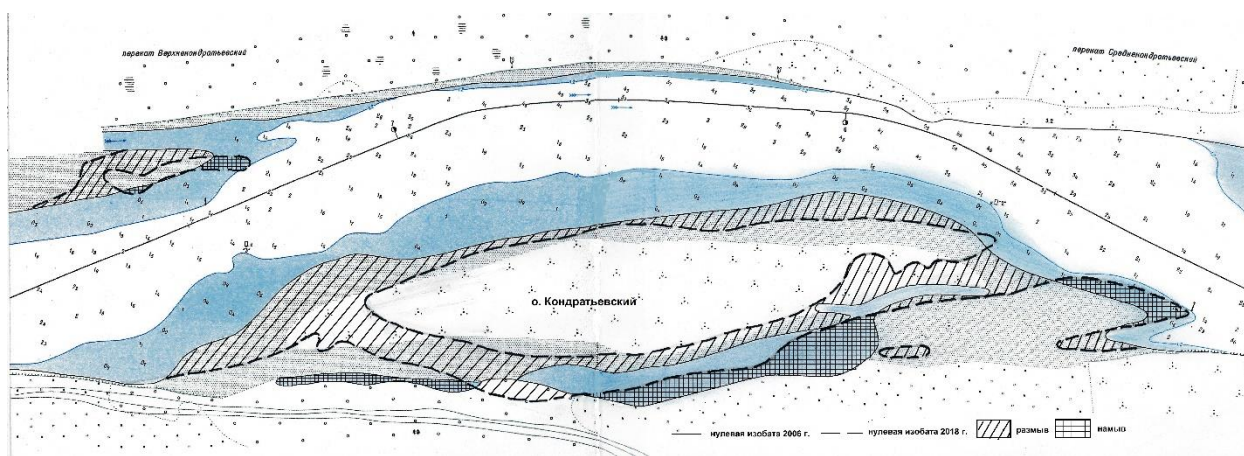


Рис. 2. Совмещенные планы Кондратьевских перекатов р. Вишера 2006 и 2018 гг.

Анализ спутникового снимка 2021 г. (рис. 3) показал, что выявленный в 2010 г. процесс незавершенного меандрирования русла на участке перекатов Керчевский и Верхнебарановский вследствие продолжения релаксации русла приближается к своему завершению. С навигации 2011 г. развитие излучины полностью прекратилось, продолжается развитие правобережной побочной протоки.

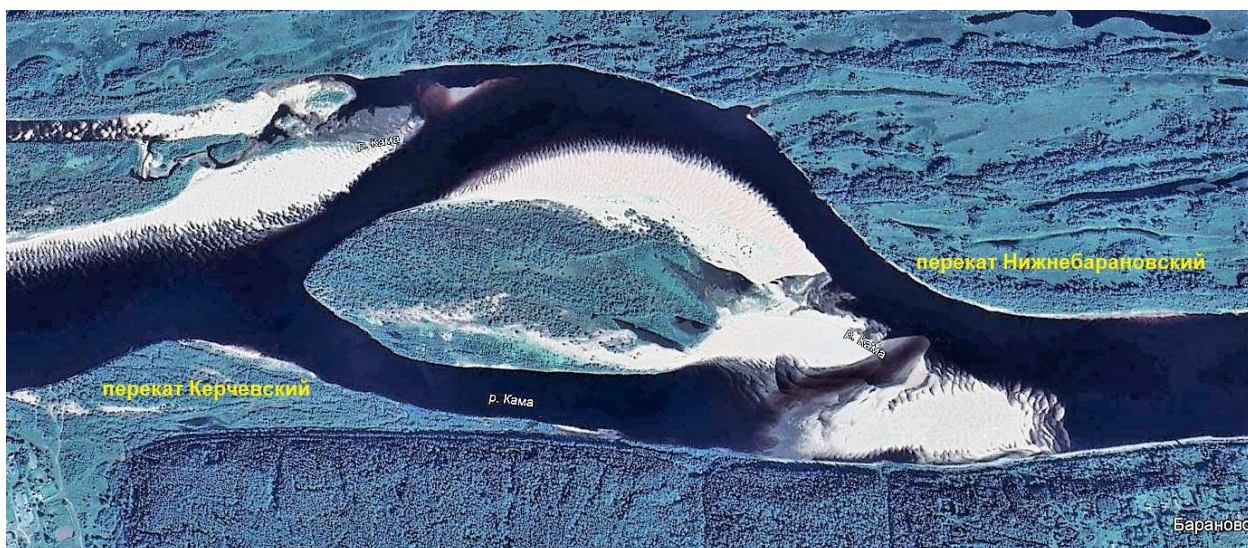


Рис. 3. Керчевский и Верхнебарановский перекаты р. Кама

Сопоставление материалов лоцманских карт издания 1954 и 2018 гг. на участке р. Кама от устья Вишеры до о. Тюлькинский (рис. 4) показывает практически весь спектр изменений руслового режима после создания Камского водохранилища.

После повышения с 1956 г. базиса эрозии (наполнение водохранилища до временной отметки НПУ 108,0 м) и прекращения с 1994 г. дноуглубительных работ для поддержания гарантированной для участка глубины судового хода 280 см произошли крупные переформирования русла р. Кама.

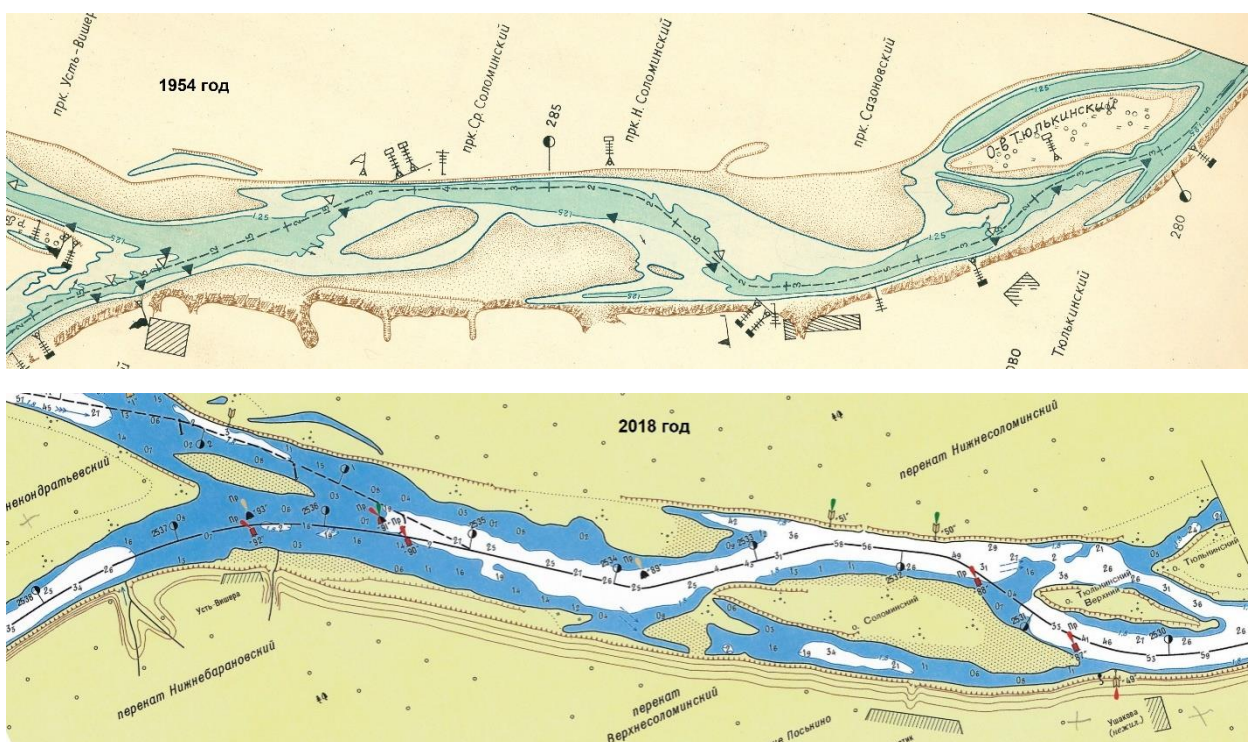


Рис. 4. Участок р. Кама от устья Вишеры до о. Тюлькинский

На устьевом участке Вишеры произошло закономерное врезание русла с отторжением левобережного побочня и причленением его оставшейся части к стрелке слияния рек. Часть продуктов размыва сформировала на Каме ниже устья Вишеры крупный левобережный побочень, который в совокупности с изменением направления течения Вишеры привел к размыву правобережной части русла за исключением нижней части правобережного побочня, закрепленной капитальными выправительными сооружениями.

Оставшаяся часть правобережного побочня начала соединяться с расположенным в средней части русла с крупным осередком и перекрыла судовой ход, который был вынужденно перенесен по правилу «восьмерки». В соответствии с повышением базиса эрозии русла укрупненный осередок продолжал увеличивать свои размеры и постепенно превратился в остров Соломинский.

При переносе судовой хода в районе острова Тюлькинский предпочтение было отдано более глубокому рукаву русла, расположенному вдоль ведущего правого берега. Однако новый поперечный судовой ход оказался неустойчивым и подверженным заносимости наносами, откладывающимися в устье растущего острова Соломинский.

Изменение после переноса судовой скоростного поля потока с направлением его по сохранившейся верхней глубоководной части левобережной протоки в среднюю часть острова Тюлькинский привело к размыву и разделению острова на 2 части. Вновь образовавшаяся протока начала активно развиваться после прекращения дноуглубления на Нижнесоломинском перекате и в навигацию 2020 г. в нее был перенесен судовой ход.

С 2020 г. частично восстановлены гарантированные габариты судовой хода до пристани Тюлькино. На вышерасположенном участке р.Камы судоходство возможно только в полноводный период Северного завоза. Правительством Пермского края неоднократно ставился вопрос о восстановлении регулярного судоходства на участке Тюлькино – Бондюг, но это требует больших объемов дополнительного финансирования на выполнение дноуглубительных и выправительных работ. В условиях продолжающегося дефицита финансирования путевых работ из федерального бюджета это пока нереально.

Участок нижнего бьефа Камского гидроузла находится в чрезвычайно сложных условиях. Он одновременно является и зоной выклинивания подпора Воткинского водохранилища в сопряженном каскаде гидроузлов. Работа последних в режимах сезонного недельного и суточного регулирования определяет резко неустановившийся режим всех процессов и явлений. При этом наиболее сильно эти процессы выражены в непосредственной близости от плотины ГЭС.

Все процессы и явления осложняются в зависимости от степени «опорожнения» бьефа в отдельные фазы водного режима (наполнение, сработка, нормальные условия) на Воткинском водохранилище, а также отсутствием области питания (водосбора) взвешенными и влекомыми наносами сверху, т.к. Камское водохранилище является гигантским отстойником, где аккумулируются все водные взвеси и в нижний бьеф поступает осветленный поток, усиливающий русловые деформации. Они еще более усложняются, если в нижнем бьефе (в приплю-

тинной части) ведется разработка месторождений песчано-гравийного материала (ПГМ). В работе рассмотрено влияние разработки ПГМ на русловые процессы на примере Гайвинского месторождения, разведанного в 1988 г. (в настоящее время не разрабатывается).

Гайвинское месторождение ПГМ расположено в русле р. Камы в 2 км ниже плотины Камской ГЭС в административной черте г. Перми. Оно известно с 30-годов и первоначально разведывалось и разрабатывалось КамГЭСстроем в районе ныне затопленного острова Гайва в устье р. Гайвы – правого притока р. Камы, вблизи верхней по течению границы современного участка работ. Подсчитанные и утвержденные запасы составили тогда 3195 тыс. м³. Добыча велась также и за контуром месторождения, в том числе и в пределах русла р. Камы на участке намечаемых работ.

Гайвинское песчано-гравийное месторождение, разведанное в 1988 г., не имеет сплошного контура подсчета запасов и представляет собой три разобщенных участка – два в верхней по течению части площади геологоразведочных работ и один, вытянутый более чем на 2 км вдоль правого берега, в низовой части участка.

Месторождение находится в сложных гидрологических условиях, так как расположено в зоне сопряжения двух водохранилищ – Камского и Воткинского. Специфичность условий заключается в том, что гидрологический режим нижнего бьефа Камской ГЭС (сам по себе сложный) осложнен режимом, присущим зоне выклинивания подпора от Воткинской ГЭС. Анализ материалов показал, что на исследуемом участке возникают колебания, обусловленные прохождением прямых и «обратных» волн попуска. Явление «обратной» волны возникает в случае прекращения поступления воды с Камской ГЭС. Через 6-8 часов после этого наступает положение, при котором уровни воды в районе выклинивания подпора будут ниже, чем у Воткинской ГЭС. Значения скоростей приближаются к нулю, а уклон зеркала становится отрицательным. Под действием отрицательного уклона возникает движение воды от Воткинской ГЭС к Камской. Полный волновой цикл включает шесть длиннопериодных волн: прямую положительную, обратную отрицательную, две прямых отрицательных и две обратных положительных. Скорость перемещения прямой волны составляет в среднем 8,6 м/с, а отраженной – 6,9 м/с. Здесь же отмечается и резкое изменение уклонов водной поверхности. Эти волны формируют своеобразный скоростной режим, особенностью которого являются обратные течения. При этом скорости придонных слоев могут быть выше поверхностных и при движении по нижнему бьефу они быстрее реагируют на изменение расходов, чем поверхностные.

Вследствие изменения режима транспорта воды и наносов происходит саморегулирование русловых процессов, что не приводит к выраженной трансформации русла. Переформирования рельефа дна носят локальный характер. Расчеты транспортирующей способности и критических скоростей перемещения наносов, выполненные для колебаний уровня от 87,0 до 89,0 м БС для весеннего и летне-осеннего сезонов, а также сравнение расчетных величин с измеренными – мутностью и скоростью течения показали, что транспорт наносов осуществляется на участке почти все время в условиях, неблагоприятных для аккумуляции.

Мутность изменяется по длине участка от 2-6 г/м³, затем к створу Н.Курья наблюдается резкое ее увеличение до 2-34 г/м³, причина – осветленный поток насыщается наносами за счет размыва дна.

Наличие русловых деформаций оценивалось по материалам русловых съемок участка карьеров, выполненных в период 1983-2018 гг. Анализ совмещенных планов русла и профилей показывает, что внутри этого периода направленные изменения дна отсутствовали. Отмечены локальные размывы и намывы, связанные с движением донных гряд. Преобладающие изменения отметок дна составили ±1-2 м. Для анализа динамики трансформации русла построены поперечные и продольные профили, анализ которых показал, что наиболее значительные русловые переформирования происходили в 1985 и 1987 гг. – аккумуляция, 1990 и 1992 гг. – размыв. Русловые переформирования происходят при расходе более 5000 м³/сек, при этом наибольшая зависимость смещения кривых от величины среднемесячного расхода воды наблюдалась в мае. В 1985 г. расход составил 6140 м³/сек, в 1987 – 5460 м³/сек, в 1990 – 7860 м³/сек и в 1992 – 6809 м³/сек. Сопоставление ежегодных кривых расходов со стандартной показало, что посадка уровня в нижнем бьефе Камской ГЭС с 1965 по 2018 г. составила 80 см, а снижение уровня в районе выемки составит 0,3-0,4 м. При полной выработке карьеров произойдет смещение течения к правому берегу, наиболее существенное при отметках ниже 89,0 м. Степень воздействия будет проявляться в изменении морфометрических параметров русла и как следствие посадке уровней; увеличении мутности потока и площади распространения взмученных масс воды; зон аккумуляции взвесей и др. Поэтому оценить степень и определить размеры зон влияния возможно только на основе фактически полученных данных. На основе полевых исследований установлено, что в весенний период транспортирующая способность в 6-7 раз больше, чем в летне-осенний. При повышении и понижении уровня транспортирующая способность уменьшается, что объясняется неоднозначностью влияния на ее величину глубины, фактической и несдвигающей скоростей. При отметках около 89,04 создаются наилучшие условия для переноса наносов, хотя фактические скорости течения не достигают максимума.

Степень воздействия добычи ПГС на режим реки характеризуется показателем C (как отношение годового объема выработки к годовому объему твердого стока). Во всех ситуациях, когда $C > 0,5$ – зона понижения уровня воды распространяется вверх на большое расстояние. Произведенные расчеты Гайвинского месторождения показали, что при среднегодовом расходе воды 2000 м³/с, величинах мутности 2; 6 и 24 мг/м³ и при условии выемки ежегодно 500 тыс.м³, степень воздействия составляет 10; 3,3 и 0,83 соответственно, то есть разработка карьера при проектируемом объеме выработок приведет к негативному воздействию на участок, непосредственно примыкающий к зоне сброса воды через плотину КамГЭС. Рациональное использование месторождения предполагает, что значение C должно быть менее 0,5.

Выводы

Релаксационные изменения русла на участке устье Вишеры – Тюлькино продолжают и при отсутствии дноуглубления в ближайшие годы можно ожидать соединения островов Соломинский и Верхний Тюлькинский, нежелательного развития левобережной воложки за островом Тюлькинский.

Разработка Гайвинского месторождения ПГС привела к изменению формы русла р. Камы, а, следовательно, к изменению его гидравлических характеристик, распределения их в пространстве и к изменению условий транспорта наносов, определяющих ход руслового процесса. В условиях рассматриваемого участка при уклонах свободной поверхности, близких к 0, и при постоянной шероховатости дна пропускная способность русла определяться только размерами живого сечения.

Результаты исследований говорят о необходимости продолжения научных и практических исследований для прогнозирования изменений русловых процессов и своевременного принятия решений в случаях необходимости стабилизации русла.

Библиографический список

1. *Калюжный В.К.* Особенности руслового режима зоны выклинивания подпора Камского водохранилища. Эрозионные и русловые процессы, выпуск 11. – М.: МГУ, 1998. С. 263-272.

2. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: Красанд/URSS, 2019. С. 71-94.

Е.И. Дебольская¹, И.И. Грицук^{1,2,3}, М.Е. Дошина⁴
e_debolskaya@yahoo.com

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭРОЗИОННОГО РАЗМЫВА РЕЧНЫХ БЕРЕГОВ

Работа посвящена исследованию русловых деформации рек криолитозоны. Приводятся новые результаты лабораторного моделирования. Особое внимание уделено размыву криволинейных участков русел. Для получения количественных оценок различий в размыве в зависимости от вида искривления русла введен и обоснован фактор формы.

Ключевые слова: лабораторные эксперименты, криолитозона, русловые деформации.

E. Debolskaya¹, I. Gritsuk^{1,2,3}, M. Doshina⁴ e_debolskaya@yahoo.com

¹ Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

²RUDN University, Moscow, Russia

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

⁴Moscow State University, Moscow, Russia

LABORATORY MODELING OF THERMOEROSION DEFORMATION OF RIVER BANK

The work is devoted to the study of river bed deformation in the permafrost zone and presents results of laboratory modeling. Particular attention is paid to the erosion of the curvilinear sections of the rivers. To obtain quantitative estimates of the differences in erosion depending on the type of river bed curvature we introduced and substantiated the shape factor.

Keywords: laboratory experiments, permafrost zone, channel deformations.

Введение

По многочисленным исследованиям Арктика за последние десятилетия нагревается значительно быстрее, чем планета в целом, что не может не отразиться на районах вечной мерзлоты, в частности, на ее гидрологической системе. Речные системы в условиях вечной мерзлоты особенно чувствительны к изменениям климата и имеют свои особенности: слабое грунтовое питание приводит к маловодью рек в зимнее время, вплоть до полного перемерзания и прекращения стока; преобладание боковой эрозии за счет того, что мерзлые грунты трудно поддаются размыву и препятствуют глубинной эрозии.

Деформационные процессы в руслах рек криолитозоны в условиях изменяющегося климата в значительной степени обусловлены термоэрозией.

Термоэрозия – процесс разрушения мерзлых грунтов и подземных льдов при тепловом и размывающем механическом воздействии постоянных и временных водотоков. Начальная стадия термоэрозии мерзлых горных пород обычно предопределяется вытаяиванием содержащихся в них ледяных жил. В геоморфологии речная термоэрозия представляет собой процесс сочетания термического и механического воздействий движущейся воды, что приводит к одновременному оттаиванию замороженного грунта и его переносу водным потоком. Особенности деформации речных берегов под воздействием термоэрозии до сих пор недостаточно исследованы.

Материалы и методы исследования

Цель лабораторных экспериментов, проведенных в гидравлическом лотке, заключалась в получении новых данных для количественной оценки деформаций, вызванных термоэрозией, способом отсыпки песка в деформируемую область. На предыдущих этапах исследований [1;2] использовался способ визуализации размываемой области по данным видео и фотосъемки, что давало не слишком точные результаты.

При постановке задачи подразумевалось, что процесс термоэрозии, обусловленный таянием, протекает в основном при положительных температурах окружающей среды, например при прохождении волны весеннего половодья. Особое внимание, как и на предыдущих стадиях исследований, было уделено установлению различий в динамике размыва участков русла с различными видами искривлений.

Ледяные пластины, полученные при температуре -18°C , размером $0,26 \times 0,165 \times 0,03\text{ м}$, закладывались в центральную часть прямолинейного, выпуклого и вогнутого берегового склона.

На прямолинейном участке ширина поперечного сечения по дну и по урезу были $B_{\text{д}}=0,16\text{ м}$ и $B_{\text{у}}=0,39\text{ м}$ соответственно. В случае расширяющегося русла ширина по урезу $B_{\text{у}}=0,45\text{ м}$, при сужающемся русле $B_{\text{у}}=0,25\text{ м}$. Длина искривленного участка в обоих случаях $0,47\text{ м}$. Глубина потока во всех экспериментах была $0,11\text{ м}$. Расход воды подбирался таким образом, чтобы средняя поверхностная скорость потоков во всех экспериментах была примерно одинаковой и равной $0,14\text{ м/с}$. Температура воды 14°C повышалась на 1°C с каждым последующим экспериментом. Температура воздуха $21-22^{\circ}\text{C}$.

Размыв оценивался путем заполнения образовавшихся в результате деформации областей сухим песком до восстановления первоначального вида берега и пересчета массы затраченного песка в объем с учетом разницы в плотностях сухого и уплотненного мокрого песка. Измерялись также размеры и массы остатков ледяных пластин после окончания экспериментов.

Для сравнения количественных характеристик деформаций при различных формах русла на предыдущих этапах [1] был использован фактор формы русла

$k_f = \frac{l S_0}{a S}$. Здесь l – длина береговой линии на рассматриваемом участке, a – кратчайшее расстояние между двумя ограничивающими его створами, S_0 – реальная плановая площадь водного потока, S – общая площадь всего рассматриваемого участка, т.е. $S=ab$, b – ширина русла без учета расширения или сужения, т. е. измеренная в створах, ограничивающих участок. Недостаток такой формы записи коэффициента формы заключается в ограниченности его применения для узких русел и возникновении неоднозначности при увеличении ширины русла. Увеличение ширины русла на прямолинейном участке не должно приводить к изменениям в процессе деформаций, но соотношение площадей при этом, а следовательно и коэффициент изменяются.

Чтобы этого избежать, предложена новая формула для фактора формы русла $k_f = \frac{L(d-d_0)}{a^2}$, d_0 – ширина водного потока по урезу на прямолинейном участке, d – ширина водного потока по урезу в точке экстремума на изгибе.

На рисунке 1 приведены фото заложения ледяной пластины в береговой склон для трех случаев искривления русла: на прямом участке и на участках с сужением и расширением. На рисунке 2 приведены фото остатков ледяных пластин для этих трех случаев через 1 час воздействия водного потока.

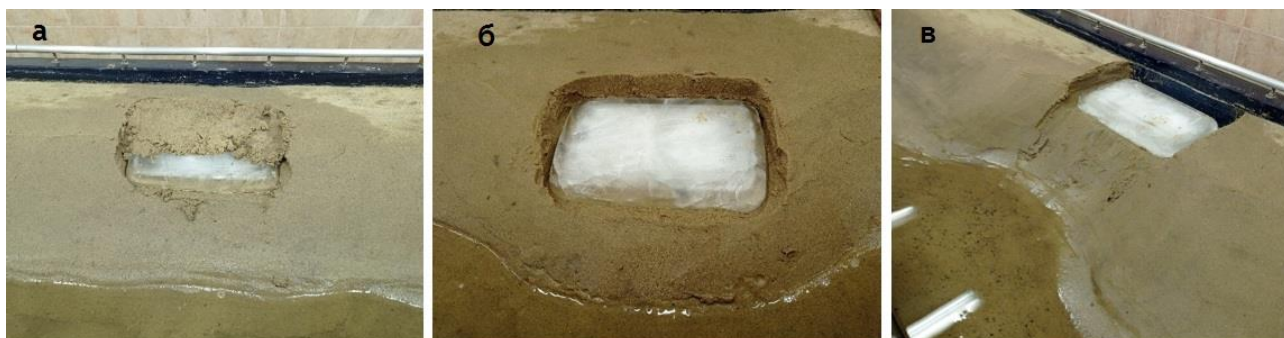


Рис. 1. Ледяные пластины в береговых склонах в случаях:
а – прямого русла, б – русла с сужением, в – русла с расширением

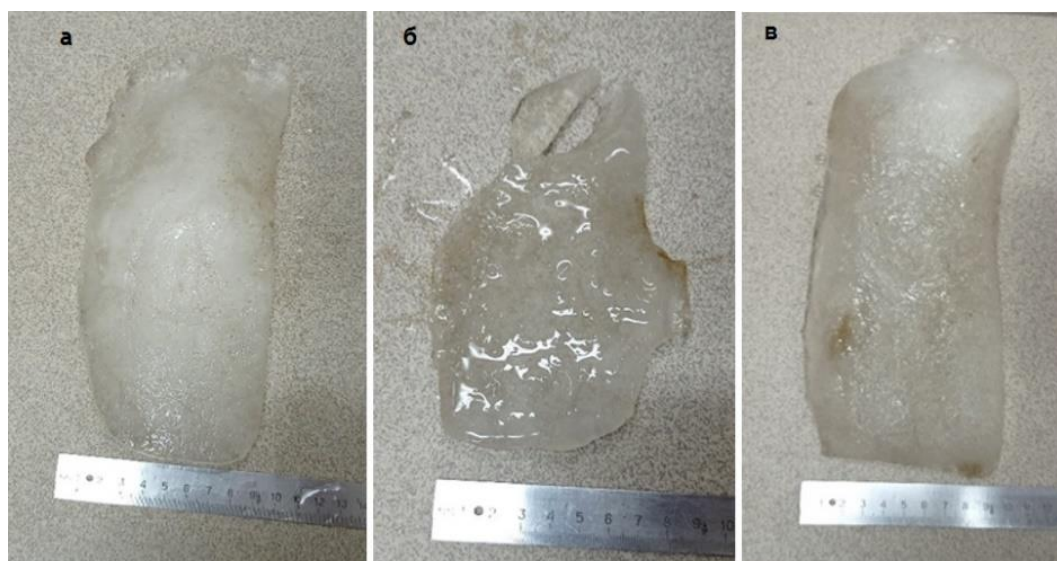


Рис.2. Остатки ледяных пластин через 1 час воздействия водного потока в случаях:

а – прямого русла, б – русла с сужением, в – русла с расширением

На рисунке 3 представлены фото береговых склонов для трех случаев заложения ледяных пластин через 1 час воздействия водного потока.



Рис.3. Вид береговых склонов с ледяными пластинами через 1 час воздействия водного потока в случаях: а – прямого русла, б – русла с сужением, в – русла с расширением

В прямолинейном русле через 5 минут под ледяной пластиной начала образовываться ниша вытаивания. Через 10 минут льдина опустилась на место ниши вытаивания. В сужающемся русле деформации начались почти сразу после запуска воды, что может быть вызвано не только влиянием пластины, но и формированием естественного угла откоса. Через 10 минут началось оседание песка, образование террас, через 20 минут более интенсивное обрушение берега в месте расположения нижнего по течению края льдины, через 40 минут произошло почти полное обрушение террас. В расширяющемся русле ниша вытаивания образовалась через 12 минут. Характер разрушения для прямолинейного и расширяющегося русла имели схожую форму, но песка вымыло больше в расширяющемся русле.

Анализ результатов

Использование фактора формы позволяет количественно продемонстрировать влияние степени искривления и формы русла на процессы деформации берегового склона и таяния ледяных включений. Кроме того, полученные данные были использованы для верификации математической модели [2]. По результатам измерений и численных расчетов по модели построены зависимости масс унесенного песка от фактора формы русла k_f , (рис.4а) и изменения ширины ледяной пластины через 1 час воздействия водного потока (рис. 4б). Коэффициент $k_f=0$ очевидно соответствует прямому руслу.

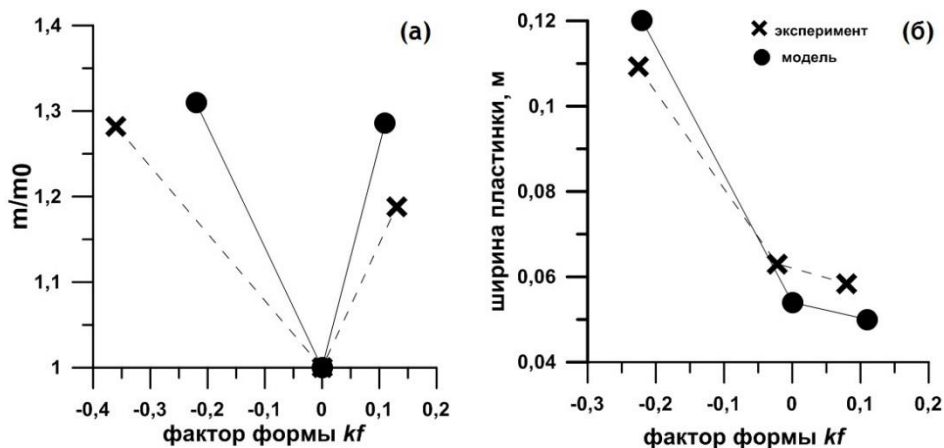


Рис. 4. зависимости отношения массы унесенного песка к массе песка, унесенного с прямолинейного участка (а), изменения ширины ледяной пластинки (б) от фактора формы русла

Как из графиков (рис. 4), так и из эксперимента видно, что искривление русла способствует усилению деформаций. Процесс таяния ледяного включения также подвержен различному воздействию водного потока в зависимости от формы русла. Переход формы в положительные значения, т.е. от прямого русла к вогнутому, замедляет таяние, отрицательные значения коэффициента формы, соответствующие участкам с сужением, усиливают таяние.

Выводы

Способ засыпки песка в деформируемую область берегового склона позволяет с достаточной точностью оценивать массу унесенного материала и проводить количественный анализ. С помощью предложенного интегрального параметра формы русла можно установить непрерывные зависимости деформаций от характера и степени искривления русла и количественно сопоставлять результаты численных и лабораторных экспериментов.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Библиографический список

1. Дебольская Е.И. Деформации криволинейных русел, подверженных термоэрозии // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: сб. тр. VII Всерос. научно-практической конференции с межд. участием. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь 2019. Т.1. С. 76–81.
2. Дебольская Е.И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 5. С. 496–506.

С.Г. Добровольский, И.П. Лебедева sgdo@bk.ru
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТУСА РЕК, РЕГУЛИРУЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ

На основе предложенной авторами классификации рек по их генетическому типу изучена информация по 2942 створам на всех обитаемых континентах. Предложен метод идентификации водосборов, на сток которых в замыкающих створах оказывают существенное влияние водохранилища. Выделены 806 такого рода створов и замыкаемых ими водосборов. Анализ соответствующих изменений стока продемонстрировал адекватность методики и значительное отличие параметров изменений стока идентифицированных створов в отличие от створов рек основного типа – неозерных и не зарегулированных.

Ключевые слова: водохранилище, идентификация рек, речные водосборы

S. Dobrovolski, I. Lebedeva, sgdo@bk.ru
Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

PROBLEMS IN IDENTIFYING THE STATUS OF RIVERS REGULATED BY RESERVOIRS

Based on the classification of rivers, by their genetic type, proposed by the authors, information on 2942 river gauges on all inhabited continents was studied. A method is proposed for identifying watersheds, the flow within which, at the closing river gauges, is significantly influenced by the reservoirs. 806 river gauges of this kind were identified. The analysis of corresponding changes in the runoff demonstrated the adequacy of the method and significant difference in the parameters of changes in the runoff at identified gauges, in contrast to the main type of gauges and rivers – non-lake and non-regulated.

Keywords: reservoir, identification of rivers, river gauges

Введение

Обычно исследования водохранилищ и изменений речного стока ведутся раздельно друг от друга, либо осуществляются, в основном, в региональном плане [1-3; 5]. Проведение совместного анализа системы «водохранилище–река» в глобальном масштабе может выявить закономерности, которые на региональном уровне малозаметны. В исследовании соавторов [3-4; 6] при анализе стока рек в 2942 створах (рис. 1) на всех обитаемых материках было обращено внимание на то, что для части рек сток (в наиболее длинных реализациях) характеризуется отличающимися, от средних, следующими свойствами: 1) повышенной инерционностью межгодовых колебаний; 2) в ряде случаев – повышенной степенью монотонной нестационарности многолетних изменений стока; 3) Явлением так называемой «перемежающейся нестационарности» – чередования сегментов со стационарным поведением и сегментов со статистически значимыми изменениями в положительную и отрицательную сторону.

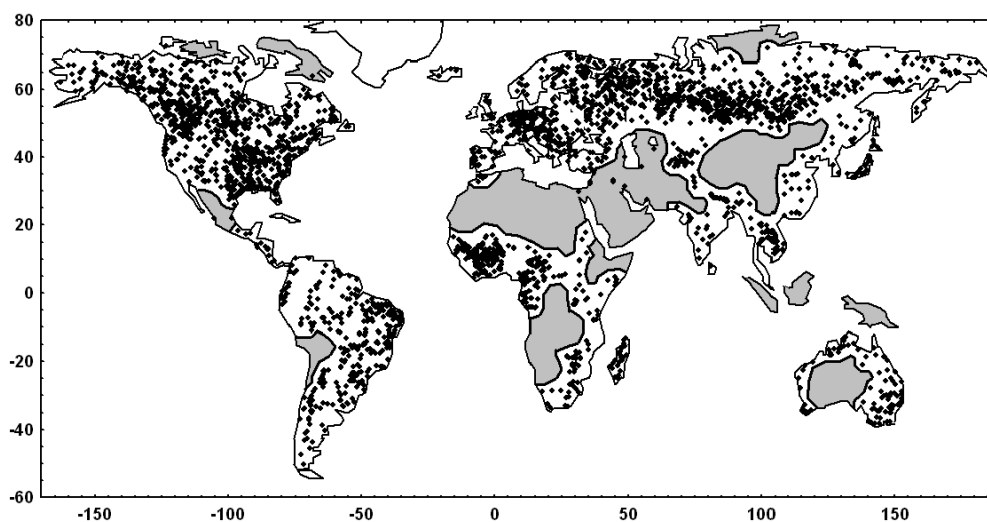


Рис. 1. Расположение всех створов, информация о стоке в которых использована в работе. Серым цветом обозначены территории, в пределах которых створы с длинными рядами наблюдений за стоком практически отсутствуют

Авторами высказана гипотеза о том, что указанные «аномалии» в межгодовых и многолетних изменениях стока связаны с регулирующей ролью водохранилищ, имеющих в пределах изучаемых водосборных бассейнов рек. Для проверки этой гипотезы необходима была идентификация речных водосборов по генетическим типам речного стока, одним из важнейших вариантов которых являются водосборы, в пределах которых речной сток регулируется водохранилищами.

Материалы и методы исследования

Вместе с тем, указанная идентификация представляла собой сложную методологическую и научную проблему, так как необходимо было изучить тысячи речных водосборов, детальная информация по хозяйственной деятельности в которых – в существующих базах данных и литературе – недостаточна или отсутствует.

В связи с этим авторами была разработана – в значительной степени находящаяся на экспертном уровне, но доказавшая свою эффективность – методика классификации речных водосборов и замыкающих их створов и идентификации створов в зависимости от генетических типов стока, в том числе типа рек, регулируемых водохранилищами. В основных чертах методика заключается в следующем.

- Были выделены следующие основные генетические типы рек и их участков (рис. 2): 1 – Створы, замыкаемые ими водосборы и соответствующие реки – неозерные, со снеговым или дождевым питанием, вблизи которых (выше по течению) отсутствуют крупные водохранилища. 2 – Створы озерных рек – расположенные вблизи питающего их озера. 3 – Реки и соответствующие створы, сток в которых формируется горными ледниками. 4 – Створы рек вблизи (ниже по течению) крупных водохранилищ.

- Наряду с перечисленными выше четырьмя основными типами створов целесообразно было выделить и два «переходных» типа – между соответственно

типами 1 и 4 (тип 5) и 1 и 2 (тип 6) – в тех случаях, когда створы находятся на некотором удалении от соответственно озер или водохранилищ и когда степень их озерности или зарегулированности априори неясна.

- На основе сформированной авторами базы данных по стоку – описанной в работах [3-5] – при помощи электронного атласа мира [6] нанесены точки створов. При этом координаты створов уточнялись: во многих случаях исправлялись ошибки баз данных по стоку, связанные с неверной идентификацией населенных пунктов, в пределах которых расположены створы, вблизи слияний рек – с неверным отнесением створа к одной из рек и т.п.

- На основе карт [6] при помощи прикладных графических программ проводились границы водосборных бассейнов, замыкаемых используемыми в работе створами.

- В пределах очерченных таким образом водосборов по карте выявлялись существующие водохранилища. Информация по водохранилищам уточнялась при помощи спутниковых снимков и (при наличии) литературных источников, а также при помощи базы данных [7].

- В зависимости от доли стока, формируемого в основном русле реки, зарегулированной водохранилищем, от суммарного стока, образованного в том числе притоками между створом и водохранилищем, створы подразделялись на основной (4) и переходный (5).

- Осуществлялся анализ изменений стока, в выделенных створах, по предложенной авторами методике [3; 5] с целью определения эффективности принятой схемы идентификации водосборных бассейнов и створов.



Рис.2. Схема выделения типов речных бассейнов

Анализ результатов

На рисунке 3 показана оказавшаяся второй по многочисленности (после створов первого типа) группа створов на реках, режим межгодовых и многолетних колебаний которых предположительно может быть существенно изменен крупными водохранилищами (4 и 5 тип). Так же, как и створы на реках основного (первого) типа, створы типов 4 – 5, в отличие от створов типов 2 и 3, рассеяны по всем материкам и не образуют четких изолированных ареалов. На карте очевидна очень высокая концентрация створов этого типа на основной территории США – в особенности в ее восточной части. В одних только США сосредоточены

более четверти створов всего мира (из исследованных нами), принадлежащих к этому типу. Велико количество водохранилищ, которые могут оказывать влияние на режим стока, и в юго-восточной части Канады, а также в Западной Европе.

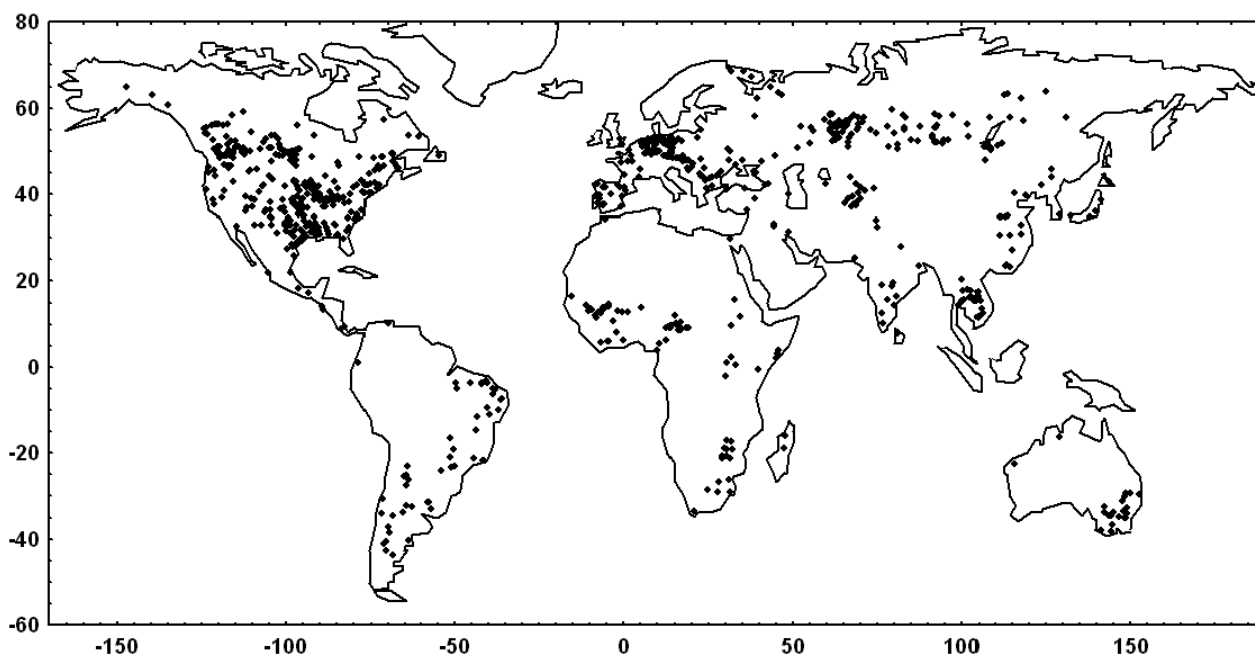


Рис.3. Расположение створов рек, на режим которых предположительно оказывают заметное влияние крупные водохранилища (типы 4 и 5)

Обращаем внимание на то, что на рисунках 1, 3 нанесены только те, использованные в настоящей работе створы, информация по которым (в том числе географические координаты) находится в международном обмене. Перечень створов с указанием их названий, а также названий рек, стран и географических координат приведены в приложении 1 к работе [4].

Для проверки эффективности предложенной процедуры идентификации створов и водосборных бассейнов, режим стока в пределах которых находится под существенным воздействием крупных водохранилищ, осуществлялся анализ закономерностей сезонной и многолетней изменчивости стока в створах типов 1, 4 – и в переходных между этими типами (тип 5) створах. Рассчитывались следующие параметры: индексы стационарности по матожиданию, автокоррелированности и дисперсиям (введенные авторами в работе [3]), сами величины коэффициентов автокоррелированности со сдвигом 1 и более лет, порядки стохастических (авторегрессионных) моделей многолетних изменений стока, интегральный временной масштаб многолетних колебаний стока и ряд других параметров. Показано, что в целом методика идентификации створов и водосборов как основного, так и переходного типа, сток в которых в значительной степени регулируется водохранилищами, эффективна. А именно: значения указанных параметров межгодовых и многолетних изменений стока в створах промежуточного (пятого) типа, как правило, имели среднее значение между параметрами в створах первого и четвертого типов.

Выводы

Предложена методика идентификации речных водосборов в зависимости от степени воздействия на режим стока крупных водохранилищ. Применен комплексный – основанный как на экспертных, так и на апостериорных количественных оценках – подход. Примененная методика позволила идентифицировать большое количество (порядка трех тысяч) водосборов, для большинства которых соответствующая информация в литературных источниках и в базах данных недостаточна или отсутствует. Расчеты параметров изменений стока в идентифицированных водосборах и створах показывают, что выделение как основного, так и переходного типов водосборов, сток в которых зарегулирован водохранилищами, эффективно.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН

Библиографический список

1. Авакян А.Б., Лебедева И.П. Водоохранилища XX века как глобальное географическое явление // Изв. РАН. Сер. географическая. 2002. № 3. С. 13–20.
2. Авакян А.Б., Шаранов В.А., Салтанкин В.П. и др. Водоохранилища мира. М.: Наука, 1979. 287 с.
3. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 660 с.
4. Добровольский С.Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: Геос, 2017. 526 с.
5. Добровольский С.Г. Межгодовые и многолетние изменения стока рек мира // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 643–660.
6. Добровольский С.Г., Лебедева И.П., Истомина М.Н., Соломонова И.В. Водоохранилища мира: анализ количественных параметров и воздействия на структуру многолетних изменений стока регулируемых рек // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 1–13.
7. Encarta World Atlas. Redmond, Wash.: Microsoft, 2009. DVD.
8. Global Reservoir and Dam (GRanD) database, 2018. (Bernhard Lehner, Catherine Reidy Liermann, Carmen Reveng and others). Version 1.1. 2011.www.GRanD_dams_v1_1.

М.С. Дрегваль, msdregval@mail.ru
Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ПЕЧОРА

Климатические изменения, связанные с повышением температуры воздуха, наиболее заметны в Арктической зоне Российской Федерации. Повышение температуры воздуха в начале водохозяйственного года способствует увеличению пропускной способности речных русел для судоходства. Неблагоприятные проявления ледового режима нередко приводят к опасным гидрологическим явлениям. Это не только паводки в период гололеда или затора, но и длительные осенние и весенние переходные периоды, когда не представляется возможным организовать ледовые или паромные переправы и другие виды хозяйственной деятельности, функционирование которых зависит от гидрологической обстановки. В данной работе рассматривается изменение дат вскрытия рек от ледовых явлений, дат появления ледовых явлений и полное установление ледостава, а также влияние строительства Печорской ГРЭС на продолжительность периода открытого русла.

Ключевые слова: водохранилище, гидрология, судоходство, климат.

M. Dregval, msdregval@mail.ru
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

CHANGES IN THE DURATION OF ICE PHENOMENA UNDER THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC AND CLIMATIC FACTORS IN THE PECHORA RIVER BASIN

Climatic changes associated with an increase in air temperature are most noticeable in the Arctic zone of the Russian Federation. An increase in air temperature at the beginning of the water management year contributes to an increase in the capacity of river channels for navigation. Unfavorable manifestations of the ice regime often lead to dangerous hydrological phenomena. These are not only floods during the period of ice or traffic jams, but also long autumn and spring transitional periods, when it is not possible to organize ice or ferry crossings and other types of economic activities, the functioning of which depends on the hydrological situation. This paper considers the change in the dates of opening of rivers from ice phenomena, the dates of the appearance of ice phenomena and the complete establishment of freeze-up, as well as the impact of the construction of the Pechorskaya GRES on the duration of the period of the open channel.

Keywords: reservoir, hydrology, navigation, climate.

Введение

Река Печора является судоходной рекой России. Она связывает районы с федеральной транспортной инфраструктурой и по ней перевозится большая часть товаров для жизнедеятельности местного населения. Продолжительность ледовых явлений на реках – одна из важнейших характеристик, определяющих

возможности социально-экономического обеспечения и развития исследуемого района. Основная цель исследования заключается в оценке влияния климатических и антропогенных факторов на продолжительность ледовых явлений.

Материалы и методы исследования

Для качественного исследования собиралась информация по гидрологическим и метеорологическим данным. В качестве исходных гидрологических данных использовались ежедневные уровни воды с ледовыми явлениями с 2008 г. по настоящее время – ресурс АИСГМВО [<https://gmvo.skniivh.ru>]. Метеоданные брались с сайта meteo.ru. В бассейне р.Печоры использовалась информация по 9 гидрологическим постам и метеорологическим постам равномерно распределенным по территории рассматриваемого речного бассейна.

По всем метеорологическим рядам наблюдений выявлены значимые тренды на повышение температуры воздуха в весенне-летний период, при этом наибольшие приращения наблюдаются в месяце соответствующем началу освобождения русла от льда – в месяце май [1;2].

Анализ гидрологических данных наблюдений начинался с выявления дат вскрытия реки ото льда, дат появления ледовых явлений и дат полного установления ледостава.

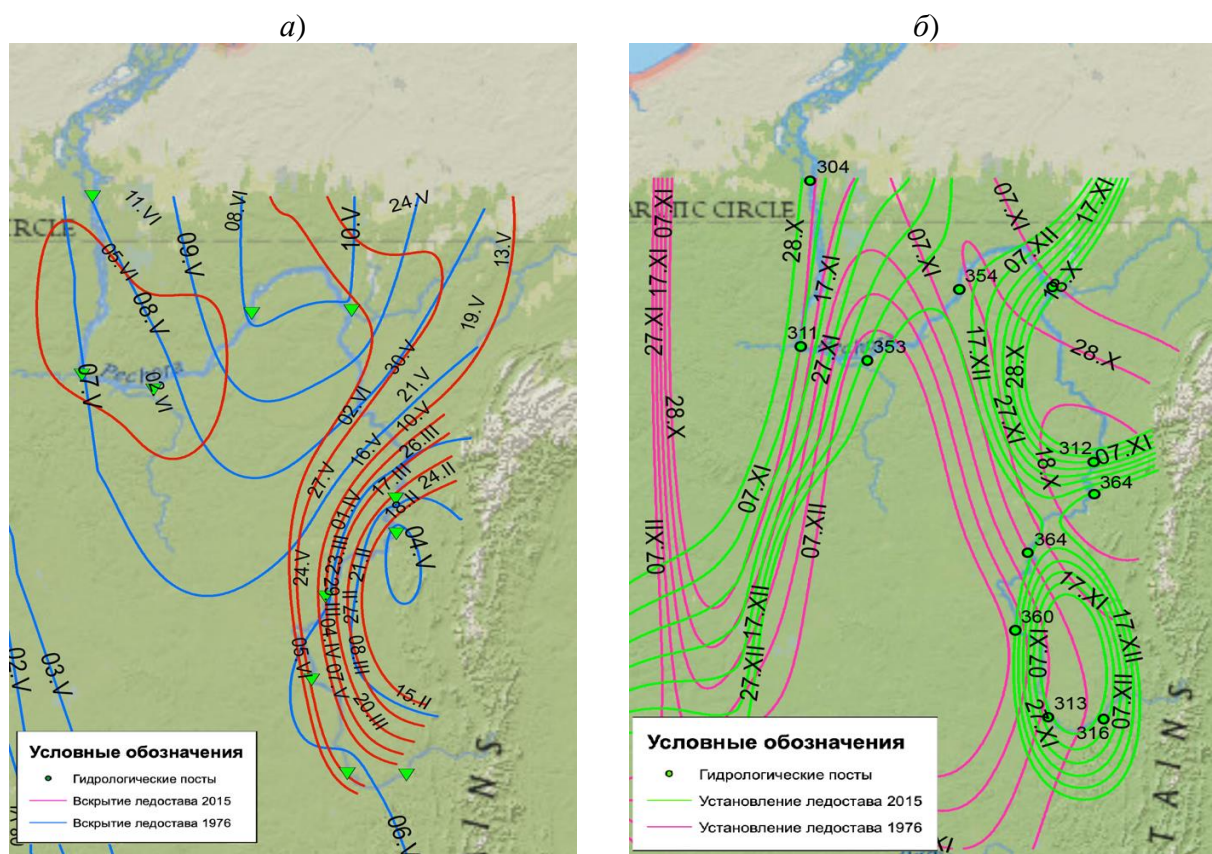
Результаты исследования

При помощи программного комплекса ArcGis была создана карта расположения гидрологических постов, которые характеризовались датами ледовых явлений. Построенные изохроны позволяют проследить, каким образом происходит процесс очищения реки ото льда от истока к устью. Анализировались даты ледовых явлений за 1976 г. (год до начала значимых климатических изменений) и за 2015 г. (современный период).

Анализ продолжительности свободного русла показал, что бассейн р.Печоры претерпел большие изменения под влиянием как климатических факторов, так антропогенных – строительство Печорской ГРЭС, находящейся в трех километрах от г. Печора и являющейся крупнейшим производителем электроэнергии в Республике Коми. На долю Печорской ГРЭС в субъекте Федерации приходится около 40 % вырабатываемой электроэнергии.

Строительство ГРЭС началось в январе 1974 г. С февраля 1979 г. по июнь 1991 г. в эксплуатацию введено пять энергоблоков. Станция обеспечивает электроэнергией промышленные предприятия и объекты социальной инфраструктуры, функционирующие в экстремальных климатических условиях. Крупнейшими потребителями вырабатываемой Печорской ГРЭС электроэнергии являются предприятия нефтегазового, угольного, лесопромышленного комплексов, транспорта.

Исходя из доступной информации по времени строительства Печорской ГРЭС, можно объяснить изменения дат ледовых явлений, наблюдаемые на картах для ретроспективных и современных условий (рисунок). Продолжительность свободного русла увеличилась в среднем на 18 дней по сравнению с 1970-ми годами.



Даты вскрытия (а) и установления (б) ледостава в бассейне реки Печора

Вывод

В ходе рассмотрения изменения дат вскрытия рек от ледовых явлений, дат появления ледовых явлений и полного установления ледостава, а также влияния строительства Печорской ГРЭС на продолжительность периода открытого русла, выявлено, что бассейн р.Печора претерпел большие изменения под влиянием климатических и антропогенных факторов. Продолжительность свободного русла увеличилась почти на три недели, что, в первую очередь, влияет и на навигационный период, как на важную характеристику деятельности транспортной и судоходной отрасли экономики рассматриваемого региона.

Библиографический список

1. *Винокуров И.О.* Оценка изменений годового стока реки Печора в условиях меняющегося климата // Молодой ученый. 2016. № 29 (133). С. 219-221.
2. *Шестакова А.Е., Винокуров И.О.* Опыт создания атласа временных характеристик ледовых явлений // Природное и культурное наследие: междисциплинарные исследования, сохранение и развитие: коллективная монография по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2019. С. 484-486. EDN FHRQXU.

И.А. Жуков, Д.Н. Айбулатов

Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова, г. Москва

ВОДНЫЙ РЕЖИМ МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНОВ ВОЛГИ И УРАЛА

В настоящее время изменения гидрологического режима рек оказывают существенное влияние на экономику страны. Однако, гидрологический режим разных по размеру рек, обладает разной степенью изученности. Лучше всего изучен речной сток средних и больших рек, в то время как речной сток малых рек не исследован. В работе представлены результаты анализа изменения речного стока малых рек бассейна Волги и Урала.

Ключевые слова: малые реки, водный режим, гидрология.

I.A. Zhukov, D.N. Aybulatov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

WATER REGIME OF SMALL RIVERS IN THE VOLGA AND URAL BASINS

Currently, changes in the hydrological regime of rivers have a significant impact on the economy. However, the hydrological regime of rivers of different sizes has a different degree of knowledge. The river flow of medium and large rivers is best studied, while the river flow of small rivers is not well studied. The paper presents the results of studying the changes in the river runoff of small rivers in the Volga and Ural basins.

Keywords: small rivers, water regime, hydrology.

Введение

С 70-х гг. XX в. Европейская территория России характеризуется весьма значимым изменением климатических характеристик, которые влияют на водность рек, преобладающие типы их питания, распределение стока внутри года, а также обуславливают формирование опасных гидрологических явлений [2].

Одной из важнейших научно-практических задач является обеспечение устойчивости к этим изменениям, т. к. изменение речного стока заметно сказывается на качестве и количестве водных ресурсов, температуре воды и состоянии связанных с водой экосистем, ведет к увеличению масштабов и частоты проявлений экстремальных природных явлений – наводнений и засух. Воздействие гидрологических изменений все больше сказывается на многих секторах экономики, в т. ч. числе на сельском хозяйстве, энергетике, рыбном промысле, туризме и т. д.

Актуальность данной работы связана со слабой изученностью водного режима и внутригодового распределения стока воды малых рек – самых распространённых рек на территории России. Также она обуславливается увеличением числа опасных гидрологических процессов и явлений, которые приводят к большим потерям в экономическом и социальном секторе.

Материалы и методы исследования

Для целей настоящего исследования из действующих гидрологических постов на малых реках исследуемой территории выбирались гидрологические посты и оцифровались данные об ежедневных расходах воды на них для дальнейшего анализа речного стока и его генетических составляющих. В ходе исследования удалось добиться равномерного распределения оцифрованных водных постов на всей исследуемой территории. Задействованные в исследовании гидрологические посты имеют максимально длинные ряды наблюдений в своих районах [3].

Для анализа водного режима рек и их источников питания проведено расчленение гидрографа на генетические составляющие. Расчленение гидрографа позволяет определить суммарную величину подземного, паводочного и половодного стока. Типовой гидрограф представляет собой линию, описывающую пик половодья, кривые его спада и подъёма, летнюю и зимнюю межень и площадь под этой линией, которая обозначает объём подземного и поверхностного стока [4].

При расчленении гидрографа нередко учитывают гидрогеологические условия территории. В тех случаях, когда река питается из водоносных горизонтов, гидравлически не связанных с рекой, питание ее происходит наиболее интенсивно в период весенних половодий. Режим стока подземных вод, гидравлически связанных с рекой, характеризуется минимумом грунтового питания в момент максимума поверхностного стока.

Основной программный комплекс исследования – программа GrWat 3.0.M. В основу работы программы заложен алгоритм, который, учитывая особенности каждой конкретной реки, отделяет на гидрографе подземную составляющую, весеннее половодье и дождевые и оттепельные паводки (в разные сезоны) [5]. Программа GrWat при параметрах, заданных за период в 70 лет, качественно отделяет грунтовую составляющую, даже несмотря на изменения водного режима, произошедшие на рубеже 70-х и 80-х годов XX-го столетия. Данная методика расчленения гидрографов позволяет рассчитывать практически все характеристики водного режима, в том числе даты наступления и окончания половодья, его объёмы и соответственно, расходы, а также характеристики летне-осенних паводков. В программе GrWat 3.0.M можно не только разделять гидрографы по типам питания, но и отслеживать изменения разных гидрологических параметров во времени и исследовать долгопериодные изменения.

Анализ результатов

В результате обработки непрерывных рядов расходов воды с совмещёнными метеорологическими данными (температура воздуха и осадки) получены многолетняя динамика изменений гидрологических характеристик речного стока для 73 постов бассейна Волги и 18 постов бассейна Урала.

Суммарно получена информация по 49 характеристикам речного стока. Подробно проанализировано распределение по исследуемой территории всех полученных гидрологических характеристик. Для каждой из них построены карты и проведён анализ пространственного распределения изменений данной характеристики.

По имеющимся данным о слоях стока и модулях стока воды и его генетических составляющих для средних и больших рек на исследуемой территории [1], можно сравнить их с изменениями, которые произошли со стоком воды малых рек. В ходе проведения исследований подтверждена схожесть динамик изменений стока воды средних, больших и малых рек бассейнов рр. Волги и Урала.

В результате выполненного анализа проанализировано распределение гидрологических характеристик в бассейнах малых рек исследуемой территории. Для укрупнения районов анализа исследование распределения всех гидрологических характеристик выполнено в рамках бассейнов больших рек.

После завершения анализа и выявления закономерностей в динамике стока воды малых рек исследуемой территории и его генетических составляющих, появилась возможность отследить динамику наступления изменений в стоке воды исследуемых рек. Для этого применён метод разностно-интегральных кривых.

Разностно-интегральные кривые построены для ряда среднегодовых расходов воды на исследуемых постах. Кроме этого, для изучения однородности времени наступления точек перегиба для каждой фазы водного режима, построены и проанализированы разностно-интегральные кривые для минимального расхода зимней и летне-осенней межени, максимального расхода половодья и максимального расхода паводков. В результате исследования установлено, что для малых рек исследуемой территории характерно увеличение стока воды во время прохождения зимней и летне-осенней межени. Так же выявлена закономерность – при движении с севера на юг фиксируется смена увеличения паводочного и половодного стока, на их уменьшение.

В основном, на исследуемой территории гидрологические изменения произошли в 70-е гг. XX века [2]. Для южной части Камского бассейна установлено наступление перелома в 80-е гг. прошлого века. В южной части Камского водохранилища установлена зона, где изменения произошли после 1990 г., это же время для верхнего и среднего течения Цны и отдельных рек Окского бассейна. На правых притоках северной части Камского водохранилища изменения произошли в 60-е гг. Это же время они произошли и в районе Куйбышевского водохранилища, и для отдельных рек окского бассейна, а также для бассейна реки Шексны. На территории Верхней Волги изменения наступили в 50-е годы.

В результате исследования установлено, что для лет наступления изменений в речном стоке исследуемой территории есть две зависимости: при движении с севера на юг по Волге и Каме изменения наступают всё раньше и при движении с востока на запад сроки наступления перелома становятся более ранними.

Для динамики стока выявлены закономерности: с севера на юг и в районе расположения крупных водохранилищ наблюдается сокращение речного стока.

Изменения стока воды и его генетических составляющих малых рек исследуемой территории являются одним из значимых последствий глобального изменения климата, начавшегося в 1970–80 гг. Существенное повышение среднегодовой температуры наблюдается со второй половины 1970-ых гг., и составляет $\sim 1,55^{\circ}\text{C}$ [2]. Климатические изменения в последние десятилетия отразились на величинах годового, сезонного и минимального стока рек на преобладающей части исследуемой территории [1]. В результате исследования установлено, что

в последние 20–25 лет по причине увеличения годовой суммы осадков (особенно в бассейне Волги выше г. Ярославля) на 3–6%, а также сокращения периода с устойчивым снежным покровом (до 11%) и уменьшение максимальной толщины снежного покрова на большинстве рек наблюдается значительное перераспределение стока воды между фазами водного режима.

Значительно повысился годовой сток по сравнению с нормой предшествующих многолетних наблюдений. В последние 20–25 лет по причине увеличения годовой суммы осадков (особенно в бассейне Волги выше г. Ярославля) на 3–6% на большинстве рек наблюдается значительное увеличение водности. За период 1981–2018 гг. общее увеличение объема годового стока воды исследуемой территории составило 4,8%. В динамике весеннего стока отчетливо проявляется всё возрастающий тренд на уменьшение его объема. Однако, для бассейна Камы, Унжи и Ветлуги характерно увеличение весеннего стока. На остальной части бассейна он уменьшается.

Для рек северо-западной части исследуемой территории характерен тренд к увеличению максимальных расходов весеннего половодья (Ветлуга) или его отсутствие (Молога). Только самые северные и северо-восточные реки региона (Унжа) характеризуются заметным увеличением максимальных расходов весеннего половодья. Тенденция к уменьшению максимальных расходов прослеживается на реках лесостепной и степной зоны (Ока). Максимальные расходы воды уменьшились здесь более чем в 2 раза.

Данные последних лет свидетельствуют о стремительном снижении максимальных расходов и распластывании волны половодья. На смену характерных для бассейна рек исследуемой территории одновершинных гидрографов приходят современные гидрографы с гребенчатой формой во время прохождения половодья. К тому же превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 10–15 до 3–5 раз.

Летне-осенний меженный сток характеризуется увеличением водности. На данной территории сток рек за последние 50 лет увеличился на 50–100%. Также увеличивается объем стока в зимнюю межень на те же 50–100%.

Причиной увеличения слоя стока в зимний меженный период является увеличение температуры воздуха, что привело к росту числа и продолжительности оттепелей, и сокращению длительности зимнего сезона. Наиболее существенное увеличение минимального стока (более 50–70%) происходит в верхнем течении Оки и Волги. В нижнем течении исследуемой территории минимальный сток увеличивается на чуть меньшие значения 20–40%.

Фоновые значения паводочного стока увеличились на 25–30%, в верхнем течении Волги (бассейне Рыбинского водохранилища) и Камы – до 75%.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что для рек бассейна Волги и Урала характерен тренд к уменьшению максимальных расходов весеннего половодья или его отсутствие. Максимальные расходы воды уменьшились более чем в 2 раза. Превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 15 до 5 раз.

Для летне-осеннего меженного стока выявлено увеличением водности. Для рек исследуемой территории сток увеличился на 50–100%. Также увеличивается объём стока в зимнюю межень до 130%. Зафиксировано увеличение паводочного стока в бассейнах малых рек, в среднем – на 43%.

Наиболее существенное увеличение минимального стока (более 50–70%) установлено для верхнего течения Оки и Волги. В нижнем течении исследуемой территории минимальный сток увеличивается на чуть меньшие значения 20–40%.

Кроме этого, для большинства исследуемых речных бассейнах установлено увеличение продолжительности и интенсивности паводков. Максимальный расход летних паводков увеличился до 80%. Объём паводочного стока за год увеличился на 40–50%. Увеличение зимних паводков выросло на 25–30%.

В результате сравнения данных, полученных по средним и большим рекам исследуемой территории, установлено, что разностно-интегральные кривые для генетических составляющих стока воды малых рек исследуемой территории имеют несколько экстремумов (точек перегиба) – первая приурочена к началу глобальных климатических изменений, повлекших за собой и гидрологические изменения, вторая – точка перегиба за последние 20 лет. Это полностью повторяет закономерности для больших и средних рек.

В результате проведённых исследований выявлена закономерность – чем южнее, тем существенней изменились генетические составляющие стока воды.

Ещё одним выводом работы является то, что несмотря на аazonальность малых рек, для них возможно составление карт стоковых характеристик воды, а также выявлена схожесть динамик и закономерностей гидрологических изменений стока воды и его внутригодового распределения у малых, больших и средних рек.

Библиографический список

1. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М. К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // Водное хозяйство России, 2014. №3. С.83-99.

2. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод европейской части России // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 571–589.

3. Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Гидрологическая изученность и классификация рек Верхней и Средней Волги // Морские исследования и образование (MARESEDU-2021): труды X Междунар. научно-практической конференции. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. Т.1 (III). С. 351–355.

4. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Издательство Московского университета, 1966.

5. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Самсонов Т.Е. Изучение современного водного режима рек европейской территории России с помощью автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа grwat // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. докладов международной научной конференции. Нижний Новгород, 2019. С 160 – 165.

В.В. Законнов, А.В. Законнова, zak@ibiw.ru

Институт биологии внутренних вод им. И.Д.Папанина РАН, пос. Борок, Россия

ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОМОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ

Рассмотрены научные и прикладные аспекты трансформации ложа и берегов водохранилищ Волжского каскада за период эксплуатации (40–85 лет). Изменение основных гидроморфометрических параметров: объемы, площади, глубины и длины береговой линии – сложный стохастический процесс, направленный на стабилизацию функционирования экосистем крупных равнинных водохранилищ в меняющихся условиях окружающей среды. Трансформация характеристик водохранилищ определена на основании мониторинговых исследований величин осадконакопления, спрямления и размыва берегов, а также отчуждением суши акватории.

Ключевые слова: гидрология, морфометрия, трансформация, водохранилища Волги.

V. Zakonnov, A. Zakonnova, zak@ibiw.ru

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, RAS, Borok, Russia

CHANGES IN HYDROMORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE VOLGA RESERVOIRS

The scientific and applied aspects of the transformation of the bed and shores of the Volga cascade reservoirs over the period of operation (40–85 years) are considered. Changes in the main hydromorphometric parameters: volume, area, depth and length of the shoreline is a complex stochastic process aimed at stabilizing the functioning of ecosystems of large plain reservoirs in changing environmental conditions. The transformation of reservoir characteristics was determined based on the monitoring studies of sedimentation, straightening and erosion of the shores, as well as the advance of land on the water area.

Keywords: hydrology, morphometry, transformation, Volga reservoirs.

Уточнение гидроморфометрических характеристик водохранилищ является важнейшей научно-прикладной задачей повышения эффективности их эксплуатации. Водоохранилища Волжского каскада за время существования (40-85 лет) претерпели существенные изменения по сравнению с проектными данными. Гидродинамические процессы в них связаны с режимом эксплуатации гидросооружений и природными циклами. Водоохранилища, как объекты техногенного происхождения постепенно вписываются в естественные природные условия. На равнинных территориях трансформация гидроморфометрических показателей крупных водохранилищ происходит незаметно, однако, это не так. Водные массы водохранилищ находятся в постоянной гидродинамической активности, пока не выработаются условия, обеспечивающие стабильность взаимодействия объекта с окружающей природной средой.

Методической основой исследования являются материалы мониторинга донных отложений – объемы и интенсивность осадконакопления в водохранилищах Волги, собранные до 2016 г. [5; 6; 8-12; 14] и пересчитанные к 2022 г. Потери объемов воды в Угличском, Горьковском и Волгоградском водохранилищах и другие показатели, рассчитанные на основании цифровых моделей рельефа дна [15] в сравнении с данными прямых геоморфологических съемок (абразия берегов) [11; 14; 19] и накопление наносов [4] дали близкие результаты. Трансформация площадей зеркала водохранилищ за счет размыва берегов и образования болотных ландшафтов определена на основании комплексных гидробиотических и аэрокосмических съемок [9; 13; 18].

Наиболее ранние ссылки, опубликованные в печати [2; 3], приближенные к проектным характеристикам, приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Основные проектные гидроморфометрические показатели водохранилищ Волги

<i>Водохранилище</i>	<i>Годы заполнения</i>	<i>V, км³</i>	<i>S, км²</i>	<i>H, м</i>	<i>Kв · год⁻¹</i>	<i>Характер регулирувания</i>
Иваньковское	1937	1.12	327	19	13.6	Сезонное
Угличское	1940	1.24	249	23	12.4	Сезонное
Рыбинское	1941	25.42	4550	30	1.7	Годичное
Горьковское	1955	8.70	1591	22	6.8	Сезонное
Чебоксарское*	1981	13.85	2270	28	24.3	Сезонное
Куйбышевское	1957	58.00	6450	40	5.4	Сезонное
Саратовское	1967	13.40	1950	32	19.1	Недельное
Волгоградское	1962	31.40	3120	41	7.5	Недельное

Примечание: * – уровень 68 м БС (Балтийской системы).

V – полный объем, *S* – площадь акватории при НПУ, *H* – глубина максимальная, *Kв* – коэффициент водообмена

При анализе основных характеристик водохранилищ А.Б. Авакян, В.М. Широков [1], А.С. Литвинов [16], К.К. Эдельштейн [20] и другие авторы внесли свои уточнения и дополнения.

Природные процессы и характер регулирования оказали влияние на уровеньный режим, который является решающим фактором трансформации гидроморфометрических показателей. В итоге конечный результат изменения основных характеристик водохранилищ к 2022 г. представлен в таблице 2.

Результаты расчетов показали, что потеря объема воды водохранилищ равна накоплению донных отложений с учетом их натуральной влажности, которая составила для песка – 25%, илистого песка – 33%, песчанистого ила – 46% и глинистого ила 62% [5]. Исходя из процентного соотношения площадей крупнозернистых наносов и тонкодисперсных отложений общая естественная влажность составила 50-54% [14].

Водохранилища Волги, как правило, не добирают объемы воды до НПУ, что является одним из условий формирования в указанных границах площади зеркала и подтопляемой территории заболоченных ландшафтов. В зарастающих мелководьях, закрытых островами, в отличие от незащищенных берегов от

ветро-волнового воздействия, наблюдается как отчуждение суши части акватории, так и ее увеличение (все водохранилища Волги за исключением Волгоградского) [5; 6; 8-12; 14]. В результате гидродинамического воздействия в зоне заплеска волны образуется вдольбереговой песчаный вал, который постепенно становится урезом, за пределами которого мелководная ложбина активно зарастает кустарником и высшей водной растительностью. Происходит срастание макрофитных сплавин с дном и формирование гидроморфных болотно-луговых почв.

Таблица 2

Трансформация гидроморфометрических показателей водохранилищ Волги за период их эксплуатации

<i>Водохранилище</i>	<i>Период эксплуатации, лет</i>	<i>V, км³</i>	<i>S, км²</i>	<i>H, м</i>	<i>Kв · год⁻¹</i>	<i>Характер регулирования</i>
Иваньковское	85	1.10	287	18	7.9	Сезонное
Угличское	82	1.22	226	22	9.8	Сезонное
Рыбинское	81	25.00	4480	28	1.4	Годичное
Горьковское	67	7.52	1509	20	6.0	Сезонное
Чебоксарское *	41	4.84	1200	23	24.3	Сезонное
Куйбышевское**	65	48.91	5870	38	4.2	Сезонное
Саратовское	55	11.97	1833	30	19.1	Недельное
Волгоградское	60	26.84	3248	39	8.0	Недельное

Примечание: * – уровень 63.5 м БС; V – 5.2 км³, S – 1200 км². ** – Куйбышевское после создания Нижнекамского (1978 г.) и Чебоксарского (1981 г.) водохранилищ, V – 56.4 км³, S – 5870 км².

Таким образом, интенсивное накопление донных отложений отмечено на максимальных глубинах, которые по сравнению с первоначальными уменьшились на 1-2 м.

Коэффициенты водообмена неодинаковы и зависят от периода водности и цикла солнечной активности. По своей сути они подтверждают то, что водохранилища являются водоемами замедленного водообмена.

Характер регулирования не изменился за исключением некоторых экстремальных лет, связанных с обводнением Нижней Волги, и перераспределением энергоресурсов в Европейской части России после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.

Задача определения длины береговой линии не ставилась. Ее величину предстоит установить, опираясь на опыт определения фрактальной (дробной) размерности [17].

Изменение интенсивности осадконакопления в каскаде (табл. 3) является подтверждением географической зональности и неизбежности занесения водохранилищ со временем, что не угрожает водохранилищам Волги в течение нескольких столетий [7].

**Интенсивность осадконакопления и потеря полного объема
водохранилищ Волги к 2022 г.**

Водохранилище	Осадконакопление, год ⁻¹			Потеря объема, %	
	мм	млн т	кг · м ²	V	V · год ⁻¹
Иваньковское	2.1	0.5	1.8	1.8	0.021
Угличское	2.5	0.4	1.9	1.4	0.017
Рыбинское	2.9	6.4	1.8	1.7	0.021
Горьковское	2.8	2.6	2.1	13.6	0.203
Чебоксарское	2.3	2.6	2.7	7.0	0.171
Куйбышевское	4.4	14.6	2.9	13.3	0.205
Саратовское	3.7	5.6	4.3	10.7	0.194
Волгоградское	5.4	12.6	4.7	14.5	0.242
<i>R</i> ²	0.70	0.54	0.85	0.69	0.79

Примечание. V – потеря полного объема воды за период эксплуатации, V год⁻¹ – среднегодовая потеря объема воды, *R*² – коэффициент детерминации.

Фактические гидроморфометрические характеристики являются не стабильными показателями и свидетельствуют о направленности процессов в результате постоянно меняющегося уровня режима в течение года.

Необходимость продолжения этих работ не вызывает сомнения, особенно при прогнозировании путей функционирования экосистем водохранилищ.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100104-б, приоритетного проекта «Оздоровление Волги» № АААА-А18-118052590015-9 и плановой темы № АААА-А18-118012690123-4.

Библиографический список

1. Авакян А.Б., Широков В.М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск: Изд-во Университетское, 1990. 240 с.
2. Буторин Н. В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 321 с.
3. Волга и ее жизнь / Под. ред. Н.Б. Буторина. Л.: Наука, 1978. 350 с.
4. Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 2007. 39 с.
5. Законнов В.В., Гершевский П., Законнова А.В., Кашубский М. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 3. Оценка изменения морфометрических характеристик в результате накопления донных отложений в Угличском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 6–28.
6. Законнов В.В., Григорьева И.Л., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 5. Донные отложения и качество воды Иваньковского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 3. С. 35–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-3-3

7. *Законнов В.В., Законнова А.В.* Географическая зональность осадконакопления в системе волжских водохранилищ // Известия РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–112.

8. *Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 7. Формирование наносов в высокопроточных водохранилищах Волжского каскада // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 29–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-2

9. *Законнов В.В., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Законнова А.В., Маланин В.В., Марасов А.А.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 72–89. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-6

10. *Законнов В.В., Комов В.Т., Законнова А.В.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 1. Донные отложения и их изменения в связи с повышением уровня Чебоксарского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 3. С. 4–19.

11. *Законнов В.В., Костров А.В., Законнова А.В.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 4. Роль берегозащиты в формировании донных отложений Горьковского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 60–74. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-4-5

12. *Законнов В.В., Литвинов А.С., Законнова А.В.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 2. Результаты мониторинга донных отложений и последствия понижения уровня Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 21–35.

13. *Законнов В.В., Ляшенко Г.Ф.* Трансформация грунтов и сукцессия высшей водной растительности в литоральной зоне Рыбинского водохранилища // Экологические проблемы литорали равнинных водохранилищ. Матер. межд. конф. Казань, 2004. С. 30–32.

14. *Законнов В.В., Филиппов О.В., Баранова М.С., Кочеткова А.И., Законнова А.В.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 8. Формирование берегов и ложа Волгоградского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 6–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-1

15. *Землянов И.В., Шкунова Е.Ю., Горелиц О.В., Павловский А.Е.* Использование цифровых моделей рельефа для уточнения современных морфометрических характеристик водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Гидро- и геодинамические процессы: тр. Межд. научн.-практ. конф. Пермь, 2011. Т. I. С. 189–193.

16. *Литвинов А.С.* Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. 83 с.

17. *Соболь И.С., Соболь С.В., Крупинов А.С.* Об измерении длины береговой линии водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 6. С. 30–39.

18. *Тихомирова Л.К.* Роль макрофитной растительности в формировании аквальных комплексов мелководий Иваньковского водохранилища. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 1985. 16 с.

19. *Филиппов О.В.* Формирование природных аквальных комплексов озерной части Волгоградского водохранилища в условиях измененного гидрологического режима // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Волгоград, 2004. 24 с.

20. *Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

УДК 556.55

А.Т. Зиновьев, А.В. Дьяченко, О.В. Кондакова
zinoviev@iwep.ru, dychenko@iwep.ru, kondakova@iwep.nsc.ru
Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ БЕССТОЧНОГО ОЗЕРА ЧАНЫ

В работе представлены результаты моделирования уровня воды бессточного озера Чаны – крупнейшего естественного водоема Западной Сибири. Для описания динамики уровня воды применена компьютерная двумерная горизонтальная (2DH) термогидродинамическая (ТГД) модель водоема, построенная на основе программного пакета с открытым исходным кодом Delft3D. Расчеты выполнены для безледоставного периода 2018г. Результаты моделирования согласуются с данными наблюдений.

Ключевые слова: озеро Чаны, водный баланс, уровень воды, плановая термогидродинамическая модель, компьютерное моделирование

A. Zinoviev, A. Dyachenko, O. Kondakova
zinoviev@iwep.ru, dychenko@iwep.ru, kondakova@iwep.nsc.ru
Institute for Water and Environmental problems SB RAS, Barnaul, Russia

MODELING OF WATER LEVEL OF CLOSED LAKE CHANY

The paper presents the results of computer modeling of water level of Lake Chany – the largest natural water body in Western Siberia. To describe the water level dynamics a computer two-dimensional horizontal (2DH) thermohydrodynamic (THD) model constructed on the base of the open software package Delft3D is implemented. Calculations of water level were performed for the ice-free period of 2018. The results of modeling show agreement with the observation data.

Keywords: Lake Chany, water balance, water level, two-dimensional horizontal thermohydrodynamic model, computer modeling

Введение

Уровенный режим озера Чаны является одним из важнейших факторов, влияющих на его водно-экологическое состояние [8]. Оз. Чаны – самый крупный по площади естественный водоем Западной Сибири, имеющий важное рыбохозяйственное значение. Озеро и прилегающая к нему территория включены в список водно-болотных угодий международного значения (Рамсарские угодья).

В данной работе термин «озеро Чаны», как и в [1, 4-6, 8-11], применен для обозначения Чановской озерной системы, состоящей из нескольких частей, различных по глубине (рис. 1): оз. Малые Чаны, оз. Яркуль и оз. Чаны (Большие Чаны), включающего плесы Чиняихинский, Тагано-Казанцевский и Ярковский.

В 1971 г. для сохранения рыбохозяйственного значения озера был отделен Юдинский плес, что позволило создать условия для повышения уровня воды в оставшейся части за счет стока впадающих в оз. Малые Чаны рек Каргат и Чулым [9]. Площадь озера после отделения Юдинского плеса (за 1971–2018 гг.) в среднем составила 1580 км² (с колебаниями от 1285 км² до 1925 км²) [6]. Площадь водосборного бассейна озера – 27 340 км².

Уровень воды в озере определяется соотношением приходных и расходных статей его водного баланса. В зависимости от того, какая из статей – поступление или расходование воды – преобладает, уровень озера повышается или понижается [7].

Приходные статьи водного баланса оз. Чаны – атмосферные осадки и речной приток; расходная статья – испарение с поверхности озера [1, 5, 8-11]. Для бессточных мелководных озер, каким является оз. Чаны, потери воды на испарение весьма значительны [10] и существенно зависят от температуры водной поверхности [9, 11].

Годовые величины элементов водного баланса оз. Чаны после отделения Юдинского плеса (за период 1971–2018 гг.) в среднем составили: речной приток – 298 мм или 0,47 км³ (48% от приходной части), атмосферные осадки на поверхность озера – 324 мм или 0,51 км³ (52%); суммарное испарение – 571 мм или 0,90 км³ [6].

Эффективным инструментом изучения водного баланса и изменения уровня озера является математическое моделирование.

Цель работы – выполнить расчеты водного баланса и уровня воды озера Чаны с применением двумерной горизонтальной (2DH) термогидродинамической (ТГД) модели водоема (в безледоставный период 2018 г.).

Материалы и методы

Построение двумерной горизонтальной ТГД-модели оз. Чаны выполнено на основе программного комплекса с открытым исходным кодом Delft3D [12].

Для проведения расчетов подготовлена база данных на основе СУБД PostgreSQL [13], содержащая входную метеорологическую информацию со станций в районе озера [14] и сведения по гидрологическим характеристикам оз. Чаны и впадающих в него рек [2, 3].

Основой цифровой модели рельефа (ЦМР), используемой в работе, послужила ЦМР котловины оз. Чаны, созданная в ИВЭП СО РАН [5] (до отметок высот 107,5 м БС-77). После вычета той части, которая соответствует Юдинскому плесу, данная ЦМР была адаптирована для построения компьютерной ТГД-модели озера (рис. 1).

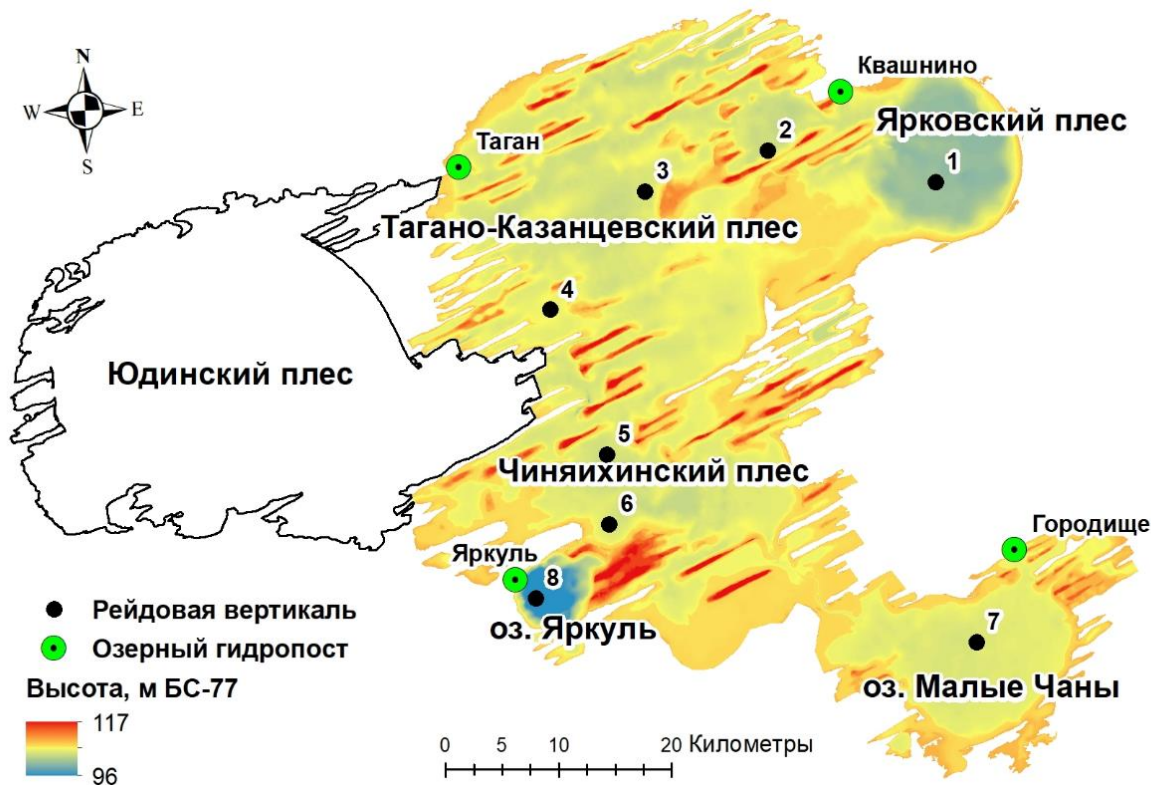


Рис. 1. Цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны

Результаты и их обсуждение

С использованием описанных выше данных построена компьютерная 2ДН ТГД-модель озера Чаны для безледоставного периода, учитывающая сложное строение озерной котловины и перераспределение тепла в толще воды за счет динамических процессов, существенно зависящих от морфометрических особенностей озера. В работе [4] представлены результаты моделирования термического режима оз. Чаны, в т.ч. показаны карты неравномерного распределения температуры воды по акватории озера, обусловленное различием по глубине отдельных частей водоема. В данной работе приведены результаты моделирования уровня озера Чаны для периода открытой воды с применением построенной 2ДН-модели с использованием входных данных для 2018 г.

По данным наблюдений на береговых постах в 2018 г. очищение ото льда произошло 7 мая, первые осенние ледовые явления появились 31 октября [3]. Расчетный период выбран с 13:00 ч. 15.05.2018 по 13:00 ч. 27.10.2018.

На входных створах расчетной области для всего рассматриваемого периода задавались среднесуточные расходы воды и среднедекадные значения температуры воды впадающих в озеро рек Каргат и Чулым по постам с. Здвинск и

с. Старогорносталево [2]. Метеорологическая обстановка в расчетный период определялась заданием метеопараметров с трехчасовой дискретностью по станции Квашнино (атмосферные осадки, температура воздуха, скорость и направление ветра, общая облачность, относительная влажность воздуха, атмосферное давление) [14].

Результаты моделирования согласуются с данными наблюдений [3]. На рисунке 2, 3 приведено сопоставление среднесуточных значений уровня озера, рассчитанных по модели, с данными измерений – по г/п Квашнино и по береговым постам в среднем.

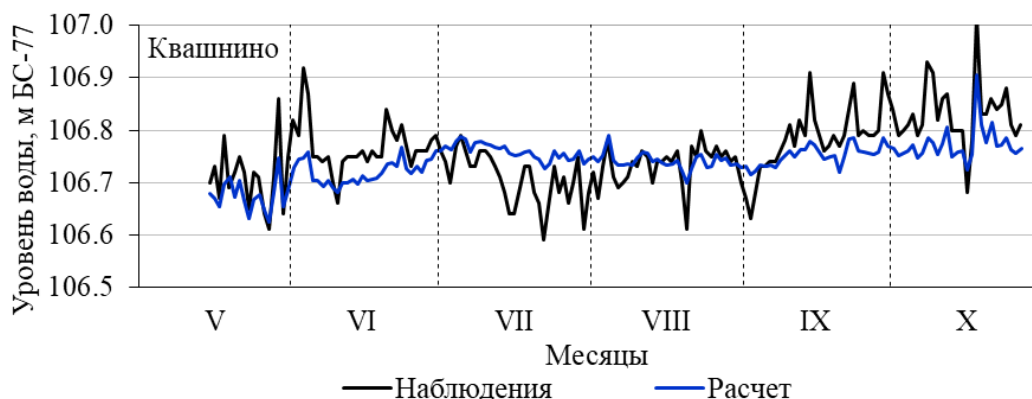


Рис. 2. Уровень воды оз.Чаны за расчетный период в 2018 г. по посту Квашнино

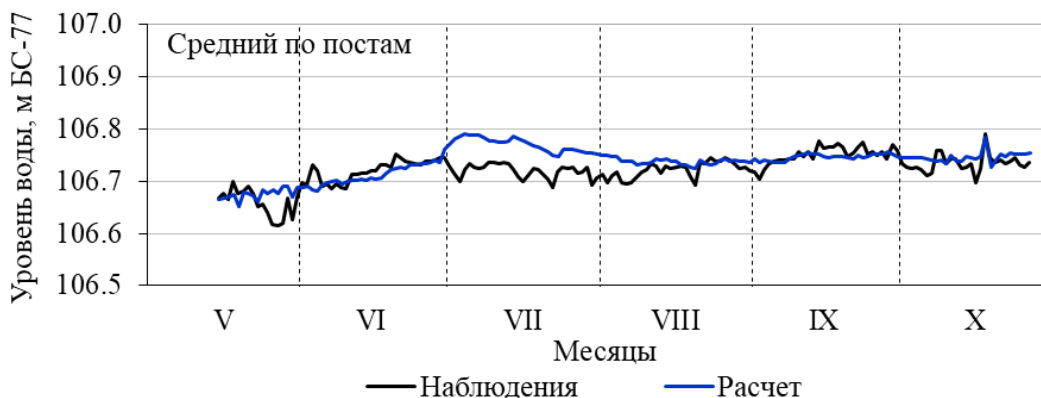


Рис. 3. Уровень воды оз.Чаны за расчетный период в 2018 г. – средний по постам

Выводы

Впервые выполнено моделирование уровня воды оз. Чаны с применением двумерной горизонтальной модели для описания ТГД-процессов в водоеме в безледоставный период, построенной на основе программного пакета с открытым исходным кодом Delft3D. Модель учитывает сложное строение котловины и позволяет описывать неравномерное распределение температуры воды по акватории озера.

Расчеты проведены с использованием входных данных за период открытой воды 2018 г. Результаты моделирования уровня озера согласуются с данными наблюдений.

Построенная 2DH-модель ТГД-модель может быть использована для прогнозирования изменения уровня воды оз. Чаны под влиянием климатических и антропогенных факторов в безледоставный период.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Библиографический список

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Новосибирское водохранилище и озера бассейна Средней Оби / Под ред. В.А. Знаменского, М.Я. Кунявского. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 156 с.
2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2018 г. Часть 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 10. Новосибирск, 2020. 304 с.
3. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2018 г. Часть 2. Озера и водохранилища. Т.1. Вып. 10. Новосибирск, 2020. 92 с.
4. *Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кондакова О.В.* Моделирование термического режима бессточного озера Чаны // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 3 т. Барнаул, 2022. Т. 1. С. 129–134.
5. *Кондакова О.В., Савкин В.М., Двуреченская С.Я., Марусин К.В.* Водный баланс и характеристики минерализации бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2020. № 1. С. 122–129.
6. *Кондакова О.В.* Водный баланс озера Чаны в многоводные и маловодные периоды // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Пермь, 2021. С.125–129.
7. *Крицкий С.Н.* Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6. С. 9–26.
8. Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / Отв. ред. О.Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. 255 с.
9. Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. Н.П. Смирновой и А.В. Шнитникова. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1982. 304 с.
10. *Савкин В.М., Орлова Г.А., Кондакова О.В.* Современный водный баланс бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 123–130.
11. *Шнитников А.В.* Большие озера Срединного региона и некоторые пути их использования // Озера Срединного региона. Л.: Наука, 1976. С. 5–133.
12. Delft3D 4 – Open Source Community. [Электронный ресурс]. URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d> (дата обращения 15.12.2022).
13. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database [Электронный ресурс]. URL: <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 15.06.2022).
14. RP5.ru. Расписание погоды. [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 15.12.2022).

М.Н. Игнатьева, mariyaignatieva@mail.ru
Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (СЕВАСТОПОЛЬ, КРЫМСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

В статье представлен анализ изменения площади зеркала Чернореченского водохранилища (Севастополь, Крымский полуостров) за период с апреля 2013 г. по декабрь 2021 г. Анализ проведен с использованием космических снимков высокого разрешения Landsat 8. Космические снимки Landsat 8 получены из облачного хранилища Google Earth Engine. Первичная обработка космических снимков произведена с использованием Google Earth Engine. Дополнительная обработка выполнена с использованием программного комплекса Quantum GIS. В результате исследования установлено, что площадь зеркала Чернореченского водохранилища в 2013-2021 гг. изменялась от 1,8 до 5,86 км².

Ключевые слова: водохранилище, береговая линия, динамика, изменение, Крым, Крымский полуостров.

M. Ignatieva, mariyaignatieva@mail.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

APPLICATION OF REMOTE RESEARCH METHODS TO ANALYZE CHANGES IN THE AREA OF THE CHERNORECHENSKOE RESERVOIR (SEVASTOPOL, CRIMEAN PENINSULA)

In the article an analysis of changes in the mirror area of the Chernorechensk reservoir (Sevastopol, Crimean Peninsula) for the period from April 2013 to December 2021 are presented. The analysis was carried out using high-resolution Landsat 8 satellite images. Satellite images Landsat 8 were obtained from the Google Earth Engine cloud storage. The initial processing of satellite images was performed using Google Earth Engine. Additional processing was performed using the Quantum GIS software package. As a result of the study, it was found that the area of the Chernorechenskoe reservoir in 2013-2021 has varied from 1.8 to 5.86 km².

Keywords: reservoir, coastline, dynamics, change, Crimea, the Crimean Peninsula.

Введение

В современном мире особенно остро стоит проблема дефицита водных ресурсов. Особенно эта проблема актуальна в регионах мира, находящихся в засушливом климате, и регионах, в которых количество выпадающих осадков существенно меньше или приблизительно равно испарению. Ярким примером такого региона является Крымский полуостров. Для решения проблем дефицита водных ресурсов в XX в. на территории Крымского полуострова была построена сеть водохранилищ, которые призваны обеспечивать постоянное снабжение потребителей водой. Однако нужно понимать, что наполняемость водохранилищ

зависит от ряда факторов, которые часто не зависят от человека. Ярким примером таких факторов является межгодовая динамика количества выпадающих осадков, чередование маловодных и многоводных годов, и, как следствие, низкая наполняемость водохранилищ.

Чернореченское водохранилище находится в юго-западной части Крымского полуострова, в пределах города федерального значения Севастополь. Построено в 1956 г. на р. Черная [3]. Согласно [4], площадь зеркала Чернореченского водохранилища составляет 6,04 км², а полный объем Чернореченского водохранилища – 64,2 млн м³.

Цель работы – проанализировать изменение площади зеркала Чернореченского водохранилища с апреля 2013 г. по декабрь 2021 г. с использованием космических снимков высокого разрешения и дистанционных методов исследования.

Материалы и методы исследования

Космические снимки активно используются многими исследователями для изучения изменения площади зеркала водохранилищ и их береговой линии [5; 11; 13]. Исследованию водохранилищ Крымского полуострова в последние годы посвящено большое количество работ, затрагивающих самые разные аспекты научной проблематики [1-2; 6-10].

Методика расчета изменения площади береговой линии и соответственно площади зеркала Чернореченского водохранилища основана на использовании мультиспектральных космических снимков и расчете спектральных индексов. В качестве спектрального индекса был выбран вегетационный индекс растительности – Normalized difference vegetation index (NDVI) [12], который изменяется в диапазоне от -1 до 1. Вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)$$

где NIR – спектральное отражение в ближней инфракрасной области, RED – спектральное отражение в красной области. Для водной поверхности значение NDVI всегда будет отрицательным.

В качестве исходных материалов исследования для расчета NDVI в работе использованы космические снимки высокого разрешения Landsat 8. Для уменьшения времени затрат на получение космических снимков использовалась не поквадратная выгрузка набора всех каналов мультиспектрального космического снимка за дату съемки, а только часть области интереса вокруг Чернореченского водохранилища с применением облачной вычислительной платформы для обработки спутниковых снимков Google Earth Engine. Это существенно позволило сократить время загрузки исходных снимков. В то же время на облачной платформе Google Earth Engine в наборе данных «Landsat 8 Collection 1 Tier 1 8-Day NDVI Composite» уже представлены результаты расчета вегетационного индекса NDVI, что позволяет нам использовать уже готовые данные для выгрузки. Поскольку периодичность ряда наблюдений космического спутника Landsat 8 не постоянна, то в работе использованы среднемесячные значения вегетационного индекса NDVI за период с апреля 2013 г. по декабрь 2021 г. С облачной платформы Google Earth Engine полученные растры значений NDVI обрабатывались

с использованием программного комплекса QGIS. В программном комплексе Quantum GIS была произведена переклассификация растра значений NDVI, отфильтрованы участки акватории со значением NDVI менее 0, а затем отрисованы векторы границ водохранилища за каждый месяц рассматриваемого временного периода и рассчитаны их площади. За отдельные месяцы (особенно зимние) не удалось получить данные, так как облачность над акваторией Чернореченского водохранилища достигала больших значений и невозможно было получить достоверный результат.

Анализ результатов

На рисунке 1 представлен пример результатов обработки космических снимков, а на рисунке 2 – график динамики среднемесячного изменения площади зеркала Чернореченского водохранилища.

Из рисунков 1, 2 отчетливо видно, что наблюдается два спада в площади Чернореченского водохранилища. Первый спад зафиксирован осенью-зимой 2014 года и связан в первую очередь с забором воды из водохранилища (площадь Чернореченского водохранилища по расчетам в декабре 2014 г. составила 1,8 км²). Однако уже в январе-марте 2015 г. объем вод был существенно восполнен в результате выпадения осадков и таяния снега в горах.

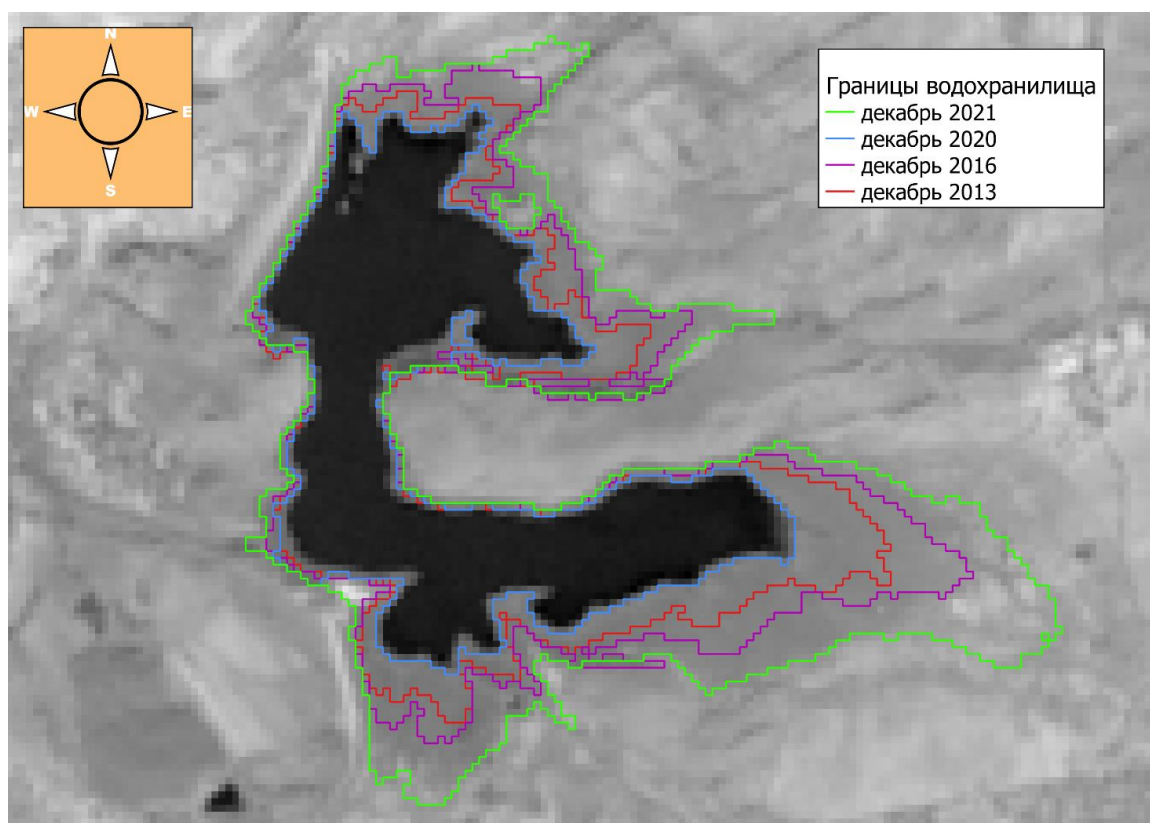


Рис. 1. Изменение площади зеркала Чернореченского водохранилища (фрагмент)

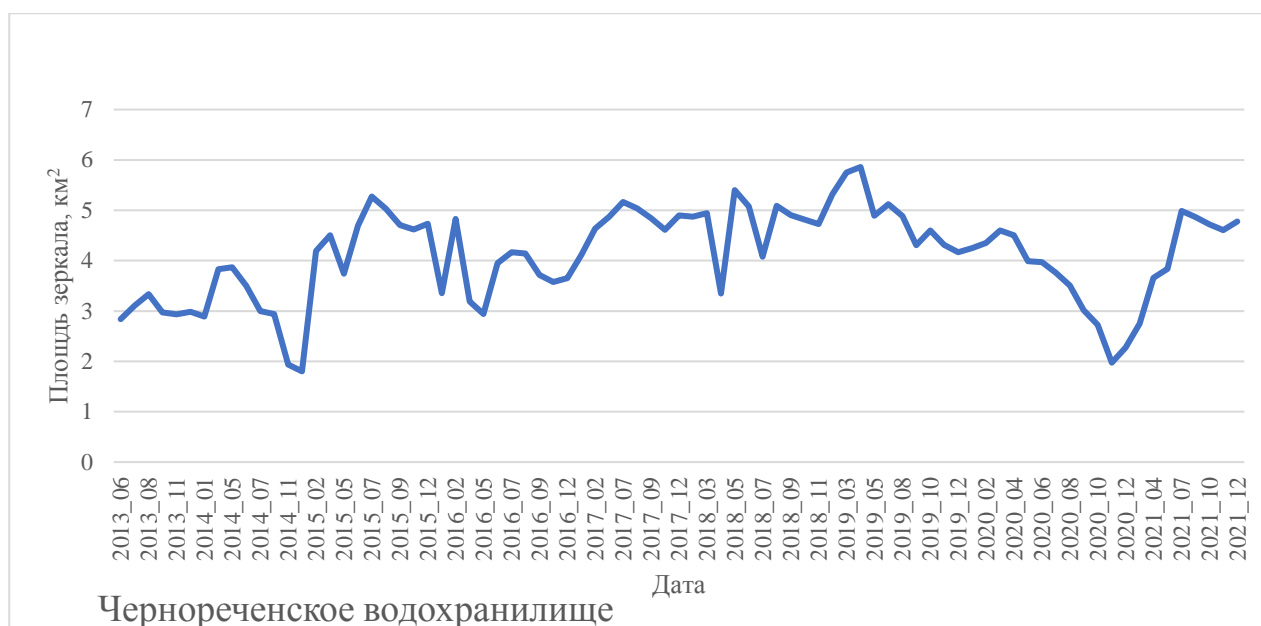


Рис. 2. Среднемесячная динамика изменения площади зеркала Чернореченского водохранилища с мая 2013 по декабрь 2021 г.

Второй минимум и предшествующий ему длительный спад был характерен для второй половины 2020 г., с минимальным значением 1,98 км² в ноябре 2020г. Этот являлся следствием в целом вододефицитных 2019-2020 гг. Наибольшее значение площади зеркала Чернореченского водохранилища по данным расчетов зафиксировано в апреле 2019 г. и составляет 5,86 км². В целом за рассматриваемый период площадь зеркала Чернореченского водохранилища изменялась примерно в 3 раза.

Выводы

Использование дистанционных методов исследования позволяет существенно сократить время и трудозатраты при проведении исследовательских работ. В последние годы еще более значительно сокращать время и трудозатраты при проведении исследований позволяют облачные вычислительные платформы, такие как Google Earth Engine. В результате использования облачной вычислительной платформы Google Earth Engine и программы Quantum GIS изучена пространственно-временная динамика изменения береговой линии и площади зеркала Чернореченского водохранилища на территории Крымского полуострова. В результате исследования установлено, что площадь зеркала Чернореченского водохранилища в 2013-2021 гг. изменялась от 1,8 до 5,86 км².

Библиографический список

1. Захаров Р. Ю., Бардин Ю. А. Вопросы обеспечения экологической безопасности водохранилищ Республики Крым // Экономика строительства и природопользования. 2020. №. 4 (77). С. 10-16.
2. Николенко И. В., Каримов Э. А., Боков С. А., Авдеева Д. В. Оценка влияния потерь водных ресурсов на экосистемы водохранилищ естественного стока

Крымского полуострова // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8, № 4. С. 205-214.

3. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: ДОЛЯ, 2005. 214 с.

4. *Поверхностные водные объекты Крыма.* / Сост.: Лисовский А.А. и др. Симферополь: Крымучпедгиз, 2011. 242 с.

5. *Погорелов А. В., Липилин Д. А., Курносова А. С.* Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник. 2017. №. 1 (40). С. 130-137.

6. *Позаченюк Е.А.* Управление водными ресурсами водохранилищ Республики Крым в современных условиях // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции. Том III. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. – С. 37-42.

7. *Табуницкий В.А.* Изменение площади зеркал водохранилищ естественного стока на территории Крымского полуострова (сравнение данных на начало апреля 2019 и 2020 года) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6. № 4. С. 181-190.

8. *Тимченко З.В., Табуницкий В.А.* Экологический мониторинг как инструмент определения современного состояния водохранилища (на примере Кутузовского водохранилища) // Экономика строительства и природопользования. 2021. № 3(80). С. 5-12.

9. *Фризен А. В.* Динамика площади зеркал водохранилищ Крымского полуострова по данным дистанционного зондирования // Ломоносовские чтения: Материалы ежегодной научной конференции МГУ, Севастополь, 14–22 апреля 2022 года. Севастополь: Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе, 2022. С. 29-30.

10. *Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А., Васильченко А.А., Выприцкий А.А.* Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 226–241.

11. *Merwade V. M.* An automated GIS procedure for delineating river and lake boundaries // Transactions in GIS. 2007. Vol. 11 (2). pp. 213-231.

12. *Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. Vol. 1. p. 48-62.

13. *Zhao G., Gao H.* Automatic correction of contaminated images for assessment of reservoir surface area dynamics // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45 (12). pp. 6092-6099.

А.С. Казанцева^{1,2}, А.В. Красиков¹, kazanalena@bk.ru

¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА Р.СЫЛВА (Г.КУНГУР)

Рассмотрены некоторые вопросы эксплуатации гидрологических постов, оборудованных на территории г. Кунгура. Подробно освещен гидрологический мониторинг р. Сылва у Кунгурской Ледяной пещеры. Приведены некоторые современные качественные характеристики.

Ключевые слова: гидрологический мониторинг, река Сылва, Кунгурская Ледяная пещера.

A. Kazantseva^{1,2}, A. Krasikov¹, kazanalena@bk.ru

¹Mining Institute of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

HYDROLOGICAL OBSERVATIONS ON THE SYLVA RIVER (KUNGUR)

The article discusses some issues of operation of hydrological posts equipped on the territory of Kungur. The hydrological monitoring of the Sylva River at the Kungur Ice Cave is covered in detail. Some modern qualitative characteristics are given.

Keywords: hydrological monitoring, Sylva river, Kungur Ice cave.

Введение

Одна из основных целей гидрологических наблюдений на реках – получение данных о поверхностном стоке на территории в исследуемом речном бассейне. В статье приведены сведения о развитии гидрологического мониторинга на территории г. Кунгура. Гидрологический мониторинг представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния р. Сылвы, которая является основной водной артерией города. Река Сылва совместно с тремя крупными притоками (рр. Ирень, Шаква и Бабка) образует один из крупнейших гидрологических узлов Пермского края. Происхождение данного речного узла связано с длительным развитием карста и тектоническими движениями земной коры.

Сливаясь с р. Сылвой рр.Бабка, Ирень, Шаква, а также р.Барда вызывают при многоводной весне резкий подъем уровней воды, что совместно с периодически повторяющимися наводнениями и паводками создают реальную угрозу для жителей и предприятий г. Кунгура [1]. Непосредственно в черте г. Кунгура наблюдения за уровнем воды в период прохождения волны весеннего половодья проводятся сотрудниками Кунгурской лаборатории-стационара «ГИ УрО РАН» и Управления гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям г. Кунгура. Для этого оборудованы речные посты на мостах рр. Сылва и Ирень, наблюдения по которым осуществляет местная служба гражданской защиты, а также создан

свайный гидрологический пост на р. Сылва, замеры уровня воды по которому ведут сотрудники Кунгурской-лаборатории-стационара (рис.1).

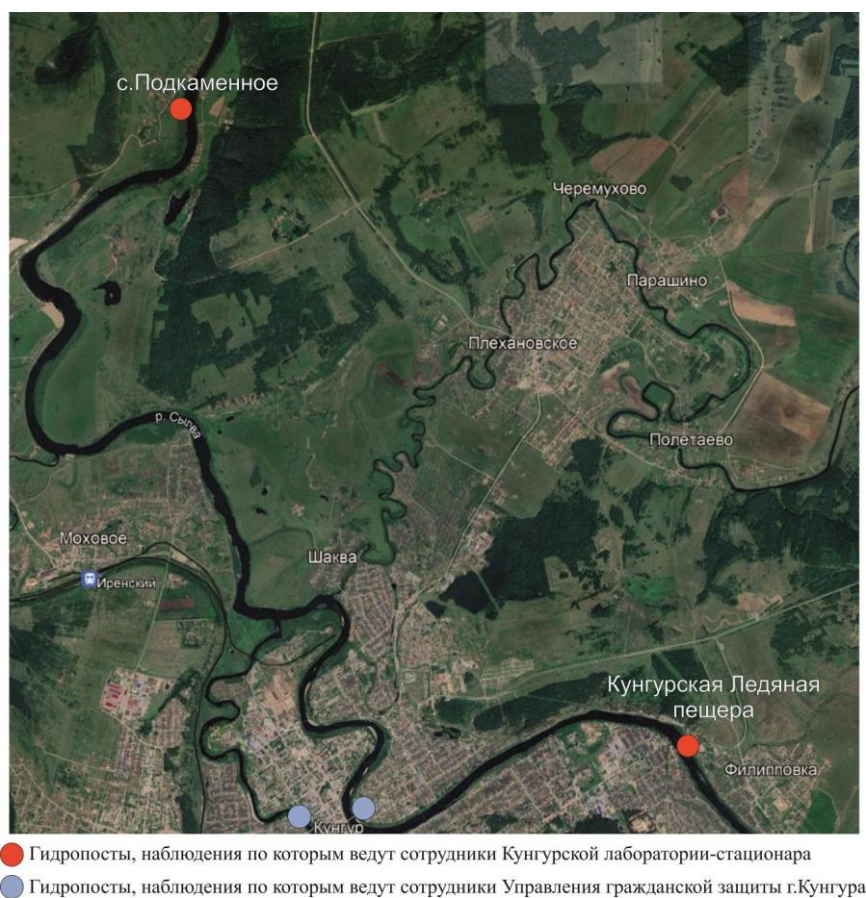


Рис.1. Расположение гидрологических постов на территории г. Кунгура

Материалы и методы исследования

В пределах города р.Сылва имеет среднюю ширину 110-150 м и среднюю глубину 2,5 м. Расход реки колеблется от 16-24 м³/с (в межень) до 1300 м³/с (в паводок).

Бассейн р. Сылвы (левый приток р. Чусовой) находится в юго-восточной части Пермского края. Речная сеть изучаемой территории принадлежит бассейну Каспийского моря. Реки Сылва, Ирень, Шаква по водному режиму относятся к типу с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. Их питание преимущественно зависит от снеговых вод. По условиям водного режима данные реки относятся ко 2 гидрологическому району, в котором до 60% осадков стекает в реки [9].

В настоящее время весеннее половодье начинается во второй декаде апреля, максимальные отметки подъема уровня воды отмечаются в середине апреля-начале мая. Средний многолетний уровень р. Сылвы составляет 113,6 м (по данным на 2022 г.). С 1936 по 2002 гг. в 14 км ниже по течению от устья р. Ирень работал гидропост на р. Сылва у с. Подкаменное. Площадь бассейна р. Сылвы у с. Подкаменное равна 19700 км². Наблюдения велись за уровнями воды, расходами воды, ледовым режимом р. Сылва (сроки и продолжительность начала-окончания ледовых явлений, установления – разрушения ледостава, толщиной

льда и высотой снега на льду). Общая продолжительность гидрологических наблюдений на этом посту 67 лет, продолжительность непрерывных наблюдений составляет более 25 лет [2-4].

В 2002 г. было принято решение оборудовать свайный гидропост на правом берегу р. Сылва в 100 м от входа в Кунгурскую Ледяную пещеру. Физико-географические условия формирования стока р. Сылва в данном месте и у с. Подкаменное оказались схожими. Участок гидропоста находится между автомобильным мостом, расположенным на расстоянии 900 м вверх по течению и поворотом реки, который находится в 300 м ниже по течению. Русло реки в районе устройства гидропоста имеет прямолинейный характер на протяжении 1200 м, не подвержено деформации, без боковых притоков и водозаборных сооружений. Ширина реки в межень около 100 м, в период половодья около 170 м. Гидрологический пост на данном участке состоит из 20 свай, которые привязаны к пунктам опорно-маркшейдерской сети с известными координатами. Ежегодно после периода весеннего половодья проводится нивелировка гидропоста.

Помимо наблюдений за изменением уровня воды р. Сылва в разные периоды проводили гидрохимические исследования. Первые пробы на химический анализ были отобраны в 1951 г., в этом году пробы анализировались только на жесткость и содержание хлора. С 1951 по 2000 гг. (50 лет) выполнено 274 анализа. По данным, полученным за этот период, вода из р. Сылва имеет гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый состав, расчетную минерализацию 508,1 мг/дм³, рН=7,4. На данный момент регулярное проведение химического анализа в рамках мониторинговых исследований для определения макрокомпонентного состава вод р. Сылва не предусмотрено. Отдельные гидрохимические исследования выполняются в рамках научных проектов или специальных работ. Последняя крупная работа, проведенная в период с 2017 по 2018 гг., основана на использовании современных методов изотопного и химического анализов и нацелена на определение качественных характеристик р. Сылвы. В этот период определены сезонные изменения параметров макрокомпонентного состава и изотопного ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) составов. Некоторые результаты будут приведены в следующем разделе.

На сегодняшний день гидрологический мониторинг включает в себя регулярные замеры уровня воды на реке во время половодья, паводков, а также каждую декаду месяца, сбор, обработку и хранение сведений, полученных в результате наблюдений за состоянием водного объекта. Дополнительно на территории Кунгурской лаборатории-стационара проводятся метеорологические наблюдения за изменением температуры воздуха, количества выпавших осадков.

Анализ результатов

Регулярные наблюдения за динамикой уровня воды позволяют своевременно оценить и спрогнозировать изменения на р. Сылва, в том числе осуществить прогноз возможных наводнений. За последние 50 лет в г. Кунгур зафиксировано 4 крупных половодья, которые привели к наводнению. Самое запоминающееся и масштабное наводнение было в 1979 г. Вода в р. Сылва поднялась на 7,86 м выше межени, что привело к подтоплению части города. Высокие

уровни воды в реках 1987 и 1998 гг. (7,46 и 7,44 м соответственно) уже не приводили к таким разрушительным последствиям, в связи с укреплением системы защитных дамб [8]. В 2016 г. отмечено одно из самых высоких половодий за последнее десятилетие. Вода в период весеннего половодья поднялась на 6,3 м выше меженного уровня, и абсолютная отметка уровня воды составила 119,7 м, при абсолютной отметке дамбы у гидропоста 121,1 м. За сутки уровень воды поднимался примерно от 0,2 до 0,6 м [5].

Во время весеннего половодья, а также быстрого подъема воды на реке замеры уровня воды проводят ежечасно, что позволяет управлять ситуацией не только на поверхности, но и в Кунгурской Ледяной пещере, поскольку между р. Сылвой и подземными водными объектами (озера) существует тесная гидравлическая связь.

Качественная характеристика – одна из важных частей гидрологического мониторинга, позволяющая оценить состояние и степень загрязненности водных объектов. В 2017-2018 гг. проведена большая работа по определению сезонных показателей не только макрокомпонентного, но и изотопного и микрокомпонентного составов. На основании изучения химического и изотопного состава речных вод установлено, что речные воды имеют постоянный гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый состав, среднегодовая минерализация равна 465,5 мг/дм³, рН=7,6 и среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O} = -14,4\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -105,1\text{‰}$. Воды р. Сылвы имеют несколько источников питания: в зимний период, когда поверхностный сток почти отсутствует, доминирующая роль в питании рек принадлежит разгрузке подземных вод из разных горизонтов. Весной основным источником питания рек являются талые воды, летом и осенью – атмосферные осадки. Смешанное питание обусловило низкую корреляционную зависимость изотопного состава речных вод с атмосферными осадками. Выявлена задержка во времени передачи изотопного сигнала от атмосферных осадков к речным водам в один месяц, что связано с иммобилизацией осадков в виде снега в зимние месяцы, а также фильтрацией воды. Концентрация таких микроэлементов, как медь, цинк, стронций и свинец не превышает ПДК [6,7].

Выводы

Существующий свайный гидрологический пост на р. Сылва на территории г. Кунгура позволяет своевременно и непрерывно получать данные об уровне воды в реке, что является очень важным экологическим фактором. Во время половодья существует угроза подтопления поймы реки, а высокие уровни приводят даже к угрозе наводнения, что может нанести ущерб населению.

Одним из недостатков действующего гидрологического мониторинга – избирательный объем измерений. Безусловно, современный мониторинг нуждается в модернизации: не хватает сведений об расходах воды, о толщине льда и высоте снега на льду, температуры воды и качественных характеристик. Но в данный момент, с учетом поставленных задач, данных хватает.

Библиографический список

1. *Двинских С. А., Китаев А. Б., Михайлов А. В.* Наводнения на реках бассейна Камы и организация защиты от них // География и природные ресурсы. Иркутск, 2010. №4. С. 74-79.
2. *Дублянский В. Н. и др.* Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 376 с.
3. *Ежов Ю.А., Дорофеев Е.П., Лукин В.С.* Наводнения в районе города Кунгура (их причины, динамика, прогнозирование и меры борьбы с ними) / УрО АН СССР. Свердловск, 1990.
4. *Ежов Ю.А., Лукин А.В.* Новые данные о химическом режиме карстовых вод Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры / Перм. ун-т. Пермь, 1976. Вып. 16. С. 35-40.
5. *Казанцева А.С.* Значимость оперативного и преждевременного прогнозирования паводковых процессов на территории г. Кунгур на примере 2016 г. // Горное эхо. Вест. Горного ин-та УрО РАН. Пермь, 2016. №3(64). С. 24-30.
6. *Казанцева А.С.* Изотопно-геохимические особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья: дис. ... канд. геол-мин. наук. Москва, 2022. 151 с.
7. *Казанцева А.С.* Изотопная и геохимическая характеристика вод р. Сылва // Горное эхо. Пермь, 2020. №1(78). С. 3-7. DOI:10.7242/echo.2020.1.1
8. *Казанцева А.С., Красиков А.В., Осетрова О.И.* Сопоставление и анализ факторов, обеспечивших высокий паводок в 2016 году в городе Кунгур // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. ст. юбилейной конф., посвящ. 100-летию Перм. ун-та 85-летию геол. ф-та. Пермь, 2016. С. 149-152.
9. *Катаев В. Н., Кадебская О.И.* Геология и карст города Кунгура: монография. Пермь, 2010. 236 с.

О.Ю. Калашникова¹, Дж.Б. Ниязов², В.А. Почечун^{3,4}
o.kalashnikova@caiag.kg, viktoriyapochechun@mail.ru

¹Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ),
г. Бишкек, Кыргызская Республика

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии
Академии Наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан

³Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

⁴Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Дана оценка возможности применения данных снежного покрова снимков MODIS для составления методик прогноза водности рек на месяцы вегетации на горных реках Тянь-Шаня и Памира. Авторами представлена эффективность разработанных методик для рек снегово-ледникового питания на примере речных бассейнов Нарын, Кара-Дарья, Гунт и Кафирниган.

Ключевые слова: расход воды, снежный покров, гидрологический прогноз, космическая съемка, Центральная Азия.

O.Yu. Kalashnikova¹, J.B. Niyazov², V.A. Pochechun^{3,4}
o.kalashnikova@caiag.kg, viktoriyapochechun@mail.ru

¹Central-Asian Institute for Applied Geosciences (CAIAG), Bishkek, Kyrgyz Republic

²Institute of Water Issues, Hydropower and Ecology
of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan

³Institute of Economics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

⁴Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

PREVENTION OF DANGEROUS HYDROLOGICAL AND GEOECOLOGICAL PHENOMENA IN WATER BODIES

The article assesses the possibility of using snow cover data from MODIS images to compile methods for predicting the water content of rivers for the months of vegetation on the mountain rivers of the Tien Shan and Pamir. The authors present the effectiveness of the developed methods for snow-glacial feeding rivers on the example of the Naryn, Kara-Darya, Gunt and Kafirnigan river basins.

Keywords: water flow, snow cover, hydrological forecast, satellite imagery, Central Asia.

Введение

Водные ресурсы рр. Нарын, Кара-Дарья, Кафирниган и Гунт имеют важное гидроэнергетическое и водохозяйственное значение, как для Кыргызстана и Таджикистана, так и для трансграничных государств, находящихся ниже по течению в бассейне Аральского моря. Кроме того, они относятся к селеопасной зоне, где многие населенные пункты, расположенные на конусах выноса боковых притоков, подвергаются значительным разрушениям, нередко с человеческими жертвами [2; 3].

Целью исследования является составление прогностических методик водности рек на месяцы половодья с использованием спутниковых снимков MODIS, которое направлено на предупреждение опасных гидрологических явлений.

Материалы и методы

Авторы использовали суточные данные о площади снежного покрова снимков MODIS, обработанные в программе MODSNOW за период наблюдений с 2000 по 2019 гг. Средние месячные расходы воды за тот же период наблюдений были получены по данным гидропостов наблюдательной сети Кыргызгидромета и Таджгидромета. Сведения об исследуемых речных бассейнах представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные сведения об исследуемых речных бассейнах

№ п/п	Название гидропоста	Средний годовой расход воды, м ³ /с	Площадь водосбора до пункта наблюдений тыс. км ²	Длина реки до пункта наблюдений, км	Средняя высота водосбора до пункта наблюдений, м над уровнем моря
1	р. Нарын-с. Уч-Терек	347	47.0	560	2890
2	р. Тар – с. Чалма (приток р. Кара-Дарья)	49.2	3.84	147	2810
3	р. Кара-Кулджа – с. Первомай (приток р. Кара-Дарья)	26.1	0.97	66	2991
4	р. Кафирниган – с. Тартки	191	12.3	387	2505
5	р. Гунт – г. Хорог	104	14.9	296	4170

Основным источником питания горных рек Центральной Азии являются запасы воды, накопленные за холодный период в виде снега. Информацию о продолжительности залегания и площади снежного покрова можно получить со снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW, позволяющей удалять облачный покров [3; 4].

Для расчета продолжительности залегания снежного покрова использовался индекс снежного покрова [1]:

$$SCI_t = \sum_{n=1}^{n=365/366} SCA_i$$

где SCI_t – индекс снежного покрова (Snow Cover Index) за год t ; SCA_i – площадь снежного покрова (Snow Cover Area) по данным снимков MODIS для дней n , начиная с 1 сентября по 31 августа предстоящего года.

Оценка качества полученных методик производилась по наставлению службы прогнозов, где полученные коэффициенты корреляции $R = 0,86-0,60$ показывают удовлетворительное, R выше $0,87$ – хорошее качество методики [6].

Результаты исследования

Для расчета индекса снежного покрова (SCI) использовались суточные данные о площади снежного покрова речного бассейна на высотных зонах через 500 м, которые суммировались, начиная с 1 сентября по 30 (31) число предшествующего месяца. Качество методики, полученной для прогноза стока рек на месяцы половодья, было в критериях хорошее и удовлетворительное. Заблаговременность гидрологических прогнозов составляет 30 (31) дней. Уравнения для расчета водности исследуемых рек представлены в таблице 2.

Таблица 2

Уравнения линейной зависимости средних месячных расходов воды с индексом снежного покрова SCI по высотным зонам через 500 м

Месяцы	Высотная зона	Уравнения	Коэффициент корреляции (R)
Для реки Нарын (створ с.Уч-Терек)*			
Июнь	3500-4000	$843SCI_{9.5} + 394$	0,79
Июль	3500-4000	$615SCI_{9.6} + 389$	0,79
Август	4000-4500	$368SCI_{9.7} + 318$	0,76
Сентябрь	4000-4500	$163SCI_{9.8} + 241$	0,80
Для реки Тар*			
Июнь	4000-4500	$208SCI_{9.5} + 44.3$	0,69
Июль	4000-4500	$144SCI_{9.6} + 35.3$	0,83
Август	4000-4500	$87.1SCI_{9.7} + 21.6$	0,72
Сентябрь	4000-4500	$46.4SCI_{9.8} + 17.5$	0,77
Для реки Кара-Кулджа			
Апрель	1500-2000	$29.9SCI_{9.3} + 9.49$	0,67
Май	2000-2500	$66.2SCI_{9.4} + 23.6$	0,62
Июнь	2500-3000	$74.4SCI_{9.5} + 29.5$	0,62
Июль	3000-3500	$70.2SCI_{9.6} + 15.4$	0,83
Август	4000-4500	$46.9SCI_{9.7} + 4.82$	0,77
Сентябрь	4000-4500	$13.8SCI_{9.8} + 9.15$	0,82
Для реки Кафирниган			
Апрель	1936-2436	$245SCI_{9.3} + 207$	0,67
Май	2936-3436	$245SCI_{9.4} + 327$	0,77
Июнь	2936-3436	$305SCI_{9.5} + 247$	0,82
Июль	2936-3436	$286SCI_{9.6} + 108$	0,91
Август	2936-3436	$118SCI_{9.7} + 58,4$	0,87
Сентябрь	2936-3436	$36,6SCI_{9.8} + 49,1$	0,74
Для реки Гунт*			
Июнь	4071-4571	$186SCI_{9.5} + 125$	0,71
Июль	4571-5071	$289SCI_{9.6} + 123$	0,87
Август	3071-3571	$99,9SCI_{9.7} + 147$	0,57
Сентябрь	3071-3571	$52,2SCI_{9.8} + 76,0$	0,78

Примечание: * – зависимости индекса SCI со стоком этих рек за месяцы апрель и май не показали статистическую значимость.

Заключение

1. В статье представлены прогностические уравнения с использованием снимков MODIS, имеющие критерии качества хорошее и удовлетворительное, которые можно использовать в оперативном прогнозировании водности рек Нарын, Кара-Дарья, Гунт и Кафирниган.

2. Данная методика может использоваться при разработке прогностических методик для различных речных бассейнов Тянь-Шаня и Памира.

3. Снимки MODIS решают проблему с получением информации о запасах снега в высокогорных и труднодоступных районах Тянь-Шаня и Памира, необходимую при составлении надежных гидрологических прогнозов.

4. Программа MODSNOW является эффективным инструментом для оперативного гидрологического прогнозирования и активно внедряется в систему национальных гидрометслужб Центральной Азии.

Авторы выражают благодарность специалистам Кыргызгидромета и Таджикигидромета за предоставленные фондовые данные. Это исследование было поддержано Центрально-Азиатским водным проектом (CAWA) (www.cawa-project.net; Грант АА7090002), финансируемым Федеральным министерством иностранных дел Германии в рамках 343-й Немецкой водной инициативы для Центральной Азии («Берлинский процесс»).

Библиографический список

1. Гафуров А.А., Нурбацина А.А., Калашикова О.Ю. Оценка водных ресурсов в Центральной Азии методами дистанционного зондирования. Новые методы и результаты исследования ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири, под руководством Сычева В. и Миллера Л., 2018. Т.2. С. 405-409.

2. Лим В.В. Инженерно-геологическая карта условий развития экзогенных геологических процессов в Таджикской ССР масштаба 1:500000. Фонды главного департамента Геологии при Правительстве Республики Таджикистан. 1984.

3. Перов В.Ф. Исследование селей. М.: МГУ. 2012. 271 с.

4. Hall D.K. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2016.

5. Gafurov A., Lüdtke S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schöne, T., Schmidt, S., Kalashnikova, O., Merz, B. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. Environmental Earth Science, 2016, №75(14), p. 1078 (doi: 10.1007/s12665-016-5869-x).

6. Наставление по службе прогнозов, Л.: Гидрометеиздат, 1967.

В.Г. Калинин, К.Д. Микова
vgkalinin@gmail.com, mikovak@yandex.ru
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

О ЗАВИСИМОСТЯХ СРОКОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ ОТ ДАТ ПЕРЕХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ЧЕРЕЗ 3°C И 2°C НА КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Выполнена проверка зависимостей на независимом материале (1996–2021 гг.), которая показала снижение оправдываемости прогнозов вследствие учащения возвратов тепла в период 1996–2021 гг. При использовании зависимостей за весь период наблюдений (1956–2021 гг.) и за период современных климатических изменений (1996–2021 гг.) выявлено, что для участков гидрологических постов Березники, Чермоз, Добрянка и Камская ГЭС зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 3°C можно использовать в качестве методики прогнозов сроков ледообразования.

Ключевые слова: водохранилище, сроки ледообразования, краткосрочные и среднесрочные прогнозы.

V.G. Kalinin, K.D. Mikova
vgkalinin@gmail.com, mikovak@yandex.ru
Perm State University, Perm, Russia

ABOUT DEPENDENCES OF ICE FORMATION DATES ON THE WATER'S 3°C AND 2°C ISOTHERMS DATES ON THE KAMA RESERVOIR

The dependences have verified on independent data (1996–2021). The results showed a decrease in forecast accuracy due to more frequent heat returns in 1996–2021. For the entire observation period (1956–2021) and for the period of modern climate changes (1996–2021) the dependences on the water's 3°C isotherm dates can be used as a forecast method of the ice formation dates for the Berezniki, Chermoz, Dobryanka and Kamskaya HPP gauge stations.

Keywords: reservoir, dates of ice formation, short and mid-term forecasts.

Введение

Прогнозы характеристик ледового режима являются важной составляющей бесперебойной работы многих водопользователей и в первую очередь судоходства. Согласно [3; 4] для составления краткосрочных прогнозов сроков появления ледяных образований применяются как детерминированные методы [5], так и методы, основаны на использовании физико-статистических зависимостей сроков появления ледяных образований от определяющих факторов.

Ранее [1] для условий камских водохранилищ были получены эмпирические зависимости за репрезентативный 40-летний период (1956–1995 гг.) для краткосрочного и среднесрочного прогнозов их замерзания и вскрытия. За последние 26 лет эти зависимости не проверялись и не уточнялись. В связи с этим

возникает вопрос о возможности их применения в условиях современных климатических изменений.

Цель настоящей работы – анализ и оценка эмпирических зависимостей сроков появления устойчивых ледяных образований от дат устойчивого перехода среднесуточной температуры воды через 3°C и 2°C на Камском водохранилище. Задачи: 1) проверка полученных ранее зависимостей на независимом материале (1996–2021 гг.); 2) анализ применимости всего периода наблюдений (1956–2021 гг.) для построения прогностических зависимостей с оценкой их оправдываемости; 3) исследование возможности использования для целей прогноза данных только за период современных климатических изменений (1996–2021 гг.).

Материалы и методы исследования

Исходными данными для выполнения исследования послужили многолетние ряды первичных наблюдений за температурой воды и появлением льда на Камском водохранилище на семи гидрологических постах (г/п) Росгидромета за весь период существования водохранилища (1956–2021 гг.). В качестве исследуемых характеристик использованы даты устойчивого перехода температуры воды через 3°C и 2°C в сторону понижения, а также сроки появления устойчивых ледяных образований в осенний период. Методика определения этих сроков детально описана в [1]. Для выполнения расчетов и построения зависимостей последние были пересчитаны в натуральные числа от 1 сентября.

Оценка полученных зависимостей выполнена в соответствии с [3]: 1) по средней квадратичной погрешности проверочных прогнозов \bar{S} в зависимости от допустимой погрешности $\pm\delta_{\text{доп}}$. При этом допустимая погрешность краткосрочных прогнозов дат наступления явлений принималась в зависимости от средней заблаговременности прогноза; 2) по величине обеспеченности допустимой погрешности P , вычисленной как вероятность непревышения допустимой погрешности случаев, в которых ошибки проверочных прогнозов были меньше допустимой, к общему числу проверочных прогнозов. Зависимости, установленные без учёта резко отклонившихся точек, при длине рядов наблюдений более 25 лет считались применимыми при $P > 75\%$.

Анализ результатов

1) Проверка полученных ранее зависимостей на независимом материале (1996–2021 гг.).

В таблице представлены характеристики зависимостей, полученных за репрезентативный 40-летний период (1956–1995 гг.). Коэффициенты корреляции этих зависимостей изменяются в пределах $0,62 \div 0,88$, заблаговременность 7–12 сут (графы 2, 3). В тоже время, если говорить об использовании их в качестве методики прогнозов сроков ледообразования по величине обеспеченности допустимой погрешности (P_1), то этому критерию соответствуют только зависимости по трем г/п: Березники, Чермоз и КамГЭС (таблица, графа 5). По остальным г/п зависимости могут быть использованы для выпуска консультаций.

Проверка на независимом материале (1996–2021 гг.) показала, что величина обеспеченности допустимой погрешности (P_2) по всем г/п снизилась в среднем на 18% (таблица, графа 6). Низкая оправдываемость прогнозов сроков ледообразования обусловлена увеличением частоты возврата тепла в осенний период. В результате проведенных ранее исследований [2] выявлено, что для условий Камского водохранилища начало выраженных климатических изменений приходится на 1996 г. Так, за репрезентативный 40-летний период (1956–1995 гг.) было 8 лет с возвратами тепла, что составило 20% от общего числа случаев. В последующий 26-летний период (1996–2021 гг.) возвраты тепла наблюдались чаще – в 31% случаев.

Анализ аналогичных зависимостей с датой перехода температуры воды через 2°C (таблица) показал, что теснота этих связей выше ($r = 0,80 \div 0,93$) за счет уменьшения заблаговременности (3–8 сут). Однако при уменьшении заблаговременности снижается и допустимая ошибка прогноза. Это приводит к уменьшению величины $P_1 \leq 71\%$, что не позволяет использовать зависимости в качестве методики прогнозов сроков ледообразования. Для независимого периода (1996–2021 гг.) обеспеченность допустимой погрешности (P_2) также существенно снизилась по всем г/п в среднем на 19% по сравнению с репрезентативным периодом.

2) Анализ применимости всего периода наблюдений (1956–2021 гг.) для построения прогностических зависимостей с оценкой их оправдываемости.

Поскольку зависимости, полученные за репрезентативный период, показали низкую оправдываемость на независимом материале, то на следующем этапе выполнено исследование зависимостей за весь период наблюдений 1956–2021 гг. Следует отметить, что теснота зависимостей сроков ледообразования от даты устойчивого перехода температуры воды через 3°C , а также заблаговременность прогноза практически не изменились. При этом зависимости также только по трем г/п: Березники, Чермоз и КамГЭС имеют качество прогностических и могут быть использованы для выпуска краткосрочных прогнозов сроков ледообразования (таблица, графа 10).

Зависимости с датой перехода температуры воды через 2°C за период 1956–2021 гг. по сравнению с периодом 1956–1995 гг. характеризуются более низкими (в среднем на 0,04) коэффициентами корреляции (таблица, графа 7). Величина P_1 у всех зависимостей $\leq 66\%$. Следовательно, ни одна из зависимостей не может быть использована для составления прогнозов.

3) Исследование возможности использования для целей прогноза данных за период современных климатических изменений (1996–2021 гг.).

Ранее нами [2] выявлена неоднородность рядов наблюдений с моментом разладки в 1996 г. Поэтому были построены физико-статистические зависимости за период 1996–2021 гг. Результаты показали, что для зависимостей с датой перехода температуры воды через 3°C теснота связи уменьшилась ($r = 0,57 \div 0,78$) по сравнению с зависимостями за весь период наблюдений ($r = 0,69 \div 0,81$). При этом только две зависимости (г/п Березники и Добрянка) имеют $P_1 \geq 75\%$ и могут быть использованы для выпуска прогнозов.

Характеристики зависимостей для прогноза сроков появления устойчивых ледяных образований от дат перехода температуры воды через 3°C и 2°C

Гидрологический пост	1956–1995 гг.					1956–2021 гг.					1996–2021 гг.				
	r	Δ , сут	\bar{S}	P_1 , %	P_2 , %	r	Δ , сут	\bar{S}	P_1 , %	P_2 , %	r	Δ , сут	\bar{S}	P_1 , %	P_2 , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Зависимости с датами перехода температуры воды через 3°C															
Березники	0,62	12	6,5	78	58	0,69	12	6,1	76	0,78	11	5,7	86		
Усть-Пожва	0,73	9	5,7	54	42	0,74	9	5,7	62	0,70	10	5,6	67		
Майкор	0,72	9	5,4	59	42	0,73	10	5,9	56	0,74	12	5,8	64		
Чермоз	0,88	10	4,0	86	42	0,79	11	5,5	80	0,60	13	6,4	68		
Добрянка	0,81	7	5,5	49	38	0,81	8	6,1	63	0,74	10	6,0	88		
КамГЭС	0,85	10	4,5	78	64	0,81	10	5,0	77	0,65	9	5,8	67		
Троица	0,76	8	5,6	53	46	0,75	9	6,0	60	0,57	9	6,5	55		
Зависимости с датами перехода температуры воды через 2°C															
Березники	0,80	8	4,5	71	58	0,80	8	5,3	66	0,74	8	6,4	48		
Усть-Пожва	0,92	4	3,4	63	23	0,84	6	4,9	47	0,74	7	5,8	50		
Майкор	0,93	4	3,0	54	31	0,81	6	5,1	52	0,74	8	5,7	45		
Чермоз	0,88	7	4,1	71	50	0,84	8	4,7	60	0,71	9	5,8	67		
Добрянка	0,92	3	3,7	49	36	0,87	4	5,2	29	0,80	7	5,3	38		
КамГЭС	0,86	6	4,4	55	44	0,86	6	4,8	54	0,82	6	5,6	44		
Троица	0,86	5	4,3	48	33	0,86	4	4,6	47	0,74	4	5,3	45		

Примечание: r – коэффициент парной корреляции; Δ – заблаговременность зависимости; \bar{S} – средняя квадратичная погрешность проверочных прогнозов; P_1 – обеспеченность допустимой погрешности на зависимом материале; P_2 – обеспеченность допустимой погрешности на независимом материале; жирным шрифтом выделены значения обеспеченности допустимой погрешности для г/п, у которых зависимости имеют качество прогностических.

Теснота связи у зависимостей с датой перехода температуры воды через 2°C также стала ниже, при этом заблаговременность не изменилась (таблица, графы 11, 12). Но, поскольку P_I у всех зависимостей $\leq 75\%$ (таблица, графа 14), то ни одна из них не имеет качество прогностической.

Выводы:

1. Проверка на независимом материале (1996–2021 гг.) показала, что рассчитанные сроки появления устойчивых ледяных образований на Камском водохранилище имеют ошибку больше допустимой. Низкая оправдываемость проверочных прогнозов обусловлена увеличением частоты возврата тепла в период выраженных климатических изменений.

2. Использование всего имеющегося периода наблюдений 1956–2021 гг. не привело к заметному уточнению исследуемых зависимостей, в связи с неоднородностью периода наблюдений. Однако по г/п Березники, Чермоз и Камская ГЭС как для периода 1956–1995 гг., так и для периода 1956–2021 гг. величина $P_I \geq 75\%$. Следовательно, полученные зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 3°C можно использовать в качестве методики прогнозов сроков ледообразования.

3. Теснота зависимостей, построенных за период климатических изменений 1996–2021 гг., снижена, в тоже время для г/п Березники и Добрянка зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 3°C можно использовать в качестве методики прогнозов сроков ледообразования. Зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 2°C пригодны лишь для выпуска консультаций.

Таким образом, происходящие климатические изменения оказывают существенное влияние на оправдываемость краткосрочных прогнозов замерзания водохранилищ.

Библиографический список

1. Калинин В.Г., Микова К.Д. О зависимостях сроков наступления ледовых явлений и критериях их оценки (на примере камских водохранилищ) // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 96–100.

2. Калинин В.Г., Микова К.Д., Чичагов В.В. Влияние современных климатических изменений на сроки ледообразования на Камском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов 2021. С. 94-99.

3. Наставление по службе прогнозов. Разд. III. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 362 с.

4. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 168 с.

5. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах: Расчеты для целей прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1960.

В.Г. Калинин, А.А. Шайдулина
vgkalinin@gmail.com, adelinash89@mail.ru

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

О ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТОВ СНЕГОТАЯНИЯ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Проведен расчет запаса воды в снежном покрове в весенний период с использованием разработанной геоинформационной модели снеготаяния на водосборе г/п Кама-Бондюг. Верификация результатов моделирования снегозапаса с данными метеорологических станций выполнена по рассчитанным значениям относительной погрешности моделирования в годы, существенно различающихся по метеорологическим условиям. Выявлено, что расчетные и фактические значения снегозапаса хорошо согласуются между собой (коэффициенты корреляции по разным метеостанциям изменяются от 0,81 до 0,97), а относительная погрешность моделирования составляет в среднем 17,8%.

Ключевые слова: снеготаяние, ГИС-технологии, моделирование снегозапаса

V.G. Kalinin, A.A. Shaydulina
vgkalinin@gmail.com, adelinash89@mail.ru

Perm State University, Perm, Russia

VERIFICATION OF SNOW MELT CALCULATIONS TO OBSERVATION DATA OF THE METEOROLOGICAL STATIONS

The calculation of the snow cover water reserve in spring using the snowmelt geoinformation model developed by authors for the Kama-Bondyug catchment area has been carried out. Verification of the results of snow cover modeling to the data of meteorological stations has been calculated. The criterion for the accuracy of the calculation were modeling errors in the years with different meteorological conditions. It was found that the calculated and measured values of the snow cover were in good agreement with each other (correlation coefficients for different weather stations change from 0.81 to 0.97) and the average modeling error was 17.8%.

Keywords: snow melting, GIS technologies, modeling the spatial distribution of snow cover.

Введение

Методы расчета снеготаяния для прогноза весеннего половодья разрабатываются с середины XX в. [1-2; 5-8; 12-13] и лежат в основе большинства моделей формирования стока [3-4; 9-11]. Расчеты величины талого стока и времени его поступления в речную сеть крайне важны для своевременного принятия мер по предотвращению негативных последствий катастрофических явлений на реках, связанных с затоплением территорий. Это особенно актуально для Пермского края, где насчитывается более 29000 рек, на берегах которых расположено множество населенных пунктов. Реки исследуемой территории имеют преимущественно снеговое питание, и доля талого стока составляет 55-70% от годового.

Материалы и методы исследования

При моделировании снеготаяния за основу принят метод температурных коэффициентов В.Д. Комарова [6], адаптированный Н.Д. Лебедевой для бассейна Камского водохранилища [8] и усовершенствованный с применением ГИС-технологий. Подробно этот метод рассмотрен в [3, 4]. Исходными метеорологическими данными являются максимальный снегозапас и дата его наступления для поля и леса, температура воздуха и осадки в период таяния снежного покрова. Информация о рельефе и сведения о залесенности территории приняты по глобальной модели *GEBCO_2022 Grid* [15] и по карте растительного покрова и основных типов ландшафтов *Global Land Cover* [14]. Применение в расчетах глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) высокого пространственного разрешения и ГИС-технологий дают возможность посуточно оценить пространственно-временную динамику снежного покрова и запаса воды в нем по разработанной геоинформационной модели [3-4] в годы с разными погодными условиями весеннего периода.

Расчёты выполнены для 2004, 2010 и 2015 гг., которые существенно отличаются по метеорологическим условиям снеготаяния. Так, 2004 г. характеризовался самым холодным апрелем в последние десятилетия, когда температура воздуха была на 4–5°C ниже нормы, а снеготаяние началось в последней декаде месяца. Раннее начало снеготаяния (конец марта) пришлось на 2010 г., весной которого наблюдалось преобладание антициклонального типа погоды, а резкое повышение температуры воздуха до +20°C в третьей декаде апреля способствовало интенсивному сходу снежного покрова. В 2015 г. снеготаяние началось в середине первой декады апреля и было затяжным. Это связано с продолжительным периодом низкой температуры воздуха (от 0°C до +5°C) и большим количеством осадков. По данным метеостанции (МС) Гайны в апреле выпало 40 мм, что превысило норму на 10%.

Верификация расчетных значений снегозапаса с данными метеорологических станций выполнена на примере водосбора г/п Кама-Бондюг, относящегося к равнинной северо-западной части водосбора Камского водохранилища (рис. 1). Его площадь составляет 46603 км², средняя высота 192 м БС, а залесенность – 94%.

Анализ результатов

Выполнены расчеты запаса воды в снежном покрове в точках МС для водосбора г/п Кама-Бондюг за годы с разными метеорологическими условиями и продолжительностью периода снеготаяния. Вычислена относительная погрешность моделирования снегозапаса δ , рассчитанная по формуле:

$$\delta = \frac{|\overline{S_m} - \overline{S_f}|}{\overline{S_f}} 100\%,$$

где $\overline{S_m}$ – среднее модельное значение снегозапаса, $\overline{S_f}$ – среднее фактическое значение снегозапаса.

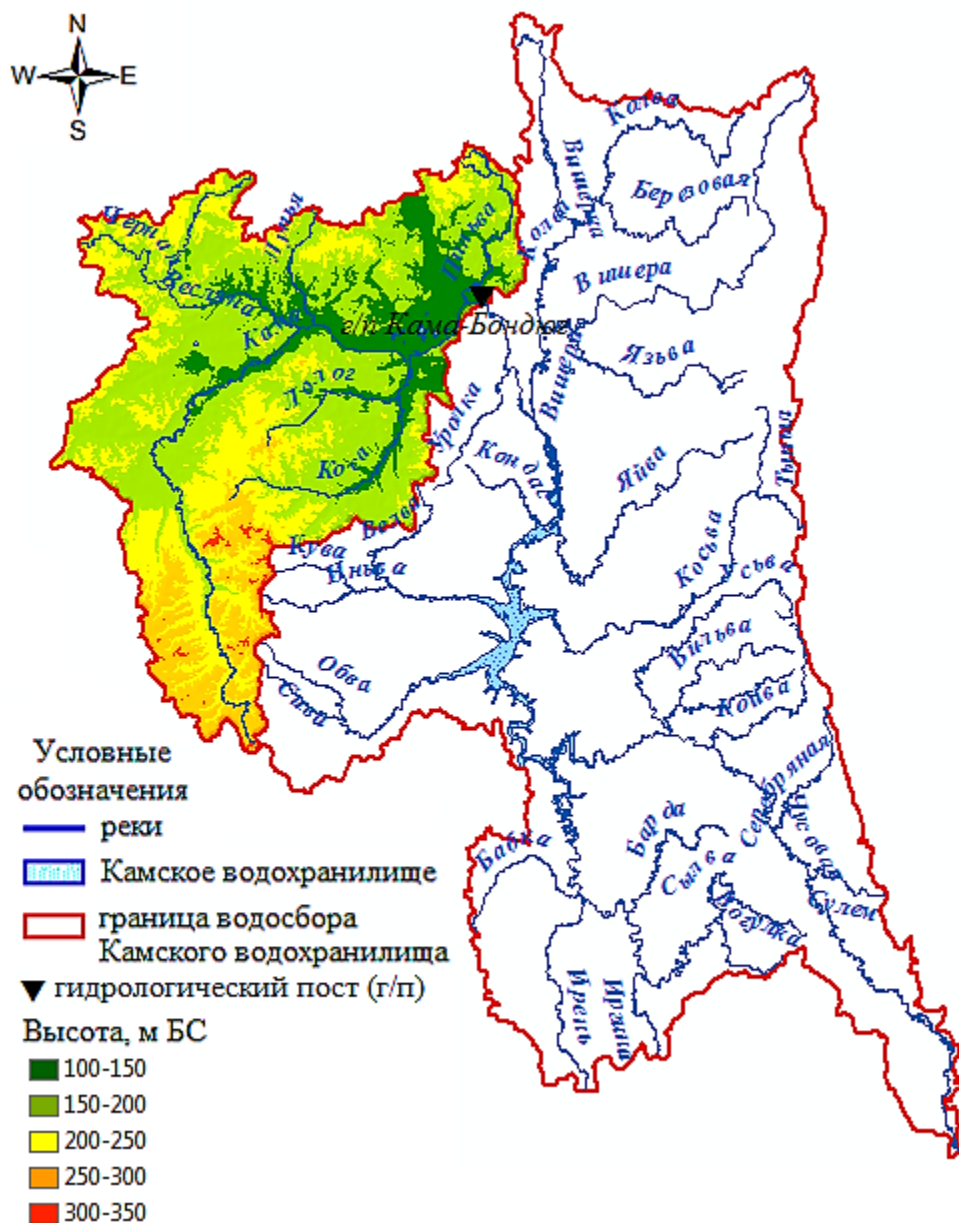


Рис. 1. Положение водосбора г/п Кама-Бондюг в пределах бассейна Камского водохранилища

Результаты расчетов относительной погрешности моделирования δ показали, что в 2004 г. ее средняя величина составила 11,1%, в 2010 г. – 26,9%, в 2015 г. – 15,3%.

Изменение фактических и расчетных данных снегозапаса в течение периода снеготаяния представлено на рисунке 2.

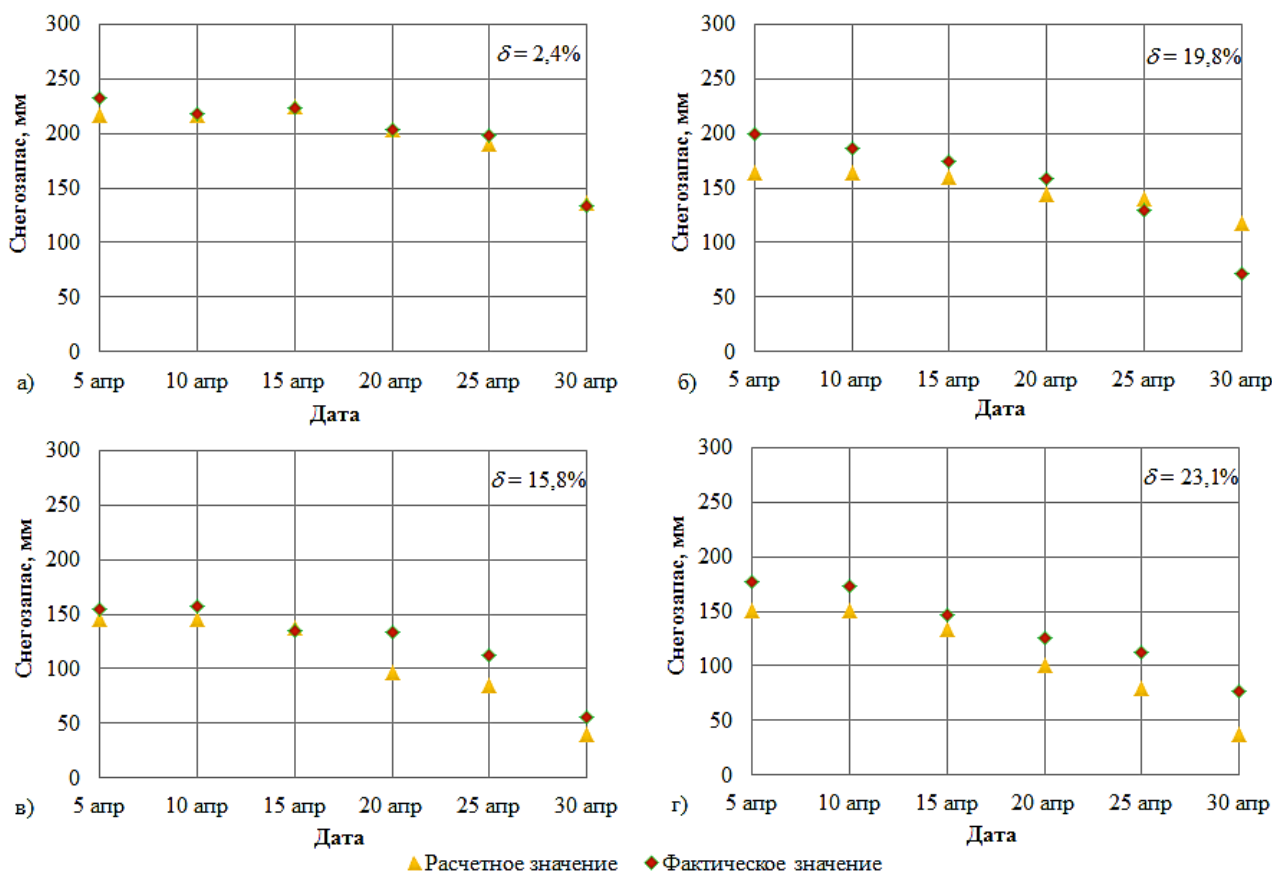


Рис. 2. Расчетные и фактические значения снеговзапаса за 2015 г. в точках МС:

а – Усть-Черная; б – Гайны; в – Кочево; г – Коса

Как видно из рисунка 2, расчетные и фактические значения снеговзапаса хорошо согласуются между собой. Коэффициенты парной линейной корреляции между модельными и фактическими значениями снеговзапаса по метеостанциям за 2004, 2010 и 2015 гг. составили: Усть-Черная и Гайны – 0,81; Кочево – 0,93; Коса – 0,97.

Выводы:

1. Выполненные расчеты запасов воды в снежном покрове в годы, существенно различающиеся по метеорологическим условиям, показали, что разработанная геоинформационная модель адекватно отражает пространственно-временные изменения снежного покрова в период снеготаяния. Относительная погрешность моделирования составила в среднем 17,8%.

2. Между расчетными и фактическими значениями снеговзапаса отмечена хорошая сходимость. Коэффициенты корреляции по разным метеостанциям изменяются в пределах 0,81÷0,97.

Библиографический список

1. *Галахов В.П.* Условия формирования и расчет максимальных снеговзапасов в горах: (По результатам исслед. на Алтае). Новосибирск: Наука, 2003. 104 с.

2. Делеур М.С., Румянцев В.А. Опыт применения корреляционного анализа для описания временной изменчивости снеготаяния в бассейне р.Дона // Труды ГШ, 1974. Вып.214. С. 54–60.
3. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Моделирование пространственного распределения снежного покрова в период весеннего снеготаяния // Метеорология и гидрология, 2019. № 2. С. 74–85.
4. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лед и снег. 2022. 62 (1): С. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673422010116>.
5. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 1. С. 37–46.
6. Комаров В.Д. О процессах формирования половодья на малой реке и предвычисления его гидрографа // Тр. ЦИП. Вып. 6 (33). 1947. С. 3–41.
7. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 348 с.
8. Лебедева Н.Д. Расчет снеготаяния и метод краткосрочного прогноза даты наступления максимального уровня половодья на р. Кама // Тр. ЦИП, вып. 94. М.: Гидрометеиздат, 1959. С. 15–33.
9. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: изд. РАН, 2018. 300 с.
10. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды. Лёд и Снег. 2019. 59(4). С. 494–508.
11. Шихов А.Н., Чурюлин Е.В., Абдуллин Р.К. Оценка достоверности расчета запасов воды в снежном покрове с применением данных глобальных моделей прогноза погоды и модели снежного покрова SnoWE (на примере бассейна р. Камы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. 66(1). doi: 10.21638/spbu07.2021.110.
12. Шутов В.А. Расчет таяния снежного покрова // Метеорология и гидрология. 1993. № 4. С. 20–28.
13. Ясинский С.В., Кашутина Е.А. Пространственные и временные закономерности изменения весеннего склонового и речного стока на Русской равнине // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 71–81.
14. [Электронный ресурс] URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2016bartalev.pdf> Дата обращения 06.07.2022.
15. [Электронный ресурс] URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ Дата обращения 06.07.2022.

И.Н. Каргаполова, И.Г. Жуков, i_kargapolova@mail.ru
ООО «ЭКОНГинжиниринг», г. Москва, Россия

РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛОЖЕ ВОДОХРАНИЛИЩ (НА ПРИМЕРЕ КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

В статье рассмотрен участок верхнего бьефа водохранилища, где на фоне общей аккумуляции зафиксированы размывы дна. Установлено, что размываемые участки приходятся на склоны затопленного русла р.Камы, а их формирование связано с продолжением русловых процессов в условиях заполненного водохранилища

Ключевые слова: верхний бьеф водохранилища, Куйбышевское водохранилище, река Кама, русловые процессы, размывы берегов, рельеф русла.

I.N. Kargapolova, I.G. Zhukov, i_kargapolova@mail.ru
ECONGengineering LLC, Moscow, Russia

RIVER CHANNEL IN THE BED OF RESERVOIR (CASE OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR)

The paper investigates the upper part of Kuibyshev reservoir. We fixed a bed erosion in contradiction to general accumulation. The eroded areas concentrate on the banks of the former Kama River channel inundated by the reservoir. We associate it with the continuation of river channel migration at the bed of filled reservoir.

Keywords: upper part of reservoir, Kuibyshev reservoir, Kama River, river channel, bank erosion, riverbed topography.

Введение

Известно, что основными процессами, изменяющими рельеф ложа водохранилищ, являются переработка берегов с одной стороны и аккумуляция наносов на дне – с другой [1-3]. В то же время, на некоторых участках на фоне общей аккумуляции могут наблюдаться размывы, обусловленные продолжением деформаций затопленных русел рек.

Сотни линейных инженерных сооружений пересекают водохранилища в верхних бьефах. При их проектировании основное внимание уделяется, как правило, переработке берегов, в то время как вероятное изменение рельефа в пределах остальной протяженной подводной части ложа зачастую не учитывается. Соответственно, в процессе эксплуатации нередко возникают проблемы, как, например, зафиксированные нами размывы трубопроводов [4]. Обследование причин размыва трубопроводов производилось ООО «ЭКОНГинжиниринг» в рамках комплекса работ по мониторингу русловых процессов.

Рассматриваемый участок Куйбышевского водохранилища расположен между пос. Лапшего и Рыбная Слобода, на расстоянии около 300 км от плотины, в пределах зоны постоянного подпора, на относительно узком участке долины реки (рис. 1). Плотина Жигулевской ГЭС построена в 1955-1957 гг. на р.Волге.

Водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока; подпор распространяется по р. Волга до Чебоксарского гидроузла и по р. Кама до Нижнекамского гидроузла [5].



Рис.1 Схема расположения участка обследования на Куйбышевском водохранилище.

Участок обследования выделен красным прямоугольником.

Коридор трубопроводов выделен красной линией

На участке изысканий на р.Каме при НПУ 53 м абс, максимальный уровень воды в половодье 1%-ной обеспеченности составляет 55,5 м, минимальный навигационный уровень 49,0 м, зимний при УМО 45,8 м абс. Как правило, в многоводные годы уровень стоит около отметки НПУ, в другие годы наблюдается снижение уровня на 1,5-3,0 м. В современных условиях во время весенних половодий вероятностью превышения 1-10%-ной обеспеченности максимальные расходы воды на участке изысканий находятся в диапазоне 25000-33000 м³/с, минимальные летне-осенней межени составляют около 900-950 м³/с, минимальные зимние порядка 500 м³/с. В среднем в летний период расходы воды на данном участке изменяются от 1500 до 4000 м³/с, в зимний период – от 600 до 3500 м³/с.

По составу донных наносов на участке преобладают илистые с диаметром фракций 0,05-0,01 мм и среднезернистый песок с размером фракций 0,3-0,5 мм. Песок распространяется вдоль затопленного русла, ил покрывает остальную территорию ложа.

Материалы и методы исследования

Для определения горизонтальных и вертикальных деформаций в пределах ложа водохранилища за многолетний период были сопоставлены картографические материалы прошлых лет, в том числе лоцманские карты 1913 и 1945 гг., с современными съемками рельефа ложа, выполненными в 2008 и 2022 гг.

Сопоставление повторных съемок позволило оценить направление и скорость русловых процессов за последние годы, а сопоставление с более ранними архивными материалами – выявить их многолетние тенденции.

Анализ результатов

По результатам сопоставления положения русла Камы за 1913, 1945 и 2022 гг. получена схема горизонтальных деформаций, представленная на рисунке 2.

На рисунке 3 приведено сопоставление поперечного сечения ложа водохранилища вдоль трубопровода – с 1945 по 2008 гг. Из рисунков заметна динамика правого и левого рукавов затопленного русла Камы.



Рис.2. Схема горизонтальных деформаций русла Камы с 1913 г. по настоящее время

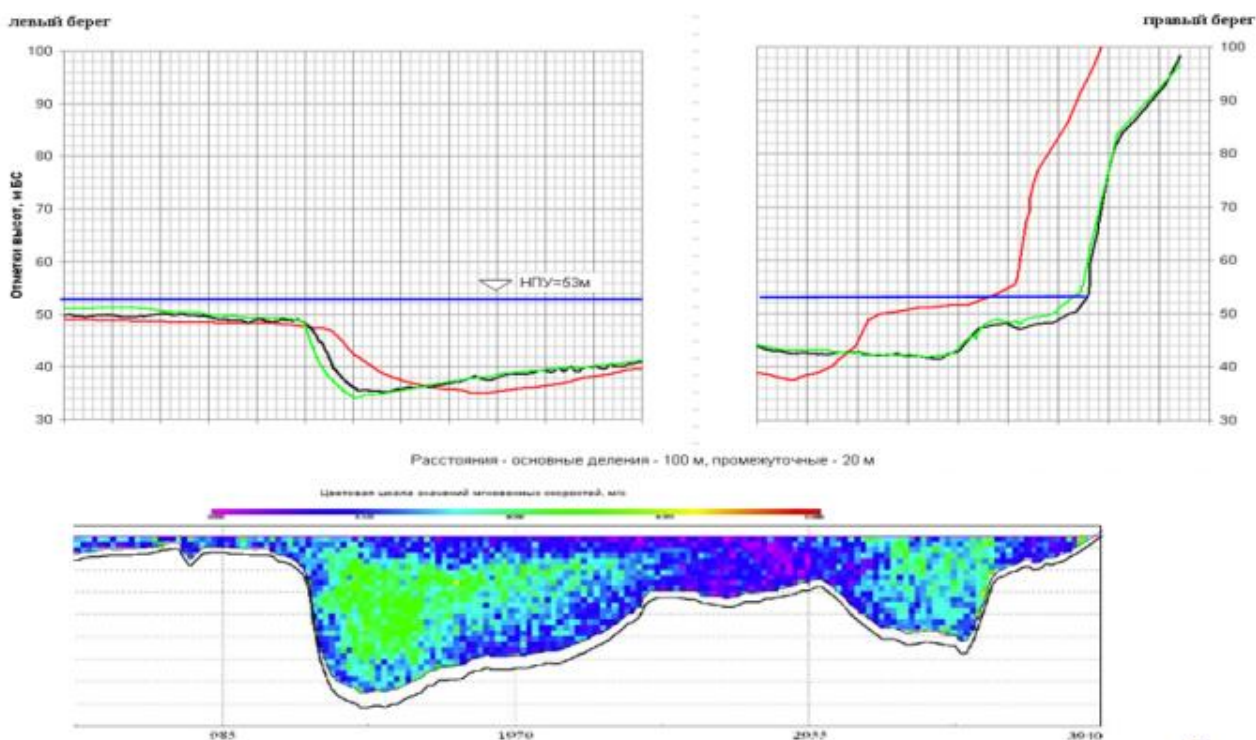


Рис. 3. Поперечное сечение ложа водохранилища вдоль трубопровода:
вверху – плановые деформации за 1945-2008 гг.

(красная линия – 1945 г, черная – 2008 г.), внизу – диаграмма распределения скоростей течения в межень, иллюстрирующая максимальные скорости течения воды в пределах рукавов затопленного русла реки [4]

Для анализа вертикальных деформаций русла Камы и расчета объема эрозионно-аккумулятивных процессов сопоставлялись планы 1945, 2008 и 2022 гг. На рисунке 4 приведена схема размыва-аккумуляции в пределах ложа: оттенками красного цвета отображен размыв русла, оттенками зеленого – аккумуляция наносов.

Рассматривая фоновые деформации ложа Куйбышевского водохранилища, следует отметить, что поступление наносов осуществляются, главным образом (около 85%), за счет абразии. Фоновая аккумуляция в ложе за период работы гидроузла оценивалась рядом исследователей [6]: средняя скорость определена как 4-5 мм в год, средний слой осадконакопления около 0,3 м.

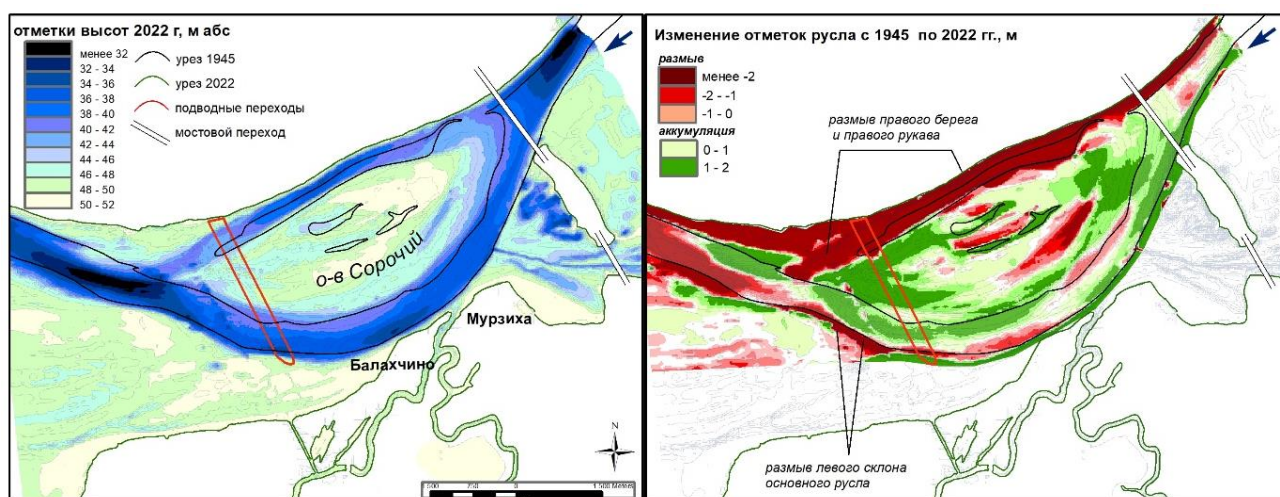


Рис.4. Вертикальные деформации русла р.Камы в пределах ложа Куйбышевского водохранилища на участке мониторинга. Слева – современный рельеф ложа водохранилища, справа – план размыва-аккумуляции

Согласно расчету баланса наносов на исследуемом участке объем размываемого грунта превышает объем аккумуляции в 1,5 раза (рис.4), то есть имеет место обратная относительно фоновой тенденция. Это обусловлено, в первую очередь, сужением долины относительно соседних участков, а также расположением участка вблизи к границе зоны переменного подпора.

Рассматривая проиллюстрированные на рисунках изменения рельефа русла, можно говорить о следующем. До строительства и заполнения водохранилища русло р. Кама представляло собой участок преимущественно меандрирующего русла, развивающегося в пределах широкой двусторонней поймы (рис.2). Большинство излучин имело пойменную протоку через шпору, куда разгружалась часть стока, проходящая по пойме в половодье.

На нашем участке расположена пологая сегментная излучина, которая опиралась вершиной на коренной левый берег у поселков Мурзиха (после строительства водохранилища частично затопленного) и Балахчино. Здесь на протяжении последних столетий располагался судовой ход. Правая протока за островом Сорочим (сейчас-правый рукав), функционировала, главным образом, в половодье, в межень пересыхала (рис. 2, 4).

После строительства гидроузла, затопления русла и поймы Камы наблюдается смена морфодинамического типа затопленного русла, развитие правого рукава. Большая часть стока по-прежнему проходит вдоль основного левого рукава. В то же время доля стока правого рукава возросла, сформировалось разветвление у о-ва Сорочий (рис.4, слева)¹. По данным измерений расходов воды в 2008 г. в межень на долю левого рукава приходится около 50% стока, на долю правого около 28%, над затопленным островом проходит около 22% общего стока.

В результате русловые деформации зафиксированы на двух участках: 1) в левом рукаве, где наблюдается продолжение размыва левого руслового склона; 2) в правом рукаве, где зафиксирован существенный размыв дна русла и правого руслового склона (рис.4).

По сопоставлению материалов были оценены их скорости до и после заполнения водохранилища. В левом рукаве в естественных условиях наблюдался постепенный размыв вогнутого берега при продольном движении излучины. За период с 1913 по 1945 гг. русло левого рукава сместилось на 210-230 м, средняя скорость размыва левого берега составляла 6,5 -7,0 м/год. После заполнения водохранилища интенсивность размыва сократилась на порядок и составила около 0,2-0,3 м/год.

Активизация правого рукава началась со времени строительства водохранилища и была связана как с абразионными процессами на береговом склоне, так и с увеличением доли стока в правой части ложа. На рисунке 4 четко выделяется проиллюстрированный красным цветом размыв практически вдоль всей площади правого рукава, в особенности – вдоль правого берега. На рисунках 3 и 4 хорошо заметно отступление бровки берегового откоса и правого руслового склона. На участке вдоль трубопровода правый берег за период с 1945 г. по настоящее время отступил на 120 м, правый русловой склон правого рукава– почти на 200 м. Средняя скорость отступления правого берега составила 2-3 м/год. В последние годы процесс приостановился, скорость размыва за период 2008-2022 гг. составила около 0,2 м/год.

При строительстве обследуемых трубопроводов, пересекающих ложе водохранилища в 1963-1972 гг., не была учтена динамика затопленного русла. Смещение русловых склонов, понижение отметок дна при развитии правого рукава вызвало понижение отметок дна над трубами на 1,0-1,5 м уже к концу 1990-х гг. В результате были зафиксированы протяженные оголения труб как в левой части левого рукава, так и в правой части правого рукава затопленного русла Камы. С того времени размываемые участки труб требуют периодического ремонта и постоянного мониторинга.

¹ Следует отметить, что к 2002 г. выше по течению был построен протяженный 14 км Камский мост, хорошо заметный на рисунках 2 и 4. Его дамбы сузили поперечное сечение ложа водохранилища, перегородив его левую часть (бывшую пойму р. Камы). Такое сужение потока также могло повлиять на увеличение доли стока в правом рукаве.

Выводы

Русло р. Кама продолжает развиваться в верхнем бьефе Куйбышевского водохранилища после его заполнения. Зафиксировано изменение рельефа ложа резервуара и размывы в пределах затопленного русла реки. На рассматриваемом участке скорость горизонтальных деформаций – развития излучины основного русла – после строительства водохранилища снижалась. В то же время наблюдалась активизация правого рукава с размывом дна и правого берега; в пределах ложа водохранилища сформировалось разветвлённое русло.

Библиографический список

1. *Барышников Н. Б.* Антропогенное воздействие на русловые процессы. Учебное пособие. Л.: ЛГМИ, 1990. 140 с.
2. *Беркович К.М.* Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 163 с.
3. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства Москва. ПНИИИС Госстроя СССР. 1987. 68 с.
4. *Бриллиантов А.Н., Глотко А.Н., Жуков Г.Д., Каргаполова И.Н.* Размывы трубопроводов в верхних бьефах гидроузлов // Гидротехника. 2010 № 2. С. 41–43.
5. Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р.Волга. Мин-во мелиорации и водного хозяйства. М.1983
6. *Законнов В.В., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Законнова А.В., Маланин В.В., Марасов А.А.* Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий. Научно-практический журнал Водное хозяйство России, 2019. № 2.

А.Б. Китаев, М.С. Ярославцева, kitaevab1953@gmail.com

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ И СРАБОТКИ НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ХАРАКТЕРНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ НАСТОЯЩЕГО СТОЛЕТИЯ

Представлены результаты оценки интенсивности наполнения и сработки водных масс в различных частях Нижнекамского водохранилища в характерные по водности годы. Методической основой исследования является подход, предложенный Т.П. Девятковой и А.Б. Китаевым, который следует рассматривать как один из существующих методов оценки обмена вод в разных частях искусственных водоемов. Исследование показало, что показатель интенсивности наполнения и сработки постепенно снижается от верхней части водохранилища к плотине Нижнекамской ГЭС. Кроме того, в многоводный год интервал его изменения внутри года выше, чем в маловодный год. Максимальные значения в годовом аспекте на всех участках водохранилища отмечались в фазу весеннего наполнения водоема, минимальные – в летне-осенний период стабилизации уровня воды.

Ключевые слова: водохранилище, морфометрические участки, обмен вод, сработка и наполнение водоема, многоводный и маловодный год.

A. Kitaev, M. Yaroslavtseva, kitaevab1953@gmail.com

Perm State University, Perm, Russia

ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF FILLING AND DISCHARGE OF THE NIZHNEKAMSK RESERVOIR IN THE YEARS CHARACTERISTIC OF WATER CONTENT OF THE PRESENT CENTURY

The results of the assessment of the intensity of the filling and work of the water masses in various parts of the Nizhnekamsk reservoir in the years characteristic in water are presented. The methodological basis of the study is the approach proposed by T.P. Devyatkova and A.B. Kitaev, which should be considered as one of the existing methods for assessing the exchange of water in different parts of artificial reservoirs. The study showed that the intensity of the filling and cutting gradually decreases from the upper part of the reservoir to the dam of the Nizhnekamsk hydroelectric power station. In addition, in the long year, its interval of its changes inside the year is higher than in the low -water year. The maximum values in the annual aspect in all sections of the reservoir were noted in the phase of the spring filling of the reservoir, the minimum-in the summer-autumn period of stabilization of the water level.

Keywords: reservoir, morphometric areas, water exchange, work and filling of the reservoir, a large -water and low -water year.

Важнейшей характеристикой экологического благополучия экосистемы любого водного объекта является интенсивность водообмена, который представляет собой сочетание ряда динамических процессов, протекающих в водоеме под действием различных внешних сил. В конечном итоге интенсивность водообмена обуславливает скорость постоянных течений, интенсивность турбулентного перемешивания водной массы, влияет на термический и ледовый режим,

гидробиологические и гидрохимические процессы, а также на санитарно-гигиеническое состояние водохранилища.

Актуальность настоящего исследования определяется тем фактом, что Нижнекамское водохранилище в гидрологическом отношении изучено гораздо слабее, чем вышерасположенные водоемы (Камское и Воткинское водохранилища). Кроме того, исследуемый водоем до сих пор не выведен на проектную отметку из-за ряда существующих экологических проблем.

Нижнекамское водохранилище – русловой искусственный водоем равнинного типа. Создано оно в 1978-1979 гг. на территории Татарстана, Башкортостана и Удмуртии. При его образовании были затоплены значительные участки в долинах рр. Белая, Ик, Иж. Площадь водного зеркала водохранилища составляет 1370 км², объем вод – 4,21 м³, максимальная глубина – 20 м, средняя глубина – 3,3 м. Проектная отметка нормального подпорного горизонта (НПУ) составляет 68,0 м БС. Однако на протяжении многих лет эксплуатации водоема она была 62,0 м БС, и лишь в 2002 г. после долгих споров и дискуссий специалистов разных отраслей хозяйства по согласованию трех субъектов РФ ее подняли до 63,3 м БС.

Балансовый метод, положенный в основу изучения гидрологических процессов на водохранилищах, дает возможность оценить особенности водообмена по соотношению составляющих уравнения водного баланса. Объем водохранилища (или его конкретных участков) в конце любого интервала времени можно определить следующим образом:

$$V_t = V_{t-1} + W_{пр} - W_{ст} \pm \Sigma W, \quad (1)$$

где V_{t-1} и V_t – объемы водной массы водоема (или участка) в начальный и конечный моменты времени, $W_{пр}$ и $W_{ст}$ – объем притока воды в водоем и стока из него за данный период времени, ΣW – суммарное выражение всех остальных составляющих водного баланса водохранилища. Количество осадков, выпадающих на зеркало искусственных водоемов, почти всегда (или чаще всего) компенсируется величиной испарения с их водной поверхности. Поскольку другие же составляющие уравнения водного баланса, входящие в величину (ΣW), слишком малы, ими можно пренебречь. Таким образом, для крупных долинных водохранилищ величину (ΣW) можно приравнять к нулю.

Если отнести все члены уравнения (1) к начальному объему водной массы (V_{t-1}), т.е.

$$\frac{V_t}{V_{t-1}} = 1 + \frac{1}{V_{t-1}} (W_{пр} - W_{ст}) \quad \text{или} \quad C = 1 + \left(\frac{W_{пр}}{V_{t-1}} - \frac{W_{ст}}{V_{t-1}} \right), \quad (2)$$

то отношение конечного и начального объемов воды, характеризующее в целом водообмен и динамику уровня поверхности, равно единице плюс разность коэффициентов водообмена по притоку и стоку. Таким образом, это отношение объемов учитывает и первый, и второй показатели водообмена. Очевидно, что при равенстве объемов притока и стока соотношение объемов водной массы за расчетный период времени равно единице, т.е. при $W_{пр} = W_{ст}$, $C = 1$. Это свидетель-

ствует о водообмене при постоянном положении свободной поверхности водоема. Если $W_{пр} > W_{ст}$, то $C > 1$ и водообмен происходит при повышении уровня воды, т.е. при наполнении водохранилища. При условии, что $W_{ст} > W_{пр}$, то $C < 1$ и водообмен происходит при понижении уровня воды в водоеме, т.е. при его сработке.

Полученный Т.П. Девятковой и А.Б. Китаевым [1] коэффициент интенсивности изменения объемов водной массы водоема является, таким образом, обобщающим показателем водообмена, отражающим особенности водного баланса, характеризующим наполнение и сработку водоемов, а также стабилизацию уровня воды в них.

Данный коэффициент интенсивности изменения объемов водной массы водохранилища или его морфометрических участков ($C = \frac{V_t}{V_{t-1}}$) можно рассматривать как показатель, отражающий специфику внутриводоемных процессов, т.е. как один из подходов оценки внутреннего водообмена в искусственных водоемах.

Представленный показатель интенсивности наполнения и сработки водохранилища и его конкретных частей с успехом реализован на Камском и Воткинском водохранилищах. Но если для этих водоемов и их частей есть надежные объемные кривые, то для Нижнекамского водохранилища такой информации нет. Поэтому перед нами стояла задача построения этих кривых и составления расчетных таблиц, позволяющих по значения уровня воды в конкретных частях водоема определять объемы водных масс.

Современные геоинформационные технологии позволяют определить наиболее точно морфометрические и гидрографические характеристики водного объекта. С помощью построения цифровой модели рельефа (ЦМР) определяются данные показатели. Картографические методы исследования позволяют определять: геодезические, прямоугольные и полярные координаты точек; относительные и абсолютные высоты, глубины, мощности, т.е. аппликаты отображенных на картах объектов и явлений; длины прямых и кривых линий; расстояния между объектами; углы и направления в горизонтальной и вертикальной плоскостях; площади участков плоских и криволинейных поверхностей, объемы участков этих поверхностей или объектов (объемы ледников, осадков, океанических котловин и т.п.). Картометрические измерения могут выполняться по картам разных масштабов, по аэро- и космоснимкам, с помощью ручных (настольных) измерительных инструментов и приборов или с использованием автоматических средств (устройств ввода картографической информации, состыкованных с ЭВМ). В зависимости от этого применяются различные способы выполнения картометрических измерений и получения искомым характеристик [2].

Определение гидрографических характеристик водных объектов выполняется с использованием топографических карт. Для расчета объема воды в водохранилище использовались наиболее актуальные цифровые карты масштаба 1:25 000. На их основе была построена цифровых моделей рельефа (ЦМР). Расчеты производились с помощью программного продукта ArcGIS [3].

Построение объемных кривых морфометрических участков Нижнекамского водохранилища осуществлено согласно его делению, выполненному сотрудниками НПО «Омега» (г. Пермь). Участки исследования водохранилища следующие: первый участок – от района г. Сарапул до р. Белая; второй – от впадения р. Белая до д. Кырныш; третий – от д. Кырныш до с. Икское Устье; четвертый – от с. Икское Устье до п. Первомайка; пятый – от п. Первомайка до впадения р. Шильная; шестой – от впадения р. Шильная до плотины Нижнекамской ГЭС. В качестве примера в таблице представлены результаты определения объемов водных масс при различных отметках уровней воды.

Пространственно-временные изменения показателя интенсивности наполнения и сработки Нижнекамского водохранилища представлены за многоводный (2015) и маловодный (2011) годы настоящего столетия.

Объемы второго участка Нижнекамского водохранилища, км³

Отметки уровня воды, м	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
62	1,016	1,031	1,046	1,061	1,076	1,091	1,106	1,121	1,136	1,151
63	1,167	1,182	1,197	1,212	1,228	1,243	1,258	1,274	1,289	1,304
64	1,319	1,335	1,35	1,366	1,381	1,397	1,412	1,428	1,443	1,459

Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки (С) Нижнекамского водохранилища в створе с. Красный бор в 2011 и 2015 гг. характеризовался незначительными колебаниями – от 0,93 до 1,03 в 2011г., и от 0,97 до 1,16 в 2015 г. (рис. 1).

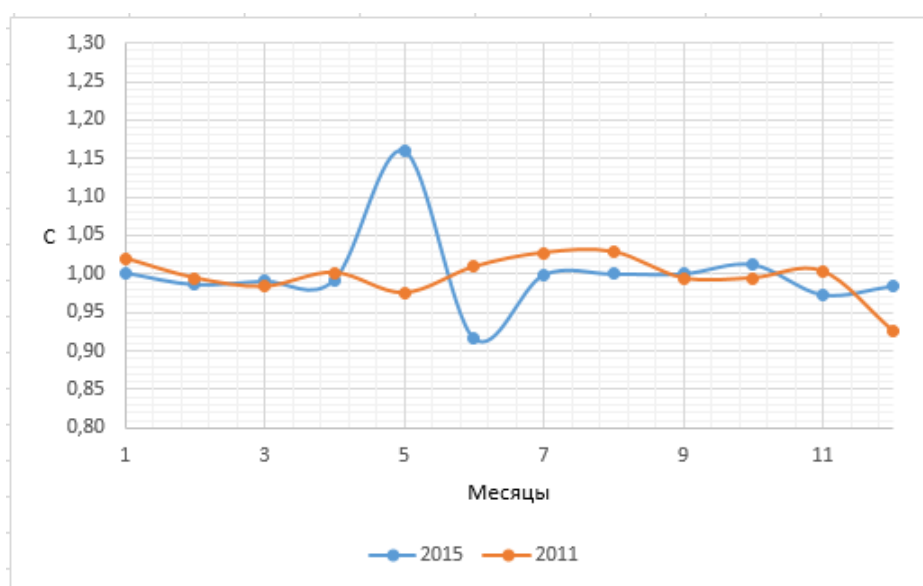


Рис. 1. Внутригодовой ход коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе с. Красный бор в 2011 и 2015 гг.

В период зимней сработки водохранилища коэффициент (С) изменялся от 0,93 до 1,02 в 2011 г., и от 0,98 до 1,00 в 2015 г. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями коэффициента, так как в этот период уровни воды значительно увеличивались – проходила фаза водного режима – весеннее наполнение водоема. Максимальное значение (С) в 2011 г. отмечалось в апреле (1,00), в 2015 г. в мае (1,16). Минимальное его значение в 2011 г. отмечено в марте и мае (0,98), в 2015 г. в марте-апреле (0,99). В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища колебались от 0,99 до 1,03 в 2011 г. и от 0,92 до 1,01 в 2015 г.

Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе с. Ижевка в 2011 и 2015 гг. характеризуется также незначительными колебаниями – от 0,94 до 1,13 в 2011 г., и от 0,92 до 1,16 в 2015 г. (рис. 2).

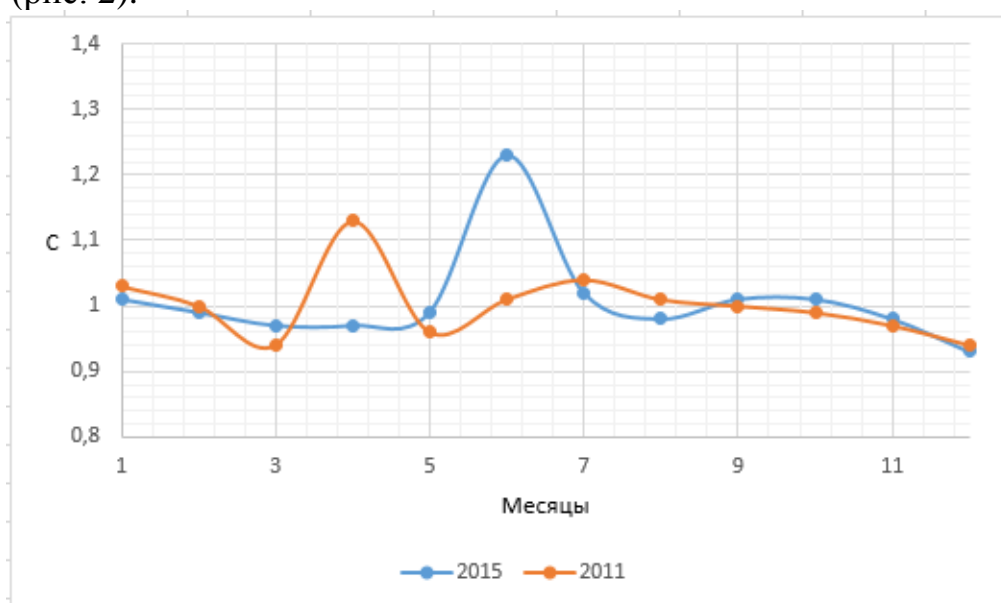


Рис. 2. Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе с. Ижевка в 2011 и 2015 гг.

В период зимней сработки водохранилища коэффициент (С) изменялся в пределах от 0,94 до 1,03 в 2011 г., от 0,93 до 1,01 в 2015 г. Период весеннего наполнения водоема характеризуется максимальными значениями коэффициента интенсивности наполнения и сработки. Максимальное его значение было в 2011 г. в апреле (1,13), в 2015 г. оно было отмечено в июне (1,23). Минимальное значение наблюдалось в 2011 г. в марте (0,94), в 2015 г. в марте-апреле (0,97). В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения коэффициента (С) колебалось от 0,97 до 1,04 в 2011 г. и от 0,98 до 1,02 в 2015 г.

Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе г. Менделеевск в 2011 и 2015 гг. характеризуется незначительными колебаниями – от 0,95 до 1,09 в 2011 г., и от 0,88 до 1,17 в 2015 г. (рис. 3).

В период зимней сработки водохранилища коэффициент (С) изменялся в пределах от 0,95 до 1,01 в 2011 г., и от 0,98 до 1,00 в 2015 г. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями коэффициента интенсивности наполнения и сработки. Максимальное его значение в 2011 г. отмечалось в апреле и было равно (1,09); в 2015 г. оно было в мае (1,17). Минимальное значение коэффициента были в 2011 г. в марте (0,96), в 2015 г. оно наблюдалось в апреле (0,95). В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения (С) колебались от 0,98 до 1,03 в 2011 г. и от 0,93 до 1,03 в 2015 г.

Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе г. Набережные Челны в 2011 и 2015 гг. характеризовался незначительными колебаниями – от 0,96 до 1,16 в 2011 г., и от 0,94 до 1,04 в 2015 г. (рис. 4). Годовой же его ход был аналогичен вышерасположенным створам.

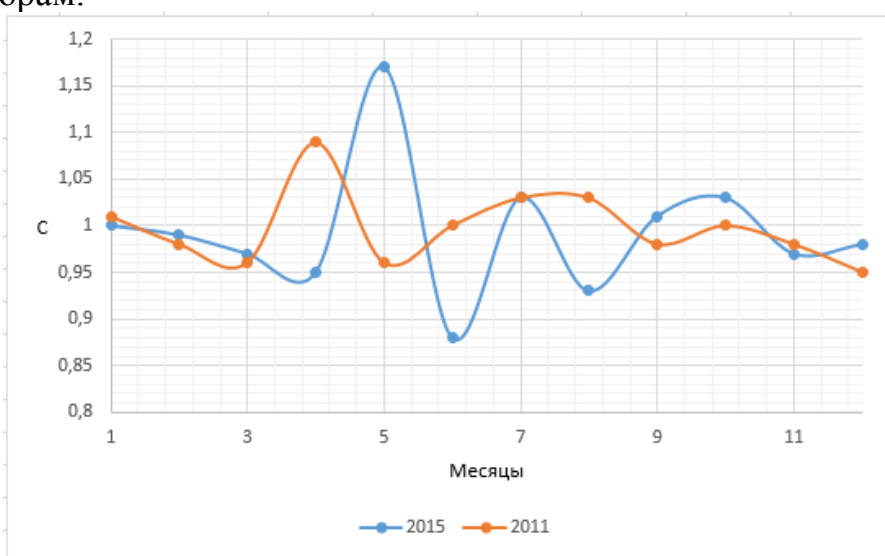


Рис. 3. Внутригодовой ход коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе г. Менделеевск 2011 и 2015 гг.

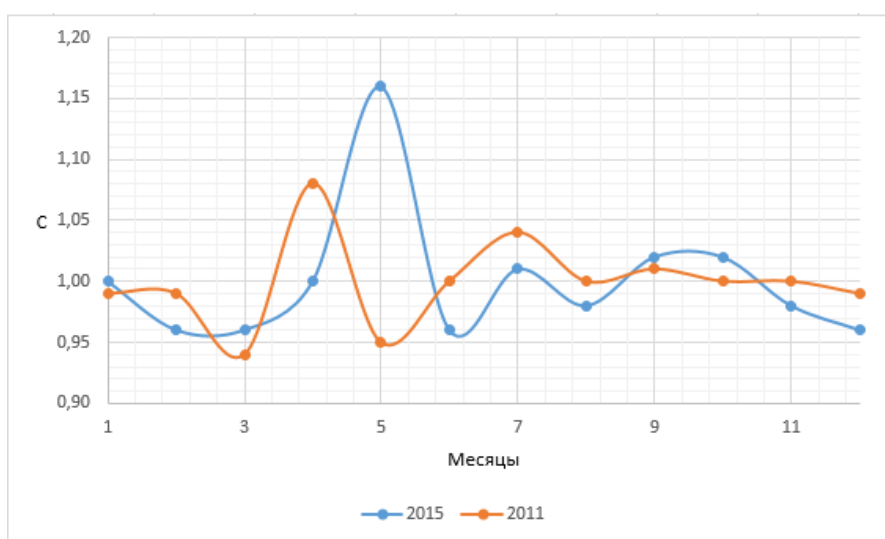


Рис. 4. Внутригодовой ход изменения коэффициента интенсивности наполнения и сработки водохранилища в створе г. Набережные Челны 2011 и 2015 гг.

Выводы

1) Показатель интенсивности наполнения и сработки водных масс по длине Нижнекамского водохранилища имеет тенденцию снижения от верховьев водоема к плотине ГЭС.

2) Величина показателя интенсивности обмена вод в Нижнекамском водохранилище несколько меньше, чем в верхних звеньях каскада – Воткинском и Камском водохранилищах. Это определяется его положением в каскаде (нижнее звено) и расположением на местности (равнинный рельеф с малыми уклонами дна).

3) Максимальные величины рассмотренного показателя в годовом аспекте, как и на выше расположенных водоемах, приурочено к фазе весеннего наполнения водохранилища, минимальные – к фазе летне-осенней стабилизации уровня воды.

Библиографический список

1. *Девяткова Т.П., Китаев А.Б.* Интенсивность изменения водных масс Камского и Воткинского водохранилищ при их наполнении и сработке // Комплексные экологические исследования водоемов и водотоков бассейна реки Камы. Пермь, 1993. С 6-11.

2. *Калинин В.Г., Пьянков С.В.* Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие. Пермь, 2013. Ч. II. 71 с.

3. ПО «ArcGIS Spatial Analyst» [Электронный ресурс]. URL:<http://data-plus.ru/products/spatialanalyst/detail/review>.

С.В. Копытов, П.Ю. Санников, Е.А. Мехоношина, kopytov@psu.ru
Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОЗЕРЕ НОВОЖИЛОВО
(КАМСКО-КЕЛЬТМИНСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ,
БАССЕЙН ВЕРХНЕЙ КАМЫ)**

В статье рассматриваются первые результаты изучения строения котловины и донных отложений озера Новожилово (север Пермского края). Приведены качественные характеристики строения опорных колонок донных отложений, а также данные о возрасте и находках диатомовых водорослей. Делается вывод о неравномерности заполнения котловины озера во времени.

Ключевые слова: палеолимнология, донные отложения, ледниково-подпрудное озеро, диатомовый анализ, радиоуглеродное датирование, литология.

S.V. Kopytov, P.Yu. Sannikov, E.A. Mekhonoshina, kopytov@psu.ru
Perm State University, Perm, Russia

**PRELIMINARY RESULTS OF THE PALEOLIMNOLOGICAL STUDY
OF THE NOVOZHILOVO LAKE (KAMA-KELTMA LOWLAND,
UPPER KAMA BASIN)**

The article discusses the first results of the Novozhilovo lake (north of the Perm region) geomorphological and paleolimnological study. Qualitative characteristics of the bottom sediments core are presented. Age data and findings of diatoms are considered. The conclusion about the uneven filling of the lake basin in time is made.

Keywords: paleolimnology, bottom sediments, ice-dammed lake, diatom analysis, radiocarbon dating, lithology.

Введение

Камско-Кельтминская низменность (ККН) занимает одно из ключевых положений для реконструкции позднеледниковых и голоценовых событий северо-востока Восточно-Европейской равнины (ВЕР) благодаря своей протяженности (более 160 км с юго-запада на северо-восток и шириной до 30 км) (рис. 1). Широкое распространение форм рельефа, характерных для дистальной зоны оледенений, – заболоченных равнин, реликтовых озер, ложбин стока породило множество дискуссий относительно возраста таких образований, главным образом, существования здесь ледниково-подпрудного водоема времени LGM с уровнем в 130 м [1; 7].

До настоящего времени большинство региональных реконструкций, начиная со времени проектирования Верхнекамского водохранилища, основывались на результатах исследований районов, смежных с ККН: долин рек Северная Двина, Вычегда и Печора [5; 6]. Огромное количество фактического материала, полученного российскими и зарубежными исследователями в северной и южной

частях региона, не затронуло озера ККН. Среди наиболее крупных можно отметить Большой Кумикуш, Новожилово, Челвинское, Сев. Кумикуш, Вост. Мал. Кумикуш и Дикое.

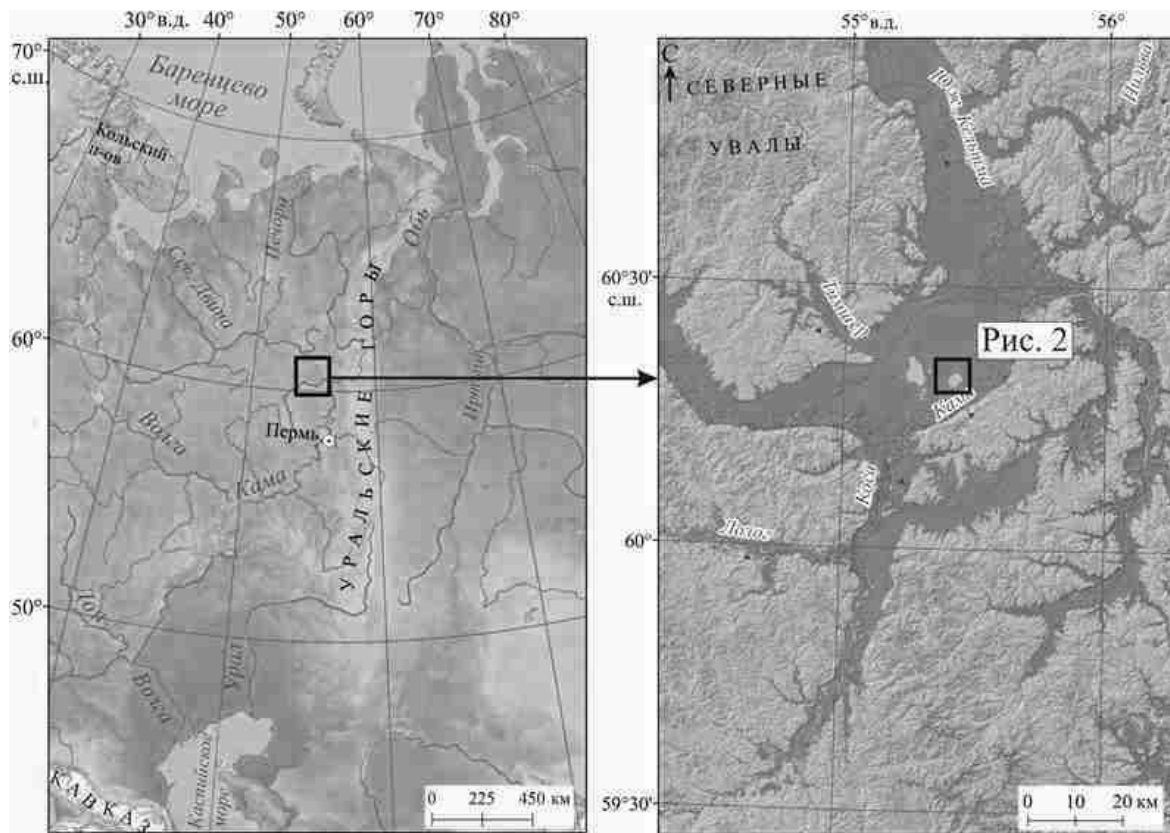


Рис. 1. Район исследований

Материалы и методы исследования

В зимний период 2023 гг. на озере Новожилово ($60^{\circ}19'18''$ с. ш., $55^{\circ}25'16''$ в. д.) были измерены глубины лотом со льда. Высота уреза воды в озере, относительно которого производились замеры глубины, фиксировалась ГНСС-приемником в летнее время в режиме кинематики реального времени. Максимальная глубина оз. Новожилово составила 3,7 м. Для выяснения литологии донных отложений ручным буром с полуцилиндрическим пробоотборником было пробурено 18 скважин по 2 поперечным профилям длиной 2940 м и 3435 м соответственно. С помощью поршневого бура Ливингстона извлечены 2 опорных керна (рис. 2).

Донные отложения представлены преимущественно слабо консолидированной, реже плотной гиттией (сапропелем) и торфом. Мощность толщ сапропеля варьирует от 0,2 м до 4,25 м, достигая максимума в опорной скважине NZH-1 ($60^{\circ}19'45,067''$ с.ш., $55^{\circ}25'48,374''$ в.д.).

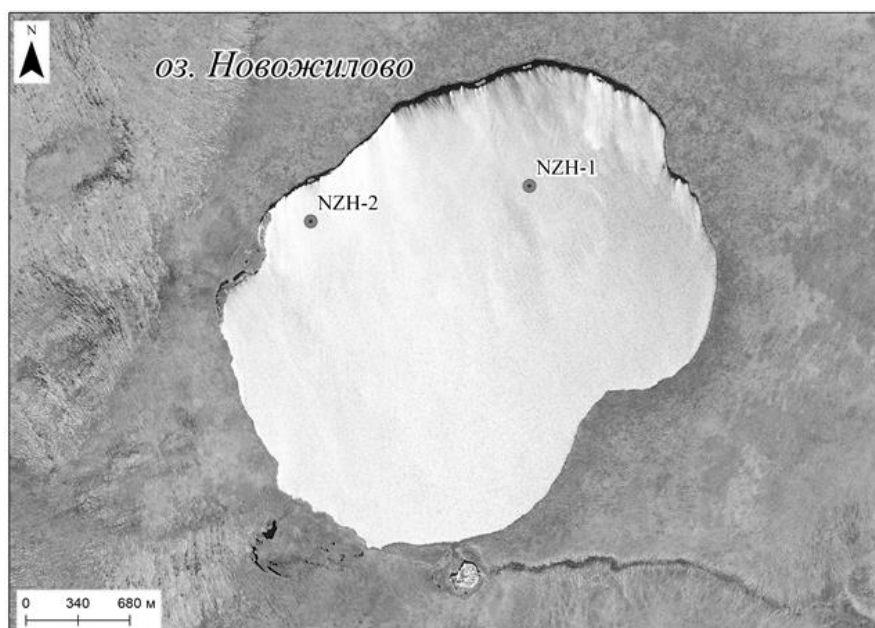


Рис. 2. Расположение опорных скважин, пробуренных на оз. Новожилово

В колонке последовательно вскрыты: 300–670 см – ил/сапропель коричневый, слабо консолидированный, с растительными остатками на глубине 450 см; 670–725 см – сапропель плотный, зеленовато-желтоватый, минерализованный; 725–810 см – ил серый (буровато-серый), минеральный, с единичными растительными остатками, по всему слою зерна тонкозернистого песка; к низу минерализация увеличивается, и он становится плотнее; на глубине 785 см – прослой сильно оторфованный (мощность 3 см); 810–820 см – песок тонкозернистый с прослоями торфа (до 2–3 см), с древесиной в торфе.

Опорная скважина NZH-2 ($60^{\circ}19'36,594''$ с.ш., $55^{\circ}24'15,387''$ в.д.) пробурена в северо-западной части озера. В керне скважины последовательно вскрыты: 250–315 см – сапропель коричневый слабо консолидированный; 315–434 м – торф светло-коричневый; 434–480 см – сапропель оторфованный, темно-коричневый; 480–495 см – торф коричневый, хорошо разлагаемый; 495–529 см – сапропель/ил буровато-серый с растительными остатками, сильно опесчаненный; 529–530 см – песок мелкозернистый, серый.

Радиоуглеродный анализ донных отложений выполнялся в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН сцинтилляционным методом. В качестве материала для датирования использовались гиттия (сапропель) и торф. Для всех полученных дат была выполнена калибровка в программе Calib 8.10 с использованием калибровочной кривой IntCal20.

Диатомовый анализ образцов проводился по стандартной методике [4]. Для скважины NZH-1 было изучено 24 образца в диапазоне 360–820 см с интервалом 20 см.

Анализ результатов

В текстуре осадков нижней части керна скважины NZH-1 на уровне 780–820 м прослеживается ритмичная слоистость, проявляющаяся в чередовании

плотного минерального буровато-серого и темного оторфованного ила, торфа и светлых опесчаненных слоев. Выше материал постепенно обогащается органическим веществом и на глубине 725 см переходит в гиттию, которая становится все более оторфованной, вязкой и однотонной.

Время формирования толщи сапропеля на глубине 760–770 см, по данным радиоуглеродного анализа, приходится на поздний дриас, 12097–12409 кал. л.н. (10440±130, IGAN–10421). По результатам аналогичных исследований в смежных регионах [2], это время характеризуется интерстадиальной климатической обстановкой, увеличением алевролитистой фракции в механическом составе отложений в условиях интенсивного выветривания грунтов на водосборе. Резкий подъем уровня озер в Молого-Шекснинской низменности и Ростовской низине приводит в этот период к снижению биопродуктивности и накопления органического вещества.

Следующий этап развития озер центральной части ВЕР относится к периоду 11800–6300 кал. л.н. В это время отмечается резкий и устойчивый переход к органогенному режиму седиментогенеза, практически полное прекращение минерагенной аккумуляции [2]. В скважине NZH-1 время начала формирования сапропеля практически без признаков слоистости (глубина 725 см) относится к 10244–10513 кал. л.н. (9220±130, IGAN–10418).

Керн скважины NZH-2 отличается присутствием в разрезе довольно мощных толщ торфа светло-коричневых и коричневых оттенков. Чередование толщ сапропеля и торфа в верхней части разреза указывает на проявление ритмичности лимнологических процессов в условиях изменения глубины озера. Переход от накопления сапропеля к торфообразованию (активизации процесса заболачивания) на глубине 495 см можно интерпретировать как один из первых этапов снижения уровня палеоводоема (палеоводоемов?) в пределах ККН. Аналогичные изменения глубины и режима седиментогенеза наблюдались, например, в бассейне современного оз. Водлозера около 11000 кал. л.н. [3].

Наибольшее видовое разнообразие диатомей в ходе экспресс-анализа было обнаружено в образце с глубины 780 см. Среди доминирующих видов много как перифитонных, так и планктонных, например, *Navicula vulpina*, *Navicula subalpina*, *Staurosira ovata*, *Handmania comta*, *Nitzschia fonticola*. Выше и ниже по разрезу количество находок существенно сокращается. Отсутствие диатомей в образцах или наличие единичных целых находок, а также обломков отмечается с глубины 700 см и выше по разрезу. С этой глубины отмечается переход к усилению биогенного накопления осадка.

Выводы

На основании полученных данных (дифференциации слоев сапропеля, плотного ила, торфа, песка, экспресс-анализа находок диатомовых водорослей, радиоуглеродного возраста отложений) можно сделать осторожный вывод о неравномерности заполнения котловины озера. Начало формирования озерных осадков (сапропеля) приходится на поздний дриас. Период, предшествующий началу накопления гиттии, характеризуется ритмичностью лимнологических обстановок – чередованием в разрезе слоев ила, торфа и песка.

Отсутствие в кернах скважин сапропеля и ила может быть косвенным фактором относительной «молодости» участка озера, а присутствие мощных толщ органогенно-минеральных слоев, наоборот, показателем длительной истории формирования и смены фациальных обстановок.

В течение позднеледниковья – голоцена чаша водоема меняла свой уровень и, как следствие, площадь. Можно предположить, что в позднеледниковье в пределах ККН низменности существовало большое количество небольших по площади водоемов, часть которых позднее соединилась до размеров современных озер, а часть исчезла, осушив свои котловины. Расширение озер могло быть связано с процессами трансформации флювиальных систем в бассейне Верхней Камы в переходный период позднего плейстоцена и голоцена, изменением баланса эрозии и аккумуляции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-00086, <https://rscf.ru/project/22-77-00086/>.

Библиографический список

1. Назаров Н.Н., Копытов С.В., Жуйкова И.А., Чернов А.В. Плейстоценовые каналы стока в южной части Кельтминской ложбины (Камско-Вычегодское междуречье) // Геоморфология. 2020. № 4. С. 74–88.

2. Садоков Д. О., Сапелко Т. В., Бобров Н. Ю., Меллес М., Федоров Г. Б. Позднеледниковая и раннеголоценовая история озерного осадконакопления на севере Молого-Шекснинской низменности на примере озера Белого (Северо-Запад России) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. Вып. 2. С. 266–298

3. Сапелко Т.В., Субетто Д.А., Севастьянов Д.В. Водлозеро: История развития // Водлозерские чтения: Естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 37–44.

4. Battarbee R.W. Diatom analysis. In Handbook of Holocene Paleoecology and Paleohydrology (Ed. Berglund, B.). Wiley & Sons, Chichester, 1986. P. 527-570.

5. Lysa A., Larsen E., Buylaert J.-P., Fredin O., Jensen M., Kuznetsov D. Late Pleistocene stratigraphy and sedimentary environments of the Severnaya Dvina-Vychegda region in northwestern Russia // Boreas. 2014. Vol. 43. P. 759–779.

6. Mangerud J., Jacobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.C.K., Henriksen M., Hjort C., Krinnerm G., Lunkkja J.-P., Moller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. pp. 1313–1332.

7. Panin A.V., Astakhov V.I., Lotsari E., Komatsu G., Lang J., Winsemann J. Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 201. 103069.

А.Г. Косицкий, Е.В. Белозёров, alexhydro@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА ЧЕРНОМОРСКИХ РЕК КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ АИУВ НПК "ЭМЕРСИТ"

Исследуемая территория Черноморского побережья Краснодарского края представлена исключительно малыми реками. Существующего числа гидропостов недостаточно для выявления пространственных закономерностей формирования стока. Для сгущения сети мониторинга следует использовать данные станций автоматизированного измерения уровней воды НПК «Эмерсит». Для этого в ряде их створов проведена поперечная нивелировка русла и поймы, а также определены продольные уклоны. Это позволило построить кривые $Q = f(H)$ и восстановить по ним расходы воды за период с 2014 г. В дальнейшем с использованием данных синхронных наблюдений на этих станциях и постах Гидрометслужбы предполагается привязать эти данные к многолетнему периоду наблюдений.

Ключевые слова: малые реки, речной сток, гидрологический пост, наводнения, приток

E.V. Belozyorov, A.G. Kositskiy, alexhydro@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

EVALUATION OF THE RUNOFF CHARACTERISTICS OF THE BLACK SEA RIVERS OF THE KRASNODAR REGION USING THE DATA OF THE AWLM RPC "EMERCIT"

The studied territory of the Black Sea coast of the Krasnodar region is represented exclusively by small rivers. The existing number of gauging stations is not enough to reveal the spatial patterns of runoff formation. To thicken the monitoring network, data from stations for automated measurement of water levels by RPC "Emersit" should be used. To this end, transverse leveling of the channel and floodplain was carried out in a number of their sections, and longitudinal slopes were determined, which made it possible to construct curves $Q = f(H)$ and restore water discharges from them for the period from 2014. Subsequently, using the data of synchronous observations on these stations and posts of the Hydrometeorological Service are supposed to link these data to a long-term observation period.

Keywords: small rivers, river flow, hydrological post, floods, inflow

Общеизвестно, что Россия обладает большим количеством возобновляемых водных ресурсов. Однако, вследствие их неравномерного распределения в пространстве и во времени, причем зачастую асинхронного с потребностями населения и хозяйства, даже у нас в отдельных регионах может возникать нехватка воды, особенно в засушливые сезоны. К числу дефицитных регионов относится юг Европейской территории РФ, где плотность населения существенно

выше средней по стране, а объем местных возобновляемых водных ресурсов меньше по сравнению с рядом других регионов.

Неравномерность распределения водных ресурсов во времени зачастую решается созданием водохранилищ, обеспечивающим перераспределение воды, накапливая ее в многоводные сезоны и годы и сбрасывая в маловодные. В связи с этим обширные территории РФ представляют собой водосборы водохранилищ. Одной из важнейших проблем является оценка притока воды к водохранилищам. Задача существенно упрощается, когда на притоках водохранилищ имеются гидрологические посты.

Исследуемая территория представляет собой узкую полосу шириной от двух в северо-западной до пятидесяти километров в юго-восточной части. Она ограничена с южной стороны Черным морем, а с северной – Главным Кавказским хребтом. В связи с небольшой шириной этой полосы на исследуемой территории могут формироваться лишь малые реки. Самая крупная река региона Мзымта имеет площадь бассейна 885 км², что более чем в два раза меньше 2 тыс. км² – граничного значения, в соответствии с ГОСТ 19179-73 [1] разделяющего малые и средние реки.

По этой же причине на данной территории отсутствуют крупные водохранилища. Тем не менее, здесь имеется несколько искусственных водоемов. Одним из них является водохранилище Сукко, расположенное в северо-западной части исследуемой территории в невысоких горах на Абрауском полуострове на границе гг. Анапы и Новороссийска. Площадь водохранилища 0,08 км², объем менее 0,0012 км³. Оно используется для орошения и рыбоводства [3]. В противоположной юго-восточной части исследуемого района расположено совсем небольшое Краснополянское водохранилище на р. Мзымте. Его площадь менее 0,02 км², назначение – гидроэнергетика. На данной территории имеются и другие искусственные водоемы еще меньшего размера.

Для успешного хозяйственного использования водоемов необходимо иметь представление об их водном балансе и, в частности, о притоке воды с водосборов. Однако, далеко не все искусственные водоемы имеют гидрологические посты на своих водосборах. В частности, водосбор водохранилища Сукко является полностью неизученным. Всего на реках Черноморского побережья Краснодарского края расположено 12 действующих и 5 закрытых гидрологических постов, данные по которым могут быть использованы для оценки характеристик стока (рис.1). С одной стороны, с учетом малой площади данной территории, концентрация пунктов наблюдений высока относительно ряда других регионов России. Однако, азональность и зачастую индивидуальность малых рек, протекающих там, не позволяет с помощью такого количества постов выявить четкие пространственные закономерности формирования стока.



Рис.1. Гидрологические посты на реках Черноморского побережья Краснодарского края

Другой важнейшей проблемой, свойственной данному региону, являются катастрофические паводки, участвовавшие в последние десятилетия. Ключевым фактором наводнений является максимальный сток рек, поэтому для минимизации ущерба от них необходимо выявление закономерностей его пространственного распределения. Однако, с учетом вышеперечисленных причин существующего количества гидрологических постов явно недостаточно для решения этой задачи.

После катастрофических наводнений, прошедших на территории Краснодарского края в 2012 г. (наводнение в Крымске и Геленджике 6 – 7 июля, в пос. Новомихайловский 22 августа и др.) силами научно-производственной компании «Эмерсит» совместно с МЧС Краснодарского края было установлено более 200 станций автоматизированного измерения уровней воды на реках края. Каждая станция оборудована датчиком, который с интервалом в 10 минут проводит измерение уровня воды в реке. Информация об уровне в автоматическом режиме передается в НПК «Эмерсит» и размещается на их официальном сайте в открытом доступе. В случае превышения уровнями воды неблагоприятных или опасных отметок информация поступает в МЧС Края, откуда идет оповещение населения о возможных предстоящих паводках [2].

На исследуемой территории бассейнов рек Черноморского побережья Краснодарского края находится более 80 (остальные – в бассейне р. Кубань) станций НПК «Эмерсит», которые ведут наблюдения за уровнями воды с 2014 г. Отметим, что их количество пятикратно превышает число гидрологических постов. Следовательно, получение по этим створам данных об основных гидроло-

гических характеристиках позволит существенно сгустить сеть гидрологического мониторинга и более четко выявить закономерности пространственного распределения стока.

Для возможности привлечения данных НПК «Эмерсит» для оценки характеристик стока рек, в створах датчиков проведена поперечная нивелировка морфостворов, определены уклоны водной поверхности и неоднократно измерены расходы воды (при разных уровнях). Это позволило получить для данных створов кривые зависимости $Q = f(H)$, по которым были восстановлены расходы воды за весь период работы станций (рис.2). Правда, следует подчеркнуть, что далеко не все створы расположения станций оказались пригодны для данной задачи. Около тридцати створов были отбракованы по причине неустойчивости русла и, соответственно, сильной неоднозначности кривых зависимости $Q = f(H)$.

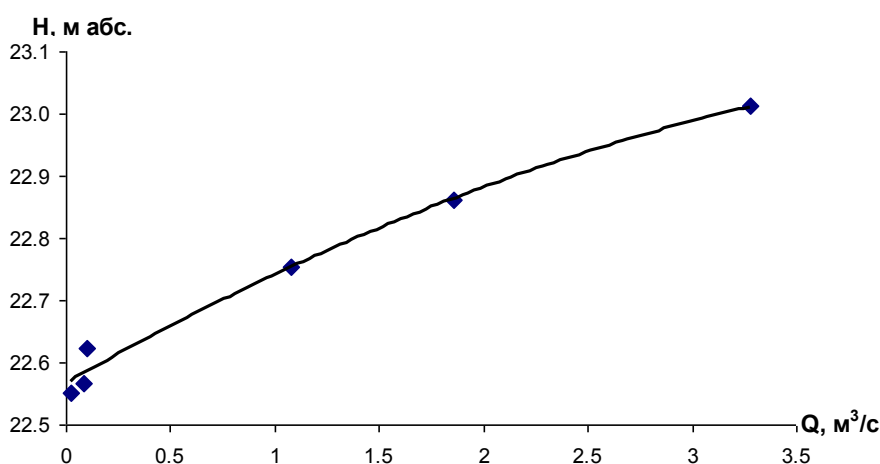


Рис.2. Кривая зависимости $Q = f(H)$ для створа НПК «Эмерсит» на р. Цемес в пос. Цемдолина

В дальнейшем с использованием данных синхронных наблюдений на гидрологических постах Гидрометслужбы и станциях НПК «Эмерсит» предполагается приведение полученных данных по створам станций НПК «Эмерсит» к многолетнему ряду наблюдений, получение для них характерных значений расходов воды и уточнение закономерностей пространственного распределения стока.

Библиографический список

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М., Государственный комитет СССР по стандартам, 1973. 36 с.

2. Шержуков Е.Л., Магрицкий Д.В., Ткаченко Ю.Ю. Автоматизация мониторинга уровней воды и прогноза быстроразвивающихся паводков // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата. Издательский центр БГУ Минск, 2015. С. 53 – 55.

3. Water Resources. Справочник водных ресурсов <https://waterresources.ru>

А.И. Лучников¹, А.В. Мозгин², luchnikovanton@gmail.com

¹Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Россия

²Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Камский филиал, г. Пермь, Россия

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

Проведены оценки точности плановых и высотных характеристик расчетной ЦММ и ортофотопланов, полученных путем фотограмметрической обработки материалов аэрофото-съемки с БПЛА. Ключевым критерием оценки являлась среднеквадратичная ошибка RMSE по контрольным точкам, при уравнивании модели по различному объему опорных наземных маркеров. Показана зависимость ошибки RMSE от количества и размещения опорных маркеров. Предложены варианты размещения наземных опорных точек с целью оптимизации полевых работ, в том числе при исследовании динамики разрушения берегов на водных объектах.

Ключевые слова: цифровая модель местности (ЦММ), ортофотоплан, опорные наземные маркеры, мониторинг разрушения берегов, Камское и Воткинское водохранилища.

A. Luchnikov¹, A. Mozgin², luchnikovanton@gmail.com

¹Mining Institute of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia

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

DEFINITION OF THE PRECISION OF PHOTOGRAMMETRIC MODELS IN SOLUTION GEOMORPHOLOGICAL PROBLEMS USING UAVS

Evaluation of the accuracy of planar and elevation characteristics of the calculated DSM and orthophotoplanes was performed, which were obtained by photogrammetric processing of aerial photography materials from UAVs. The key condition for the evaluation was the RMSE error on the control points, when equalizing the model with a different number of reference ground markers. The dependence of RMSE values on the number and placement of reference markers is shown. Variants of placement of reference ground points for optimization of field research, including in the study of the dynamics of destruction of banks on water bodies, are proposed.

Keywords: digital surface model (DSM), orthophotoplan, reference ground markers, banks destruction monitoring, Kama and Votkinsk reservoirs.

Введение

С момента создания Камского (1954 г.) и Воткинского (1961 г.) водохранилищ выполнено множество исследовательских работ по переработке их берегов.

Первые исследования опубликованы в работе А.М. Казакова и М.В. Муравейской в 1956 г. [1]. С конца 50-х годов вопросами геодинамики берегов Камских водохранилищ занимались Л.И. Дубровин, Ю.М. Матарзин, И.А. Печеркин [2-3] и др. исследователи ЕНИ Пермского университета. В 70-х годах Сылвенской гидрогеологической партией Пермской геологоразведочной экспедиции (Ю.Г. Бурцев, В.Г. Байдин и др.) заложена сеть стационаров по изучению геодинамики побережий. В 2008 г. Н.Н. Назаровым опубликована монография [4], в которой обобщены результаты исследований геодинамики побережий Камских водохранилищ за более, чем полувековой период. Результаты исследований представлены в работах Д.Г. Тюняткина [5], И.В. Фроловой [6], С.В. Пьянкова и В.Г. Калинина [7], С.С. Егоркиной и П.А. Красильникова [8], И.С. Копылова [9] и др.

Ключевыми процессами, формирующими облик побережий Камских водохранилищ являются русловая (боковая) и овражная эрозия, оползни, суффозия, а уровенный и ветроволновой режимы являются определяющими факторами интенсивности этих процессов. На современном этапе развития водохранилищ, несмотря на общую стабилизацию геодинамических процессов, на отдельных участках сохраняются высокие темпы переработки берега (табл. 1).

Таблица 1

**Площади и объемы потерянных земель от берегоразрушения
Камских водохранилищ [10]**

Водохранилище	Длина береговой линии, км	Площадь потерянных земель, га	Объем размытых пород, млн м ³
Камское	591 (51%*)	2140	204
Воткинское	378 (39%*)	1276	90

* – длина береговой линии, подверженной абразии (в процентах от общей)

К негативным последствиям геодинамических процессов относится смещение положения бровок берега вплотную к жилым и хозяйственным объектам и прилегающей инфраструктуре. Поэтому, на сегодняшний день, кроме стационарных наблюдений все большую актуальность приобретает мониторинг динамики берега в границах прибрежных населенных пунктов. Цель и задачи заключаются в своевременном выявлении и точной оценке интенсивности переработки берега на основе натурных обследований. Оптимальным решением для мониторинга, на наш взгляд, является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа (квадрокоптер), когда протяженность исследуемых участков не превышает 3-4 км.

Материалы и методы исследования

С 2017 по 2020 гг. специалистами Камского филиала ФГБУ «РосНИИВХ» осуществлялся мониторинг динамики берегов в границах населенных пунктов на Камских водохранилищах [11]. Всего обследовано 28 участков общей протяженностью более 32 км. Разработанная методика полевых работ [12], результаты обработки натурных материалов и последующий анализ позволяли определять (по ортофотопланам) количество жилых и хоз. объектов, инфраструктуры и др. и их

и удаленность от бровки разрушающегося берега. Программная обработка ЦММ и расчеты в ГИС позволяли детально подойти к оценке и анализу динамики переработки берега. Высокая точность анализируемых материалов достигалась путем раскладки большого количества наземных опорных маркеров и определением их планово-высотных координат от наземной базовой GNSS-станции методом кинематики в режиме RTK и предустановленной точностью 2 см в плане и по высоте. Раскладка и сбор маркеров являлся самым трудоемким этапом полевых работ, дополнительные сложности возникали при передвижении вдоль бровки берега через ограниченные заборами землевладения или заросшие растительностью участки, а также вдоль подошвы склона при уровнях воды близких к НПУ.

С целью оптимизации трудозатрат в период полевых исследований динамики берегов проведен натурный эксперимент. Основная задача – это определение оптимального расположения опорных наземных маркеров на местности с сохранением требуемой точности расчетных ЦММ и ортофотопланов. Участок эксперимента – автомобильная развязка (рис. 1), откосы, эстакада и другие ее элементы, в целом, достаточно хорошо повторяют очертания разрушающегося берега. Площадь съемки ~0,86 км², перепад высот рельефа ~12 м, опорных наземных маркеров – 16 шт. Аэрофотосъемка выполнена с высоты 150 м, с продольным и поперечным перекрытием снимков 80 и 65%, соответственно. В качестве БПЛА использовался DJI Phantom 4 Pro в стандартной комплектации без дополнительного бортового GNSS-модуля. Обработка материалов аэрофотосъемки выполнена в Agisoft Metashape. Расчетные ЦММ и ортофотопланы построены для 10 вариантов размещения опорных точек, использованных при уравнивании модели (комбинации опорных маркеров: «без маркеров»; «15»; «1,3»; «1,15,3»; «1,6,14,3»; «12,13,14,15»; «6,7,9,11»; «2,3,4,5»; «1,2,3,4,15»; «1,5,6,15,8,3»).

Анализ результатов

Оценка точности фотограмметрических моделей выполнена по маркерам не участвующим в уравнивании, по ним рассчитаны плановая (рис. 2а) и высотная (рис. 2б) среднеквадратичная ошибка RMSE (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$

где n – кол-во контрольных точек, x_i – значение по геодезическим приборам, \hat{x}_i – расчетное значение по модели.

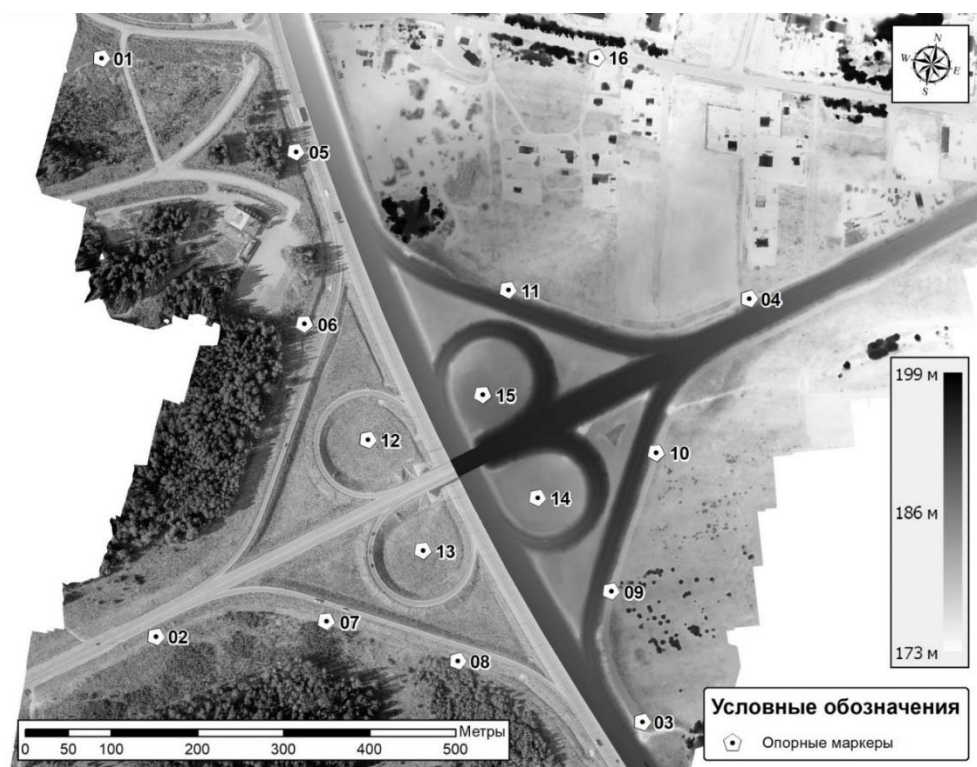


Рис. 1. Картограмма расположения опорных наземных маркеров на участке эксперимента (подложка: совмещенный ортофотоплан и ЦММ)

Из рис. 2а очевидно, модели «без» и с 1-м опорным маркером имеют метровые ошибки. В тоже время, уже при 2-х и более маркерах достигаются сантиметровые точности модели в плане (по контрольным точкам). В комбинациях с использованием 3-х и более маркеров плановая ошибка RMSE по контрольным точкам близка к разрешающей способности ортофотоплана (3,8 см/пиксель), при этом увеличение количества опорных маркеров не дает качественно иных результатов. С высотной точностью моделей (рис. 2б) ситуация значительно сложнее. При отсутствии опорных маркеров ошибки модели критические ~10 м. В условно «линейных» вариантах «1,3», «1,15,3», «1,6,14,3» и «1,5,6,15,8,3» прослеживается повышение точности модели с увеличением количества опорных маркеров, а RMSE уменьшается с 0,91 до 0,11 м. При «прямоугольном» размещении наибольшие ошибки отмечаются при плотном расположении маркеров в центре участка («12,13,14,15» RMSE 1,09), для «2,3,4,5», «6,7,9,11» и «1,2,3,4,15» ошибки уравнивания модели меньше на порядок (RMSE 0,12-0,06). Относительно небольшая ошибка RMSE (0,49) при уравнивании модели по 1-му маркеру («15»), вероятно, имеет низкую надежность и может значительно варьироваться от особенностей рельефа.

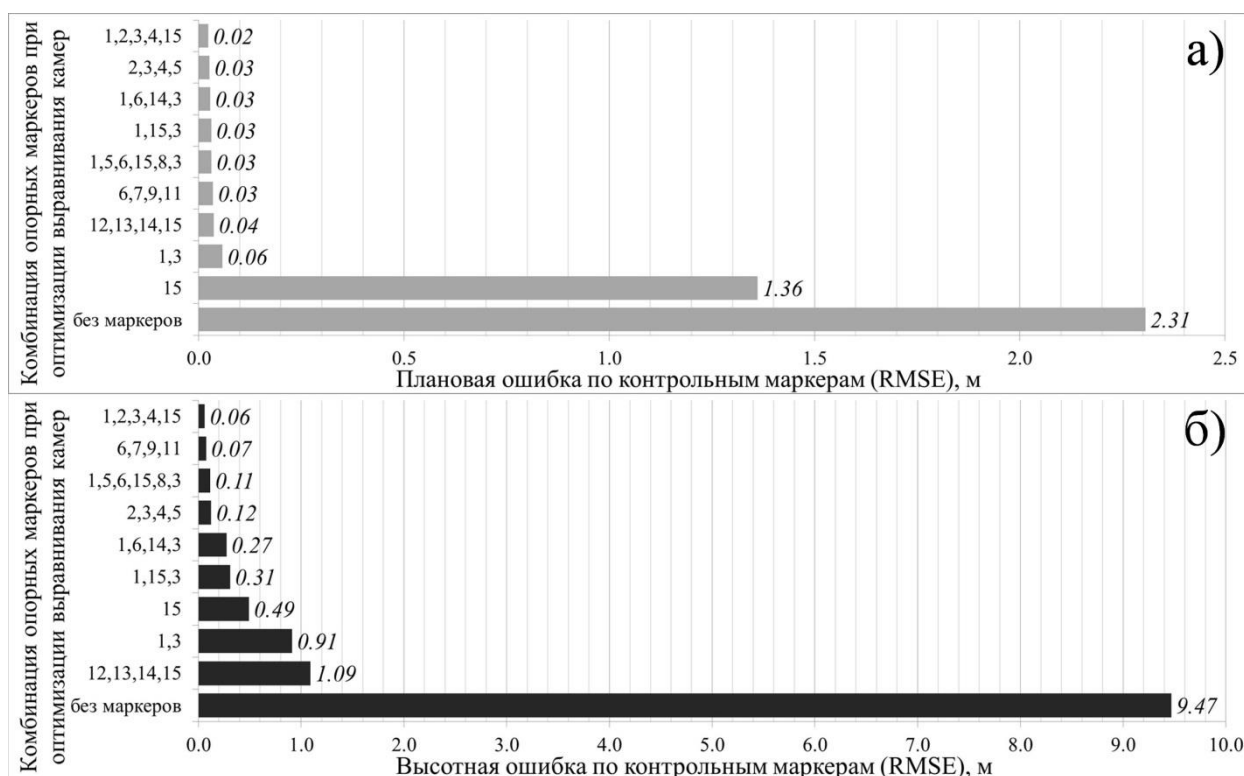


Рис. 2. Диаграммы изменения среднеквадратичной ошибки (RMSE) по контрольным точкам в плане (а) и высоте (б) в расчетных моделях при различных комбинациях опорных маркеров

Выводы

Создание качественных ортофотопланов возможно при уравнивании фотограмметрической модели минимум по 3-м опорным маркерам, а для построения ЦММ по 4-е и более. Однако при исследовании динамики переработки берега водохранилищ участки съемки характеризуются значительной протяженностью (км), при ширине, как правило, не более 100 м. Это исключает раскладку опорных маркеров по «прямоугольному» принципу из-за невозможности их размещения с акватории, и нецелесообразности выноса вглубь прибрежной зоны (увеличение нецелевой площади съемки). При «линейном» расположении опорных маркеров минимальная ошибка RMSE (0,11) получена при использовании 6 маркеров («1,5,6,15,8,3»), при этом среднее расстояние между ними составило 208 м. Таким образом, в качестве характерного плеча при размещении опорных наземных маркеров на вытянутых участках исследования рекомендуется расстояние не более 200 м.

Библиографический список

1. Казаков А.М., Муравейская М.В. Камское водохранилище. Молотов: Молотовское книжное изд-во, 1956. 72 с.
2. Печеркин И.А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. Ч.1. Пермь, 1966. 199 с.

3. *Печеркин И.А.* Геодинамика побережий камских водохранилищ. Ч.2. Пермь, 1969. 308 с.
4. *Назаров Н.Н.* Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края / Н.Н. Назаров. Пермь, 2008. 151 с.
5. *Тюняткин Д.Г.* Геосистемная дифференциация современного экзогенного рельефообразования береговой зоны Воткинского водохранилища: дис. канд. геогр. наук: 25.00.23/ Пермь, 2005. 264 с.
6. *Фролова И.В.* Экзогенные геодинамические процессы и ландшафтное разнообразие берегов Камского водохранилища: дис. канд. геогр. наук: 25.00.23/ Пермь, 2006. 257 с.
7. *Пьянков С.В., Калинин В.Г.* ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских). Пермь, 2011. 158 с.
8. *Егоркина С.С., Красильников П.А.* К вопросу об эрозии берегов Камского водохранилища (на примере Чермозского пруда) // ПГНИУ, 2016. С. 131-138.
9. *Копылов И.С.* Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология пермского края. Пермь, 2021. 502 с.
10. *Гарифулова А.В., Иванченков А.А., Халиманович Р.Д., Чуракова Е.А.* // Закономерности развития геологических процессов на берегах камских водохранилищ. ПГНИУ, 2018.
11. *Зарипов А.С., Лучников А.И.* Исследование динамики разрушения берегов Камского и Воткинского водохранилищ в результате абразии по материалам аэрофотосъемки // ГеоРиск. 2021. Т. 15. № 1. С. 58-66.
12. *Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П.* Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 37-46.

Д.В. Магрицкий, К.Н. Прокопьева magdima@yandex.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ МАМАКАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

На основе данных стационарного гидрологического мониторинга, спутникового зондирования и расчетов по эмпирическим формулам оценена роль Мамаканского водохранилища в нарушении водного режима и стока наносов рр. Мамакан и Витим. Установлено, что трансформация им месячного и сезонного стока очень мала, суточное и недельное регулирование почти не прослеживается на р.Витим. Из 170–230 тыс. т/год наносов, поступающих в водохранилище, в нижний бьеф сбрасывается от 35 до 60 тыс. т. Но водохранилище играет важную гидроэкологическую роль.

Ключевые слова: река, водохранилище, пост, уровень, сток наносов, регулирование, наносоудерживающая способность, спутниковый снимок

D.V. Magritsky, K.N. Prokopieva magdima@yandex.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

THE HYDROLOGICAL ROLE OF THE MAMAKAN RESERVOIR

Based on the data of stationary hydrological monitoring, satellite sensing and calculations based on empirical formulas, the role of the Mamakan reservoir in the violation of the water regime and sediment runoff of the Mamakan and Vitim rivers is estimated. It was found that the transformation of the monthly and seasonal runoff is very small, the daily and weekly regulation is almost not traced on the Vitim River. From 170-230 thousand tons/year of sediments entering the reservoir, from 35 to 60 thousand tons are discharged into the lower stream. But the reservoir plays an important hydroecological role.

Keywords: river, reservoir, gauging station, water regime, sediment runoff, regulation, satellite image

Введение

Одним из мощных факторов изменения величины и режима стока воды и наносов рек служат водохранилища [1]. Но роль некоторых из них до сих пор изучена недостаточно. К числу таких водоемов относится Мамаканское водохранилище на р.Мамакан, в 1 км от устья и 281 км от впадения р.Витим в Лену. Его площадь, полный и полезный объем 10,8 км², 0,197 км³ и 0,105 км³, длина 30 км [4]. Водохранилище начали заполнять в 1961 г.; в 1966 г. принята в эксплуатацию ГЭС [2]. О его влиянии на водный режим и сток наносов Мамакана и, главное, Витима практически ничего неизвестно, хотя оно старейшее и третье по размерам в бассейне р.Лены; замыкает территорию с активной добычей россыпного золота. Авторы постарались, используя разные типы данных, установить общие особенности влияния этого водохранилища на сток рр. Мамакан и Витим.

Материалы и методы исследования

В основе исследований среднесуточные и месячные расходы, уровни воды на постах Росгидромета – это Бодайбо и Мама (на р.Витим), Тельмама и Мамаканская ГЭС (р.Мамакан), Таксимо (р.Муя), среднемесячные расходы наносов и мутность воды реки Витим (пост Бодайбо), за весь период наблюдений и до 2020 г. Часть данных – по водному балансу Мамаканского водохранилища – взята с официального сайта Мамаканской ГЭС [<https://www.mamges.ru/>].

Наносоудерживающая способность водохранилища рассчитана по формуле Б.И. Новикова, предложенной для равнинных водохранилищ России и Украины [3], а также по формуле Дж. М. Бруна [9], в зависимости от коэффициента или периода условного водообмена водохранилища, его длины. Также она оценивалась по спутниковым снимкам Landsat 8 за период с 2013 по 2022 г., для условий открытого русла. Рассматривался красный канал с длиной волны 636-673 нм. Обработка спутниковых снимков велась в Google Earth Engine с предварительной радиометрической и атмосферной коррекцией. Рассчитывалось среднее значение спектрального отражения на участке Верхнего бьефа (30 км выше плотины ГЭС) и на участке Нижнего бьефа (участок у плотины ГЭС). Данная методика была апробирована в среднем и нижнем течении р. Лена, где точность составила 10–15% [11].

Анализ результатов

Наполнение водохранилища начинается в мае и продолжается в июне, что соответствует срокам половодья на р.Мамакан. Поскольку регулирующая призма водохранилища небольшая ($0,105 \text{ км}^3$), а поступает в него в среднем $5,7 \text{ км}^3$ (рис. 1), большую часть стока половодья гидроузел вынужден сбрасывать в нижний бьеф вхолостую. После пика половодья в июне расходы воды снижаются. Падение может прерываться дождевыми паводками, которые по своей величине могут превысить половодье. Больших паводков 2-3 и больше. Паводки способны накладываться и на спад половодья. Во время летне-осенних паводков может происходить не только сработка, но и наполнение водохранилища.

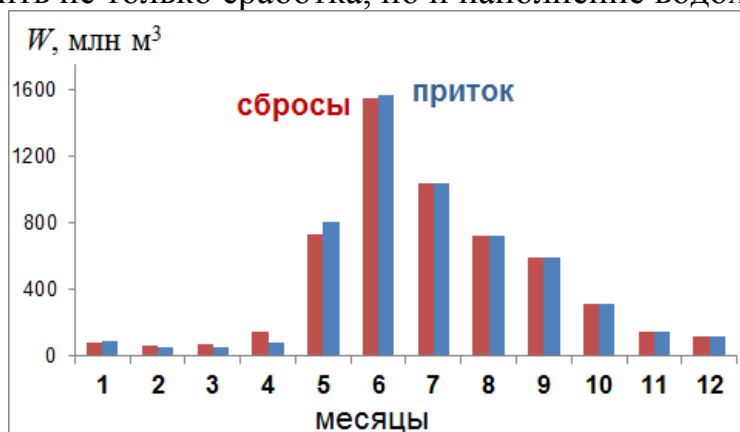


Рис. 1. Среднее за 2013–2019 гг. распределение месячного притока речных вод в Мамаканское водохранилище и сбросов в нижний бьеф

В сентябре значительных паводков почти не бывает, а в октябре самые низкие расходы и уровни воды летне-осеннего сезона. С конца октября – начала но-

ября и по апрель низкая и устойчивая зимняя межень. Самая интенсивная сработка водохранилища происходит во вторую половину зимы. Доля половодья около 40%, лета-осени – 48%, зимней межени – 12% (рис. 1).

Мамаканский гидроузел осуществляет совсем неглубокое сезонное регулирование, а также суточное и недельное. Причем, как установлено, оно не прослеживается на посту Мама – в 110 км ниже устья р.Мамакан. То есть воздействие Мамаканского водохранилища на водный режим и сток нижнего Витима минимальное, несмотря на то, что через гидроузел в год проходит ~11% стока Витима выше впадения в него р.Мамакан и ~8,2% в его устье.

Согласно [2], «..поступление наносов в Витим из р.Мамакан практически прекратилось». По формуле Новикова и при коэффициенте условного водообмена $K_b=29$ наносоудерживающая способность Мамаканского водохранилища равна 94% (это близко к утверждению из [2]), а по формуле Дж.М.Бруна – 73%. К сожалению, проверить стандартными методами достоверность этих расчетов по формулам не представляется возможным, поскольку мониторинга за наносами на р.Мамакан или на р.Витим, ниже впадения в него р.Мамакан, нет. Но некоторые выводы – по результатам обработки 26 спутниковых снимков – сделать можно. Так, за 2013–2022 гг. наблюдается устойчивое превышение характеристики спектрального отражения в верхнем бьефе Мамаканского водохранилища над средним значением в нижнем бьефе (рис. 2): в среднем, в 3,86 раз. В отдельные даты превышение достигало 7,53.

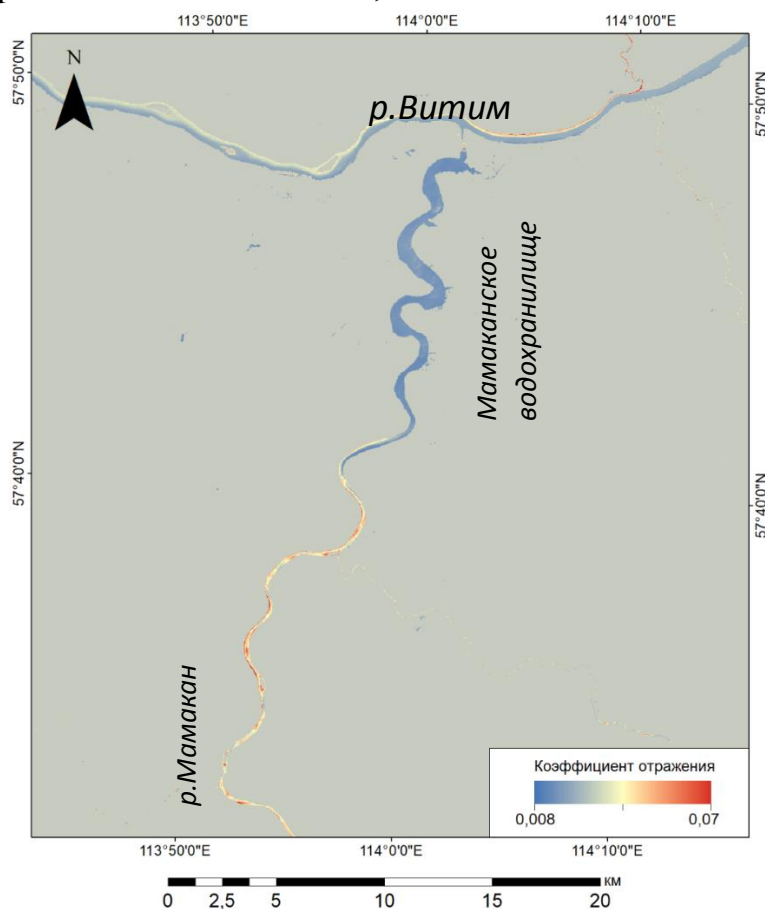


Рис. 2. Типичное распределение мутности в Мамаканском водохранилище, согласно коэффициенту отражения (на примере спутникового снимка Landsat 8 от 31 июля 2021г.)

Для оценки наносодерживающей способности значения коэффициента отражения были пересчитаны в весовую мутность воды (в мг/л) по регрессионным зависимостям, приведенным в [10]. Была рассчитана относительная наносодерживающая способность водохранилища по формуле:

$$\Delta S = \frac{S_{\text{ВВ}} - S_{\text{НБ}}}{S_{\text{ВВ}}} * 100\% ,$$

где ΔS – наносодерживающая способность (%), $S_{\text{ВВ}}$ – средняя мутность в верхнем бьефе водохранилища (мг/л), $S_{\text{НБ}}$ – средняя мутность в нижнем бьефе водохранилища (мг/л). Она составила 78,6%, что хорошо согласуется с результатами по формуле Бруна. Однако, данная оценка имеет отношение только к поверхностной толще, видимой из космоса. Также на снимках хорошо видны шлейфы сильно мутных вод от разрабатываемых в бассейнах рр. Мамакан и Бодайбо россыпных месторождений. Таким образом, водохранилище улавливает значительную часть взвесей антропогенного генезиса.

Мамаканское водохранилище и его водосбор расположены в районе с малой мутностью воды рек – от 25 до 50 г/м³, согласно картам из фундаментальных работ [7;8].

Новые данные по большему числу постов в бассейне Витима и за последние годы [5] позволяют этот диапазон сузить до 30–40 г/м³. Но есть вопросы к самим данным мониторинга, поскольку на него способна влиять масштабная горнодобывающая деятельность (особенно добыча россыпного золота) и временные этапы ее развития. Возможно, с ее сокращением в 1990-х гг. связано уменьшение стока наносов р.Витима, именно начиная с этих лет. В итоге, естественный сток взвешенных наносов в створе Мамаканской ГЭС можно приблизительно оценить в 170–230 тыс. т/год, или примерно 5,5–8,5% величины стока наносов в р.Витим, ниже слияния его с Мамаканом. С учетом ранее оцененной наносодерживающей способности водохранилища (по формуле Бруна и спутниковым снимкам) в его нижний бьеф могло бы сбрасываться около 35–60 тыс. т взвесей в год (в естественных условиях формирования стока наносов). В отношении косвенного влияния Мамаканского водохранилища на сток наносов Витима можно утверждать следующее: из-за его очень слабой регулирующей способности оно не способно, как например вилюйские водохранилища [6], значительно влиять на транзит наносов в низовьях Витима.

Выводы

Использование данных стационарного мониторинга, спутникового зондирования и полученных по эмпирическим формулам позволило больше узнать о влиянии Мамаканского водохранилища на водный режим и сток наносов рр. Мамакан и Витим. Ранее гидрологическая роль этого водохранилища, старейшего и третьего по размерам в бассейне р.Лена, была изучена недостаточно. В ходе исследования, удалось установить, что регулирование им сезонного стока очень ограничено. Не удалось обнаружить ниже по течению от устья р.Мамакан характерных суточных и недельных флуктуаций уровня воды Витима, хотя через Мамаканский гидроузел в год проходит ~11% стока р.Витима у г.Бодайбо. Удалось приблизительно оценить наносодерживающую способность водохранилища:

по формуле Дж.М.Бруна и спутниковым снимкам она составила 73–79%. Поэтому для условно-естественных условий из 170–230 тыс. т/год наносов, поступающих в водохранилище с его водосбора, в нижний бьеф может сбрасываться от 35 до 60 тыс. т. Водоохранилище играет важную гидроэкологическую роль, задерживая основную часть антропогенных взвесей, поступающих с разрабатываемых в бассейне р.Мамакан месторождений.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФ № 21-17-00181

Библиографический список

1. *Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н.* Водоохранилища и их влияние на устья рек / В кн. География, общество, окружающая среда. М.: «Городец», 2004. Т. VI. С.375-413.
2. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
3. *Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К.* Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наук. думка, 1987. 164 с.
4. Каталог «Водоохранилища СССР». М.: Союзводпроект, 1988. 276 с.
5. *Магрицкий Д.В., Банищикова Л.С.* Реакция стока наносов рек в бассейне р.Лены на изменения климата и хозяйственную деятельность // Материалы конференции «Динамика и взаимодействие геосфер Земли». Том 2. Томск, 2021. С. 61-64.
6. *Магрицкий Д.В., Морейдо В.М., Прокопьева К.Н.* Изменение каскадом водохранилищ стока взвешенных наносов реки Вилюй // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4, №1. С. 68-92.
7. Ресурсы поверхностных вод. Том 17. Лено-Индибирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 652 с.
8. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под общ. ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.
9. *Brune G.M.* Trap Efficiency of Reservoirs //Trans. Am. Geophysical Union. 1953. No 34 (3). Pp. 407-418.
10. *Chalov S., Prokopeva K.* Sedimentation and erosion patterns of the Lena river anabranching channel // Water. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 3845.
11. *Chalov S., Prokopeva K., Habel M.* North to south variations in the suspended sediment transport budget within large siberian river deltas revealed by remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, no. 22. P. 4549.

Н.Р. Малюгин, n.r.maliugin@outlook.com
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ВЯЗКОСТИ В РЕВЕРСИВНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ЗА СЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Приведены результаты численного моделирования динамики реверсивного потока в лотке с целью выявления режима течения, соответствующего определению отрицательной макроскопической вязкости (трения), а также анализа взаимного влияния фрикционной и вязкостной компонент диссипативных сил на формирование вышеуказанного явления. Численное моделирование выполнено в программном комплексе STREAM 2D CUDA с использованием уравнений мелкой воды, учитывающих плановую турбулентную вязкость. Предложен оригинальный критерий выявления зон отрицательной макроскопической вязкости, а также объяснены механические причины возникновения отрицательных диссипативных коэффициентов по результатам выполненного ранее анализа результатов полевых наблюдений в одномерном приближении.

Ключевые слова: гидродинамика устьевых областей, реверсивные течения, приливный цикл, реверсивное течение, турбулентная вязкость, уравнения мелкой воды.

N.R. Maliugin, n.r.maliugin@outlook.com
Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

STRENGTHENING THE EFFECT OF NEGATIVE VISCOSITY IN REVERSING FLOWS DUE TO THE INTERACTION OF VORTEX STRUCTURES

The paper presents the results of numerical simulation of reversing flow dynamics in a flume in order to identify the flow regime corresponding to the definition of negative macroscopic viscosity (friction), as well as to analyze the mutual influence of the frictional and viscous components of dissipative forces on the formation of the above phenomenon. Numerical modeling was performed in the STREAM 2D CUDA software package using shallow water equations that take into account the planar turbulent viscosity. An original criterion for identifying zones of negative macroscopic viscosity is proposed, and the mechanical causes of negative dissipative coefficients occurrence are explained based on the analysis of the results field observation results in a one-dimensional approximation.

Keywords: estuary zone hydrodynamics, reversing flows, tidal cycle, turbulent viscosity, shallow water equations.

Введение

Современные полевые исследования гидродинамического режима устьевых областей рек Белого моря, выполненные с использованием высокоточных акустических методов измерения скоростей потока, позволили получить принципиально новые результаты, свидетельствующие о присутствии эффекта так называемой отрицательной вязкости (трения) – ситуации, при которой осреднен-

ные по живому сечению градиенты скорости и глубины потока при их суммировании оказываются противоположными направлению действия диссипативных сил [1;2].

Подобное противоречие кажется неразрешимым при рассмотрении наблюдаемого явления в одномерном приближении, поскольку отрицательность интегрального коэффициента диссипации энергии потока в общепринятой формуле Дарси-Вейсбаха неизбежно ведет к не интерпретируемым с физической точки зрения мнимым значениям коэффициента Маннинга, в связи с чем применимость данного подхода к анализу реверсивных потоков является открытым вопросом.

Гипотезой настоящего исследования является предположение о том, что наблюдаемый эффект отрицательной вязкости напрямую связан со взаимным энергетическим обменом между транзитной и вихревой частями потока в условиях периодически изменяющегося реверсивного течения, в связи с чем предлагается рассмотрение модельной задачи реверсивного периодического течения в резко изменяющихся границах. Подобная постановка задачи позволяет достичь наибольшего вихреобразования в рассматриваемой области потока и, как следствие, наиболее активного энергетического взаимодействия между транзитной частью потока и вихревыми структурами за обтекаемыми сжатиями/расширениями потока.

Материалы и методы исследования

Для проведения численных экспериментов используется программный комплекс STREAM 2D CUDA, основанный на конечно-объемной дискретизации уравнений мелкой воды [3].

Основной системой уравнений, используемой для моделирования течений в используемой версии STREAM 2D CUDA, являются так называемые уравнения вязкой мелкой воды, учитывающие явление плановой вязкости [3, 4]. Данная система уравнений соответствует осредненным уравнениям Навье-Стокса с точностью до членов порядка $O(\varepsilon^2, \varepsilon^2 Re^{-1}, \delta)$.

Отличительной особенностью используемой версии программы является присутствие вязкостных слагаемых, при этом предполагается, что кинематическая вязкость ν может быть представлена как сумма молекулярной вязкости ν_m и турбулентной вязкости ν_t . При этом для определения последнего используется следующее соотношение:

$$\nu_t = \nu_c + \frac{Dhn\sqrt{g}}{h^{1/6}} |\mathbf{u}|, \quad (2)$$

где ν_c – постоянный коэффициент турбулентной вязкости; D – безразмерный диффузионный коэффициент.

Предлагаемая модель является простейшей RANS-моделью турбулентности, тем не менее как будет показано далее, ее использование позволяет получать качественно отличающиеся решения при рассмотрении резко изменяющихся во времени в пространстве течений в сравнении с получившими широкое распространение в гидрологии одномерными моделями мелкой воды.

В рамках настоящей работы выполнен модельный численный эксперимент по определению осредненных по глубине гидродинамических параметров безнапорного реверсивного потока в пределах прямоугольной области с переменным уровнем на одной из границ расчетной области. Прочие границы расчетной области рассматриваются как непроницаемые стенки без прилипания. Продольный размер расчетной области – 18 м, поперечный – 0,92 м. Выбор размеров расчетной области обусловлен ранее проведенной коллективом лаборатории численного гидродинамического моделирования ИВП РАН работы по калибровке предлагаемой модели плановой турбулентной вязкости.

В целях формирования в расчетной области вихревых структур, взаимодействующих с транзитным потоком, вдоль продольных стенок с обеих сторон располагаются непроницаемые диафрагмы с острыми кромками длиной 0,16 м и толщиной 0,04 м. В естественных условиях формирование вихревых структур, хоть и менее выражено, происходит вблизи существующих сжатий/расширений и резких поворотов русла водотока или устьевого участка.

Шероховатость дна расчетной области принята равной 0,01 (по Маннингу), что соответствует лоткам из стекла или полимерных материалов, используемых в целях физического моделирования гидродинамических процессов.

Колебания уровня на входной границе – гармонические, с амплитудой 0,02 м ($\approx 0,1h_0$) и периодом 13 с, что соответствует времени однократного распространения малого возмущения при заданной начальной глубине вдоль расчетной области. Начальная глубина потока $h_0 = 0,189$ м.

Расчетная сетка регулярная прямоугольная с шагом разбиения 0,02 м (41 144 элемента). Временной шаг определяется исходя из условия Куранта-Фридрихса-Леви ($C=0,9$). Общая продолжительность эксперимента – 10 минут модельного времени.

Для рассматриваемой расчетной области оптимальными коэффициентами для выбранной модели турбулентной вязкости являются $\nu_c = 0,002 \text{ м}^2/\text{с}$; $D = 0$.

Анализ результатов

Моделируемое течение приобретает квазистационарный (периодический) характер после трех полных периодов колебания уровня на входной границе. После достижения квазистационарного режима модуль скорости изменяется в границах от 0 м/с до 0,25 м/с в зонах обтекания диафрагм. Колебания уровней в пределах расчетной области соответствуют заданным колебаниям уровня на входной границе.

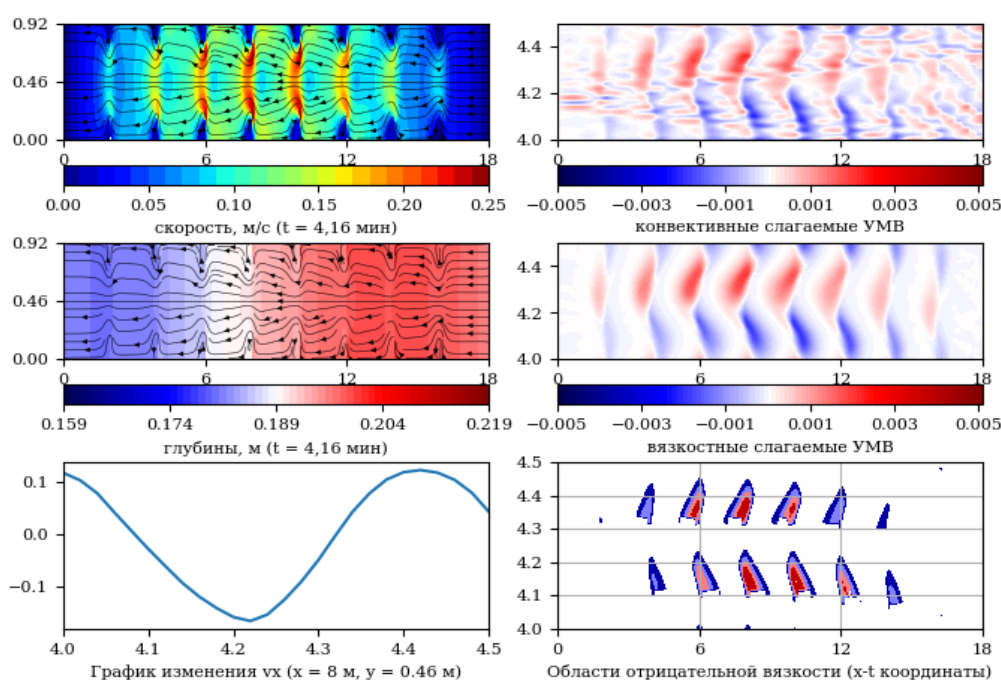
В целях подтверждения феномена макроскопической отрицательной вязкости (трения) для центрального продольного сечения расчетной области ($y = 0,46$ м) на интервале модельного времени от 4 до 4,5 мин (течение квазистационарное) был выполнен покомпонентный анализ слагаемых закона сохранения импульса для продольной оси: местного и конвективного ускорения жидкости в расчетных элементах рассматриваемого сечения, а также слагаемые гидростатического давления, фрикционные и вязкостные.

Выбор центрального продольного сечения для анализа результатов рассматриваемой задачи соответствует расположению динамической оси потока в

случае одномерного моделирования (анализа) в соответствии с ранее выполненными работами по изучению динамики реверсивных потоков в устьевых зонах.

По результатам анализа установлено, что преобладающее действие на характер движения потока оказывает гидростатическое давление и турбулентные вязкостные члены, трение о дно существенного влияния на гидродинамические параметры потока в рассматриваемой задаче не оказывает.

В таком случае зоны и временные интервалы, соответствующие определению макроскопической отрицательной вязкости (трения), могут быть определены как области на плоскости « $x-t$ », для которых сумма проекций местного и конвективного ускорения совпадает по знаку с проекцией скорости потока в заданном направлении. В таком случае, действительно, одночленная параметризация диссипативных сил по формуле Дарси-Вейсбаха приводит к отрицательным значениям коэффициента трения λ .



Результаты численного моделирования

Для рассматриваемой задачи зоны с наибольшими отрицательными значениями макроскопической турбулентной вязкости формируются в месте обтекания диафрагм на фазе реверсивного течения соответствующей, в первую очередь, снижению скорости роста продольной компоненты скорости u_x перед достижением последней экстремального значения (два раза за приливный цикл):

$$\text{sign} \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right) \neq \text{sign} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right). \quad (3)$$

Данный критерий предлагается для дальнейшей валидации при полевых исследованиях феномена макроскопической отрицательной вязкости на натуральных объектах для различных соотношений фрикционных и вязкостных слагаемых диссипативных сил.

Необходимо также отметить, что попытки описания реверсивных течений единственным коэффициентом по формуле Дарси-Вейсбаха подобно распространенной инженерной практике для стационарных и плавно изменяющихся потоков в данном случае оказывается гораздо менее эффективным, поскольку наблюдаемые эффекты обусловлены плановым взаимодействием турбулентных структур потока, которое фактически не может быть учтено существующими одномерными моделями динамики безнапорных течений.

Выводы

1. Области течения с отрицательными коэффициентами Дарси-Вейсбаха, соответствующие определению феномена отрицательной макроскопической вязкости (трения), могут быть получены при двумерном моделировании реверсивных течений уравнениями вязкой мелкой воды с использованием постоянных положительных коэффициентов трения и вязкости.

2. Для рассмотренной задачи зоны с наибольшими отрицательными значениями макроскопической турбулентной вязкости формируются в месте обтекания диафрагм на фазе реверсивного течения соответствующей, в первую очередь, снижению скорости роста продольной компоненты скорости перед достижением последней экстремального значения (дважды за приливный цикл). Данное положение должно быть проверено по результатам полевых исследований на натуральных объектах.

3. Использование одномерных моделей динамики реверсивного потока для непризматических участков течения не позволяет эффективно учитывать плановое взаимодействие вихревых структур с транзитным потоком, ввиду необходимости предварительного определения коэффициентов диссипации энергии потока, который вообще говоря, оказывается различным (положительным или отрицательным) для каждого сочетания фазы приливного цикла и морфометрических параметров исследуемого объекта и напрямую зависящим от моделируемых гидродинамических параметров.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>.

Библиографический список

1. Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. №4. С. 39–48.

2. Алабян А.М., Панченко Е.Д. Феномен отрицательной турбулентной вязкости в приливных устьях рек // Пермские гидродинамические научные чтения: сб. статей по материалам VIII Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 43–49.

3. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды. М.: РАН, 2020. 346 с.

4. Bresch D., Noble P. Mathematical Derivation of Viscous Shallow-Water Equations with Zero Surface Tension // Indiana University Mathematics Journal. 2010. №60(4). С. 1–31.

О.Я. Масликова¹, И.И. Грицук^{2,1,3}, Д.Н. Ионов¹, oksana68@mail.ru

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

²Российский Университет дружбы народов, г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЫВА МЕАНДРА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

События последнего времени, связанные с мощнейшим землетрясением, приведут к реформированию водного баланса не только в зоне самой катастрофы, но и в смежных регионах. Отголоски ощущаются за тысячи километров от эпицентра. Сейсмоопасные районы есть также в криолитозоне, на Камчатке и Дальнем Востоке. Было проведено исследование движения бассейна реки в условиях криолитозоны в случае изменения уклона земной поверхности вследствие катастрофических явлений. Для этого в гидравлической лаборатории РУДН проводилась серия экспериментов по исследованию размыва русла в таких условиях. Использовалась установка, позволяющая изменять угол наклона части потока, содержащей меандр.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, мерзлый грунт, оттаивание грунта, водный поток, уклон поверхности.

O.Ya. Maslikova¹, I.I. Gritsuk^{2,1,3}, D.N. Ionov¹, oksana68@mail.ru

¹ Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

STUDY OF MEANDER EROSION IN THE CRYOLITHIC ZONE

The recent events associated with the most powerful earthquake will reshape the water balance, not only in the disaster zone itself, but also in adjacent regions. The reverberations are felt thousands of kilometres away from the epicentre. There are also earthquake-prone areas in the permafrost zone, on Kamchatka and in the Far East. A study of river basin movement in conditions of cryolithozone was carried out in case of changes in the slope of the earth surface due to catastrophic events. For this purpose, a series of experiments were conducted at the PFUR hydraulic laboratory to investigate channel erosion under such conditions. An apparatus was used to change the inclination angle of the meander-containing part of the flow.

Keywords: permafrost, frozen ground, ground thawing, water flow, surface slope.

В [1] авторами рассматривались соотношения таяния снега (особенно в весенний период) или интенсивность дождя и способности грунта впитывать эти потоки, зависящей от степени оттаивания грунта. В весенний период наряду с пиком таяния снега происходит одновременное размораживание породы склона, и не всегда эти явления совпадают по интенсивности.

1. Если интенсивность таяния не превышает скорость инфильтрации, то вся влага уходит на пропитывание грунта. В этом случае склоновых потоков не

образуется и никакого размыва не происходит. Скорость поднятия этого горизонта равна скорости впитывания талых вод в грунт (предполагается, что этот уровень горизонта равен уровню основного потока).

2. Если интенсивность таяния превышает скорость инфильтрации, то излишки талой воды уходят в сток. На самой вершине склоновый расход равен разности интенсивности дождя и скорости инфильтрации:

$$q_{\text{скл}} = q_{\text{т}} - q_{\text{инф}}. \quad (1)$$

Но на каждом участке склона своя вертикаль талых вод, поэтому вниз по склону эти потоки объединяются с верхними, и в каждой точке склона расход будет равен:

$$q_{\text{скл}} = (q_{\text{т}} - q_{\text{инф}}) \cdot l, \quad (2)$$

где l – расстояние от вершины склона до рассматриваемой точки.

Склоновый сток, таким образом, будет линейно возрастать с уменьшением высоты, формула размыва будет зависеть от расстояния от вершины склона, а сам размыв иметь тенденцию к увеличению от вершины к подножию.

Формула размыва, полученная ранее, переписется с учетом этого:

$$S = \frac{6 \cdot 10^{-9}}{w(i^2 + 10^{-6})} \frac{\sqrt[3]{g(q_{\text{т}} - q_{\text{инф}})l}}{\lambda^{4/3}} tg \propto^{4/3}. \quad (3)$$

Таким образом, если не рассматривать влияние основного потока, то сезонное влияние атмосферных осадков происходит наиболее интенсивно у подножия склона, ближе к урезу воды – где наиболее мощные склоновые потоки.

3. Если нижняя граница снежного покрова (наиболее распространенный случай) является мерзлой породой, то скорость инфильтрации рассматривается с поправкой Арманда + 0,6 град. на нижней границе (начальное условие). В каждой точке склона расход будет равен:

$$(Q_{\text{т}} - 0,6 \cdot Q_{\text{инф}}) \cdot l, \quad (4)$$

где l – расстояние от вершины склона.

Область применимости коэффициента 0,6 будет продвигаться вглубь грунта по мере оттаивания, изменяясь в каждой конкретной точке от 0,6 до 1 (статья по дождю). Скорость протаивания вглубь грунта, распределение потоков и перераспределение их по мере оттаивания в грунте описано в [1]. Таким образом, определяется результирующий склоновый поток для уравнения 3.

Для того, чтобы началось оттаивание, потоки тепла сквозь толщу должны достичь поверхности грунта. Обычно это происходит после стаивания снега на поверхности, который стечет вниз по склону, не деформируя пока ещё мерзлый грунт. Таким образом, будет запаздывание оттаивания склона в зависимости от толщины и плотности снега и внешней температуры воздуха. Уравнения, описывающие все фазы таяния снега и распределение этих процессов во времени, приведены в [2].

Лабораторная проверка

1. Экспериментальное определение коэффициента шероховатости на склоне

Под эквивалентной шероховатостью [3] понимают высоту выступов равнозернистой шероховатости из однородного песка, при которой в квадратичной области сопротивления получается такое же значение λ , что и на рассматриваемом участке. Равнозернистая шероховатость определяется следующим образом. Опытным путем определяют λ при различных Re и строят график $\lambda=f(Re)$, который сравнивают с графиками Никурадзе. Исследуемому участку приписывают относительную шероховатость, равную относительной шероховатости той трубы в опытах Никурадзе, для которой в квадратичной области график совпадает с графиком исследуемой.



Рис. 1. Определение глубины потока при заданном угле склона

Для определения λ была проведена серия экспериментов с различным уклоном свободной поверхности, при которой замерялась скорость течения и глубина потока на склоне. Расчет производился по зависимости, полученной из формулы Дарси-Вейсбаха:

$$V = \frac{1}{\lambda} \sqrt{2ghi}. \quad (5)$$

По данным измерений (таблица) построена зависимость $\lambda = f(Re)$.

Результаты измерений λ

Уклон i , %	Скорость V , м/сек	Шероховатость λ
1	0,055	0,8
2	0,16	0,4
3 (началась подвижка ч-ц)	0,37	0,2
4	0,6	0,14

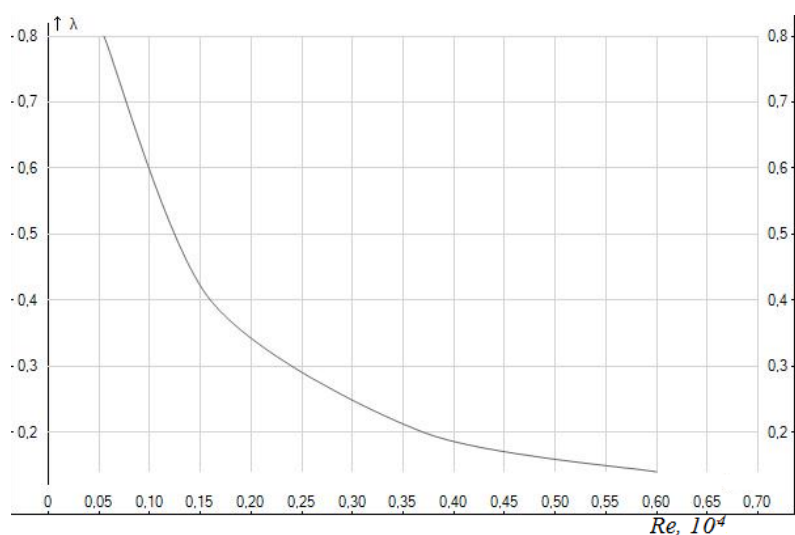


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости потока на склоне

2. Экспериментальное исследование размыва меандра в лабораторных условиях

В гидравлической лаборатории была проведена серия экспериментов по исследованию размыва меандра. Противоположные склоны (внешний и внутренний) выкладывались маркерным песком различного цвета для отслеживания миграции наносов и дифференцирования их. На рисунке 3 слева склон до начала эксперимента, справа – после. Как и было ожидаемо, внешний склон размывается интенсивнее [4], в то время как внутренний подвергается только проседанию, вещество при этом практически не движется.



Рис. 3. Эксперименты по исследованию размыва меандра

3. Изменение геометрии канала при увеличении уклона земной поверхности

При изменении уклона земной поверхности геометрия канала в разрезе будет претерпевать существенные изменения. На рисунке 4 схематически показаны разрезы русла а) в состоянии равновесия до изменения уклона; б) случай уклона в сторону внешнего склона; в) в сторону внутреннего склона. В первом случае внешний берег будет продолжать размываться, а внутренний намываться, и вследствие этого сам меандр будет мигрировать, постепенно двигаясь все

дальше и дальше «вниз». Во втором случае, в зависимости от угла наклона, меандр будет иметь тенденцию к сглаживанию. Разумеется, всё зависит от конкретной местности (состав грунта, климатические условия) и степени уклона по отношению к первоначальному.

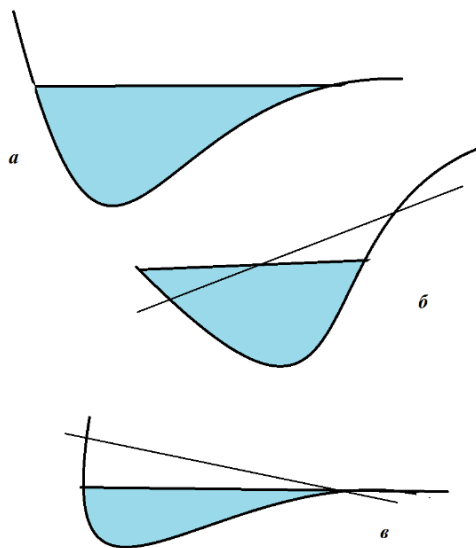


Рис. 4. Схематические разрезы русла:

- а) в состоянии равновесия до изменения уклона;
 б) случай уклона в сторону внешнего склона; в) в сторону внутреннего склона

Таким образом, дальнейшие исследования и эксперименты позволят получить более полную модель движения наносов, включающую уравнения движения потока на склоне с учетом таяния подстилающего грунта, осадков, вихревого движения жидкости на повороте русла и возможного изменения уклона земной поверхности в сейсмоопасных районах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7)

Библиографический список

1. Гришук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород. // Лед и снег. М.: 2012. №3(119). С. 73-78.
2. Гришук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К., Синиченко Е.К. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. М.: 2013. №3. С. 83-91.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник для вузов (3-е изд., перераб. и доп.) // М.: КолосС, 2005. 655 с.
4. Масликова О.Я., Гришук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К. Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. М.: 2019. Т. 20. № 1. с. 85-95.

К.Д. Микова, Д.А. Соснина
mikovak@yandex.ru, darya.sosnina.01@mail.ru
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ЗИМНИЙ СТОК РЕК ПЕРМСКОГО КРАЯ

Выполнены расчеты минимальных 30-ти суточных расходов воды в период зимней межени для 10 гидрологических постов. Выявлено, что минимальные 30-ти суточные расходы воды формируются с февраля по март. После 1978 г. на исследуемой территории наблюдается увеличение минимальных расходов воды зимой. Наибольший рост расходов отмечен для равнинных рек. Выявленные тренды оказались статистически значимыми.

Ключевые слова: зимний сток рек, изменение стока, многолетняя изменчивость.

K.D. Mikova, D.A. Sosnina
mikovak@yandex.ru, darya.sosnina.01@mail.ru
Perm State University, Perm, Russia

CLIMATIC CHANGES IMPACT ON THE WINTER FLOW OF RIVERS IN THE PERM KRAY

Calculations of the minimum 30-day water flow during the winter low water period for 10 hydrological stations have been done. It was revealed that the minimum 30-day water flow is formed from February to March. After 1978, an increase in the minimum runoff in winter in the study area was observed. The largest increase in winter runoff was noted for the lowland rivers. The identified trends were statistically significant.

Keywords: winter flow of rivers, change in runoff, long-term variability.

Введение

На большей части России, минимальный зимний сток рек отличается значительной многолетней изменчивостью и разнообразием условий формирования [1; 2]. Знание закономерностей формирования зимнего стока рек необходимо для надежного обеспечения водой населенных пунктов и промышленных предприятий, сохранности водных обитателей в зимнее время и т.д. Наличие точной информации об ожидаемом дефиците воды позволяет пережить его с минимальными потерями для водопользователей. Практический интерес представляет долгосрочный прогноз характеристик зимней межени, так как водность в этот период выступает в качестве лимитирующего фактора использования водных ресурсов.

На колебания зимнего стока существенное влияние оказывает изменчивость метеоусловий в зимний период. В условиях современного изменения климата необходимо продолжать исследования в данной области.

Материалы и методы исследования

Исходными данными послужили многолетние ряды наблюдений за расходами воды на 10-ти гидрологических постах (г/п) за период 1956-2020 гг. Для исследования отобраны средние реки с площадью водосбора до 10500 км². Посты расположены на равнинной территории (р. Коса – с. Коса; р. Лолог – пос. Сергеевский; р. Иньва – г. Кудымкар; р. Иньва – пос. Слудка; р. Обва – с. Карагай) и в горной части (р. Колва – д. Петрецова; р. Косьва – с. Останино (Перемское); р. Усьва – пгт Усьва; р. Сылва – пгт Шамары; р. Чусовая – пгт. Староуткино).

В качестве исследуемой характеристики использованы минимальные 30-ти суточные расходы воды в период зимней межени. Оценка изменений расходов воды выполнена для периода 1979-2020 гг. по сравнению с 1956-1978 гг.

Анализ результатов

В формировании зимнего меженного стока рек на территории Пермского края отмечается характерная закономерность – рост минимального зимнего стока с увеличением площади водосборов рек (рис. 2). Среднемноголетние минимальные 30-ти суточные расходы воды (1956-2020 гг.) на исследуемых реках изменяются в пределах 1,37–7,93 м³/с.

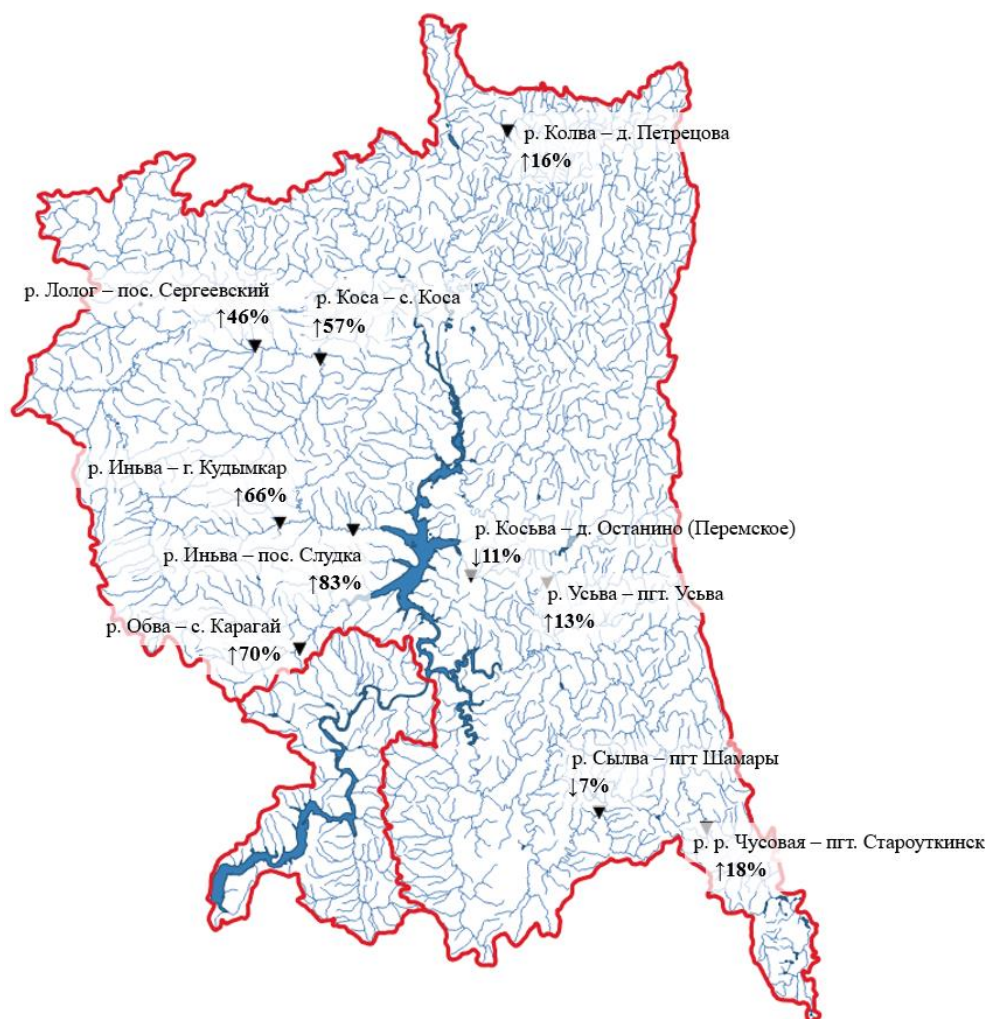


Рис. 1. Изменение минимальных 30-ти суточных расходов воды зимней межени

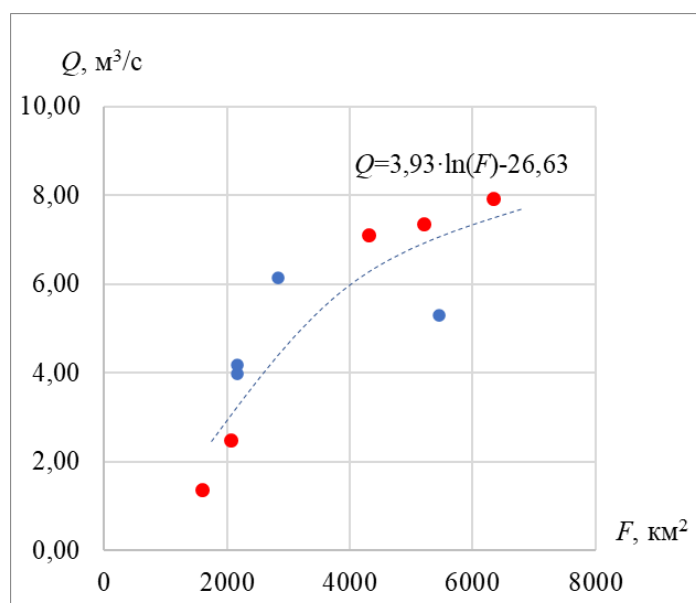


Рис. 2. Зависимость среднемноголетних (1956-2020 гг.) минимальных 30-ти суточных расходов воды (Q , м³/с) за период зимней межени от площади водосбора рек (F , км²) (● равнинные реки; ● горные реки)

Наименьшие расходы воды, как правило, формируются с февраля по март. Начало 30-ти суточного периода в среднем приходится на начало февраля (1–10 февраля), а конец периода на начало марта (2–11 марта). Расходы воды к этому времени уменьшаются в 2–5 раз по сравнению с расходами воды в начале зимней межени.

Графики многолетнего изменения минимальных зимних 30-ти суточных расходов воды для 10 гидрологических постов показали наличие периодов разной водности рек: 1956–1978 гг. и 1979–2020 гг. (рис. 1). В период 1956–1978 гг. водность рек была значительно меньше (таблица). Как видно из рисунка 3 и таблицы в последние десятилетия практически на всех г/п наблюдается увеличение зимнего стока. Наибольший рост минимальных зимних расходов воды наблюдался на г/п расположенных на равнинных реках 46–83%. В увеличении зимнего стока прослеживается определенная закономерность – чем больше площадь водосбора, тем больше увеличился минимальный зимний 30-ти суточный расход воды. Исключение составил водосбор р. Чусовая – пгт. Староуткинск, где рост оказался меньше ожидаемого, что, возможно, связано с наличием пропусков в рядах наблюдений за период 1979-2020 гг. В горной части водосбора отмечается меньший рост расходов (13-18%), при этом на двух г/п (р. Косьва – д. Останино (Перемское); р. Сылва – пгт Шамары) происходит уменьшение стока.

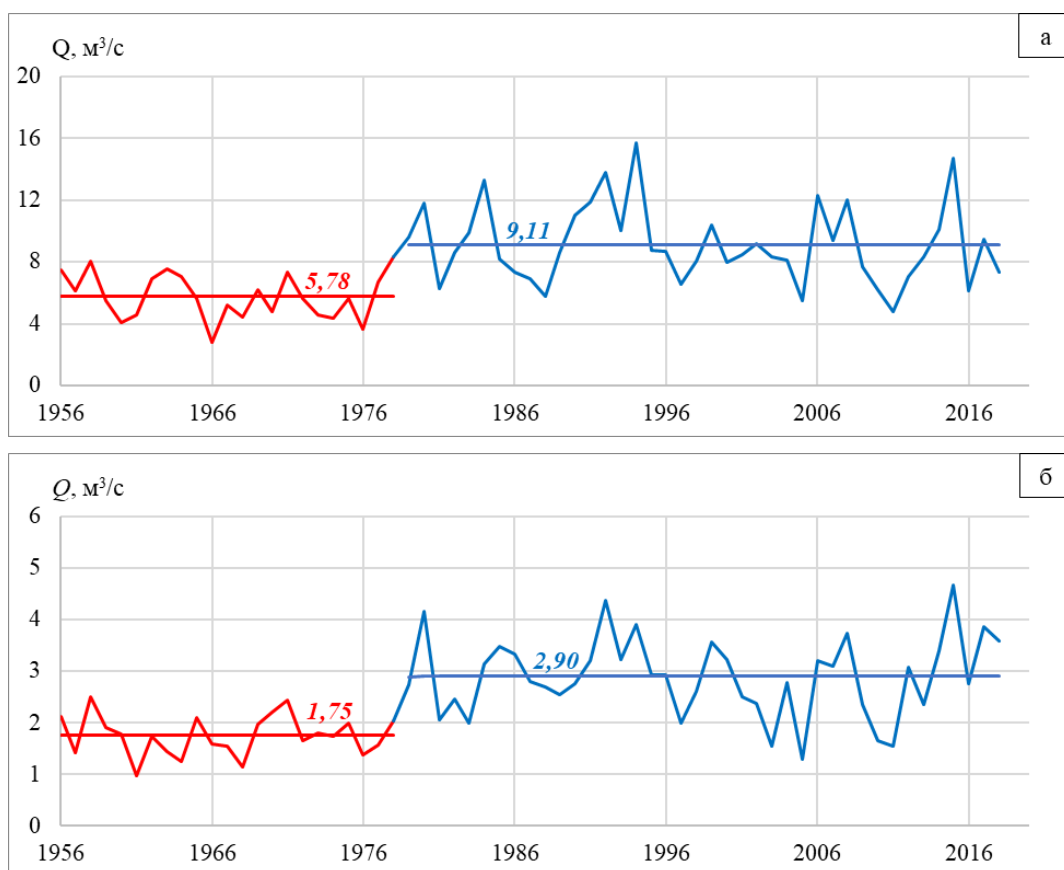


Рис. 3. Многолетнее изменение минимальных 30-ти суточных расходов воды за 1956-1978 и 1979-2020 гг. на г/п: (а) р.Коса – с.Коса, (б) р.Иньва – г.Кудымкар

Исследование Паромова В.В. и Шантыковой Л.Н. [3] показало, что период после 1980-х годов считается периодом заметного увеличения средней глобальной температуры воздуха. Максимальное потепление характерно для равнинных рек и низкогорья. На исследуемой территории в многолетней динамике зимнего стока также проявляется тенденция к росту, что может быть вызвано увеличением температур воздуха и почвы. Согласно Второму оценочному докладу Росгидромета об изменении климата и последствиях на территории Российской Федерации [4] доминирующей тенденцией изменения годового стока рек России является его увеличение. Данное увеличение расходов воды также связывают с повышением средней температуры воздуха и почвы из-за изменения концентрации парниковых газов в конце 20 – начале 21 в.

Статистический анализ многолетнего изменения минимальных зимних 30-ти суточных расходов воды показал, что гипотеза стационарности не выполняется. Оценка значимости тренда имеющихся рядов наблюдений выполнена по критерию Стьюдента при $p < 0,05$. Результат показал, что для 6 из 10 постов тренд оказался значимым (таблица). Таким образом, выявлена тенденция увеличения минимального 30-ти суточного стока рек зимой на исследуемой территории. Наибольшие изменения наблюдаются на равнинных реках.

Изменение минимальных 30-ти суточных расходов воды зимней межени

Гидрологический пост	$Q_{1956-1978}$, $м^3/с$	$Q_{1979-2020}$, $м^3/с$	ΔQ	
			$м^3/с$	%
Равнинные реки				
р. Коса – с. Коса	5,78	9,11	+3,32	57
р. Лолог – пос. Сергеевский	1,03	1,50	+0,48	46
р. Иньва – г. Кудымкар	1,75	2,90	+1,15	66
р. Иньва – пос. Слудка	4,80	8,81	+4,01	83
р. Обва – с. Карагай	4,92	8,37	+3,44	70
Горные реки				
р. Колва – д. Петрецова	5,61	6,49	0,88	16
р. Косьва – д. Останино (Перемское)	23,6	21,0	-2,54	-11
р. Усьва – пгт. Усьва	3,68	4,14	0,46	13
р. Чусовая – пгт Староуткинск	4,82	5,67	0,85	18
р. Сылва – пгт Шамары	4,36	4,05	-0,31	-7

Примечание: $Q_{1956-1978}$ – средний минимальный 30-ти суточный расход воды за период 1956–1978 гг., $м^3/с$; $Q_{1979-2020}$ – средний минимальный 30-ти суточный расход воды за период 1979–2020 гг., $м^3/с$; ΔQ – изменение средних минимальных 30-ти суточных расходов воды. Курсивом выделены значимые изменения.

Выводы

Исследование многолетнего изменения минимальных зимних 30-ти суточных расходов воды позволило выделить периоды разной водности рек. В первую половину выделенных периодов (1956–1978 гг.) водность рек меньше, чем во вторую половину периодов (1979–2020 гг.). За период 1956–2020 гг. на всех исследуемых г/п наблюдался рост минимальных расходов воды на 13–83%. Оценка значимости тренда имеющихся рядов наблюдений по критерию $p < 0,05$ показал, что для 8 из 10 постов тренд оказался статистически значимым.

Библиографический список

1. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 581–581.
2. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. Вып. 4. С. 74–84.
3. Паромов В.В., Шантыкова, Л. Н. Изменение характеристик ледового режима рек бассейна Верхнего Енисея // Лед и снег, 2010. №2. С. 51–55.
4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологии, 2022. 124 с.

В.М. Морейдо, Б.И. Гарцман vsevolod.moreydo@iwp.ru
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ПРОГНОЗ СЕЗОННОГО РЕЧНОГО СТОКА В ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ И ВЕРОЯТНОСТНОЙ ФОРМАХ

Рассмотрена методика получения прогнозов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу на основе ансамблевого подхода. Методика позволяет получать прогнозы как в детерминированной форме путем осреднения ансамбля сценариев притока, так и в виде вероятностного распределения интересующих величин (объем притока, максимальный расход и т.п.). Комбинирование разработанного подхода с долгосрочным метеорологическим прогнозом методом многомерного вероятностного моделирования может позволить увеличить период заблаговременности прогноза и повысить его точность и оправдываемость.

Ключевые слова: долгосрочные гидрологические прогнозы, управление водохранилищами, гидрологические прогнозы, гидрологическое моделирование

V. Moreido, B. Gartsman vsevolod.moreydo@iwp.ru
Water problems institute of the RAS, Moscow, Russia

SEASONAL RUNOFF FORECASTING IN DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC FORM

An approach for long-term forecasting of water inflow to the Cheboksary reservoir based on the ensemble approach is presented. The approach allows to obtain forecasts both in a deterministic form by averaging an ensemble of inflow scenarios, and in the form of probability distribution function of the desired variables (such as inflow volume, maximum flow rate, etc.). Combining the developed approach with a long-term meteorological forecast using multivariate probabilistic modeling can increase the lead time of the forecast and improve its accuracy and detection rate.

Keywords: Long-term hydrological forecasts, reservoir management, hydrological forecasts, hydrological modeling

Введение

Разработка долгосрочного гидрологического прогноза высокой точности является сложной фундаментальной задачей современной гидрологии [6], а востребованность таких систем велика в областях гидроэнергетики, судоходства, сельского хозяйства и у экстренных служб. В настоящее время широко используются методы долгосрочного прогнозирования, основанные на использовании физико-статистических зависимостей основанных на соотношениях элементов водного баланса водосбора [5]. Такие зависимости предоставляют прогноз в виде одного ожидаемого значения прогнозируемой величины, т.е. в детерминированной форме [8]. Детерминистический (однозначный) прогноз позволяет определять лишь наиболее вероятное значение прогнозируемой величины, не предоставляя никаких оценок неопределенности прогнозируемой величины. Однако при управлении водными ресурсами имеет зачастую критическое значение при выборе стратегии принятия решений потребителями прогнозов Наибольшее значение имеет предсказание вероятности редких явлений. Таким образом, высокую

ценность представляет прогноз в виде вероятностного распределения прогнозируемой величины.

Одним из методов получения долгосрочного вероятностного прогноза является ансамблевая методика, которая объединяет динамическую гидрологическую модель формирования стока и ансамбль возможных будущих метеорологических условий за период заблаговременности, которые используются для расчета в гидрологической модели. При этом наблюдаемые в прошлом сценарии метеорологических условий за период заблаговременности прогноза задаются как возможные будущие метеорологические условия. Показано, что использование ансамблевых прогнозов позволяет разработать более гибкий режим управления водно-ресурсными системами, так как дает возможность оценить степень риска при вероятных ошибках прогноза, а также обеспечивает большую экономическую эффективность управления, чем детерминистические прогнозы [1].

Указанные преимущества такого подхода могут быть использованы для дальнейшего усовершенствования вероятностного прогноза. Оно связано с разработкой процедуры пост-обработки результатов ансамблевого прогноза с привлечением сезонных метеорологических прогнозов. Для водосборов с наличием талого стока, к которым относится большинство рек в нашей стране, существенным является точность воспроизведения гидрологической моделью влагозапасов в снеге, а также процессов снеготаяния, которые, в свою очередь, зависят от качества прогноза температурного режима. Также, существенным является прогноз суммы осадков за период снеготаяния.

В настоящей работе описана методика получения долгосрочных ансамблевых прогнозов притока воды в Чебоксарское водохранилище путем сочетания ансамблевого гидрологического подхода, численного долгосрочного прогноза метеовеличин и многомерного вероятностного моделирования.

Материалы и методы исследования

Система ансамблевого долгосрочного гидрологического прогноза разработанная в ИВП РАН [2; 4; 6] позволяет на основе физико-математической модели формирования речного стока с распределенными параметрами ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics) [2] по ансамблям метеорологических данных за предыдущие годы наблюдений набора (ансамбля) строить сценарии гидрографов возможных расходов воды притока в Чебоксарское водохранилище за период заблаговременности прогноза с их последующей обработкой для получения прогноза различных характеристик речного стока. Для получения прогноза расходов воды в детерминированной форме используется осреднение значений по всем членам ансамбля или построение вероятностных распределений характеристик всех сценариев для получения прогноза в вероятностной форме. Таким образом, прогноз дается на основании полного ансамбля сценариев.

Модель проверялась на протяжении ряда лет в оперативном режиме и показала высокое качество и заблаговременность прогноза. Так, значения коэффициента линейной корреляции R для объемов притока во II квартале составило 0,91, среднеквадратическая ошибка прогноза $RMSE - 2,8 \text{ км}^3$, значение S/σ за период с 2017 по 2022 г. (5 лет) – 0,38, за весь период проверочных прогнозов –

0,29. Значения R для максимальных расходов воды притока во II квартале – 0,94, среднеквадратическая ошибка прогноза $RMSE$ – $1224 \text{ м}^3/\text{с}$, величина S/σ за 5 лет – 0,49, за весь период проверочных прогнозов – 0,35.

Для получения прогнозных значений температуры и осадков большой заблаговременности (от 1 до 4 месяцев) была использована численная модель циркуляции атмосферы ПЛАВ, разработанная в Гидрометцентре России и ИВМ РАН [7]. Общий принцип разработанной методики прогноза заключается в построении условных кривых обеспеченности прогнозируемой величины (среднемесячных расходов воды бокового притока к Чебоксарскому водохранилищу) при различных сочетаниях диапазонов значений предикторов, которыми в данном случае являются прогнозные (по полному ансамблю сценариев) среднемесячные расходы воды притока и прогнозные величины месячных сумм осадков и среднемесячной температуры воздуха. Условные кривые вероятностного распределения прогнозных величин строятся общепринятыми методами, после разделения исходной совокупности фактических среднемесячных расходов на подвыборки, соответствующие различным сочетаниям используемых предикторов. В данном случае используется сочетание предикторов «прогнозный расход воды притока – осадки – температура», рассматриваемое в пределах трех категорий по 33%-ным квантилям плотности вероятности их распределения, то есть исходная совокупность фактических расходов воды притока разделяется на $3 \times 3 \times 3 = 27$ подвыборок.

Очевидно, что имеющиеся ряды исходных данных наблюдений, охватывающие период с начала работы водохранилища по настоящее время, недостаточно продолжительны, чтобы обеспечить такое построение непосредственно. Поэтому для построения условных кривых обеспеченности был применен метод многомерного (группового) вероятностного моделирования [3], с помощью которого генерировался набор модельных рядов достаточной продолжительности, сохраняющий все основные статистические свойства исходного набора рядов. Исходные ряды гидрометеорологических фактических и прогнозных величин подвергались стандартизации, проверке на нормальность распределения тестом Шапиро-Уилкса и нормализации при помощи трансформации Тьюки. Далее нормализованные ряды характеристик подвергались преобразованию методом главных компонент. По оценкам полученных рядов главных компонент и их ковариационной матрице производилось многомерное моделирование нормально распределенных случайных величин длиной 27000 значений. С полученными рядами смоделированных главных компонент производилось обратное преобразование, после чего характеристики исходных и полученных рядов были сопоставлены для проверки воспроизведения средних значений, дисперсий и сравнения функции плотности вероятности распределения. Далее все полученные ряды снова разделялись на категории по заданным квантилям распределения и формировались все возможные комбинации этих категорий, в пределах которых с интегральной функции распределения определялись значения квантилей 5%, 50% и 95% обеспеченности фактических расходов воды по всем исследуемым месяцам для различной заблаговременности (от 1 до 3 месяцев), составляющие 90% доверительный интервал и медианное значение для прогноза.

Полученные вероятностные прогностические значения для каждого месяца с марта по июнь для заблаговременностей от 1 до 3 месяцев были сопоставлены с фактическими значениями притока за соответствующие месяцы и годы (с 1982 по 2010) и определены их средняя квадратическая ошибка и коэффициент корреляции с рядом фактического притока. Также были оценены попадания фактических значений притока в 90% доверительный интервал прогноза путем оценки величины интервала и оценки оправдываемости, т.е. попадания в 90%-ный доверительный интервал.

Для проверки методики использовалось два способа задания будущих метеорологических условий (среднемесячных температур и сумм осадков) в качестве прогнозных. Проверка модели «по метеопрогнозу» осуществлялась при помощи использования данных среднемесячных прогнозов по метеорологической модели ПЛАВ [7], разработанной в ИВМ РАН и применяемая в Гидрометцентре России. Период для оценок был взят по имеющейся информации о прогнозах на весь бассейн Чебоксарского водохранилища за период с 1991 по 2010 гг. Проверка модели «по «идеальному» прогнозу» осуществлялась при помощи использования данных атмосферного реанализа по той же модели, т.е. величин, очень близких к фактически наблюдавшимся за тот же период. Таким образом, был проверен предел предсказуемости гидрологических характеристик, который может быть достигнут при использовании все более совершенных и точных прогнозов будущих метеорологических условий.

Анализ результатов

Для прогноза величин притока воды в Чебоксарское водохранилище были рассчитаны сценарии за период с 1982 по 2022 гг. с марта по июнь заблаговременностью от 1 до 3 месяцев. После этого из ансамбля сценариев был рассчитан средний детерминистический прогноз по полному ансамблю (ППА) и была произведена процедура многомерного вероятностного моделирования. Полученная прогнозная информация в вероятностной форме – интегральные функции распределения среднемесячных объемов притока воды в водохранилище с оценкой 90%-ного доверительного интервала – была с помощью метеорологического прогноза по модели ПЛАВ и «идеального» метеорологического прогноза оценена на весь период проверочных прогнозов с 1991 по 2010 гг.

Использование «идеального» прогноза позволило несколько увеличить значение коэффициентов корреляции для прогноза – с 0,59 до 0,72 в апреле для заблаговременности 2 месяца и с 0,53 до 0,74 в мае для заблаговременности 3 месяца. Прогноз по ПЛАВ дает существенное преимущество при прогнозировании в мае с заблаговременностью 1 месяц – с 0,83 до 0,90. Для остальных месяцев и заблаговременностей улучшений не отмечено. При этом по величине оправдываемости прогноза, характеризующей попадание величины фактического притока в 90% доверительный интервал вероятностного прогноза, отмечается прирост от 10 до 30% на всех заблаговременностях и во все месяцы как по «идеальному» прогнозу, так и по ПЛАВ.

Выводы

Использование ансамблевого подхода позволяет выпускать прогноз речного стока в детерминистической и вероятностной форме на единой методической основе. Это позволяет существенно увеличить информативность гидрологического прогноза, а также, за счет использования долгосрочного метеорологического прогноза, несколько повысить точность прогнозирования отдельных элементов весеннего половодья.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0003 Государственного задания ИВП РАН.

Библиографический список

1. *Boucher M.-A., Roulin E., Fortin V.* Short-Range Ensemble Forecast Post-processing // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. – Springer Berlin Heidelberg, 2018. С. 1-25. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_71-1.
2. *Бориц С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А.* Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 366. С. 68-86.
3. *Картвелишвили Н.А.* Стохастическая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 162 с.
4. *Морейдо В.М.* Оценка предсказуемости притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью численных экспериментов // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. 2017. С. 241-247.
5. Руководство... Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 357 с.
6. *Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P.* Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // Hydrology and Earth System Sciences. – 2018. – Vol. 22. – № 4. – P. 2073-2089. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2073-2018>.
7. *Khan V.M., Kryzhov V.N., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Bundel' A.Y.* Multimodel approach to seasonal prediction // Russian Meteorology and Hydrology. 2011. Vol. 36. № 1. <https://doi.org/10.3103/S106837391101002X>.
8. *Бориц С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Т. 355. С. 3-195.

Ю.М. Нестеренко¹, М.Ю. Нестеренко¹, Н.В. Соломатин¹, В.А. Мещерин²,
geocol-onc@mail.ru

¹Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Оренбург, Россия

²Оренбургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал
ФГБУ «Приволжское УГМС», г. Оренбург, Россия

РЕЖИМ СТОКА РЕКИ УРАЛ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Рассмотрены водные ресурсы Южного Урала. Выявлено влияние уровня обеспеченности водными ресурсами на формирование биоресурсов, социума и экономики. Обоснована необходимость увеличения строительства водохранилищ в исследуемом бассейне. Результаты исследования направлены на повышение эффективности использования водных ресурсов природой, в социуме и экономике в бассейне р.Урал.

Ключевые слова: водные ресурсы, русловые процессы, биоресурсы, социум и экономика в бассейнах рек.

Yu. Nesterenko¹, M. Nesterenko¹, N. Solomatin¹ and V. Meshcherin²,
geocol-onc@mail.ru

¹Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Orenburg, Russia

²Orenburg Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Federal State Budgetary Institution "Privolzhskoe UGMS", Orenburg, Russia

FLOW REGIME OF URAL RIVER, PROBLEMS AND SOLUTIONS

The water resources of the Southern Urals are considered. The influence of the level of water availability on the formation of biological resources, society and economy is revealed. The necessity of increasing the construction of reservoirs in its basin is substantiated. The results of the study are aimed at improving the efficiency of the use of water resources by nature, in society and the economy in the Ural River basin.

Keywords: water resources, riverbed processes, bioresources, society and economy in river basins.

Введение

Река Урал и его водосбор расположены в лесостепной, степной и полупустынной зонах с большим разнообразием геологии и рельефа, интенсивным специфичным антропогенным воздействием. Особенности речных бассейнов обуславливают необходимость адресных решений по их оптимизации в интересах природы и человека.

Водный сток р.Урал и хозяйственная деятельность на его водосборе существенно отличаются от других рек России. Важнейшей и главной проблемой его водного стока является большая неравномерность по годам и сезонам. Велики антропогенные изменения в формировании водного стока на водосборе. Без их учета мероприятия по решению экологических проблем не дадут желаемого результата. Изменения в режиме стока р. Урал обуславливают соответствующие

изменения в его русле и пойме с положительными и отрицательными последствиями.

Река Урал и его водосбор – комплексная система живой и не живой материи, находящаяся в эволюционном развитии совместно с непрерывно меняющимся климатом, погодой и всей Природой Земли с участием и без участия деятельности человека, как ее эволюционно сформировавшейся части.

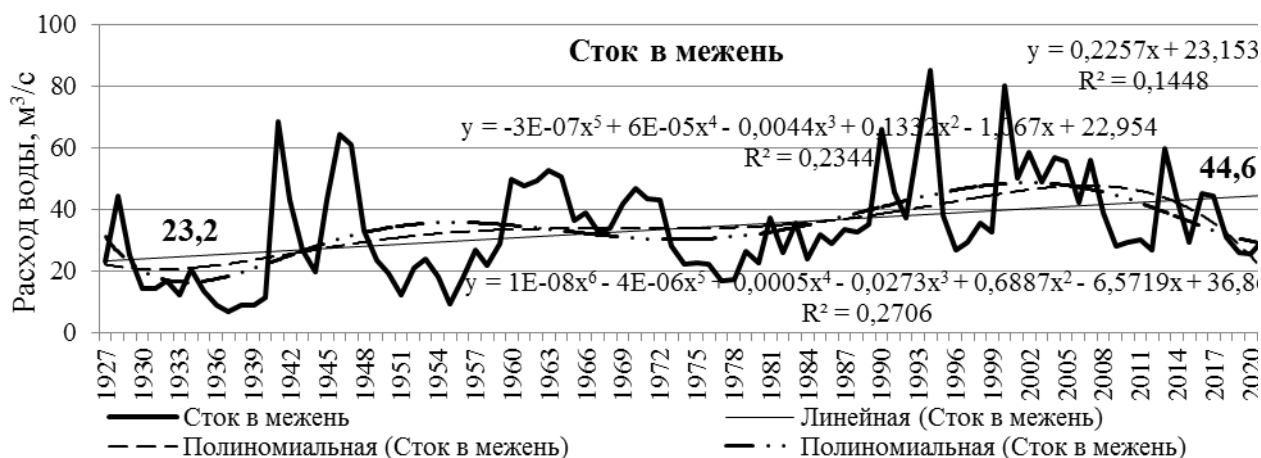
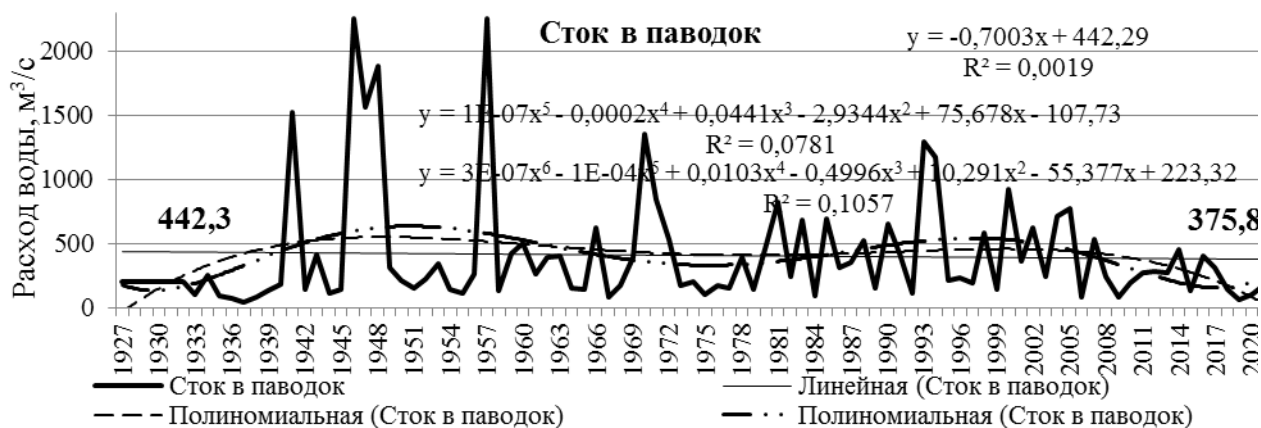
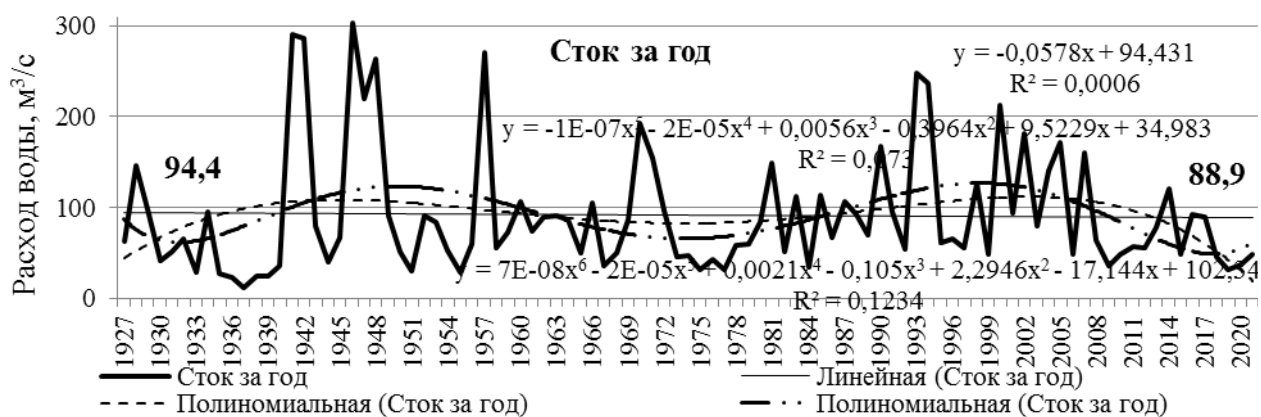
Материалы и методы исследования

Использованы материалы полевых опытов авторов, фондовые материалы Оренбургского гидрометцентра и Оренбургстата. Методами статистической обработки с построением графиков изучены особенности стока р.Урал и их влияние на природу бассейна.

Для бассейна р.Урал характерна неравномерность стока как в многолетнем режиме, так и в течение года. Используя данные Оренбургского гидрометцентра в режиме годового стока реки можно выделить два периода: повышенной его неравномерности в 1927-1957 гг. до строительства Ириклинского водохранилища в 1967-2021 гг. многолетнего регулирования в его верховье объемом 3,2 км³ и после его заполнения в 1967-2021 гг. В первый период до значительного регулирования река в районе г. Оренбурга имела в основном естественный сток (рисунок) с расходом за год от 23 м³/с (1936 г.) до 303 м³/с (1946 г.). Водоохранилище, зарегулировав 30% водного стока реки до створа г. Оренбурга, уменьшило неравномерность стока по годам до 32 м³/с (1993 г.) и 248 м³/с (1993 г.). Анализ линейного тренда за 95-летний период показывает уменьшение среднего стока реки на 5,5 м³/с, что составляет 6% от среднего годового стока. Уменьшение годового стока р.Урал соответствует уменьшению годовых атмосферных осадков в регионе на 6,4% в расчете на 134 года [5].

В годовом стоке р. Урал выделяются два основных периода – весенний паводок и меженный период. Важнейшим периодом является весенний паводок. За время паводка проходило до 90% годового стока (1942 г.). До строительства Ириклинского водохранилища в 1927-1957 года в районе г. Оренбурга в паводок проходило 74% годового стока реки. После ввода водохранилища в эксплуатацию в 1967-2021 гг. его доля уменьшилась до 58%.

На рисунке показана изменчивость стока р.Урал в весенний паводок в апреле, месяце наибольшего расхода воды весной, в створе г. Оренбурга в 1927-2021 гг. В паводковом стоке, аналогично годовому, выделяется период до строительства водохранилища и после его заполнения. В 1927-1957 гг. расход воды в реке был 460 м³/с и изменялся от 24 м³/с (1939 г.) до 2260 м³/с в 1946 и 1957 годах. Водоохранилище уменьшило средний паводковый сток до 391 м³/с, но увеличило минимальный сток до 66 м³/с (2019 г.) и уменьшило максимальный до 1350 м³/с (1970 г.), ликвидировав экстремально малые и экстремально большие расходы.



Расход воды (м³/с) в р.Урал 1927-1921 гг. в районе г. Оренбурга

В меженном стоке р.Урал также наблюдаются периоды до и после строительства Ириклинского водохранилища. Основной его минимум в июле-феврале.

В 1927-1957 гг. естественный меженный сток реки в среднем был 24 м³/с и изменялся от 7 м³/с (1937 г.) до 68 (1941 г.). После строительства водохранилища средний меженный сток увеличился до 38 м³/с, что в 1,6 раза больше меженного стока до его строительства, и стал в пределах от 17 м³/с (1977 г., 1978 г.) до 85 м³/с (1994 г.).

Не зарегулированный водный сток р.Урал с большими колебаниями по годам и сезонам с бурными весенними паводками и продолжительными мелководьями в межень не способствует эффективному использованию его водных ресурсов. Основная их часть сбрасывается в Каспий весенними паводками без предварительного использования в социуме и хозяйственной деятельности, усиливая эрозионные процессы в его русле.

Анализ результатов

Отличительной особенностью половодий в бассейне р.Урал, длящихся около месяца, является быстрая смена температуры и мутности воды, объемов, уровня и скоростей ее течения. Быстрая смена условий обитания живых организмов затрудняет их адаптацию все к новым и новым условиям, и они в стрессовой ситуации замедляют развитие и во множестве погибают, изменяется видовой состав. Весенний паводок Урала начинается в середине апреля и продолжается до 10 мая. Температура воды в реке в паводок по данным Оренбургского гидрометцентра находится в пределах 5-10°C с большими колебаниями во времени, что ниже оптимального режима температур для нереста многих видов рыб. Количество и видовой состав бентоса в реке начинают восстанавливаться после зимнего анабиоза с повышением температуры после паводка и стабилизации водного стока в межень [1; 2; 4].

Сезонное маловодье сокращает площади с водной растительностью и донного ила, содержащего бентос, уничтожается кормовая база ихтиофауны и другой водной живности. Количество ихтиофауны и ее видовой состав определяется меженным объемом воды, а не средними и краткосрочными паводковыми. По исследованиям Д.К. Кожаевой, С.Ч. Казанчева и Д.В. Жантеголова [3] для ихтиофауны глубина воды в водоеме должна быть не менее 2,5-3 м. Средняя глубина Урала в районе г. Оренбурга в межень 60-70 см, что мало для функционирования продуктивной ихтиофауны и подтверждается малым ее количеством в нем и его притоках.

Рост многих населенных пунктов Оренбуржья ограничен малой обеспеченностью водными ресурсами. Они страдают в меженный период от маловодья, а весенние паводки от ее избытка. Нужно накопление талых вод в водохранилищах в районах перспективных населенных пунктов. Они станут центрами притяжения населения из малоперспективных поселений. В растущих поселениях рентабельно создавать высоко технологичное производство и социокультурную базу для комфортной жизни населения. В сельской местности это будут агрогородки.

Без повышения эффективности использования водных ресурсов в природной системе бассейна реки Урал, в основном сбрасываемых в паводки без предварительного использования проблематично гармоничное развитие его природы и улучшение бытия населения.

Негативные воздействия нестабильности водного стока устраняются или уменьшаются строительством водохранилищ и прудов.

Выводы

Современное состояние р. Урал и его притоков с большими неравномерностями стока по годам и сезонам не благоприятно для развития, биоразнообразия и продуктивности биосистем в его русле и пойме, а также социума и экономической деятельности человека.

Катастрофические паводки краткосрочными разливами создают стрессовые условия для живых организмов реки и поймы со многими жертвами.

Меженное маловодье Урала и его притоков сокращает ареалы водных экологических систем, приводит к уменьшению видового состава ихтиофауны и ее продуктивности, формируются не благоприятные условия для социума и развитию производства.

Решение многих проблем экологии, социума и хозяйственной деятельности человека в бассейне р. Урал возможно лишь на основе стабильного в необходимом объеме обеспечения водными ресурсами, являющихся системообразующей компонентой вододефицитных территорий. Созданная система водохранилищ в его верховье обеспечила улучшение экологической обстановки для населения и повышения продуктивности природы в зарегулированной части бассейна р. Урал, положительно повлияла на меженный сток в ниже расположенной его части.

Библиографический список

1. *Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М.* Продукционная гидробиология. СПб: Наука, 2013. 343 с.
2. *Жирков И.А.* Жизнь на дне. Биоэкология и биогеография бентоса. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 453 с.
3. *Кожяева Д.К., Казанчев С.Ч., Жантеголов Д.В.* Влияние глубины водоемов на их биоэкологические параметры. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета 6(50). 2014. С. 155–157.
4. *Масюткина Е. А.* Оценка экологического состояния водных объектов Калининградской области на основе структурно-функциональных и индикаторных свойств зообентоса. Диссертация на соискание ученой степени канд. биол. наук. Калининград. 2018. 184 с.
5. *Nesterenko Yu.M., Solomatin N.V., Khalin A.V.* Climate and weather of the Southern Urals and their influence on agronomy. // E3S Web of Conferences Volume 222 (2020) International Scientific and Practical Conference “Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad” (DAIC 2020) Yekaterinburg, Russian Federation, October 15-16, 2020. 11 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022205015>.

Ш.Р.Поздняков¹, С.А.Кондратьев², tbgmaster@mail.ru

¹Институт исследований континентальных водных объектов РГГМУ,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт озераведения СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩ И ИХ ВОДОСБОРОВ

Современные исследования, позволили выявить глубинные причинно-следственные связи между природными и антропогенными факторами, дающими реальные представления о формировании тех или иных экологических состояний водных объектов. В этой связи, назрела необходимость учета некоторых результатов этих разработок для современной системы мониторинга и дальнейшего принятия соответствующих управленческих решений.

Ключевые слова: водохранилища, мониторинг, диффузная нагрузка, транспорт наносов, субмикронные частицы, микропластиковое загрязнение.

Sh. R. Pozdnyakov¹, S.A. Kondratiev², tbgmaster@mail.ru

¹Institute for Research of Continental Water Bodies, Russian State Hydrometeorological University,
St. Petersburg, Russia

²Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia

CURRENT PROBLEMS OF MODERN RESEARCH IN RESERVOIRS AND THEIR WATERSHEDS

Modern studies have made it possible to reveal deep causal relationships between natural and anthropogenic factors, which give real ideas about the formation of certain ecological states of water bodies. In this regard, there is a need to take into account the results of these developments for a modern monitoring system and further make appropriate management decisions.

Keywords: reservoirs, monitoring, diffuse load, sediment transport, submicron particles, microplastic pollution.

В настоящее время водные ресурсы любой страны являются важнейшим элементом для обеспечения ее безопасности и независимости. Водоохранилища при этом могут иметь первостепенное значение. Поэтому качество воды в них является приоритетным направлением исследований. Для контроля их экологического состояния в современных условиях стандартных систем мониторинга и обследований часто оказывается недостаточно.

Современные экологические и гидрологические исследования, позволили выявить многие новые глубинные причинно-следственные связи между природными и антропогенными факторами, дающими более правильные и реальные представления о формировании тех или иных экологических состояний водных объектов и качества их вод. В этой связи, назрела необходимость учета результатов этих исследований и разработок для современной системы мониторинга и дальнейшего принятия соответствующих управленческих решений. По-нашему

мнению, выполненные в последнее время работы указывают на то, что требуется учет следующих факторов для современного анализа экологического состояния любого водного объекта.

Оценка диффузной нагрузки на водные объекты

В настоящее время становится все более очевидным, что оценка диффузной составляющей внешней нагрузки – это необходимый элемент для разработки адекватных научно-обоснованных мероприятий по охране водных объектов и минимизации их эвтрофирования. Интенсивная нагрузка биогенными веществами, обусловленная хозяйственной деятельностью на водосборах, приводит к значительному возрастанию скорости эвтрофирования водных объектов по сравнению с естественными условиями. Внешняя нагрузка на водный объект, как известно, при этом разделяется на точечную и рассредоточенную. Точечная нагрузка формируется за счет сбросов на водосбор или в водоем сточных вод различных предприятий. Рассредоточенная биогенная нагрузка формируется за счет выноса веществ со всей площади водосбора. Происходит это в основном за счет смыва примесей с поверхности водосбора. В зависимости от происхождения рассредоточенная нагрузка может классифицироваться как природная (фоновая) или диффузная (антропогенная). Диффузная нагрузка представляет собой рассредоточенный вынос с водосборных территорий растворенных и взвешенных примесей антропогенного происхождения. К числу диффузных источников относятся сельскохозяйственные угодья, свалки, селитебные площади, стоки с которых не попадают на очистные сооружения. Такие источники загрязнения контролировать гораздо сложнее, чем точечные. Не существует универсальной системы мониторинга за ними, поскольку они весьма разнообразны.

Для выявления вклада антропогенной составляющей нагрузки на водный объект необходимо иметь инструмент для количественной оценки генезиса ее формирования. Таким инструментом может служить детерминированная математическая модель ILLM изучаемого процесса, разработанная в настоящее время в Институте озераведения РАН [2]. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор и позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью [4]. Для демонстрации возможностей модели ниже представлены результаты расчетов биогенной нагрузки, включающей диффузную составляющую, для Куйбышевского водохранилища – крупнейшего в Евразии и третьего в мире по площади водохранилища на р.Волге, образованного в 1955-1957 гг. после завершения строительства плотины Волжской (ныне Жигулёвской) ГЭС у г.Ставрополь (ныне Тольятти).

Модель откалибрована по данным государственного мониторинга на пилотных объектах, расположенных в левобережной и правобережной частях частного водосбора Куйбышевского водохранилища (без водосборов Вятки и Камы). По результатам моделирования выполнена оценка внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище (таблица), сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора в современных условиях.

Оценка средней многолетней биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище с правобережной части водосбора (площадь – 30878 км², средний слой стока 74 мм/год) и с левобережной части водосбора (площадь – 60207 км², средний слой стока 125 мм/год)

Результаты расчета	Азот N	Фосфор P
Правобережная нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	11141,4	515,3
Природная (фоновая) составляющая	685,0	29,4
Диффузная (антропогенная) составляющая, вкл. атмосферные выпадения	10427,4	484,4
Модуль выноса (кг/км ² год)	360,8	16,7
Левобережная нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)	25389,7	1121,8
Природная (фоновая) составляющая	2732,9	104,0
Диффузная (антропогенная) составляющая, вкл. атмосферные выпадения	21243,8	984,0
Модуль выноса (кг/км ² год)	421,7	18,6

Рассчитанные значения суммарной нагрузки на водохранилище составили 40559 тN/год и 1496 тP/год для условий средней водности. При этом вклад левобережной части – около 69% по фосфору и 73% по азоту от значения суммарной нагрузки. Проведено выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки. Вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора весьма велик (85-95% от значения суммарной нагрузки). Отсюда, можно сделать вывод о том, что для современных научно-обоснованных мероприятий по охране водных объектов и предотвращению негативного воздействия на них, в обязательном порядке требуется оценка диффузной составляющей внешней нагрузки. Данная оценка является необходимым элементом выявления генезиса актуального экологического состояния каждого конкретного водного объекта. И только таким образом будут приниматься дальнейшие правильные управленческие решения.

Оценка транспорта наносов в водных объектах во всем диапазоне возможных размеров

Как правило, в водохранилища привносится большой объем наносов, создавая проблемы для их эксплуатации и экологии. По существу, данные водные объекты являются терминальными приемниками их основной массы. В этой связи весьма актуальной является оценка стока наносов в них. Кроме количественной оценки стока, требуется исследование параметров наносов, прежде всего гранулометрического состава, включая субмикронные частицы, а также их загрязненности, в том числе органическими соединениями.

К сожалению, до последнего времени в классической гидрологии и на сети Росгидромета использовалась преимущественно стандартная шкала разделения частиц наносов по крупности, в соответствии с которой гранулометрический анализ выполнялся только до частиц крупнее 1 мкм. Более мелкие фракции, считавшиеся содержащимися в небольших количествах, как правило, не подвергались дальнейшей дифференциации и анализу. Вместе с тем специальные гидрологические и гидрофизические исследования показывают, что, в этом случае при анализе не учитывались весьма существенные факторы.

Например, измерения показывают, что взвешенные наносы р.Невы представлены преимущественно песчано-илистыми частицами. При этом, средний размер взвешенных наносов ориентировочно составляет порядка 0,05 мм. Если допустить, что в этом диапазоне располагается 99% всех частиц, а только 1% приходится на субмикронные частицы, средним размером 100 нм, то в 1 дм³ объема взвешенных наносов р.Нева площадь поверхности субмикронных частиц более, чем в 2 раза превысит площадь всех песчано-илистых частиц вместе взятых. При ограничении анализа размеров взвешенных наносов нижним пределом в 1 мкм этот факт практически игнорировался.

Что касается оценки содержания частиц размером менее 1 мкм, то, например, в донных отложениях Ладожского озера, можно отметить следующее. Экспедиционные исследования гранулометрического состава донных отложений показали, что доля таких частиц в отдельных районах дна составляет до 30% общего объема, а частиц менее 100 нм, которые вообще не выделялись в анализе – до 5% [1]. В тоже время специальные исследования проведенные на р.Катунь показали, что субмикронные частицы могут играть важнейшее значение в формировании экологического состояния водных объектов и загрязненности их воды. На основе анализа проб взвешенных наносов на данном водотоке получено, что в зависимости от гидрологического режима на частицах размером 0,45–1 мкм в реке транспортируется от 3 до 34 % всей ртути, тогда как весовая доля этой фракции не превышает 0,5–10 % суммарного веса всех фракций [1]. Происходит это в силу двух причин. С одной стороны, если рассмотреть значения удельной поверхности частиц различных фракций в единице кубического объема со стороной ребра равной 100 мм, то площадь поверхности шара вмещенного в этот объем диаметром 100 мм составит 314 см², а площадь поверхности шариков диаметром 1 нм, вмещенных в этот объем, составит 3,14 км², т.е. в 100 млн раз больше. На эту же величину увеличивается и сорбционная емкость частиц в этом объеме. Кроме того, как известно из классического курса коллоидной химии [6] активность частиц размером менее 1 мкм резко возрастает в силу того, что у них увеличивается доля молекул или атомов, находящихся на поверхности раздела фаз (между твердой и жидкой) с накопленной избыточной потенциальной энергией.

Понятно, что возникает настоятельная необходимость выполнения анализов гранулометрического состава, как взвешенных наносов, так и донных отложений в расширенном диапазоне размеров вплоть до 1 нм с последующими работами по оценке их загрязненности. Таким образом, можно оценить особый вклад транспорта загрязняющих веществ частицами субмикронного размера для последующих современных научно-обоснованных рекомендаций по оздоровлению водного объекта.

Оценка микропластикового загрязнения водных объектов

Человечество производит всевозможные пластиковые изделия практически в течение последних двухсот лет. С учетом того, что период разложения пластика превышает этот период, можно констатировать, что практически все пластиковые материалы, изготовленные за это время, за исключением небольшой

переработанной части, находятся в окружающей природной среде в виде отходов. В этой связи неудивительно появление огромных пластиковых островов на акватории Мирового океана. Такие мусорные пятна формируются господствующими океаническими течениями, постепенно концентрирующими выброшенный в океан мусор в одной области. Подавляющая часть пластикового мусора поступает в океан с континентов, прежде всего, впадающими в него водотоками, которые вместе с континентальными озерами и водохранилищами являются, по существу, приемными терминалами этих отходов. К настоящему времени сложилась ситуация, при которой дальнейшее увеличение интенсивности поступления пластика в водные объекты приведет к серьезной экологической проблеме, при которой самоочищающая способность водных экосистем будет неспособна предотвратить качественные нарушения в их экологическом равновесии.

В отличие от других отходов, подверженных биоразложению, пластиковые материалы и детали под действием солнечного света только распадаются на мелкие фракции. Их полимерная структура при этом сохраняется. Мелкие фракции частиц пластика (размером менее 5 мм) называют микропластиком. Именно он представляет наибольшую опасность. Мелкие частицы пластика имеют высокую сорбционную активность, в результате которой содержание в них загрязняющих веществ (например, стойких органических) может значительно превышать их концентрацию в окружающей воде. Водные организмы начинают употреблять такие частицы в пищу, путая их с планктоном. В результате пластиковые отходы включаются в пищевую цепь со всеми вытекающими отрицательными последствиями. Кроме того, попадая в организм животных и человека, сами микропластиковые частицы, разлагаясь, могут выделять опасные химические вещества. В этой связи, становится понятной необходимость широкомасштабных исследований содержания микропластиковых частиц, прежде всего, в континентальных водных объектах, и, прежде всего, в водохранилищах, являющихся источником питьевого водоснабжения человечества.

В последнее время были разработаны специальные устройства для отборов проб воды для определения содержания микропластика. При этом появились устройства, которые могут определять объем отбираемой воды с точностью до 1 мл и при этом осуществлять отборы с любой глубины водного объекта [3]. С их использованием были организованы исследования содержания микропластика на акватории Ладожского озера и его притоках, некоторых водотоках и водоемах Санкт-Петербурга и Балтийского моря [5].

В процессе этих исследований в воде и донных отложениях анализировались концентрации микропластика в диапазоне размеров 100 мк–5 мм. Предварительные результаты исследований на Ладожском озере показали наличие определенных закономерностей в распределении концентраций микропластика по его акватории – наименьшая концентрация зафиксирована в северной части Ладожского озера – от 10 до 30 частиц/м³. В центральной части озера содержание варьирует от 100 до 500 частиц/м³. Наибольшая концентрация микропластиковых частиц характерна для южной части акватории Ладоги, достигающая до 2000 частиц/м³ [5].

Следует отметить, что при оценке содержания частиц микропластика в донных отложениях Ладоги и Финского залива были зафиксированы концентрации, превышающие значения в воде, более чем в десятки раз. Это является косвенным подтверждением активной сорбции частицами микропластика тяжелых металлов и органических загрязнений. В результате этих процессов плотность частиц микропластика увеличивается, что и приводит к их осаждению.

Кроме того, отмечено суммарное увеличение количества частиц при дифференцированном размерном переходе в диапазоны более мелких частиц. Данный серьезный современный вызов, связанный с микропластиковым загрязнением требует все более усиленного внимания, и, особенно, при исследовании состояния воды в водохранилищах с водозаборами питьевого назначения и их водосборах.

Библиографический список

1. *Поздняков Ш.Р.* Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. СПб.: Лема, 2012. 226 с.

2. *Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А.* Диффузная биогенная нагрузка – возможная причина антропогенного эвтрофирования водоемов // *Российский журнал прикладной экологии.* 2022. № 4. С. 28-35.

3. *Поздняков Ш.Р., Каретников С.Г., Иванова Е.В., Тихонова Д.А., Лапенков А.Е., Гузева А.В.* Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще // *Российский журнал прикладной экологии.* 2021. № 4. С.41-45.

4. *Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Минакова Е.А., Брюханов А.Ю., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В.* Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // *География и природные ресурсы.* 2019. № 3. С. 67-76.

5. *Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В.* Оценка концентраций частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера // *Региональная экология.* 2018. № 4 (54). С. 48–52.

6. *Фридрихсберг Д.А.* Курс коллоидной химии. СПб: Химия, Санкт-Петербургское отделение, 1995. 400 с.

А.А. Сапожникова^{1,2}, Е.А. Ракчеева^{1,2}, Asapozhnikova@mail.ru

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
г. Москва, Россия

² Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ КРЫМА В РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ПОЛУОСТРОВА

Рассмотрены существующие методики определения испарения с поверхности водоемов. Выполнены расчеты месячных величин испарения с поверхности некоторых водохранилищ Крымского полуострова за 2022 год. Также в работе рассмотрены закономерности изменения величины испарения в зависимости от климатических и гидрографических условий районов исследования.

Ключевые слова: водохранилище, испарение, экспериментальные полигоны, наземный испаритель, автоматическая метеостанция

A. Sapozhnikova^{1,2}, E. Rakcheeva^{1,2}, Asapozhnikova@mail.ru

¹ N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

² Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

EVAPORATION FROM THE SURFACE OF RESERVOIRS IN VARIOUS HYDROGRAPHIC REGIONS OF CRIMEA

Existing methods for determining evaporation from the surface of water bodies are considered. Calculations of monthly values of evaporation from the surface of some Crimea reservoirs for 2022 are made. Also the article considers the patterns of changes in the amount of evaporation depending on the climatic and hydrographic conditions of the study areas.

Keywords: reservoir, evaporation, experimental sites, ground-based evaporator, automatic weather station.

Введение

Региональные особенности режима водных объектов Крымского полуострова и его уникальные природно-климатические условия представляют научный и практический интерес. Для решения многих водохозяйственных проблем крайне необходимо знать величины годового испарения с поверхности водоемов и его сезонного хода.

Актуальность работы объясняется тем, что, являясь очень важным элементом режима увлажнения в разных регионах ЕТР, особенно в тех, что испытывают дефицит водных ресурсов, испарение остается наименее изученным элементом водного баланса. Это объясняется отсутствием данных натуральных наблюдений в различных природных условиях. Стремительное сокращение станций водно-испарительной сети не позволяет надежно оценивать пространственное распределение испарения с водной поверхности и решать практические задачи, связанные с оценкой обеспеченности водными ресурсами территорий в современных

условиях [4]. Без данных натуральных наблюдений за испарением невозможна оценка достоверности различных климатических и гидрологических моделей. Эти данные необходимы при разработке и совершенствовании методов расчета испарения при отсутствии данных наблюдений.

На территории Крыма действует только одна станция, проводящая наблюдения за испарением с водной поверхности, но она расположена в степной зоне Северо-Крымского района, который характеризуется засушливым климатом, и данные по ней доступны только с 2014 г.

Принимая во внимание вышесказанное, важной задачей представляется определение испарения с водной поверхности водохранилищ самого вододефицитного региона России, изменение величины испарения в течение года, изучение закономерностей его изменения в районах Крыма с различными природно-климатическими условиями.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования по определению величин испарения с водной поверхности были назначены экспериментальные полигоны в пределах репрезентативных речных бассейнов, отражающих особенности формирования водных ресурсов в разных частях Крымского полуострова. Внимание было уделено бассейнам рек трёх гидрографических районов, где сосредоточены основные ресурсы поверхностных вод Крыма: реки восточной части северного макросклона Крымских гор, впадающие в залив Сиваш Азовского моря; реки западной части северного макросклона Крымских гор, впадающие в Черное море; реки южного макросклона Крымских гор, впадающие в Черное море. Экспериментальные полигоны охватывают территории, занимаемые Белогорским (р. Бююк-Карасу), Партизанским (р. Альма) и Изобильненским (р. Улу-Узень) водохранилищами, соответственно. Районы исследования характеризуются различными природно-климатическими и ландшафтными условиями.

В 2021-2022 гг. на полигонах были организованы наблюдательные площадки, устроенные по правилам соблюдения обязательных условий: сохранности оборудования, близости водоема и расположения на открытой местности. Наблюдательные площадки оснащены автоматическими метеорологическими станциями (АМС) и испарителями ГГИ-3000.

Расчет испарения с поверхности каждого из исследуемых водохранилищ производился несколькими методами, что обусловлено невозможностью проведения натуральных наблюдений в непрерывном режиме и отсутствием данных наблюдений за некоторыми гидрометеорологическими параметрами в отдельные периоды.

Производство наблюдений за испарением с помощью специализированного оборудования служит основой для расчетов месячных величин по методу наземных испарителей. Расчеты по нему проводились на основе данных наблюдений, выполненных во время экспедиционных выездов в июне, августе и ноябре 2022 г. Поскольку продолжительность экспедиционных работ не превышала двух недель, величины испарения с поверхности воды в приборе за месяц, в котором производились наблюдения, восстанавливались по следующей формуле [4]:

$$E_{3000} = \beta \Sigma d_i \quad (1)$$

где E_{3000} – величина испарения за целый месяц, β – местный калибровочный коэффициент, Σd_i – сумма средних суточных дефицитов влажности воздуха за все дни рассматриваемого месяца.

Переход от показаний испарителя ГГИ-3000 к средним месячным величинам испарения с поверхности водохранилищ осуществлялся двумя способами: по формуле В.С. Голубева и А.П. Урываева [3] и по методике, предложенной В.С. Вуглинским и И.П. Албулом [2]. Так как методика В.С. Вуглинского и И.П. Албула предложена для определения среднемесячных значений испарения в только июне-сентябре, то для дальнейшего анализа использовалась формула В.С. Голубева и А.П. Урываева (2):

$$E_0 = 0,43E_{3000} + 0,9h - 1,2\Delta h + 2,4\tau - 8,1\Delta\tau - 35 \quad (2)$$

где E_0 – величина испарения с водоема в мм, h и Δh – полуденная высота солнца 15-го числа месяца и ее приращение за этот месяц, τ и $\Delta\tau$ – продолжительность светлого времени суток 15-го числа месяца и ее приращение за месяц.

Величина испарения с поверхности водоемов может быть определена также и по различным эмпирическим формулам, основанным на использовании данных стандартных наблюдений на метеостанциях, расположенных на суше. В настоящем исследовании рассмотрены две расчетные схемы.

Основным расчетным методом, регламентируемым «Указаниями по расчету испарения с поверхности водоемов» [6], принято считать определение испарения по обобщенной формуле ГГИ (3):

$$E_0 = 0,14n(e_0 - e_{200})(1 + 0,72u_{200}), \quad (3)$$

где e_0 и e_{200} – соответственно максимальная упругость водяного пара, вычисленная по температуре поверхности воды, и среднее значение абсолютной влажности воздуха над водоёмом, мб; u_{200} – средняя скорость ветра на высоте 200 см над водоемом, м/с; n – число суток в расчетном интервале времени. В расчетах испарения по формуле (3) использовались данные измерений АМС, установленных в непосредственной близости от водохранилищ. Для определения температуры поверхности воды на водохранилищах были установлены автоматические регистраторы. Все параметры приводились к значениям над водоемом и осреднялись за месяц.

Наиболее простым и доступным способом определения испарения является расчет по формуле В.И. Мокляка (4) 1940 г., не требующей большого количества исходных метеорологических данных [5]:

$$E_0 = 30d^{0,7} \quad (4)$$

Применение данного метода позволило рассчитать величины испарения за каждый месяц всего периода исследования, равного продолжительности работы установленных АМС.

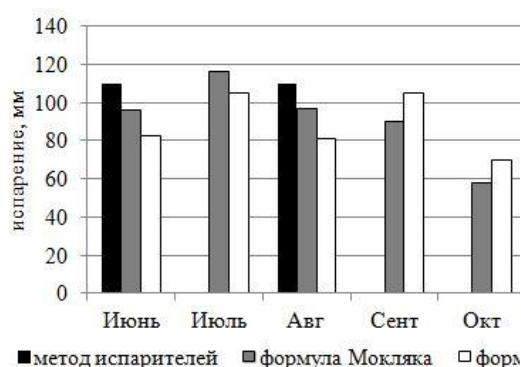
Анализ результатов

На данный момент имеющиеся данные наблюдений позволили определить месячные величины испарения на Белогорском водохранилище за период с марта по ноябрь, на Изобильненском и Партизанском – с июля по ноябрь 2022 г.

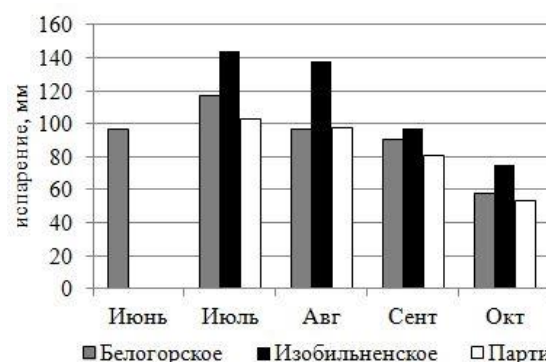
На рисунке *а* представлены результаты расчета испарения с поверхности Белогорского водохранилища в летне-осенние месяцы по трем рассматриваемым методикам. Сравнение полученных разными способами значений испарения показало относительно неплохую сопоставимость результатов. Величина отклонения рассчитанных по эмпирическим формулам значений от испарения, полученного по данным наземных испарителей, варьируется в пределах от 2% в ноябре до 25% в летние месяцы. В среднем погрешность оценки испарения за каждый месяц составляет 15%, что подтверждается авторами многих работ в области данного исследования. Отличия в результатах расчета величин за один и тот же месяц обусловлены учетом разных определяющих испарение факторов в предлагаемых методах.

Наиболее близкие результаты к методу испарителей дала формула В.И. Мокляка. Формула ГГИ несколько занижает месячные значения испарения, особенно в летние месяцы, когда оно максимально. Величина испарения, определяемая по данному методу, чутко реагирует на незначительное изменение скорости ветра. Поэтому точность определения этого параметра должна быть довольно высокой. А данные измерения скорости ветра автоматической метеостанцией на берегу на высоте 2 м, скорее всего меньше реальных значений скорости над водоёмом по причине имеющихся вблизи локальных препятствий. Поэтому для дальнейшего анализа были выбраны результаты расчетов по формуле В.И. Мокляка.

Применение данного метода позволило провести сопоставление величин испарения с поверхности Белогорского, Изобильненского и Партизанского водохранилищ, как за период совместных наблюдений, так и за отдельные месяцы (рисунок *б*).



а)



б)

Месячные суммы испарения с водохранилищ (2022 год):

а – сравнение расчетных методов на примере Белогорского водохранилища,

б – результаты расчета испарения по формуле В.И. Мокляка

Анализ результатов расчетов показал, что величины суммарного испарения с поверхности исследуемых водохранилищ за имеющийся период, а также за отдельные месяцы различаются. Испарение с поверхности Изобильненского водохранилища значительно превосходит величину испарения с других водохранилищ, несмотря на то, что, к примеру, Партизанское водохранилище имеет такое же широтное местоположение.

Суммарное испарение за совместный период с июля по ноябрь составляет 504 мм с поверхности Изобильненского водохранилища, 405 мм и 379 мм с поверхности Белогорского и Партизанского водохранилищ соответственно. Наличие данных измерений метеостанции, установленной на наблюдательной площадке Белогорского полигона, за весь 2022 г. позволило определить суммарную величину испарения в этом районе за период с марта по ноябрь, включительно. Она составляет 685 мм, что укладывается в обозначенные пределы поля значений испарения, осредненных за многолетний период, для данной территории [1].

Наибольшее испарение с поверхности водохранилищ наблюдается в июле и августе. Месячные суммы испарения достигают 144 мм для Изобильненского водохранилища и 117 мм для Белогорского водохранилища, а для Партизанского водохранилища эта величина составляет в среднем 100 мм. Наиболее заметная разница в значениях испарения на водохранилищах в июле обусловлена сочетанием метеорологических факторов. На фоне более высоких средних месячных температур воздуха и минимальной влажности на Изобильненском полигоне величина испарения здесь больше на 40 мм. А при схожем температурном режиме на Партизанском и Белогорском полигонах и различных режимах увлажнения величина испарения на Партизанском водохранилище ниже на 15 мм вследствие выпадения здесь большого количества осадков.

По рисунку 1б видно, что характер изменения величины испарения в исследуемых районах в течение года также заметно различается. Наибольшей изменчивостью отличается испарение с водной поверхности Изобильненского водохранилища.

Выводы

Рассмотрены особенности предлагаемых методов определения испарения, которые показали сопоставимость результатов. Выполнен сравнительный анализ величин суммарного испарения и изменение его в течение года на исследуемых полигонах. Проведенное исследование показало, что на сравнительно небольшой территории Крымского полуострова распределение величины испарения неравномерно, что обусловлено различным сочетанием определяющих его факторов, как то гидрометеорологическая характеристика, особенности рельефа и окружающего ландшафта.

Работа выполнена в рамках темы № 0126-2021-0001 государственного задания «Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма».

Библиографический список

1. *Атлас «Климатический атлас Крыма»*. Приложение к научно-практическому дискуссионному сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
2. *Вуглинский В.С., Албул И.П.* Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземных испарителей ГГИ-3000. Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 3. С. 118-128
3. *Голубев В.С., Урываев А.П.* Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов. Труды ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69-76.
4. *Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети.* СПб. ООО «РИАЛ». 2021. 64 с.
5. *Поляков Б.В.* Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат. 1946. 480 с.
6. *Указания по расчету испарения с поверхности водоемов.* Л.: Гидрометеиздат. 1969. 84 с.

А.И. Смирнов, smalil@mail.ru
Институт геологии УФНИЦ РАН, г. Уфа, Россия

ПЕРЕФОРМИРОВАНИЕ БЕРЕГОВ КАРМАНОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЮЖНОМ ПРЕДУРАЛЬЕ

По генезису формирования выделены абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные и техногенные типы берегов. Для абразионных обвально-осыпных и оползневых берегов характерно их разрушение, а для аккумулятивного – наращивание. Приведена оценка переформирования берегов за последние 55 лет (1967-2022 гг.). Установлено, что современная переработка абразионных берегов крайне низкая, они находятся в стадии динамического равновесия. Аккумулятивные берега находятся в активном переформировании под действием биогенного фактора. Во второй и третьей гидрологических зонах площадь акватории водохранилища за счет отступления береговой линии сократилась на 54 и 86% соответственно.

Ключевые слова: типы берегов, активность разрушения, Республика Башкортостан.

A.I. Smirnov, smalil@mail.ru
Institute of Geology, UFNITS RAS, Ufa, Russia

RESHAPING OF THE SHORES OF THE KARMANOVSKY RESERVOIR IN THE SOUTHERN URALS

According to the formation genesis, abrasion, abrasion-accumulative, accumulative and technogenic types of coasts are distinguished. For abrasion landslide-scrree and landslide banks, their destruction is characteristic, and for accumulative – their buildup. An assessment of the reshaping of the banks over the past 55 years (1967-2022) is given. It has been established that modern processing of abrasion banks is extremely low, they are in the stage of dynamic equilibrium. The accumulative shores are in active reformation under the action of the biogenic factor. In the second and third hydrological zones, the water area of the reservoir decreased by 54 and 86%, respectively, due to the retreat of the coastline.

Keywords: types of shores, destruction activity, Republic of Bashkortostan.

Введение

Кармановское водохранилище введено в эксплуатацию в 1967 г. в Янаульском муниципальном районе Республики Башкортостан (РБ), в нижнем течении р. Буй правого притока р. Кама. Водоохранилище создано для сезонного регулирования речного стока, обеспечения водопотребления и охлаждения циркуляционных вод Кармановской ГРЭС. В состав гидроузла входят плотина (длиной 2150 м и шириной по гребню 10 м с напором 14 м), водосбросное сооружение (4 пролета), струенаправляющая дамба (длиной 2800 м), 2 водозабора ГРЭС (производительность 40 и 20 м³/с).

Кармановское водохранилище – четвертое по объему водохранилище Республики Башкортостан – имеет следующие основные характеристики [1]:

- нормальный подпорный уровень (НПУ) – 80,0 м абс;
- площадь зеркала – 35,5 км²;

- полный объем – 134 млн м³;
- полезный объем – 19,6 млн м³;
- глубины: максимальная 12,8 м, средняя 3,8 м;
- призма сработки – 0,5 м.

Для р. Буй характерно высокое однопиковое весеннее половодье и довольно устойчивая межень. Климат района континентальный с жарким летом и холодной зимой при среднегодовой температуре +1,7°. Преобладающие ветры в теплое время года юго-западные и западные, при средних скоростях 3,2-5,7 м/с, нередко до 14-20 м/с.

Материалы и методы исследования

В конце 1980-х гг. ПГО (ныне ОАО) «Башкиргеология» проводило работы по изучению экзогенных геологических процессов (ЭГП) в северной части РБ, в ходе которых были обследованы и берега Кармановского водохранилища. По результатам работ составлена карта переработки берегов масштаба 1:50000 по всему периметру Кармановского водохранилища и определена скорость их разрушения. Эти сведения актуализированы автором на 01.01.2021 по методике оценки переработки берегов Павловского и Нугушского водохранилищ РБ [4; 5].

Анализ результатов

Наибольшая высота волны в западной части водохранилища может достигать 1,0 м, но обычно она составляет 0,3-0,6 м. Максимально возможная (теоретически рассчитанная) высота вскатывания волны на плотину не превышает ~1,4 м. По характеру волнового процесса [2; 6], определяющего активность развития абразии, водохранилище разделено на три зоны, которые отличаются друг от друга по форме и размерам акватории, глубинам и конфигурации береговой линии.

I зона – озерная часть наибольшего развития ветрового волнения; II – озерная часть ограниченного развития ветрового волнения и III – речная часть наименьшего развития ветрового волнения водохранилища.

По направленности развития берегов выделены абразионные, абразионно-аккумулятивные, аккумулятивные и техногенные берега, а по ведущему ЭГП, вызванному абразией, они подразделены на обвально-осыпные и оползневые [2; 3]. Распространение генетических типов берегов по гидрологическим зонам приведены ниже на рисунке. На нем отражены также современный контур береговой линии водохранилища и контур акватории водохранилища по состоянию на 1989 г.

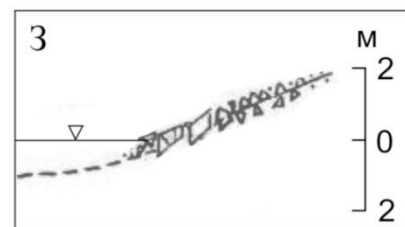
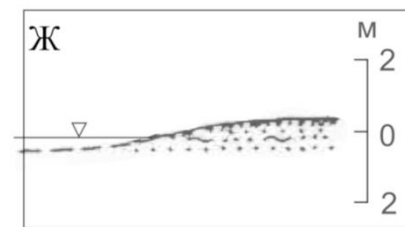
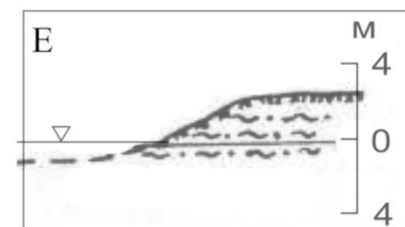
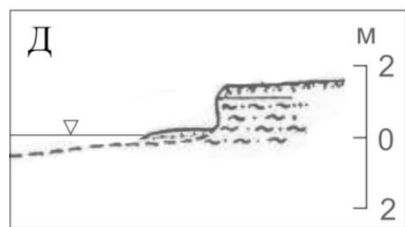
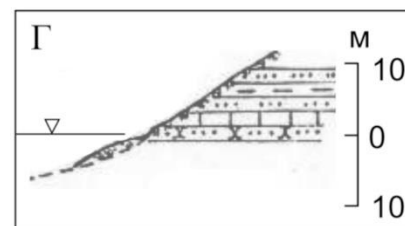
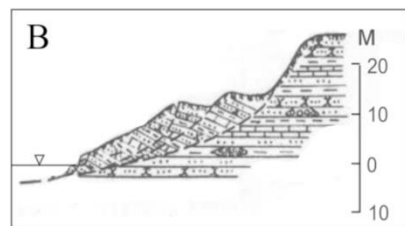
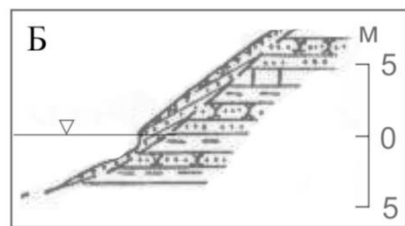
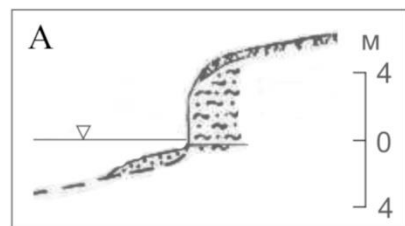
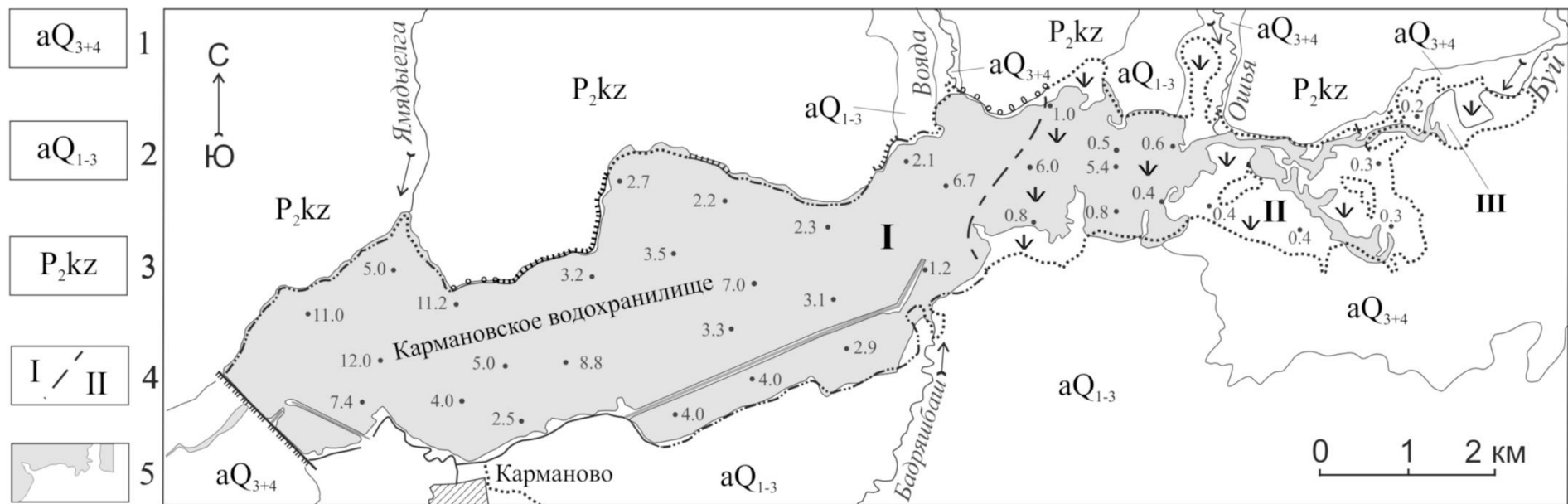
Абразионный обвально-осыпной тип берега сформирован исключительно в первой гидрологической зоне (см. рис.), где волновой процесс получил максимальное развитие. Наибольшее распространение он получил по правому берегу, что связано с направлением преобладающих ветров. После создания водохранилища, скорость разрушения берега, сложенного терригенными казанскими породами, составляла 0,3-0,5 м в год, а по левому берегу, сложенному четвертичным аллювием, она иногда достигала 1-3 м в год. На современном этапе скорость переработки этого типа берега в 5 и более раз меньше, чем в 1970-2000 гг.

Абразионный оползневый тип берега встречается преимущественно в первой гидрологической зоне по правобережью р. Буй (см. рис.). Оползанию подвержены казанские полускальные породы на склонах крутизной 10-35°. Ширина захвата склонов оползевым процессом достигает 250 м, а длина по фронту – 500 м. В результате подрезки абразией подошвы склонов в 1980-х гг. наблюдалась активизация древних оползней и образование новых в 1,5 км юго-восточнее устья р. Ямдыелга. В настоящее время все оползни по берегам водохранилища – без признаков активизации.

Абразионно-аккумулятивный тип берега (см. рис.) характеризуется тем, что наряду с малоинтенсивным (0,3-0,4 м в год) разрушением правого берега абразией, на нем идет процесс аккумуляции, который обусловлен наличием широкой прибрежной отмели по левому берегу.

Аккумулятивный (потенциально-биоогенный) тип берега развит в третьей и во второй гидрологических зонах (см. рис.), в которых идет наиболее интенсивное накопление илистого материала и зарастание мелководья гидрофитными растениями. Этот тип берега подвержен наибольшему переформированию. Так, современная площадь акватории второй и третьей гидрологических зон водохранилища за счет отступления береговой линии сократилась от первоначальной на 54 и 86% соответственно.

К техногенному типу (см. рис.) отнесены берега в районе ГРЭС, которые защищены от абразии бетонными плитами или набросками из строительного мусора, и переработка их не фиксируется.



Типы берегов Кармановского водохранилища

Условные обозначения к рисунку. Геологические индексы пород, слагающие берега: 1 – аллювиальные позднеплейстоценовые и голоценовые пески, супеси и суглинки с галечником в основании (I надпойменная терраса); 2 – аллювиальные, аллювиально-озерные и перигляциальные ране- и позднеплейстоценовые пески, глины, суглинки, алевриты и галечники (II надпойменная терраса); 3 – терригенные верхнепермские аргиллиты, алевролиты, песчаники, конгломераты с прослоями известняка казанского яруса. 4 – граница гидрологических зон: наибольшего (I), ограниченного (II) и наименьшего (III) развития ветрового волнения. 5 – современный (2020-2021 гг.) контур береговой линии. Типы берегов в контурах: 1989 г.: абразионный 6 – обвально-осыпной (А – в пределах II надпойменной террасы и Б – в пределах коренного склона) и 7 – оползневой (В); 8 – абразионно-аккумулятивный (Г – в пределах коренного склона и Д – в пределах II надпойменной террасы); 9 – аккумулятивный (Е – в пределах II надпойменной террасы, Ж – в пределах I надпойменной террасы); 10 – техногенный. 11 – дамба. 12 – плотина. 13 – глубина водохранилища, м. 14 – гидрофитная растительность.

Выводы

Наибольшая скорость разрушения берегов наблюдается в первой гидрологической зоне на абразионных обвально-осыпных и оползневых берегах. Максимальна она на участках, где берега сложены рыхлыми нелитифицированными четвертичными отложениями, а минимальна – на берегах, сложенных коренными полускальными верхнепермскими терригенными породами. На современном этапе переработка этих типов берегов крайне низкая и через 55 лет после заполнения водохранилища их состояние близко к динамическому равновесию.

Во второй и третьей гидрологических зонах наблюдается активное перестроение аккумулятивных берегов. За счет заиления дна водохранилища и зарастания гидрофитными растениями акватория этих гидрологических зон сократилась более чем наполовину.

Исследование выполнено в рамках Государственной бюджетной темы № FMRS-2022–0010.

Библиографический список

1. Данилов А.Н. Кармановское водохранилище // Энциклопедия Башкортостана: интернет-портал. [2019]. https://ufa-gid.com/encyclopedia/karm_vodohr.html (дата обращения: 28.02.2023).
2. Печеркин И.А., Печеркин А.И., Гайнанов Ш.Х. Переработка берегов водохранилищ, сложенных песчано-глинистыми и карбонатными породами. Учебное пособие по спецкурсу. Пермь: ПГУ, 1981. 96 с.
3. Рекомендации по инженерным изысканиям для прогноза переработки берегов водохранилищ. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1986. 55 с.
4. Смирнов А.И. Типы и переработка (перестроение) берегов Нугушского водохранилища на Южном Урале (Республика Башкортостан) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 175-180.

5. Смирнов А.И., Дурнаева В.Н. Оценка переработки берегов Павловского водохранилища на реке Уфа с использованием ГИС-технологий // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3 томах. Пермь, 2019. С. 197-202.

6. Финаров Д.П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ. Л.: Наука, 1986. 241 с.

УДК 556.555.4

Д.И. Соколов, О.Н. Ерина, М.А. Терешина, Dmitriy.Sokolov@yandex.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОЗЕРА ГЛУБОКОГО В 2018-2021 ГГ.

Детальные наблюдения за температурой воды озера Глубокое в 2018-2021 гг. показали, что современный режим озера отличается от такового в первой половине XX века. Переход от весенней циркуляции к летней стратификации происходит на несколько недель раньше и в некоторые годы с меньшей стабильностью. Сезонный термоклин формируется, как и раньше, на глубине 2-4 м и опускается летом до глубины 8-10 м, но вертикальная устойчивость водной толщи выше. Максимальные значения теплозапаса и средней температуры воды в озере увеличились в среднем на 16% и 8%. Причиной этого могут быть как климатические изменения, так и увеличение прозрачности воды в результате мелиоративных работ на водосборе. Переход от летней стратификации к осенней гомотермии происходит, как и раньше, при температуре воды, близкой к 6 °С, но почти на месяц позже.

Ключевые слова: озеро Глубокое, термический режим, стратификация, вертикальная устойчивость, теплозапас

D.I. Sokolov, O.N. Erina, M.A. Tereshina, Dmitriy.Sokolov@yandex.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

THERMAL REGIME OF LAKE GLUBOKOYE IN 2018-2021

Detailed observations of the water temperature of Lake Glubokoe in 2018-2021 showed that the modern regime of the lake differs from that in the first half of the XX century. Transition from spring circulation to summer stratification occurs several weeks earlier and in some years with less stability. The seasonal thermocline is formed, as before, at 2–4 m depths and dips to 8–10 m depth during the summer, but the vertical stability of the water column is higher. The maximum values of heat storage and average water temperature in the lake have increased on average by 16% and 8%. The reason can be both climatic changes and increase of water transparency as a result of reclamation works on the watershed. The transition from summer stratification to autumn homothermia occurs, as before, at water temperatures close to 6 °C, but almost a month later.

Keywords: Lake Glubokoe, thermal regime, stratification, vertical stability, heat storage

Введение

Многочисленные исследования термического режима сотен разнотипных озер по всему миру свидетельствуют о существенном росте их поверхностной температуры с конца 1970-х – начала 1980-х гг., особенно в умеренных широтах [2-4; 6; 9; 10; 12; 14]. При этом даже в пределах одного региона тренды характеризуются очень большим разбросом (вплоть до охлаждения в отдельных озерах) [10]. Различаются эти тренды и по сезонам [9; 11]. Еще менее очевидны изменения температуры гипolimниона [6; 8; 9].

Прогрев озер приводит к заглублению термоклина [12], увеличению продолжительности и устойчивости летней стратификации [7-9; 13] и, как следствие, изменениям ледового режима, уровня воды, прозрачности, длительности вегетационного периода, биопродуктивности и биоразнообразия, темпов эвтрофирования, эмиссии парниковых газов и т.д.

В настоящее время чрезвычайно сложно разделить воздействие природных и антропогенных факторов на формирование гидроэкологического состояния водоемов, т.к. процент водных экосистем, не трансформированных человеческой деятельностью, невелик и продолжает стремительно снижаться (особенно в Московском регионе). В этом отношении особый интерес представляет озеро Глубокое, водосбор которого расположен на территории государственного природного заказника в Рузском районе Московской области и отличается малой антропогенной нарушенностью.

На протяжении более чем вековой истории комплексных исследований озера Глубокое детально термический режим изучали лишь в середине XX в. [1; 5], с тех пор сопоставимых исследований не производилось. С 2017 г. нами начаты систематические наблюдения за температурой воды озера для восполнения этого пробела.

Материалы и методы

Основными материалами настоящей работы послужили данные термометрической косы, оснащенной логгерами температуры воды на глубинах 0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20, 26 м и устанавливаемой преимущественно в периоды открытой воды в 2018 г. (с 13 мая по 3 ноября), 2019 г. (с 25 апреля по 12 ноября), 2020 г. (с 10 июля до весны следующего года) и в 2021 г. (с 14 июня по 14 ноября) в центральной, самой глубоководной части озера. Дополнительным материалом послужили данные рейдовых наблюдений на той же вертикали, проводимых нами с марта 2018 г. на регулярной основе с частотой 1-3 раза в месяц и включавших измерение температуры воды на горизонтах 0.1, 0.5, 1 м и далее каждый метр до придонного горизонта (28 м).

В качестве основных характеристик термического режима озера по аналогии с работой [1] вычислены теплозапас Θ , средняя температура всего озера T_{cp} , устойчивость его водной массы S .

Работа проводилась на базе биологической станции «Глубокое озеро» Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН.

Анализ результатов

Минимальный теплозапас в водной массе озера Глубокого в фазу зимней стагнации (54 ТДж при средней температуре водной толщи 2,2 °С) зафиксирован 6-7 декабря 2020 г., через месяц после полного разрушения летней стратификации и спустя неделю с момента начала формирования обратной зимней стратификации. Вертикальная устойчивость за несколько дней возросла от 0 до $7 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10^5$, оставалась практически неизменной в течение всего периода ледостава, за последние недели зимы в условиях частичной подледной циркуляции снизилась с 7 до $5 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10^5$ и затем за несколько дней разрушения ледяного покрова – до нуля. После более холодных зим в 2018 и 2021 гг. в конце марта еще наблюдалась обратная зимняя стратификация, а после более теплых зим 2019 г. и тем более 2020 г. уже происходило конвективное перемешивание при температуре, близкой к 4 °С.

В 2019 г. к концу апреля поверхностные слои уже прогрелись до 10 °С, а температурный градиент на глубине 2-4 м достиг 2°С/м, что позволяет говорить о появлении слоя температурного скачка (СТС). В 2021 г. СТС с температурным градиентом более 1 °С/м в слое 2-4 м сформировался только в начале второй декады мая.

Положение металимниона все четыре года изменялось в течение летней стратификации однотипно. В начале лета термоклин располагался на глубине 2-3 м и характеризовался градиентом температуры примерно 4 °С/м, в течение июня заглублялся до 3-5 м с увеличением градиентов до 5-6 °С/м, в июле-августе – до 4-6 м. В 2018 и 2021 г. максимальная устойчивость термоклина наблюдалась во второй половине июля (градиент достигал 6-7 °С/м), в 2019 и 2020 гг. – во второй половине июня (градиент 5-6 °С/м). В сентябре-октябре по мере охлаждения эпилимниона и усиления динамического перемешивания термоклин быстро погружался до глубины 14-16 м, где прекращал существование с переходом к полной осенней циркуляции.

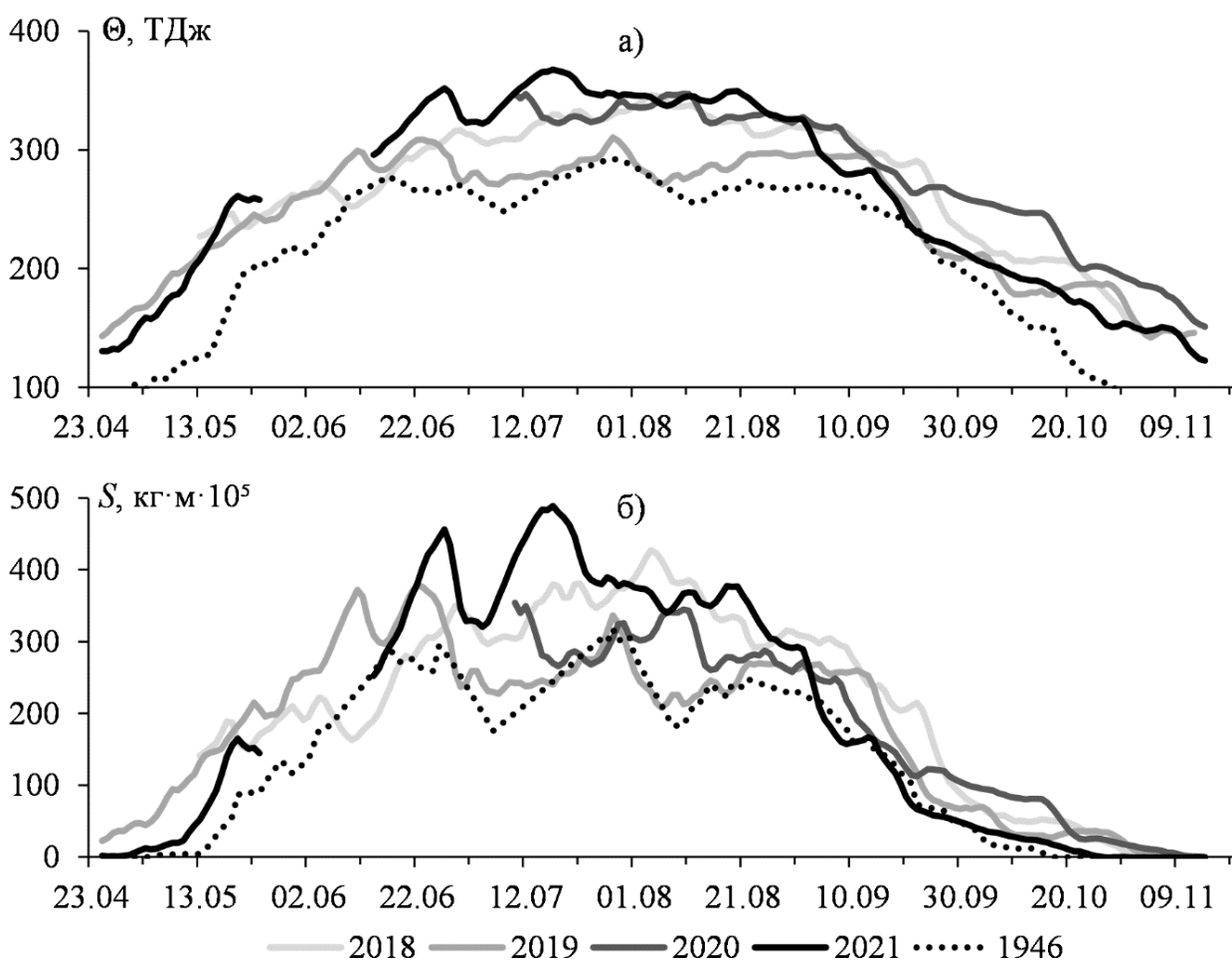
Самым низким за лето теплозапасом (рис. а) отличался 2019 г., что обусловлено не только менее прогретым эпилимнионом во вторую половину лета, но и сравнительно холодным гипolimнионом по сравнению с остальными годами. Наиболее устойчивый термоклин наблюдался в 2018 и 2021 гг., наименее устойчивый – в 2020 и 2019 гг. То же можно сказать и об устойчивости всей водной массы (рис. б). В 2021 г. она превышала $500 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10^5$, в 2019 г. не достигала $400 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10^5$.

Холодной и ветреной осенью 2021 г. разрушение летней стратификации началось раньше всего: эпилимнион остыл до 15°С к середине сентября, до 10°С – к началу октября. Теплой и безветренной осенью 2018 г. разрушение стратификации происходило позже всего: до 15°С эпилимнион охладился к концу сентября, до 10°С – к началу третьей декады октября. В 2020 г. охлаждение было самым длительным: переход через 15 °С произошел так же рано, как в 2019 и 2021 гг., а через 10 °С – так же поздно, как в 2018 г.

По данным [1] в 1946 г. теплозапас и вертикальная устойчивость водной толщи озера Глубокого большую часть лета были существенно ниже, чем в годы

наших исследований (рисунок). Максимальные величины теплозапаса по данным исследований первой половины XX в. [5] различаются не более чем на 25%. За 2018-21 гг. разброс значений Θ составляет 16%. При этом в среднем современный максимальный годовой теплозапас оказывается на 16% выше, чем в первой половине XX века, а средняя температура – на 8% выше.

Не привлекая дополнительного материала, нельзя утверждать, что это повышение теплосодержания в летний период обусловлено исключительно климатическими изменениями. Другая возможная причина – значительное снижение цветности воды в озере и увеличение прозрачности после мелиоративных работ на заболоченном водосборе озера в 1960-х гг.



Изменения теплозапаса Θ , ТДж (а) и вертикальной устойчивости S , $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot 10^5$ (б) в озере Глубоком в теплый период 2018-2021 гг. и в 1946 г. (по [1])

Выводы

Проведенные детальные наблюдения за температурой воды озера Глубокого в 2018-2021 гг. позволили получить актуальные представления о его термодинамическом режиме. При сохранении всех черт, присущих озерам данной климатической зоны, современный режим озера по ряду количественных показателей отличается от наблюдавшегося в первой половине XX века.

Переход от весенней циркуляции к летней стратификации происходит на несколько недель раньше и в отдельные годы при меньшей устойчивости, чем указывается для прошлых лет.

Сезонный слой скачка формируется, как и прежде, на глубинах 2-4 м и в течение лета погружается до глубины 8-10 м, однако вертикальная устойчивость водной толщи оказывается выше. Также по сравнению с первой половиной XX века возросли максимальные величины теплозапаса и средней температуры воды в озере (в среднем на 16% и 8% соответственно). Температура придонных слоев гипolimниона при этом по-прежнему составляет 4-6°C; различия между соседними годами бывают существеннее, чем между прошлым и современным периодом.

Разрушение летней стратификации и переход к осенней гомотермии происходит, как и раньше, при температуре водной толщи, близкой к 6°C, однако почти на месяц позже. Таким образом, средняя длительность периода летней стратификации возросла не менее чем на 1-1,5 месяца.

Причиной увеличения теплосодержания и средней температуры озера могут быть как климатические изменения, так и увеличение прозрачности воды в результате мелиоративных работ на водосборе.

Работа выполнена в рамках НИР кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова (ГЗ № 121051400038-1).

Библиографический список

1. *Богословский Б.Б.* О термическом режиме озера Глубокого в безледный период / В кн. Вопросы географии. Сб. 26. Гидрология. М.: ГЕОГРАФИЗ, 1951. С. 96-117.
2. *Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З.* Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953-2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. №2. С. 228–238.
3. *Жукова Т.В., Радчинова Н.П., Адамович Б.В. и др.* Температурный режим Нарочанских озер на фоне многолетних климатических изменений // Вестник БГУ. Серия 2. 2014. №2. С. 26–35.
4. *Обязов В.А.* Гидрологический режим озер Забайкалья в условиях меняющегося климата (на примере Ивано-Арахлейских озер) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. №3. С. 4–14.
5. *Щербаков А.П.* Озеро Глубокое. М.: Наука, 1967. 380 с.
6. *Anderson E., Stow C., Gronewold A. et al.* Seasonal overturn and stratification changes drive deep-water warming in one of Earth's largest lakes // Nature Commun. 2021. Vol. 12(1688). P. 1–9.
7. *Fang X., Stefan H.* Projections of climate change effects on water temperature characteristics of small lakes in the contiguous U.S. // Climatic Change. 1999. Vol. 42. P. 377–412.
8. *Hondzo M., Stefan H.G.* Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change // Climatic Change. 1993. Vol. 24. Pp. 187-211.

9. Kirillin G. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 279–293.

10. O'Reilly C., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 10.773–10.781.

11. Öglü B., Möls T., Kaart T. et al. Parameterization of surface water temperature and long-term trends in Europe's fourth largest lake shows recent and rapid warming in winter // *Limnologia*. 2020. Vol. 82(125777).

12. Schindler D.W., Beaty K.G., Fee E.J. et al. Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest // *Science*. 1990. Vol. 250(4983). P. 967–970.

13. Trumpickas J., Shuter B., Minns C. Forecasting impacts of climate change on Great Lakes surface water temperatures // *J. Great Lakes Res.* 2009. Vol. 35. P. 454–463.

14. Winslow L., Read J., Hansen G. et al. Seasonality of change: summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures // *Limnol. Oceanogr.* 2017. Vol. 62. P. 2168–2178.

УДК 556.51: 556.5.06

З.А. Сучилина, Б.И. Гарцман, mezozya1@mail.ru
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ р.УССУРИ НА ОСНОВЕ ИМК ECOMAG

На основе ИМК ECOMAG и данных мезомасштабной модели климата WRF в работе исследуется возможность создания методики краткосрочного прогноза дождевых паводков в бассейне реки Уссури. Разработана и реализована схема прогноза, а также, получены оценки результатов по стандартным критериям качества.

Ключевые слова: река Уссури, дождевой паводок, краткосрочный прогноз, моделирование, расход, климатическая модель, калибровка.

Z.A. Suchilina, B.I.Gartsman, mezozya1@mail.ru
Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

SHORT-TERM FORECAST OF RAIN FLOODS IN THE USSURI RIVER BASIN BASED ON THE IMC ECOMAG

Based on the IMC ECOMAG and data from the meso-scale WRF climate model, this study researches the opportunity of creating methods of rain flood short-term forecasting in the Ussuri river

basin. The authors managed to develop and realize a forecast scheme and obtain results of standard quality assessment.

Keywords: Ussuri river, rain flood, short-term forecast, modeling, discharge, climate model, calibration.

Введение

Моделирование и прогнозирование дождевого речного стока является одной из основных проблем в современной гидрологической науке. В особенности это актуально для паводкоопасных регионов, где высок риск возникновения катастрофических наводнений, нередко сопровождающихся жертвами и разрушительными последствиями. Предупреждение и прогноз ситуации в пределах бассейна является неотъемлемой частью защитно-восстановительных мероприятий. Базируясь на имеющейся наблюдательной сети, на практике зачастую невозможно обеспечить полноценный мониторинг и прогноз ситуации в интересующем регионе, что связано с частичным отсутствием данных и их недостаточной плотностью. Для обеспечения информационной поддержки в чрезвычайных ситуациях предлагается использовать математическое моделирование гидрологического цикла.

В качестве объекта исследования был выбран бассейн р.Уссури до замыкающего створа р.п.Кировский (площадь водосбора 24400 км²), который расположен в Приморском крае Российской Федерации. Выбранная часть бассейна р.Уссури обладает достаточно надежными и продолжительными рядами гидрометеорологических данных, что позволяет испытать в качестве основного расчетного инструмента Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics; автор Ю.Г.Мотовилов) [2;4]. Кроме того, для краткосрочного прогноза дождевого стока мы располагаем данными климатической модели WRF, зарекомендовавшей себя в качестве надежной и широко используемой модели со средним и высоким качеством выходных гидрометеорологических характеристик. Временной масштаб расчетов ограничен летне-осенним паводковым сезоном, характеризующимся на юге Дальневосточного региона России высокой частотой выпадения продолжительных интенсивных дождей, а также динамичностью формирования и сложной структурой паводкового стока.

Таким образом, целевой аспект работы направлен на оценку возможности воспроизводить временные закономерности формирования летних дождевых наводнений в бассейне р.Уссури – р.п.Кировский с помощью модели формирования стока ECOMAG и с использованием данных современной мезомасштабной климатической модели WRF.

Материалы и методы исследования

Исходные данные модели ECOMAG для бассейна р.Уссури, представляют собой картографическую информацию в виде цифровой модели рельефа (ЦМР), карт почв, растительности и использования земель, метеорологическую информацию с 8 метеостанций и 15 гидрологических постов (среднесуточные данные

о температурах ($^{\circ}\text{C}$), осадках (мм) и дефицитах влажности воздуха (гПа)) и гидрологическую информацию о расходах воды (рис.1).

Для целей прогнозирования были использованы данные климатической модели WRF (Weather Research and Forecasting) – мезомасштабной модели атмосферы для численного прогнозирования погоды. В работе использовались данные версии модели WRF, настроенной для территории Приморского края и используемой в ПУГМС (Приморское территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) об осадках (мм), температурах ($^{\circ}\text{C}$) и дефицитах влажности воздуха (гПа) с суточным временным шагом за период 2013 – 2019 гг. [5].

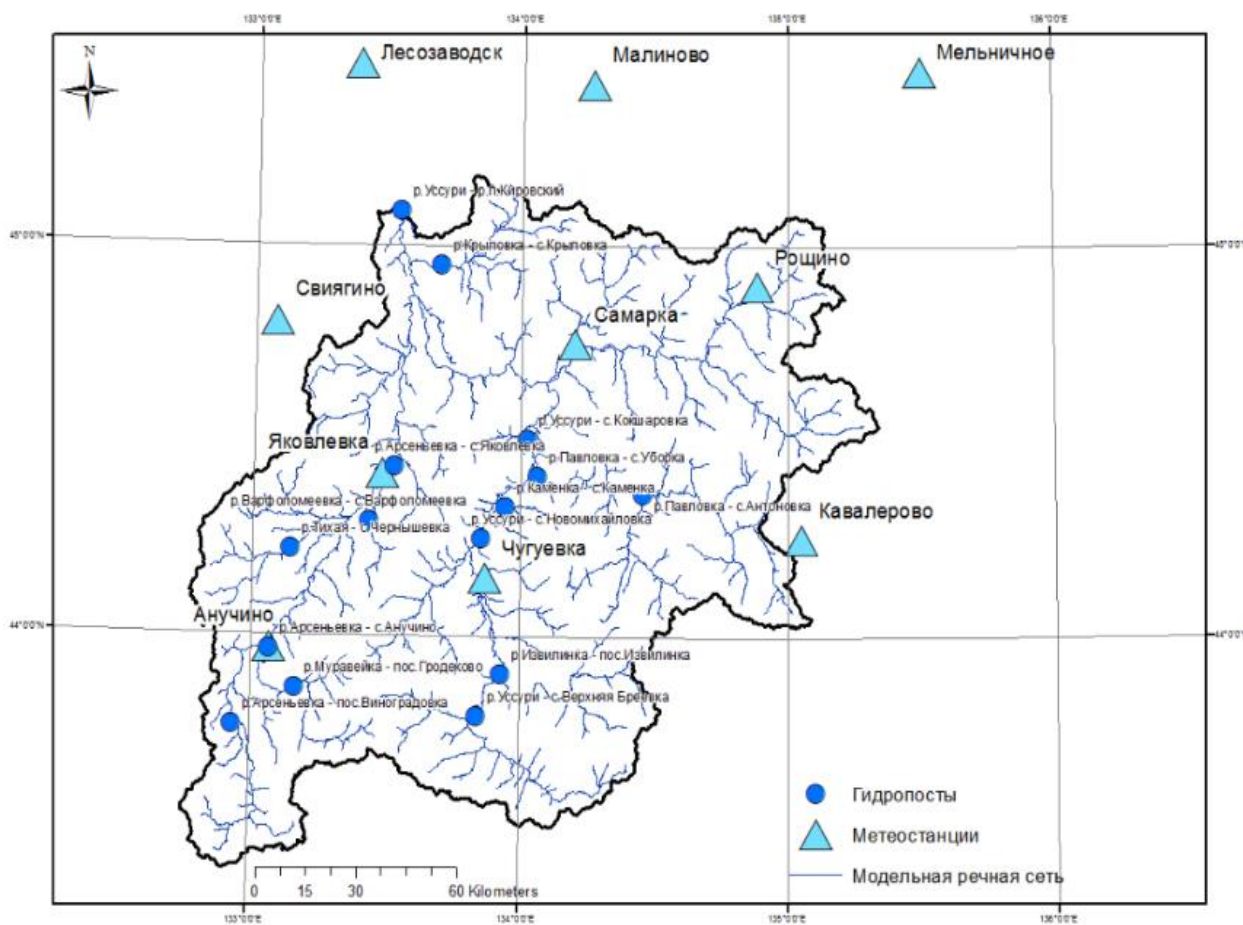


Рис.1. Карта-схема расположения метеостанций и гидропостов в бассейне р.Уссури – р.п.Кировский

Важным этапом работы при настройке модели ECOMAG является калибровка оптимальных параметров на выбранном периоде 1999-2009 гг. В данном исследовании мы решили изменить подход к традиционной методике калибровки, которая исключала работу с настройкой коэффициента шероховатости и не была адаптирована для водного режима реки Уссури. Значение коэффициента шероховатости существенно влияет на вид гидрографа в условиях дождевого паводка. В связи с этим шероховатость была включена, как базовый параметр калибровки наряду с остальным набором параметров. В результате были получены разные наборы оптимальных параметров для разных периодов – для многовод-

ных и маловодных лет, для весенних и летне-осенних сезонов, а также набор параметров, полученный с использованием метода PCA (Principal Component Analysis) в процессе калибровки, что позволяет эффективно разделять полезный сигнал и случайный шум в совокупностях данных. Последний был выбран для целей краткосрочного прогноза на современном периоде 2013-2019 гг. В перспективе такой подход к калибровке позволит перейти к работе с гибридной моделью, которая способна выбирать набор параметров в зависимости от текущего состояния водного режима.

В испытаниях метода прогноза использованы данные за следующие годы (максимальный расход паводка превышает 2000 м³/сек): 2013, 2016, 2017, 2018, 2019. Прогнозирование выполнялось для летне-осеннего паводкового периода с 31 мая по 31 октября. Расчетная схема прогноза состоит из следующих этапов (рис.2):

1. Расчет контрольных точек. По фактическим метеорологическим данным в ЕСОМАГ рассчитывалась контрольная точка за период с 1 января каждого года по 31 мая (первая в году дата выдачи прогноза). По фактическим данным метеостанций в ЕСОМАГ начиная от 31 мая ежедневно проводился расчет контрольных точек вперед на одни сутки до 31 октября.

2. Подготовка и добавление данных модели WRF в ИМК ЕСОМАГ в качестве прогнозной метеорологической информации.

3. Запуск прогнозной схемы расчета. От каждой контрольной точки в среде ИМК ЕСОМАГ по прогнозным данным WRF проводился расчет на 3 суток вперед. Таким образом, охватывался весь летне-осенний паводковый сезон.

4. Выгрузка полученных результатов и оценка прогноза относительно фактических рядов расходов воды с помощью стандартных оценок качества.

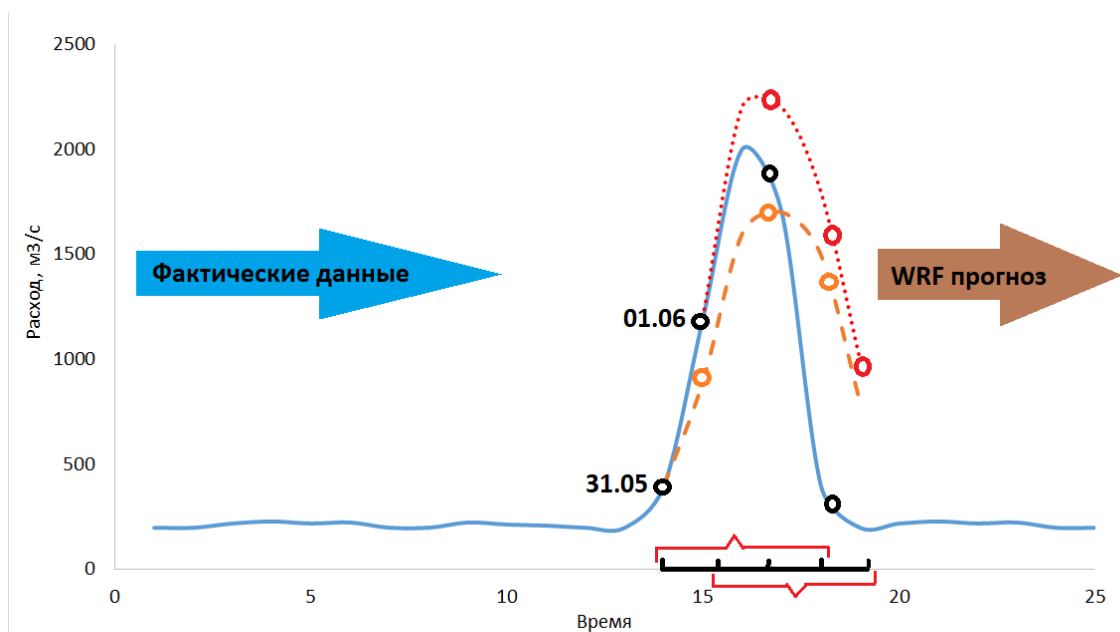


Рис. 2. Расчетная схема краткосрочного прогноза на 3 суток (сплошная голубая линия – фактические расходы воды; красная и оранжевая штриховые линии – спрогнозированные значения расходов воды)

Анализ результатов

Анализируя таблицу оценки результатов (таблица) и принимая во внимание, что при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,8$ качество методики моделирования считается удовлетворительным, а при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,5$ – хорошим, в первую очередь, отметим тот факт, что для заблаговременности в одни сутки $S/\sigma_{\Delta 1}$ велика практически для всех постов и всех расчетов, что свидетельствует о низком качестве методики прогноза.

Для остальных заблаговременностей (2, 3 суток) отношение S/σ_{Δ} в целом, уменьшается для всех лет, поскольку погрешность модели S , как правило, мало меняется с течением времени, при этом σ_{Δ} , которая отражает динамику процесса движения и поступления воды, за период заблаговременности быстро растет. В связи с этими особенностями входящих в соотношение S/σ_{Δ} величин с ростом заблаговременности качество методики прогноза увеличивается до удовлетворительного и хорошего, а прогноз оправдывается с большей вероятностью [1;3].

Оценки результатов краткосрочного прогноза для серии лет с использованием данных модели WRF на основе ИМК ЕСОМАГ для р.Уссури – р.п. Кировский

Критерии качества	Оценки 2013-2019 гг.			
	прогноз	на 1-ые сутки	на 2-ые сутки	на 3-и сутки
Нэш-Сатклиф	2013	0.82	0.86	0.85
	2016	0.03	0.55	0.56
	2017	0.32	0.42	0.40
	2018	0.90	0.92	0.92
	2019	0.84	0.81	0.80
Корреляция	2013	0.93	0.93	0.92
	2016	0.74	0.75	0.77
	2017	0.70	0.70	0.69
	2018	0.96	0.97	0.97
	2019	0.91	0.91	0.91
Относительная ошибка	2013	41.8	27.9	29.2
	2016	97.7	50.0	49.6
	2017	81.4	56.8	57.8
	2018	30.7	20.7	21.8
	2019	40.0	32.6	33.1
$S/\sigma_{\Delta i}$	2013	1.95	1.02	0.74
	2016	2.13	1.21	0.94
	2017	3.25	1.73	1.27
	2018	1.54	0.79	0.60
	2019	2.37	1.24	0.90
Средняя абсолютная ошибка	2013	111	112	114
	2016	260	257	252
	2017	121	122	125
	2018	124	120	126
	2019	92.2	92.4	95.0

Наилучшие результаты моделирования получены в 2018 г. Чуть хуже ситуация в 2013 и 2019 гг. Как видно по оценкам, хуже всего модель воспроизводит 2016 и 2017 гг. В 2016 году наблюдается значительная разница в наступлении

максимальных расходов воды (до 8 дней). В случае 2016 года модельные “пики” не только наступают раньше фактических расходов воды, но и значительно занижены, что связано с реакцией модели WRF на высокие значения осадков (от 35 до 60 мм в сутки), при этом средние по величине осадки (до 20 мм в сутки) не формируют высокие значения расходов воды. В 2017 году модель ECOMAG не обрабатывает осадки по данным модели WRF. Первый выдающийся подъем воды (июнь 2017 г.) модель не воспроизводит. Скорее всего, это связано с тем, что ECOMAG при расчете пропускает или по каким-то причинам не учитывает данные по осадкам в узлах сетки модели WRF. Причины выявленной некорректности работы модели требуют дополнительного исследования.

Выводы

1. В условиях Дальнего Востока предвычисление дождевых паводков является важной гидрологической задачей, которая требует разработки надежной схемы прогноза.

2. Разработка нового подхода к калибровке в рамках ИМК ECOMAG, включающего шероховатость, учитывает особенности водного режима реки Усури и дает новые возможности для перехода к более совершенным методикам моделирования.

3. Подготовлена и испытана схема краткосрочного прогноза дождевых паводков с заблаговременностью до 3 суток на основе ИМК ECOMAG по данным прогнозной метеорологической информации WRF.

4. Использование ИМК ECOMAG в связке с мезомасштабной моделью климата WRF дает корректные результаты.

Библиографический список

1. *Гарцман Б.И.* Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска // Тихоокеанский ин-т географии ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.

2. *Мотовилов Ю.Г.* Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG для моделирования речных бассейнов. VI Всероссийский гидрологический съезд. Тезисы докладов. Секция 5. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 139-140.

3. *Мотовилов Ю.Г., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В.* Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ECOMAG с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 78 – 102.

4. *Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K. and Belokurov A.* ECOMAG – regional model of hydrological cycle., Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, May 1999.(8)

5. *Skamarock W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Powers, J. G.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Report, 2008 (June), 113. doi:10.5065/D6DZ069T

М.А. Терешина, О.Н. Ерина, Д.И. Соколов martereshina@yandex.ru
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ GLM ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В работе проведена оценка эффективности воспроизведения термического режима долинного Можайского водохранилища с помощью одномерной лимнологической модели GLM при различных вариантах задания вертикального распределения температуры воды. Показано, что для правильного воспроизведения режима вытянутого водоема необходим учет продольной неоднородности температурного профиля путем осреднения температур, измеренных на нескольких вертикалях. В таком случае ошибка расчета температуры воды составляет около 2 °С и адекватно воспроизводится водный баланс водохранилища. Несмотря на ошибки в воспроизведении глубины термоклина и придонной температуры воды, модель правильно показывает режим формирования и разрушения сезонной стратификации.

Ключевые слова: лимнологическое моделирование, термический режим, стратификация, озера и водохранилища, одномерная модель.

M. Tereshina, O. Erina, D. Sokolov martereshina@yandex.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

SUITABILITY OF ONE-DIMENSIONAL LAKE MODEL GLM FOR SIMULATION OF THERMAL DYNAMICS OF A VALLEY RESSERVOIR

We evaluate the effectiveness of a one-dimensional limnological model GLM for reproducing the thermal regime of the Mozhaisk Reservoir with different variants of setting the vertical distribution of water temperature. It is shown that for correct simulation of thermal regime of an elongated reservoir it is necessary to take into account longitudinal changes of temperature profile by averaging temperatures measured on several stations. In this case, the RMSE of water temperature calculation is about 2 °C and the water balance of the reservoir is adequately reproduced. In spite of errors in reproducing the thermocline depth and near-bottom water temperature, the model correctly simulates formation and destruction of seasonal stratification.

Keywords: limnological modeling, thermal regime, stratification, lakes and reservoirs, one-dimensional model.

Введение

Моделирование термического режима озер и водохранилищ является важной лимнологической задачей, необходимой для целого ряда гидрометеорологических и экологических исследований. Для димиктических водоемов, к которым относится большинство крупных озер и водохранилищ умеренной зоны, огромную роль для всех внутриводоемных процессов играет летняя стратификация, параметры которой определяют условия развития гидробионтов, интенсивность

протекания биохимических процессов и круговорота биогенных веществ и других загрязнителей. Для водоемов с интенсивным водопользованием, в особенности для источников питьевого и промышленного водоснабжения, режим нагрева и перемешивания водной толщи может значительно влиять на потребительские качества воды за счёт его связи с трофическими условиями и химическим составом воды.

Выбор модели для изучения термических и динамических процессов в водоеме является достаточно сложной задачей, так как слишком простые модели могут не охватить полный спектр происходящих в водоеме процессов, а при усложнении моделей могут потребоваться большие вычислительные мощности и большое количество входных данных, не всегда доступных в реальных условиях. В случае с долинными водохранилищами, имеющими обычно вытянутую форму, наиболее распространенным вариантом является использование двумерных моделей, позволяющих воспроизводить такие элементы продольной неоднородности, как неодинаковые условия ветрового перемешивания, ветровые течения и др. [1; 4]. Однако, в силу гораздо меньшей требовательности одномерных моделей и их более простой интеграции с глобальными моделями климатической системы, они также достаточно широко используются при изучении термического режима водохранилищ [3; 4].

Материалы и методы исследования

В данной работе для Можайского водохранилища, классически рассматриваемого в двумерной схематизации, адаптирована одномерная модель GLM (General Lake Model). Можайское водохранилище создано в верховьях р. Москвы в западной части Московской области и служит источником питьевого водоснабжения г. Москвы. Водоем имеет площадь зеркала при НПУ 31 км², длину (по прямой) около 28 км, при этом максимальная ширина составляет до 3 км. Максимальная глубина от верховьев к плотине возрастает от 5 до 22,5 м, средняя глубина составляет 7,6 м. Среднегодовой коэффициент водообмена составляет 1,8 год⁻¹, больше половины от годового объема притока в водохранилище поступает во время весеннего половодья. В летний период в водохранилище формируется устойчивая температурная стратификация, сохраняющаяся в течение 4–5 месяцев, нижняя граница эпилимниона в зависимости от района водохранилища и сезона располагается обычно на глубине от 2 до 14 м.

Для приведения фактических профилей температуры воды в водохранилище к одномерной схематизации использовалось три варианта задания вертикального распределения температуры: 1) в качестве вертикального профиля для всего водохранилища использовалось распределение температуры воды на наиболее глубокой приплотинной станции, 2) для каждого слоя использовалось среднее арифметическое значение температуры воды на соответствующей глубине между пятью станциями, равномерно распределенными по длине водохранилища, 3) использовалось средневзвешенное по объему значение температуры воды между пятью станциями.

Для воспроизведения температурного режима водохранилища была применена одномерная модель GLM [2], находящаяся в бесплатном открытом доступе и широко применяемая в международном лимнологическом сообществе. В качестве метеорологических данных использовались результаты реанализа NCEP-NCAR Reanalysis II, калибровка модели проводилась методом адаптации ковариационной матрицы (CMA-ES), представленном в пакете *glmtools* на языке программирования R. К калибруемым параметрам относились коэффициент экстинкции ФАР, множители для величин метеопараметров и константы интенсивности различных типов перемешивания, реализуемых в модели. Для калибровки использовались фактические данные измерений температуры воды за 2012–2015 гг., для верификации – за 2016–2020 гг., частота измерений в летний период составляла в среднем 1 съемку в месяц.

Анализ результатов

Модель показала в целом хорошее качество воспроизведения основных черт водного и термического режима Можайского водохранилища, хотя качество моделирования заметно различалось в зависимости от способа задания вертикального профиля температуры. Наименьшая среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды за период калибровки ($1,8^{\circ}\text{C}$) наблюдалась при использовании средневзвешенного по объему водохранилища температурного профиля, чуть большая ($1,9^{\circ}\text{C}$) – при использовании среднего распределения температуры между пятью вертикалями, наибольшая ($3,4^{\circ}\text{C}$) – при использовании температурного профиля, измеренного на одной глубоководной станции. Похожие результаты были получены и при верификации модели: при использовании средневзвешенного температурного профиля среднеквадратическая ошибка расчета составила $2,4^{\circ}\text{C}$, среднего – $2,3^{\circ}\text{C}$, одного реального профиля – $3,4^{\circ}\text{C}$. Таким образом, даже в одномерном приближении учет продольной неоднородности распределения температуры воды необходим для адекватного воспроизведения общего теплового режима и особенностей внутреннего теплообмена.

Результаты модельного расчета хорошо отображают как общий размах колебаний температуры воды на различных горизонтах, так и положение основных термических слоев, даты наступления различных фаз термического режима (рис. 1). Кроме того, модель показала высокое качество воспроизведения уровня режима водоема с ошибкой расчета около 20 см (рис. 2), что считается крайне высоким показателем при решении различных расчетных и прогнозных задач.

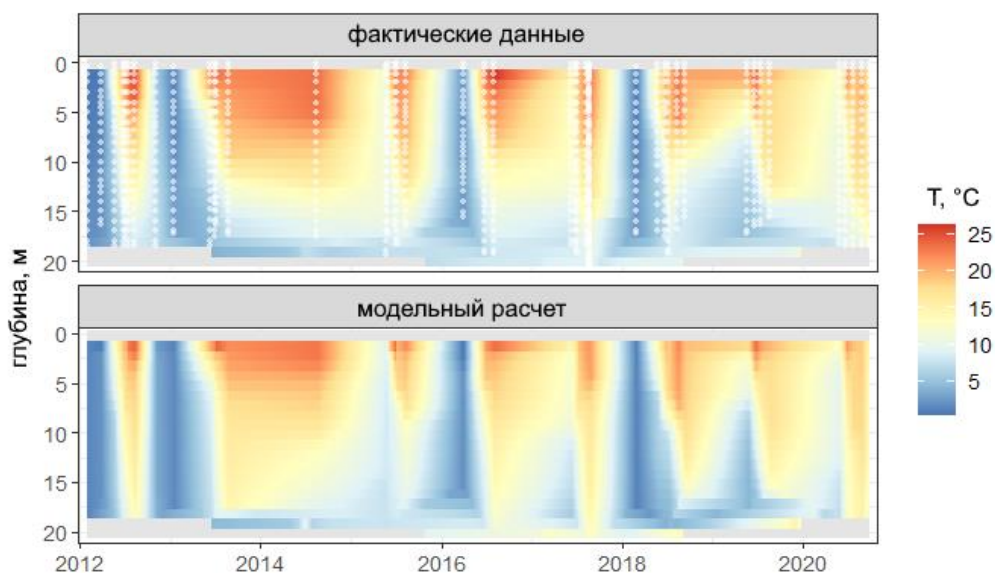


Рис. 1. Сопоставление фактического и расчетного распределения температуры воды в Можайском водохранилище (средневзвешенной по пяти вертикалям) за 2012-2020 гг.

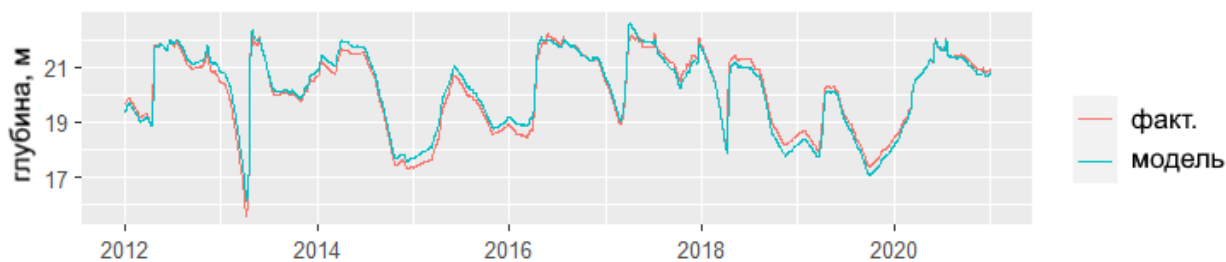


Рис.2. Фактический и расчетный ход максимальной глубины водохранилища за 2012-2020 гг.

Для всех дат фактических наблюдений модель правильно воспроизвела наличие или отсутствие устойчивой стратификации. При этом в силу невозможности полного описания всех динамических процессов, отмечаются и некоторые устойчивые ошибки работы модели. Так, при почти полном повторении моделью фактически наблюдаемых температур в поверхностном слое воды, она может значительно завышать или занижать придонную температуру воды (до 5°C и более) (рис. 3а, б). Ошибки в воспроизведении режима придонной температуры воды связаны в основном с неполным совпадением модельной и фактической температуры воды в конце периода весеннего перемешивания, в результате чего на весь последующий период стратификации температура гипolimниона остается искаженной. Также, несмотря на крайне высокую степень схожести модельных и фактических величин устойчивости водной толщи, не всегда сходится с фактическими данными положение самого сезонного слоя скачка (рис. 3в). Однако, эти ошибки относятся в первую очередь к периодам самого начала формирования летней стратификации и ее разрушения, либо к случаям, когда вертикальное распределение температуры оказывается сглаженным вследствие установления теплой безветренной погоды и строгое выделение сезонного термоклина само по себе представляет большую сложность.

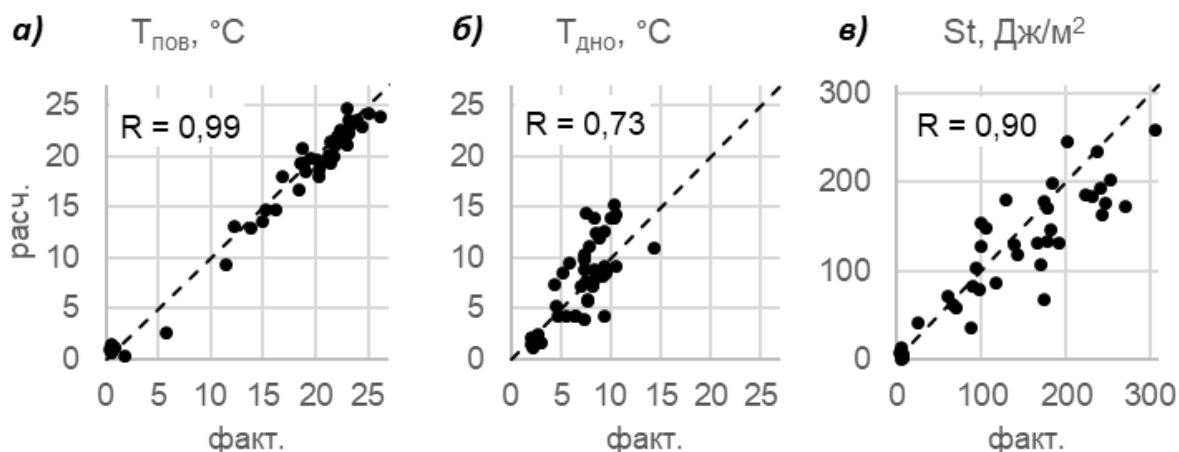


Рис. 3. Соотношение между фактическими и расчетными значениями некоторых термических характеристик за расчетный период:

а) температура поверхности воды, б) придонная температура, в) устойчивость водной толщи

Режим притока и сброса воды из водохранилища, определяющий его проточность, оказал малое влияние на качество воспроизведения температурного режима. Наиболее высокие ошибки расчета отмечались как в экстремально маловодном 2015 г., так и в многоводных 2013 и 2018 гг. Наибольшие ошибки, по видимому, связаны с невозможностью учета направления ветра, за счет чего модель не может адекватно воспроизвести более интенсивное перемешивание при большей длине ветрового разгона.

Выводы

Одномерная лимнологическая модель GLM показала свою применимость для долинного Можайского водохранилища, адекватно воспроизведя его водный режим, формирование, развитие и разрушение стратификации и главные черты температурного режима. К недостаткам модели относится невозможность повторения некоторых особенностей, обусловленных вытянутой формой водоема – разных морфометрических черт отдельных секций водохранилища, неоднородности динамического перемешивания при разных направлениях ветра. Кроме того, осреднение нескольких температурных профилей хотя и сильно увеличивает эффективность моделирования за счет более адекватного отображения энергетического баланса водоема, но в то же время само по себе отдаляет модель от фактического состояния водоема и может исказить картину при определенных синоптических условиях. Можно заключить, что модель GLM вполне применима для изучения сезонных и многолетних особенностей термического режима долинных водохранилищ годового и многолетнего регулирования стока.

Подготовка статьи осуществлена в рамках НИР кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, в рамках госзадания, номер ЦИТИС 121051400038-1 («Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши»).

Библиографический список

1. Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Численное моделирование стратифицированных течений в системах открытых русел и водоемах разветвленной формы //Вычислительные технологии. 2004. Т. 9. №. 2. С. 26–41.
2. Hipse M.R., Hamilton D.P., Hanson P.C., Carey C.C., Coletti J.Z., Read J.S., Ibelings B.W., Valesini F.J., Brookes J.D. Predicting the resilience and recovery of aquatic systems: a framework for model evolution within environmental observatories //Water Resources Research. 2015. Vol. 51(9). Pp. 7023–7043
3. Man X., Lei C., Carey C.C., Little J.C. Relative performance of 1-D versus 3-D hydrodynamic, water-quality models for predicting water temperature and oxygen in a shallow, eutrophic, managed reservoir //Water. 2021. Т. 13. №. 1. 88.
4. Soares L.M.V., Calijuri M.C. Deterministic modelling of freshwater lakes and reservoirs: Current trends and recent progress //Environmental Modelling & Software. 2021. Vol. 144. 105143.

УДК 502.504

Т.В. Турутина, Turutina.tatyana@yandex.ru

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Изменение климата определяет изменение гидрологического режима водных объектов. Для рек северных регионов имеют место тенденции к увеличению твердого стока за счет активизации процессов термоэрозии русла и водосбора. На р. Се-Яха имеют место выраженные тенденции к увеличению стока воды и стока наносов. Причем, годы с выраженными одновременными максимумами температуры воздуха и осадков характеризуются повышенными значениями стока воды и наносов.

Ключевые слова: изменение климата, расход воды, наносы, термоэрозия

T.V. Turutina, Turutina.tatyana@yandex.ru

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE ANNUAL DISTRIBUTION OF SOME HYDROLOGICAL QUANTITIES

Climate change determines the change in the hydrological regime of water bodies. For the rivers of the northern regions, there are tendencies to increase solid runoff due to the activation of the processes of thermal erosion of the channel and catchment area. On the Se-Yakha River, there are pronounced trends towards an increase in water runoff and sediment runoff. Moreover, years with pronounced simultaneous maxima of air temperature and precipitation are characterized by increased values of water runoff and sediment.

Keywords: climate change, water discharge, sediments, thermal erosion

Введение

Глобальное потепление, стало основной проблемой, вставшей перед человечеством в последние десятилетия. Повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, которое связано с интенсивным сжиганием ископаемого топлива приводит к ощутимым изменениям экосистем на планете. Изменение климата влечет за собой и изменения гидрологических параметров и величин во всех климатических поясах, в том числе и в субарктике. Целью настоящей работы является анализ влияния климатических изменений на гидрологический режим рек центрального Ямала.

Материалы и анализ результатов

За последние годы по данным многих метеостанций (Марресале, Новый порт и др.) на территории ЯНАО наблюдается тенденция повышения температуры воздуха. Эти изменения затрагивают также и территорию центрального Ямала. Вот уже 18 лет ведутся режимные наблюдения на метеоплощадке пос. Бованенково, которая находится на р. Се-Яха в 30 км от ее устья. На рис. 1 приведен график средних годовых значений температуры воздуха за период 2005-2022 гг. по метеостанции пос. Бованенково, а также тренд, который показывает тенденцию повышения температуры воздуха за период наблюдений.

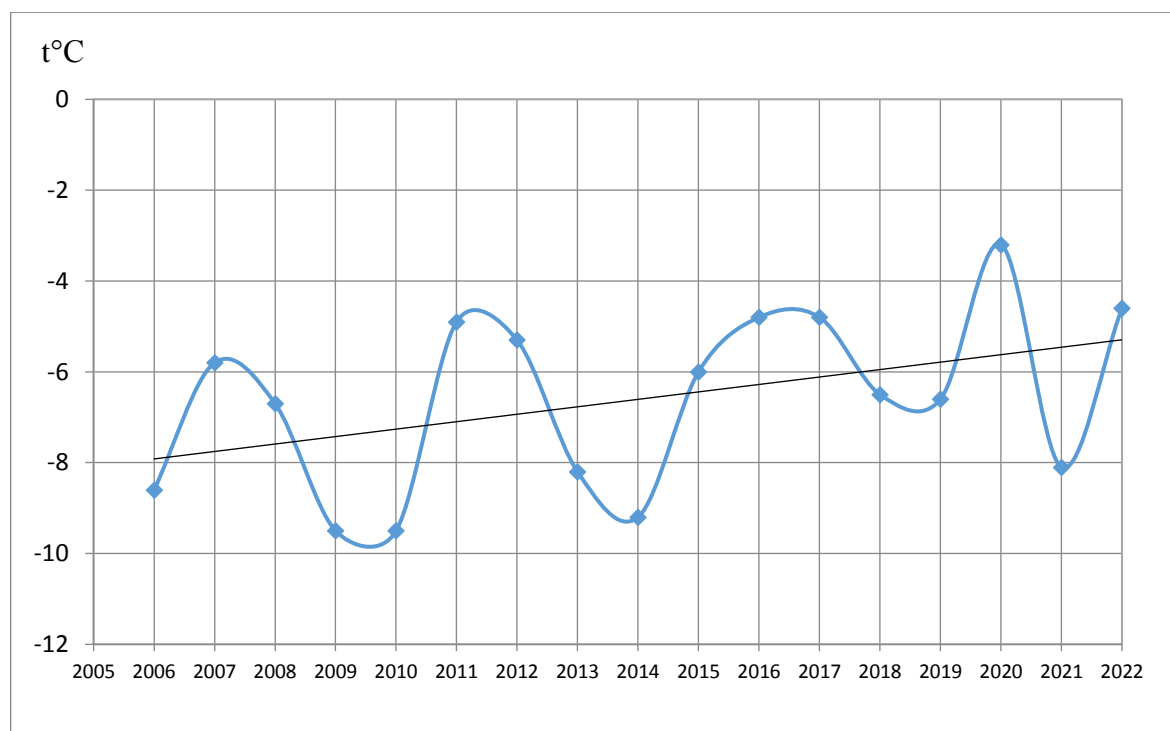


Рис. 1. Хронологический ход средних годовых значений температуры воздуха по метеоплощадке пос. Бованенково. Период наблюдений 2005-2022 гг.

В таблице представлены средние многолетние значения температуры воздуха за период наблюдений 2005-2022 г, а также средние месячные значения за 2022 год. Из таблицы видно, что зима 2022 г. была сравнительно тёплой.

Средние месячные и средние годовые значения температуры воздуха за 2022 г. и период наблюдений 2005–2022 гг., м/ст пос. Бованенково

Годы/месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
2022	-19,1	-17,6	-15,5	-9,3	-0,4	6,5	12,2	11,5	2,9	0,8	-11,7	-15,1	-4,6
Среднее за период 2004-2022	-21,5	-21,8	-18,3	-11	-3,1	5,8	12,3	9,4	4,4	-3,4	-13,9	-17,7	-6,6

Зимние месяцы (в сравнении с многолетними данными) оказались теплее в среднем на 2,7 (январь-апрель, ноябрь-декабрь) градуса, а летние и осенние (май-октябрь), теплее, на 1,4°C. Минимальная температура воздуха в зимний период 2022 года ни разу не опускалась до минус 40°C. Наименьшее ее значение было зафиксировано 2 января и составило минус 37,0°C.

По данным многолетних наблюдений на метеоплощадке пос. Бованенково наряду с увеличением температуры воздуха наблюдается и увеличение количества осадков. Ниже, на рисунке 2 приведены годовые суммы осадков за период наблюдений 2005–2022 гг., а также представлен тренд, который показывает тенденцию повышения сумм годовых осадков в течение всего периода наблюдений.

Осадки, мм

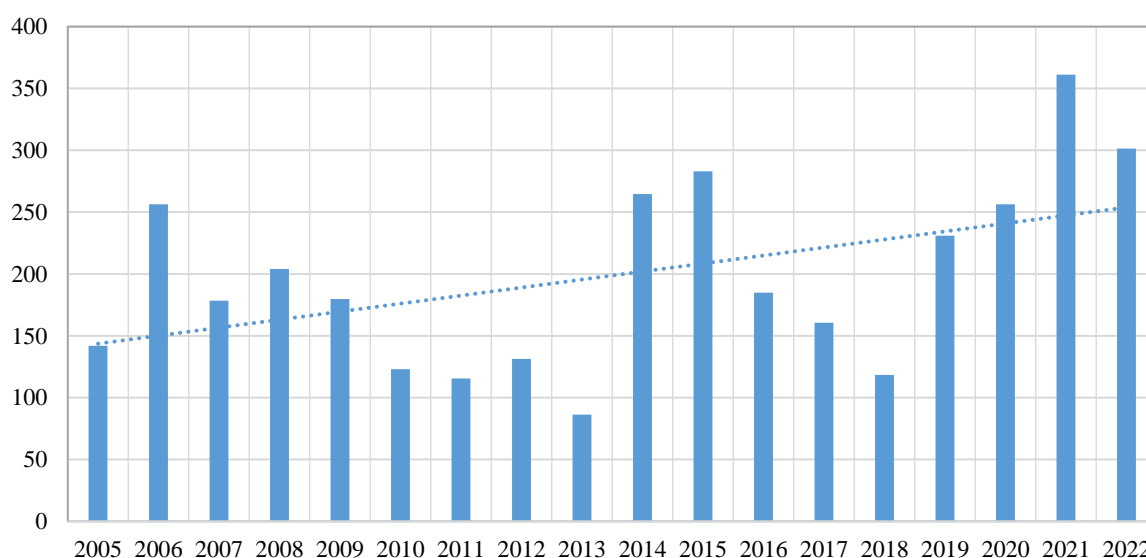


Рис. 2. Годовые суммы осадков за период с 2005-2022 гг., м/ст пос. Бованенково

Существенные изменения температуры воздуха и атмосферных осадков определяют изменения гидрологических величин – стока воды и наносов. При этом на территории центрального Ямала есть одна особенность. Льды многолетней мерзлоты находятся близко к поверхности, на глубине всего 0,3-0,5 м. при повышении температуры воздуха они начинают активно таять, что способствует увеличению разного вида эрозии на водосборах рек этого региона [1; 5-6]. В результате таяния льдов учащаются обрушения береговых склонов рек, образуются термокары на водосборах [3; 4]. В период весеннего снеготаяния и дождевых паводков возникают временные водотоки, которые активно разрушают поверхность водосборов, учащаются такие явления, как оплывы и оползни [2].

В силу того, что грунты и почвы подстилающей поверхности на полуострове мягкие и несвязные, при оттаивании они быстро размываются, растительный покров тундры нарушается также очень легко. Корни растительности тундры расположены в поверхностном слое, проникают в почву на не большую глубину и не способны сдерживать усиливающуюся эрозию от таяния льдов многолетней мерзлоты.

На рисунке 3 представлены графики стока наносов и воды по данным измеренных расходов воды и расходов наносов на р. Се-Яха, ОГП (основной гидрометрический створ), в 30 км от устья. Также на рисунке показаны тренды, которые указывают на тенденции повышения этих гидрологических величин.

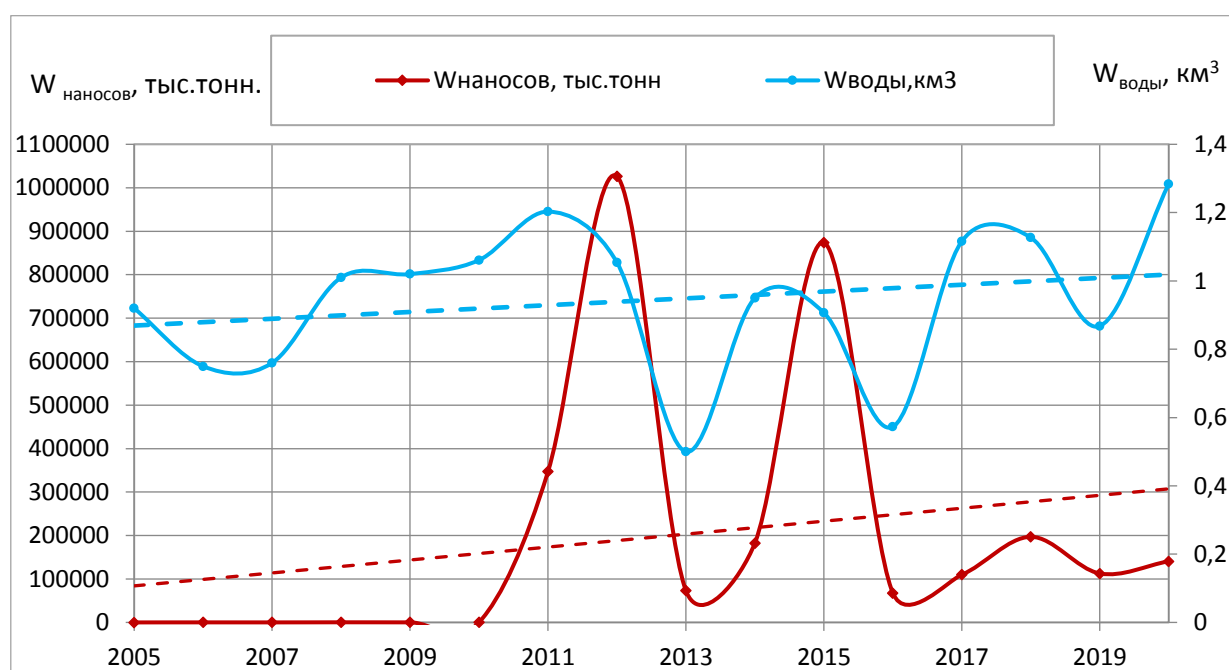


Рис. 3. Хронологический ход стока наносов и расхода воды, р. Се-Яха

Выводы

Повышение стока воды связано с изменением температуры воздуха и увеличением количества осадков. Влияние этих факторов ведет к активному таянию льдов многолетней мерзлоты, что в свою очередь, приводит к интенсивности эрозионных процессов на водосборах рек и образованию термокаров. Еще одной из причин активизации эрозионных процессов и увеличения стока наносов является антропогенный фактор, связанный с освоением газовых месторождений.

Библиографический список

1. Бобровицкая Н.Н. Тенденции изменения стока наносов рек России в современных условиях // Материалы VI Всероссийского съезда (секция 6). СПб: Гидрометеиздат, 2004. С.28–34.
2. Воскресенский О.Б. Расчет максимального стока рек и малых водотоков полуострова Ямал. GeoINFO, 2020. 17 с.

3. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода. М.: Изд. «ГЕОС», 1997. 198 с.

4. Сидорчук А.Ю., Баранов А.В. Эрозионные процессы центрального Ямала. СПб: Недра, 1999. 349 с.

5. Bobrovitskaya N.N. Erosion and sediment yield modeling in the Former USSR, IHP Technical Documents in Hydrology, No. 60, UNESCO, Paris, 2002.

6. Bobrovitskaya N.N., Kokorev A.V., Lemeshko N.A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers. Elsevier, Global and Planetary Change 39, 2003.

УДК 556.53

М.В. Ушаков, mvilorich@narod.ru

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А.Шило
Дальневосточного отделения РАН, г. Магадан, Россия*

ГОДОВОЙ ПРИТОК ВОДЫ К ВОДОХРАНИЛИЩУ КОЛЫМСКОЙ ГЭС В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Проведен анализ многолетних колебаний годового притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС (Северо-Восток России). Методами исследования явились анализ временных рядов на тренд по критерию Херста, низкочастотная фильтрация рядов скользящим средним. Ряд рассматриваемой характеристики содержит тренд на повышение. Тенденция роста притока согласуется с положительными трендами среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков. Получена формула, по которой можно вычислить, какова будет норма притока, рассчитанная за 30 лет, при различных вариантах потепления климата.

Ключевые слова: потепление климата, гидрологический режим, приток воды, скользящее среднее

M.V. Ushakov, mvilorich@narod.ru

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N. A. Shilo,
Far East Branch, RAS, Magadan, Russia*

ANNUAL WATER INFLOW TO THE RESERVOIR OF THE KOLYMA HYDROELECTRIC POWER STATION UNDER CLIMATE CHANGE

The analysis of long-term fluctuations of the annual water inflow to the reservoir of the Kolyma hydroelectric power station (North-East of Russia) has been carried out. The research methods were the analysis of time series for the trend according to the Hurst criterion, low-frequency filtering of the series by moving averages. The series of the characteristic under consideration contains an upward trend. The inflow growth trend is consistent with the positive trends in the average annual air temperature and annual precipitation. A formula has been obtained by which it is possible to calculate what will be the inflow rate, calculated over 30 years, under various options for climate warming.

Key words: climate warming, hydrological regime, water inflow, moving average

Введение

Современное глобальное потепление влечет за собой изменения гидрологического режима рек, в том числе в Арктике и северо-восточной Евразии [5; 12].

В работе ставится цель, получить представление о произошедших климатических изменениях в годовом притоке воды к водохранилищу Колымской ГЭС, которое расположено на Северо-Востоке России, в верхнем течении р. Колымы (табл. 1).

Таблица 1

Сведения о Колымском водохранилище

<i>Площадь водосбора, км²</i>	<i>Расстояние плотины от устья, км</i>	<i>Объем, км³</i>	<i>Средний напор воды у плотины, м</i>
61500	1850	14,4	112

Климат здесь резко континентальный с морозной зимой (средняя температура воздуха в январе $-38,2^{\circ}\text{C}$) и умеренно теплым летом (средняя температура в июле $+13,3^{\circ}\text{C}$) [4;7]. Отмечается сплошное распространение многолетней мерзлоты, прерываемое таликами [1; 9].

Подробное описание гидрологического режима можно найти в [6]. Климатические изменения гидрологического режима рек Северо-Востока России рассматривались в работах [2; 8; 11; 13].

Материалы и методы исследования

Сведения величинах годового притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС взяты из Фонда научно-оперативных материалов Колымского управления по гидрометеорологии и окружающей среды. Многолетние данные о температуре воздуха и годовых суммах атмосферных осадков на метеостанции Сусуман размещены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [3].

Методами исследования явились анализ временных рядов на тренд по критерию Херста [10], низкочастотная фильтрация рядов скользящим средним.

Анализ результатов

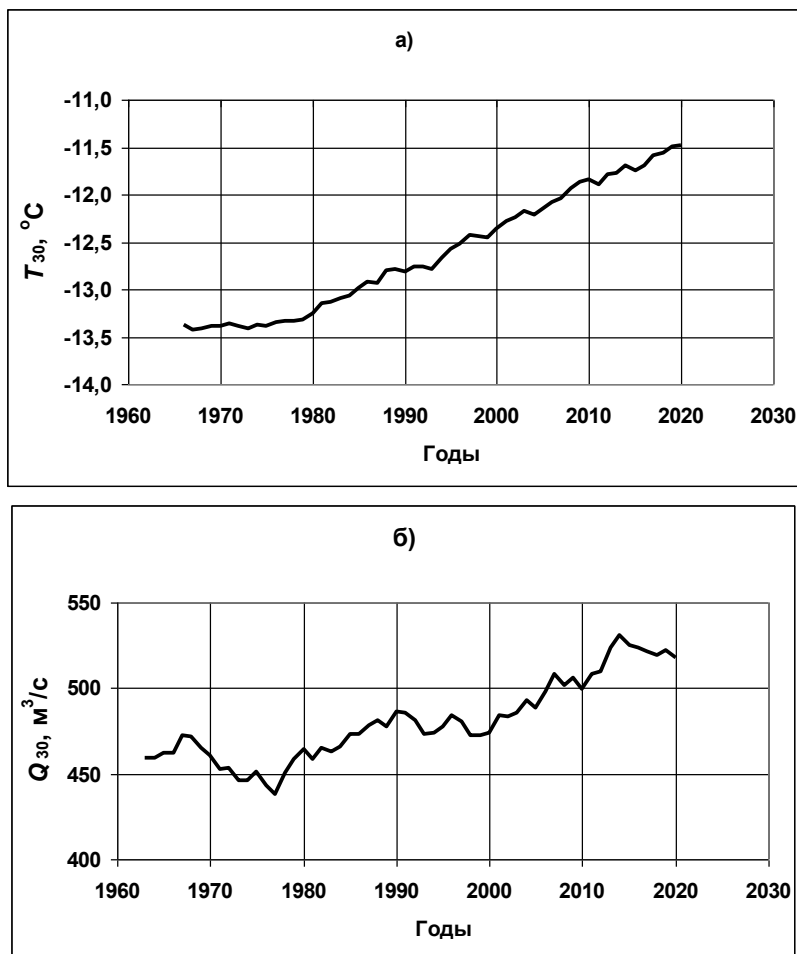
В многолетних колебаниях годового притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС прослеживается тренд на повышение, который удовлетворяет критерию Херста. Тенденция на увеличение притока согласуется с тенденцией роста среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков.

Более наглядное представление о климатических изменениях гидрометеорологических характеристик дает низкочастотная фильтрация – скользящее осреднение с окном 30 лет. На рисунке видно, что выборочные средние, рассчитанные за 30-летние интервалы, в последние десятилетия растут. Эти скользящие нормы хорошо связаны между собой

$$Q_{30} = 34,8T_{30} + 921, \text{ коэффициент корреляции } r = 0,93,$$

где Q_{30} – норма годового притока воды, рассчитанная за 30 лет; T_{30} – норма среднегодовой температуры воздуха, рассчитанная за 30 лет.

По этой формуле можно рассчитать, какова будет норма годового притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС при различных вариантах потепления климата (табл. 2).



Скользящие 30-летние средние температуры воздуха (а) и годового притока воды в водохранилище Колымской ГЭС (б)

Таблица 2

Норма притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС на 2050 г. при различных вариантах потепления климата

<i>Норма притока воды (м³/с) при повышении среднегодовой температуры воздуха на</i>			
0,5°C	1,0°C	1,5°C	2,0°C
538	556	573	590

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Отмечается климатический тренд на повышение в ряду годовых значений притока воды к водохранилищу Колымской ГЭС. Этот тренд согласуется с трендами среднегодовой температуры воздуха и суммой атмосферных осадков за год на метеостанции Сусуман.

2. Получена формула связи скользящих 30-летних средних годового притока и среднегодовой температурой воздуха, по которой можно определить, какова будет норма притока, рассчитанная за 30 лет, при различных вариантах потепления климата.

Результаты данной работы могут быть полезны гидроэнергетикам при перспективном планировании работ по регулированию стока.

Работа выполнена в рамках темы НИР «Эволюция природной среды Арктики и Северной Пацифики в кайнозое».

Библиографический список

1. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.

2. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. т. XXIV. № 6. С. 33-44.

3. Интернет-портал ВНИИГМИ-МЦД Web Аисори-М [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/result.xhtml>, свободный.

4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер.3. Ч. 1-6. Вып. 33. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 566 с.

5. Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Крохин В.В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 15-26.

6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.

7. Север Дальнего Востока / Под ред. Н. А. Шило. М.: Наука, 1970. 487 с.

8. Ушаков М.В. Климатический отклик минимального летне-осеннего стока рек северного Приохотоморья // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Т. 5(71). № 1. 2019. С. 238-246.

9. Glotov V.E., Glotova L.P. Geocryological and hydrogeological conditions of the coalfields on the northern coast of the sea of Okhotsk // Earth`s Cryosphere. 2015, Vol. XIX, No. 1. pp. 3-10.

10. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116. P. 770-808.

11. Lobanov S. A., Ushakov M.V. The river water resources of the Magadan region and their long-term variability // Geography and natural resources, 2008, Vol. 29. No 3. pp. 247-250.

12. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A. and Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost, The Cryosphere, 13, 2019, 1635–1659.

13. Ushakov M.V., Ukhov N.V. Modern Changes in the Thermal Regime of Mountain Rivers in the Permafrost Zone (A Case Study for the Upper Kolyma) Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. No. 12, pp. 858-863.

А.А. Шайдулина, А.Д. Сулимов adelinash89@mail.ru
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПОЛУРУСЛОВОГО УЧАСТКА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ HEC-RAS

Проведен расчет скоростей течения по г/п Кама-Тюлькино в программном комплексе HEC-RAS. Верификация результатов моделирования выполнена по измеренным данным, размещенным в гидрологических ежегодниках. Для сравнения величины измеренных и смоделированных скоростей течения проведён анализ ошибки их расхождения на даты измерения. Выявлено, что расчетные и фактические значения скоростей течения хорошо согласуются между собой, а погрешность моделирования составляет в среднем 16%.

Ключевые слова: скоростной режим, моделирование, HEC-RAS.

A.A. Shaydulina, A.D. Sulimov adelinash89@mail.ru
Perm State University, Perm, Russia

RELIABILITY EVALUATION OF SIMULATION OF THE VELOCITY MODE OF THE HALF-COURSE SECTION OF THE KAMA RESERVOIR IN THE HEC-RAS SOFTWARE COMPLEX

Calculation of flow velocities along the Kama-Tyulkino was carried out in the HEC-RAS software package. Verification of the modeling results was carried out on the basis of measured data published in hydrological yearbooks. To compare the values of the measured and simulated current velocities, an analysis of the error of their discrepancy on the measurement dates was carried out. It was found that the calculated and actual values of the flow velocities are in good agreement with each other, and the modeling error is on average 16%.

Keywords: speed mode, simulation, HEC-RAS.

Введение

Вопросами изучения скоростного режима, распределением скоростей течения в пространстве и во времени занимались многие авторы [1; 3-4; 6-9]. Скорости течения в водных объектах целесообразно оценивать по данным фактических измерений, с учетом изменения в режиме их использования. Обычно за год подобные измерения проводят порядка 30-40 раз. В последние десятилетия XX в. – начале XXI в. все большее распространение получили математические модели, способные имитировать и прогнозировать характеристики гидрологического режима, например программный комплекс HEC-RAS с открытым кодом доступа. Он позволяет получать ежедневные значения исследуемой величины.

Целью настоящей работы является оценка достоверности моделирования скоростного режима на участке Камского водохранилища от г/п Кама-Керчевский до г/п Кама-Тюлькино в программном комплексе НЕС-RAS.

Материалы и методы исследования

Для проведения расчетов скоростного режима в программном комплексе НЕС-RAS на участке между двумя гидрологическими постами (г/п) необходим следующий набор исходных данных: расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) во входном г/п; уровни воды на замыкающем г/п; цифровая модель рельефа (ЦМР). Такими постами в работе выступают г/п Кама-Керчевский и г/п Кама-Тюлькино (рис. 1). На исследуемом участке в Камское водохранилище впадает р. Вишера, среднегодовой расход воды которой больше, чем на г/п Кама-Керчевский. Так, для г/п Вишера-Рябинино его величина составляет $470 \text{ м}^3/\text{с}$, а для г/п Кама-Тюлькино – $875 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. Поэтому также необходим учет расхода воды, поступающей с р. Вишеры. Расчеты проведены на примере среднего по водности 1966 г.

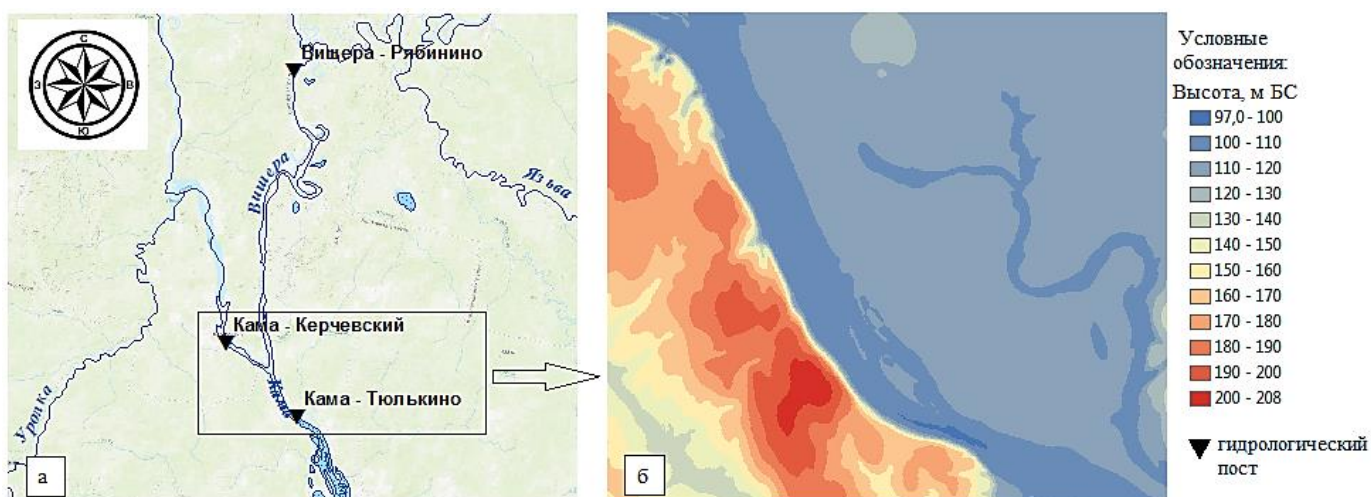


Рис. 1. Положение исследуемого участка от г/п Кама-Керчевский до г/п Кама-Тюлькино (а) и цифровая модель рельефа территории (б)

Анализ результатов

В 1966 г. [2] скорости течения на г/п Кама-Тюлькино измерялись 45 раз. Их внутригодовое распределение представлено на рис. 2а.

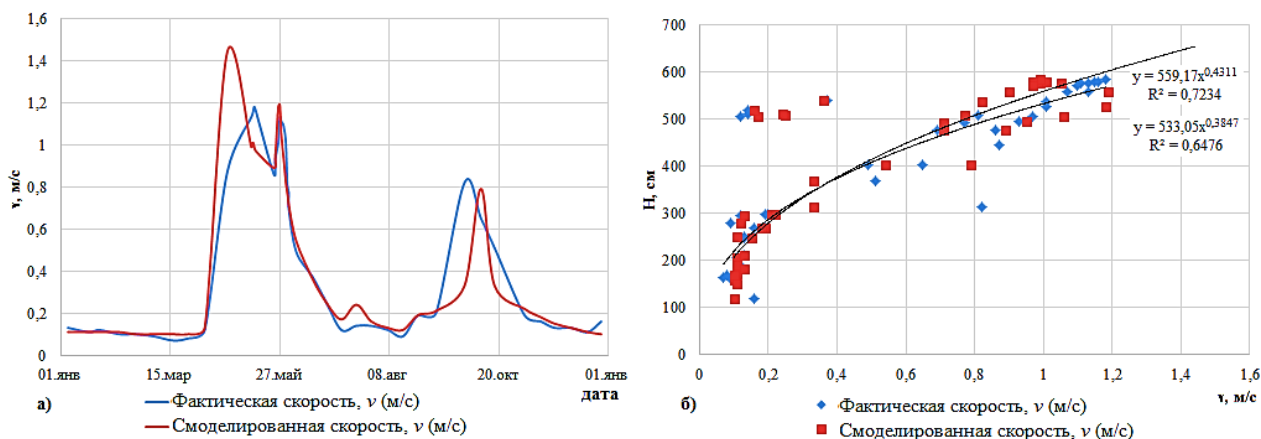


Рис. 2. Изменение фактической и смоделированной скорости течения в течение года (а) и их связь с уровнем воды (б) на г/п Кама-Тюлькино за 1966 г.

Увеличение скоростей течения связано с весенним половодьем и летне-осенними паводками, а снижение приходится на периоды летней и зимней межени. Так, максимальная скорость наблюдалась 10 мая (1,18 м/с), а минимальная – 17 марта (0,07 м/с). Программный комплекс HEC-RAS позволяет получить ежедневные среднесуточные скорости течения. Однако для корректного сопоставления результатов графики внутригодового изменения фактических и смоделированных скоростей течения построены на даты фактических измерений, по 45 точкам (рис. 2а). Коэффициент парной линейной корреляции между модельными и фактическими значениями скоростей течения составил 0,94. Также построены графики связи фактической и смоделированной скорости течения с уровнем воды (рис. 2б).

Для сравнения величины измеренных и смоделированных скоростей течения проведён анализ ошибки их расхождения на даты измерения:

$$\delta = \frac{|\bar{v}_m - \bar{v}_f|}{\bar{v}_f} 100\%,$$

где \bar{v}_m – среднее модельное значение, \bar{v}_f – среднее фактическое значение.

Анализ показал, что средняя ошибка моделирования скоростей течения составила 16%; максимальная ошибка (71%) наблюдалась в летний период (17.07.1966), что в абсолютных величинах составило 0,1 м/с. Наибольшие расхождения между измеренными и смоделированными скоростями пришлись на период весеннего наполнения (22.04.1966) и абсолютное расхождение составило 0,57 м/с. При этом более чем в 40% измерений (20 из 45) ошибка составляла менее 10%, а в отдельных случаях 0%.

Выводы

1. В результате выполненных расчетов ежедневных среднесуточных скоростей течения с применением программного комплекса HEC-RAS по г/п Кама-

Тюлькино за средний по водности 1966 г выявлена высокая согласованность модельных и фактических значений, коэффициент парной линейной корреляции между ними составил 0,94.

2. Величина ошибки моделирования скоростей течения составила в среднем 16%, а более чем в 40% измерений – менее 10%.

Библиографический список

1. Гидрологический режим камского водохранилища (по материалам XX и начала XXI столетия): монография / под. ред. А. Б. Китаева. Пермь. 2020. 463 с.

2. Гидрологический ежегодник 1966 г. Т. 4. Вып. 5-7. Бассейн Каспийского моря без Кавказа и Средней Азии. Бассейн р. Камы. Свердловск: Уральское территориальное управление по гидрометеорологической службы. 1968.

3. *Гырдымов Д.А., Шайдулина А.А.* Моделирование изменений поля скоростей течения в районе переменного подпора камского водохранилища в разные фазы водного режима // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. 2019. Т. 1. С. 119-124.

4. *Китаев А.Б., Клименко Д.Е., Ларченко О.В.* Скоростной режим района переменного подпора Камского водохранилища и его возможные изменения в связи с созданием хозяйственного объекта // Географический вестник = Geographicalbulletin. 2010. С. 52-62.

5. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 11 (средний Урал и Предуралье), Л.: Гидрометеиздат. 1973, 565 с.

6. *Понаморёв В.И., Снегирёв Э.А., Пономорёв Л.И.* Режим больших водохранилищ // Ресурсы поверхностных вод СССР (Средний Урал и Приуралье). Л.: Гидрометеиздат. 1973. Т.2 С. 476-548.

7. *Урлапов Г.А.* К вопросу гидравлики водохранилищ // Метеорология и гидрология. 1975. №9. С. 68-78.

8. *Шайдулина А.А., Двинских С.А.* Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник = Geographicalbulletin. 2017. №3(42). С. 61-70. doi 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70

9. *Шлычков В.А.* Расчет пространственной структуры течений в водоемах сложной морфометрии (на примере камского водохранилища) // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озёр и водохранилищ. Иркутск. 2009. С. 109-115.

М.В. Шмакова, m-shmakova@yandex.ru

Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

РУСЛОВАЯ И БАСЕЙНОВАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ СТОКА НАНОСОВ

Разработана модель руслового и бассейнового компонентов твердого стока. Модель позволяет оценить интенсивность перераспределения речных наносов и донных отложений в речном русле. При этом в модели рассчитываются профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами, распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц, масса частиц русловой и бассейновой составляющей стока наносов и доля вклада бассейновой компоненты.

Ключевые слова: почвенная эрозия, математическая модель, расход наносов, водосбор, река, русло, гранулометрия

M.V. Shmakova, m-shmakova@yandex.ru

Institute of Limnology RAS, St. Petersburg, Russia

CHANNEL AND BASIN COMPONENTS OF SEDIMENT RUNOFF

A model of channel and basin components of solid runoff has been developed. The model allows us to estimate the intensity of redistribution of river sediments and bottom sediments in the riverbed. At the same time, the model calculates the profile of changes in the bottom marks between the two calculated channels, the distribution of the size of the particles deposited or set in motion, the particle mass of the channel and basin components of sediment runoff and the share of the contribution of the basin component.

Keywords: soil erosion, mathematical model, sediment flow, catchment, river, riverbed, granulometry

Введение

Основными факторами, определяющими поступление продуктов почвенной эрозии в речную сеть, являются физико-географическая расположенность речного бассейна, типы его подстилающей поверхности, антропогенная нагрузка и пространственное расположение наиболее эрозионно активных частей водосбора, на которых формируется основная масса наносов, поступающих в русло водотока [7]. Вклад русловой и бассейновой составляющей в твердом стоке рек обусловлен, прежде всего, гранулометрическим составом почво-грунтов, донных отложений и транспортируемых из верхнего створа наносов. При этом, в естественных условиях как правило вклад русловой составляющей увеличивается по длине реки [7]. Морфометрические и гидравлические характеристики водотока определяют распределение твердого вещества, находящегося в теле речного потока в соответствии с его транспортирующим потенциалом.

Обзор существующих методов и моделей

Вклад бассейновой и русловой составляющих в общий сток наносов весьма изменчив в своем внутригодовом распределении, зависит от водности года и от интенсивности и характера антропогенной нагрузки на водосборе и русле реки. В зависимости от фазы водности (летняя и зимняя межень, половодье и паводки) меняется транспортирующий потенциал речного потока, его способность переносить твердое вещество. При этом с увеличением водности в период, например, паводка, возрастание транспортирующего потенциала потока сопровождается интенсивным поступлением продуктов почвенной эрозии с поверхности водосбора. Все это определяет процессы аккумулятивно-эрозионной деятельности речного потока по отношению к руслу как крайне неоднозначную. Разделение твердого стока на русловую и бассейновую составляющую возможно сопоставлением минералогического, гранулометрического, геохимического состава почвообразующих грунтов речного бассейна и руслообразующих грунтов, а также радиоизотопным методом [2; 10], оценкой магнитных свойств минералов [8; 9; 11; 12], и методами математического моделирования процессов почвенной эрозии и двухфазного массопереноса в русле. Также для решения этой задачи может быть использован гидрологический подход [1; 3-6].

Выделение бассейновой доли в общем составе наносов по минералогическому и гранулометрическому составу возможно лишь при условии того, что русловые наносы по этим характеристикам принципиально отличаются от почвообразующих грунтов на водосборе. В случае относительно однородного состава руслового и бассейнового грунта для антропогенно освоенных водосборов хороший результат в оценке вклада исследуемых компонентов даст сопоставление химического состава грунта.

Модель компонентов твердого стока

В основе оценки вклада русловой и бассейновой составляющих в твердом стоке реки лежат гранулометрические кривые водосборных почво-грунтов, донных отложений и наносов, транспортируемых из верхнего створа. Если транспортирующий потенциал речного потока, то есть масса твердого вещества, которая может быть перенесена этим потоком с заданными гидравлическими переменными состояниями потока, больше поступившей в данный расчетный створ массы твердого вещества, то имеет место размыв дна. Иначе – намыв, или отложение. Изменение отметок дна происходит на площади русла реки, которая задействована скоростью осаждения транспортируемых частиц в соответствии с их крупностью. При этом, формируется продольный профиль изменения отметок дна расчетного участка русла для заданного временного масштаба и меняется кривая гранулометрического состава наносов. Для непрерывной оценки этих показателей каждый расчетный участок реки должен быть обеспечен данными о поступлении продуктов почвенной эрозии с территории его частного водосбора.

Запишем выражение для оценки массы осаждаемой частицы $m_{p,\%}$ в расчетном створе, расположенном от исходного на расстоянии l , м в общем виде

$$m_{p,\%} = f(l, h', p). \quad (1)$$

Масса наносов для фракций заданной крупности $m_{p,\%}$, осажденных на протяжении всего расстояния L будет равна

$$M' = \int_0^L \int_0^1 f(l, h', p) dp dl, \quad (2)$$

где M' – масса всех частиц, которые в соответствии со своей крупностью $m_{p,\% \min}$ могут быть осажжены в точке, расположенной на расстоянии L от верхнего створа, кг/с; L – расстояние между расчетными створами, м; p – обеспеченность крупности наносов, б/р.

Величина M' охватывает весь диапазон крупности, который задействован в процессе осаждения на протяжении всего пути следования частиц между двумя расчетными створами. Исходя из гипотезы последовательного осаждения частиц в соответствии с их крупностью, частицы с наименьшей массой, осажденные в пределах двух расчетных створов, будут лимитированы в своем количестве обеспеченностью согласно кривой распределения гранулометрической крупности. Таким образом, величина M' может быть больше, чем разность транспортирующего потенциала ΔG , поскольку для обозначенного пути осаждения используется вся масса фракций наименьшей крупности $m_{p,\% \min}$. Однако с учетом допущения о последовательном осаждении частиц по убыванию их крупности, частицы грунта с наименьшей крупностью осаждаются не в полном объеме и их часть продолжает транспортироваться потоком далее. Эта часть представляет собой разность

$$\Delta M' = M' - \Delta G. \quad (3)$$

Профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами формируется за счет последовательного осаждения или взмыва частиц грунта в соответствии с распределением их крупности. Тогда зависимость изменения отметок дна ΔH , м от расстояния от верхнего створа l , м будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta H(l_{p,\%})|_{l_{p,\%} < L} = \frac{\varphi}{F \rho_s} \Delta G \cdot p(m_{p,\%}), \\ \Delta H(L) = \frac{\varphi}{F \rho_s} [\Delta G \cdot p_1(m_{p,\% \min}) - \Delta M'], \end{cases} \quad (4)$$

где ρ_s – плотность грунта, кг/м³; φ – плотность залегания грунта на момент осаждения, не уплотненное залегание, б/р; F – площадь осаждения, м², которая рассчитывается как произведение ширины русла B , м и расстояния, которое пройдет частица со скоростью v_s за время Δt .

Изменение кривой распределения крупности частиц $p_3(m)$ в очередном расчетном створе рассчитывается как средневзвешенная по массе разность или сумма кривых распределения крупности частиц верхнего створа $p_1(m)$ и распределения крупности осевших или пришедших в движение частиц $p_2(m)$ соответственно

$$p_3(m) = \frac{G_1 p_1(m) \pm \Delta G p_2(m)}{G_1 \pm \Delta G}. \quad (5)$$

где G_1 – расход наносов расчетного створа, кг/с.

При этом, распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц определяется как

$$\begin{cases} p_2(m)|_{m_{p\%} < m_{p\% \min}} = 0, \\ p_2(m)|_{m_{p\%} = m_{p\% \min}} = p_1(m_{p\% \min}) \frac{G_1}{\Delta G} \left(1 - \frac{\Delta M}{p_1(m_{p\% \min}) G_1} \right), \\ p_2(m)|_{m_{p\%} > m_{p\% \min}} = p_1(m) \frac{G_1}{\Delta G}. \end{cases} \quad (6)$$

Учет доли в составе наносов частиц определенного размера позволяет получить кривую распределения гранулометрического состава наносов, поступивших в следующий расчетный створ и дать оценку вклада частиц определенной крупности в формирование русла, что определяет возможность выделения вклада русловой и бассейновой составляющей в твердом стоке.

Вполне понятно, что оценить долю бассейновой составляющей в общем стоке наносов возможно лишь при принципиальном различии в гранулометрическом составе руслоформирующих и почвообразующих грунтов. При допущении о том, что почвообразующие грунты имеют меньшую крупность, обозначим максимальную массу отдельной частицы в их составе как $m_{s \max}$ и распишем кривую распределения гранулометрического состава наносов в первом расчетном створе в виде двух частей

$$p_1(m) = p_1(m)|_{m \leq m_{s \max}} + p_1(m)|_{m > m_{s \max}}. \quad (7)$$

Тогда массы частиц русловой M_{riv} , кг/с и бассейновой M_{bas} , кг/с частей будут равны

$$\begin{aligned} M_{riv} &= \int_{p < p_1(m_{s \min})}^1 f(l, h', p) dp, \\ M_{bas} &= \int_0^{p_1(m_{s \min})} f(l, h', p) dp, \\ G_1 &= M_{riv} + M_{bas}. \end{aligned} \quad (8)$$

Доля вклада бассейновой компоненты $D_{M_{bas}}$, б/р рассчитывается как отношение

$$D_{M_{bas}} = \frac{\int_0^{p_1(m_{s \min})} f(l, h', p) dp}{G_1}. \quad (9)$$

Аналогичным образом строятся алгоритмы и для всех последующих створов с учетом изменившейся кривой распределения гранулометрического состава наносов.

Выводы

В основе модели компонентов твердого стока водотоков лежит оценка транспортирующего потенциала водотока и динамика кривых гранулометрического состава донных отложений, продуктов почвенной и русловой эрозии. В зависимости от гидравлических условий на всем протяжении водотока меняется и его транспортирующий потенциал. Последнее приводит к инициации эрозионно-аккумулятивных процессов, или, другими словами, перераспределению твердого вещества в речном русле. Поступающие на всем протяжении русла продукты почвенного смыва с водосборной территории оказывают непосредственное влияние на динамику перераспределения твердого стока и донных отложений. Мо-

дель позволяет оценить профиль изменения отметок дна между двумя расчетными створами (формируется за счет последовательного осаждения или взмыва частиц грунта в соответствии с распределением их крупности); распределение крупности осажденных или пришедших в движение частиц; массу частиц русловой и бассейновой составляющей стока наносов; долю вклада бассейновой компоненты. При этом, расчет динамики кривых распределения гранулометрического состава строится на принципиальном различии в гранулометрическом составе руслоформирующих и почвообразующих грунтов. При схожей крупности последних возможна лишь оценка профиля изменения отметок дна и изменения состава общей гранулометрической кривой транспортируемых речных наносов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме FFZF-2024-0001.

Библиографический список

1. *Бобровицкая Н.Н.* Зависимость среднего многолетнего стока взвешенных наносов рек ЕТС от физико-географических факторов // Тр. ГГИ. Вып. 191. 1974. С. 68–84.
2. *Голосов В.Н.* Использование радиоизотопов при исследовании эрозионно-аккумулятивных процессов // Геоморфология. 2000. № 2. С. 26–33.
3. *Гусаров А.В.* Оценка русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах // Геоморфология. № 2. 2013. С. 23–38.
4. *Дедков А.П., Мозжерин В.И.* Общая оценка интенсивности эрозии по стоку взвешенных наносов // Климатическая геоморфология денудационных равнин. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1977. 224 с.
5. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. М.: Географгиз, 1952. 166 с.
6. *Поляков В.Б.* Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 480 с.
7. Эрозионно-русловые системы: монография / Под науч. ред. Р.С. Чалова, А.Ю. Сидорчука, В.Н. Голосова. М.: ИНФРА-М, 2017. 697 с.
8. *Foster I.D.L., Grew R., Dearing J.A.* Magnitude and frequency of sediment transport in agricultural catchments: a paired lake-catchment study in Midland England // Soil Erosion on Agricultural Lands. Chichester: Willey, 1990. P. 153–171.
9. *Oldfield F., Rummery T.A., Thompson R., Walling D.E.* Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results // Water resources research. 1979. № 15. P. 211–218.
10. *Peart M.R.* Using sediment properties as natural tracers for sediment source: two case studies from Hong Kong // Tracers in Hydrology / Proc. of the Yokohama Int. Symp. (July, 1993). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 215, 1993. P. 313–318.
11. *Slattery M.C., Burt T.P., Walden J.* The application of mineral magnetic measurements to quantify within-storm variations in suspended sediment sources // Tracers Technologies for Hydrological Systems / Proc. of Boulder Int. Symp. (July, 1995). Wallingford (UK): IAHS Press. IAHS Publ. 229, 1995. P. 143–151.
12. *Stott A.P.* Sediment tracing in a reservoir catchment system using a magnetic mixing model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1986. № 42. P. 105–112.

А.Н. Шихов, Е.В. Пищальникова, Н.А. Калинин
shikhovan@gmail.com

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В БАССЕЙНЕ КАМЫ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ И РЕАНАЛИЗА В 2019–2023 ГГ.

Рассматриваются результаты расчетов снегонакопления в бассейне р. Камы за пять зимних сезонов (2019-2023 гг.) на основе выходных данных моделей численного прогноза погоды (ЧПП) ICON и GFS и данных сети метеостанций. Валидация результатов расчета снеготопливных запасов перед началом таяния выполнена по данным снегомерных съемок на 35 маршрутах. Результаты также сопоставлены с расчетными снеготопливными запасами согласно данным реанализа ERA5. Наибольшую точность расчета снеготопливных запасов обеспечивает использование данных модели ЧПП ICON в качестве входной информации об осадках. Во всех случаях, за исключением 2019 г., минимальная величина среднеквадратичной ошибки составила менее 20%, что указывает на удовлетворительную точность расчета. Точность оценки снеготопливных запасов по данным реанализа ERA5 оказалась ниже, чем при расчете с использованием данных модели ICON.

Ключевые слова: бассейн р. Камы, снежный покров, запас воды в снежном покрове, глобальные модели численного прогноза погоды, реанализ

A.N. Shikhov, E.V. Pischalnikova, N.A. Kalinin, shikhovan@gmail.com

Perm State University, Perm, Russia

CALCULATION OF MAXIMUM SNOW ACCUMULATION IN THE KAMA RIVER BASIN ACCORDING TO THE DATA OF GLOBAL NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODELS AND REANALYSIS FOR 2019–2023

In this study, we consider the results of calculations of the snow water equivalent (SWE) in the Kama river basin for five winter seasons (2019-2023) based on the outputs of ICON and GFS numerical weather prediction (NWP) models and the data from weather stations. Validation of the results of SWE calculation before the start of snowmelt was carried out according to the data of snow surveys on 35 routes. The results are also compared with the estimated SWE from the ERA5 reanalysis. The most accurate calculation of SWE is provided by the use of ICON NWP model data as input information on precipitation. In all cases, except for 2019, the minimum value of the mean square error was less than 20%, which indicates a satisfactory accuracy of the calculation. The accuracy of SWE estimates based on ERA5 reanalysis is lower than using the ICON model data.

Key words: Kama river basin, spring flood, snow cover, simulation, global atmospheric models, online web map service

Расчет максимального запаса воды в снеге (снеготопливных запасов), накопленного к началу периода снеготаяния, является необходимым этапом среднесрочного и долгосрочного прогноза весеннего половодья. Традиционно снегонакопление в бассейнах рек оценивается на основе снегомерных съемок. Снегомерные съемки регулярно (каждые 5 или 10 сут) проводятся на сети метеостанций Росгидромета.

Однако сеть снегомерных съемок отличается пространственной неравномерностью, в труднодоступной и горной местности измерения почти не проводятся. Частота проведения снеговосъемок также недостаточна для ряда практических приложений [6-7].

В настоящее время для расчетов снегонакопления часто используются математические модели снежного покрова различной сложности. Они применяются в качестве блоков в распределенных моделях формирования речного стока ECOMAG [4], Гидрограф [1], или в моделях поверхности суши [2]. Схемы параметризации снежного покрова также необходимы для описания подстилающей поверхности в глобальных и региональных моделях численного прогноза погоды (ЧПП) [6-7]. Данные об осадках для моделирования могут быть получены как с сети метеостанций, так и по моделям ЧПП. Если в бассейнах равнинных рек снегонакопление весьма успешно воспроизводится на основе данных метеостанций [4; 8], то для горной местности предпочтительнее использовать прогнозы осадков по моделям ЧПП [3; 10-11]. Также применяются различные комбинированные подходы, к числу которых относится разработанная в Гидрометцентре России технология расчета снегонакопления SnoWE [7].

С 2018 г. выполняются расчеты снегонакопления на основе данных глобальных моделей ЧПП для бассейна р. Камы [5; 12]. В результате был накоплен архив результатов расчетов за пять лет, существенно различающихся по условиям снегонакопления и снеготаяния на водосборе. В настоящей работе оценивается точность расчетов запасов воды в снеге на основе прогнозов осадков по моделям ЧПП ICON (Германия) и GFS/NCEP (США) в северо-восточной части бассейна Камы на основе сопоставления с материалами снегомерных съемок на метеостанциях Пермского ЦГМС. Также выполнено сопоставление полученных оценок с данными реанализа ERA5-Land с пространственным разрешением 9 км [9].

Общая схема методики расчета снегонакопления и снеготаяния показана на рисунке, а ее описание приведено в работах [5; 12].



Общая схема методики расчета запасов воды в снежном покрове

Расчет основан на комбинировании выходных данных моделей ЧПП ICON и GFS/NCEP с данными наблюдений на метеостанциях. Выходные данные моделей ЧПП загружаются в режиме реального времени с серверов национальных метеослужб. Для получения данных моделей и их конвертации в формат Geotiff разработаны скрипты на языке Python. Выходные данные моделей имеют пространственное разрешение от 13 до 25 км, однако расчет снегонакопления производится с более высоким пространственным разрешением – 3 км, так как при расчетах также проводится коррекция по цифровой модели рельефа (ЦМР).

Оценка достоверности результатов расчета снегозапасов выполнена на основе их сравнения с материалами снегомерных съемок на 35 снегомерных маршрутах (17 лесных и 18 полевых), полученных в период перед началом снеготаяния. Результаты сопоставления приведены в таблице. За 2023 г. данные снегомерных съемок на момент начала снеготаяния не получены, поэтому использовались последние доступные данные за 28.02.2023 г. Также за 2021 г. не были получены данные модели GFS, а за 2023 г. – данные реанализа ERA5. Помимо результатов расчетов снегозапасов, полученных на основе разных источников данных об осадках (модели ЧПП ICON, GFS и данные сети метеостанций), оценивались также результаты их осреднения (за исключением 2021 г., когда данные модели GFS не были получены).

Сопоставление результатов расчета запаса воды в снеге на момент начала снеготаяния с данными маршрутных снегомерных съемок в 2019-2023 гг. Выделены минимальные значения среднеквадратичной ошибки RMSE

Дата снего-съемки	Средний запас воды в снеге по маршрутам, факт/расчет, мм						Среднеквадратичная ошибка (RMSE) результатов расчета, % от фактического снегозапаса				
	факт	ICON	GFS	метеостанции	среднее*	ERA5	ICON	GFS	метеостанции	среднее	ERA5
31.03.2019	141	158	181	158	166	201	38	55	45	44	50
29.02.2020	178	184	200	176	188	211	18	22	16	16	24
25.03.2021	155	168	-	145	-	165	22	-	16	-	21
31.03.2022	196	200	237	197	211	211	18	31	19	19	21
28.02.2023	136	134	147	128	137	-	19	25	21	19	-

*Среднее по данным моделей ЧПП ICON, GFS и сети метеостанций

Выводы

Как следует из таблицы, наибольшую точность расчета снегозапасов обеспечивает использование данных модели ЧПП ICON в качестве входной информации об осадках. Во всех случаях, за исключением 2019 г., минимальная величина среднеквадратичной ошибки составила менее 20%, что сопоставимо с ранее опубликованными результатами [3; 5; 11-12], и указывает на удовлетворительную точность расчета. Второй важный вывод состоит в том, что точность оценки снегозапасов по данным реанализа ERA5 оказалась ниже, чем точность расчета

с использованием данных моделей ЧПП. При этом реанализ систематически завышает снегозапасы на 5–15%, такое же завышение отмечается и при расчете по модели GFS. При расчете по данным метеостанций есть тенденция занижения снегозапаса. Осреднение результатов, полученных по трем источникам данных об осадках, не дает существенного повышения точности расчета снегозапаса.

Зависимость величины ошибок от накопленного снегозапаса не выявлена. В многоснежные зимы (2019–2020, 2021–2022 гг.) соотношение фактических и расчетных снегозапасов оказалось примерно таким же, как в относительно малоснежные зимы 2020–2021 и 2022–2023 гг. Влияние погодных условий периода снегонакопления на точность расчета снегозапасов требует дополнительного изучения. Также остались неопределенными причины сильного превышения расчетного снегозапаса над результатами его измерений, наблюдавшегося в 2019 г.

Библиографический список

1. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 304 с.
2. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
3. *Калинин Н.А., Свиязов Е.М., Шихов А.Н.* Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF–ARW // *Метеорология и гидрология*, 2015, № 11, С. 57–68.
4. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. 296 с.
5. *Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г.* Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды // *Лёд и Снег*. 2019. №. 59(4) с. 494–508.
6. *Турков Д.В., Сократов В.С.* Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. №3. С. 369–380. doi:10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
7. *Чурюлин Е.В.* Использование спутниковой и модельной информации о снежном покрове при расчетах характеристик весеннего половодья. дисс. канд. геогр. наук. 25.00.27. М., 2019. 175 с.
8. *Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N. and Demidov V.N.* Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // *Hydrology and Earth system science*. 2010. Vol. 14(2). P. 339–350. doi: 10.5194/hess-14-339-2010.
9. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.* ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*, 2021. V. 13(9). P. 4349–4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021.

10. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M. & Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric-resolution meteorological forecasts // *The Cryosphere*. 2016. Vol. 10. P. 1571–1589. doi: 10.5194/tc-10-1571-2016.

11. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // *Journal of Geographical Sciences*, 2018. Vol. 28(2), P. 221–237. doi: 10.1007/s11442-018-1469-x.

12. Shikhov A.N., Churiulin E.V., Abdullin R.K. Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin) // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2021. V. 66(1). Doi:10.21638/SPBU07.2021.110

УДК 551.4.042; 551.435.47

В.А. Юдина, С.С. Черноморец, Е.А. Савернюк, И.В. Крыленко, В.М. Кидяева,
viktoriiakurovskaia@gmail.com

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОРЫВА ЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА

В работе рассматривалось моделирование возможного прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее. Площадь акватории данного озера непрерывно растет. С 1980 по 2022 г. площадь акватории озера увеличилась на 137%. По результатам обследования долины в 2018 г. объем озера составил 1,94 млн м³. Для оценки максимального расхода паводка применялась программа FLOVI, включающая в себя уравнения модели прорыва озера. По результатам моделирования выявлено, что начальная температура воды в озере является наиболее чувствительным параметром модели. Максимальный расход прорывного паводка при температуре воды, равной 4°C, окажется на 41 % выше, чем для 0°C, и составит 1098 м³/с. Также в интервале от 0 до 4°C расход прорывного паводка будет увеличиваться примерно на 4,4 % на каждые 0,5 °C.

Ключевые слова: ледниковое озеро, Памир, FLOVI.

V.A. Iudina, S.S. Chernomorets, E.A. Savernyuk, I.V. Krylenko, V.M. Kidyaeva,
viktoriiakurovskaia@gmail.com

Lomonosov Moscow State University, Moscow

MODELING THE GLACIAL LAKE OUTBURST

The work considered the modeling of a possible outburst flood on the example of the glacial lake Varshezkul Nizhneye. The water area of this lake is constantly growing. From 1980 to 2022, the

water area of the lake increased by 137%. According to the results of the survey of the valley in 2018, the volume of the lake was 1.94 million m³. To estimate the maximum flood discharge, the FLOVI program was used, which includes the equations of the lake outburst model. According to the simulation results, it was found that the initial water temperature in the lake is the most sensitive parameter of the model. The maximum discharge of an outburst flood at a water temperature of 4 °C will be 41% higher than for 0 °C and will be 1098 m³/s. Also, in the range from 0 to 4 °C, the outburst flood discharge will increase by approximately 4.4% for every 0.5 °C.

Keywords: glacial lake, Pamir, FLOVI.

Введение

Ледниковые озера являются одними из самых распространённых в мире и составляют около 50% от общего числа озёр [5]. В условиях изменения климата наблюдается активное отступление ледников, которое, в свою очередь, ведет к образованию от сотен до тысячи ледниковых озёр по всему миру [12-14].

Согласно [11] площадь моренных озёр на Памире с 2008 г. по 2017 г. увеличилась на 10%. Средняя площадь ледниковых озёр составляет 0,19 км² и выше, чем центральные Гималаи (0,15 км²), восточные Гималаи (0,12 км²), юго-восток Тибетского нагорья (0,11 км²) и Перуанские Анды (0,10 км²) [15]. Целью данной работы является оценка характеристик возможного прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее, расположенного на территории Памира.

Объект исследования

В верховьях р.Варшездара расположены два ледниковых озера Варшезкуль Верхнее и исследуемое в данной работе Варшезекуль Нижнее. Река является левым притоком Гунта и впадает в него на 102 км выше устья. Длина р.Варшездара составляет 18 км, а площадь водосбора 71,7 км² [2]. Озеро Варшезкуль Верхнее находится на высоте 4788,6 м. Площадь акватории озера составляет 348 тыс. м², длина – 1000 м, характерная ширина – 300 м. Однако, запруда озера представляется достаточно надёжной. Озеро Варшезкуль Нижнее лежит в чаше, образованной мёртвыми льдами бывшего языка ледника Варшез, на абсолютной отметке 4532,5 м. Длина озера Варшезкуль Нижнее составляет 700 м, ширина в средней части 260 м, глубина достигает 20 м, объём по состоянию на 2018 г. составляет 1,94 млн м³ [3]. Современный активный язык ледника находится на южном берегу озера в 100–150 м от уреза воды. С запада и востока берега озера образуют высокие, по 15–25 м гряды мёртвых льдов, покрытые рыхлообломочным плащом и круто обрывающиеся к озеру. Северный берег и запруды озера Варшезкуль Нижнее образует конечно-моренный вал. На поверхности вала хорошо прослеживаются изогнутые полосы движения, имеются просадки с небольшими эфемерными озерами. Предположительно, большая часть вала все еще остается цельным ледовым телом, покрытым чехлом грубообломочной поверхностной морены. Поскольку озеро наледниковое, то, скорее всего, продолжится трансформация его ложа и берегов в результате таяния льдов. Так, наблюдается значительное возрастание площади акватории озера Варшезкуль Нижнее. С 1980

по 2022 гг. площадь акватории озера увеличилась на 137%. С момента обследования озера в 2018 году площадь озера в летнее время выросла на 6,4%. Все это является признаками повышенной прорывоопасности озера. Одним из вариантов развития прорывного паводка эта возможность образования канала стока в гряде мертвых льдов.

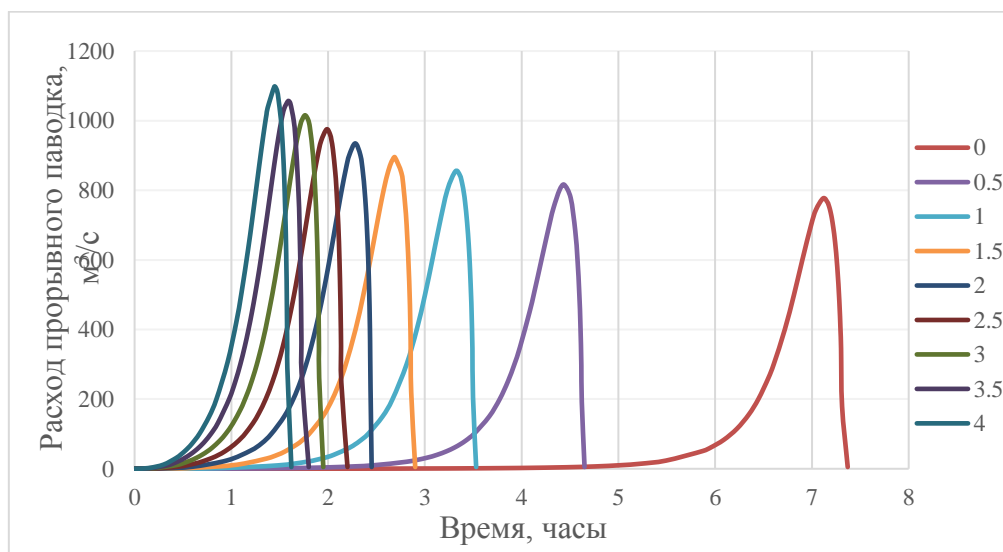
Материалы и методы исследования

В данной работе применялась программа FLOVI [9], а именно первый блок, в котором используются уравнения модели прорыва озера с ледяной плотиной [1]. В основе модели лежит предположение, что тепла, выделяемого за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и особенно диссипации энергии водного потока, достаточно для выработки за относительно короткий промежуток времени туннеля, способного обеспечить катастрофических сброс воды из озера [1]. Согласно геоморфологическому обследованию долины длина подледникового канала составит 650 м. Разница в отметках высот между началом и концом тоннеля определялась с использованием спутникового снимка ALOS PALASR (разрешение 12,5 м) и составила 81 м. Объем воды в озере Варщезкуль, а также морфометрические параметры чаши, были определены на основе батиметрической съемки и составили 1,94 млн м³ [Черноморец и др., 2018], 0,635 и 0,55 соответственно.

Ранее программа FLOVI уже применялась для моделирования прорывных паводков на территории Западного Памира [7-8]. Так, на примере долины р.Бодомдара, было показано, что изначальная температура воды в озере является одним из параметров модели, к которым она наиболее чувствительна [6]. В связи с этим в данной работе были проведены численные эксперименты с изменением данного параметра.

Анализ результатов

По результатам моделирование наименьший расход прорывного паводка наблюдается при начальной температуре воды, равной 0 °С и составляет 777 м³/с (рисунок). Время наступления пикового расхода при этом составляет 7,1 часа.



Гидрографы прорывного паводка при температуре воды в озере от 0 до 4 °С

При увеличении температуры воды на $0,5^{\circ}\text{C}$ пиковый расход увеличивается на 5%, а время добегаания сокращается на 2,7 часа. При дальнейшем росте температуры расход прорывного паводка будет увеличиваться примерно на 4,4 % на каждые $0,5^{\circ}\text{C}$. При увеличении температуры воды на 1°C пиковый расход будет возрастать примерно на 9%. Максимальный расход при температуре воды, равной 4°C , окажется на 41 % выше, чем для 0°C , и составит $1098 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом время добегаания уменьшится приблизительно на 6 часов. Также нужно отметить, что, начиная с температуры воды равной $2,5^{\circ}\text{C}$ и выше, разница во времени добегаания составляет в среднем 0,2 часа.

Во время обследования озера в июле 2018 г. температура поверхностного слоя воды в озере составляла приблизительно около 5°C [3]. Однако в модели прорыва озера используется именно средняя температура воды в озере, а не поверхностного слоя [1]. В данном случае наиболее вероятная температура воды в озере может находиться в интервале от $2,5$ до 4°C в зависимости от суточного хода температуры воды, а также температуры воздуха.

Выводы

В данной работе представлены результаты моделирования прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее. Расчеты проводились в программе FLOVI, при этом использовался блок уравнений модели прорыва озера, предложенные Ю.Б. Виноградовым. По результатам моделирования выявлено что, температура воды в озере является наиболее чувствительным параметром в модели. Температура воды в озере варьируется по глубине, в течение суток и в рамках сезонных изменений. Единичные измерения распределения температуры по глубине не могут дать точное значение средней температуры, при которой будет наблюдаться прорыв озера. Однако, такие измерения позволяют определить, к какому типу по термическому режиму [4] можно отнести то или иное озеро. В субполярных озерах температура поверхности воды выше 4°C наблюдается только летом в течение очень короткого промежутка времени. В полярных озерах температуры поверхности воды в озере всегда находятся в интервале от 0 до 4°C . Таким образом, рекомендуется проводить численные эксперименты с изменением температуры воды в озере от 0 и до 4°C для определения максимального возможного расхода прорывного паводка. В каждом конкретном случае следует учитывать высоту расположения озера, близость ледников, а также распределение глубин в озере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-35-90006) и темы госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова, разделы I.7(ЦИТИС 121051300175-4), I.10 (ЦИТИС 121051400038-1), ИВП РАН 0147-2019-0001 (ЦИТИС АААА-А18-118022090056-0). Авторы выражают благодарность Агентству Ага Хана по Хабитат и лично У.Р. Пирмамадову, И.И. Зикиллобекову, Ю.Х. Раимбекову за помощь и поддержку.

Библиографический список

1. *Виноградов Ю.Б.* Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 156 с.
2. *Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Том 14. Бассейны рек Средней Азии. Выпуск 3. Бассейн р. Аму-Дарьи.* Л.: Гидрометеиздат, 1967. 322 с.
3. *Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аришинова М.А., Куровская В.А.* Батиметрическая съемка озер Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. М.: Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2018. 278 с.
4. *Хатчинсон Д.Э.* Лимнология / сокр. пер. с англ. Цыцарпина Г.В., Шинкар Г.Г. / ред. и предисл. Россолимо Л.Л. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
5. *Эдельштейн, К. К.* Гидрология озер и водохранилищ: учеб. для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
6. *Юдина В.А.* Оценка характеристик селевых потоков и прорывных паводков на основе комплекса математических моделей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. М.: «Постер-М», 2022. 28 с.
7. *Юдина (Куровская) В.А., Черноморец С.С., Крыленко И.Н., Виноградова Т.А., Крыленко И.В., Савернюк Е.А., Гуломайдоров А.Г., Зикиллобеков И.И., Пирмамадов У.Р., Раимбеков Ю.Х.* Оценка возможных последствий прорывных паводков на примере долины реки Бодомдара (Таджикистан). Криосфера Земли 26, 5. 2022. С. 14–28.
8. *Юдина (Куровская) В.А.* Оценка характеристик гляциального селевого потока с использованием цепочки математических моделей. Географический вестник. 2022. №4 (63). С. 67–79.
9. *Юдина В.А., Юдин Н.Е., Виноградова Т.А.* Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока (FLOVI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022683748; приоритет от 24.10.2022; зарегистр. В Реестре программ для ЭВМ РФ 08.12.2022.
10. *Ackerman, C.T., Evans, T.A., and Brunner, G.W.* HEC-GeoRAS: Linking GIS to Hydraulic Analysis using ARC/INFO and HEC-RAS // Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographical Information Systems / In Maidment, D., and Djokic, D. (Eds.). New York: ESRI Press. 2000. P. 155–176.
11. *Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017 / Fang Chen, Meimei Zhang, Huadong Guo, Simon Allen, Jeffrey S. Kargel, Umesh K. Haritashya, and C. Scott Watson // Earth System Science Data. 2021. Vol 13, issue 2. P. 741–766.*
12. *Clague J.J.* Glacier-related outburst floods / Clague, J. J., O'Connor, J. E. // Snow and ice-related hazards, risks, and disasters / Haeberli, W., Whiteman, C. (eds.). 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 2021. P. 467–499.

13. *Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods* / Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C. [et al.] // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. P. 1195–1209.

14. *Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K. [et al.] Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990* // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 939–945.

15. *Wangchuk, S., Bolch, T. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: strengths and challenges* // *Science of Remote Sensing*. 2020. Vol. 2. 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>

УДК 556.552

М.С. Ярославцева, А.Б. Китаев kitaevab1953@gmail.com

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

ОЦЕНКА ОБМЕНА ВОД В НИЖНЕКАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

По длине Нижнекамского водохранилища в целом внутренний водообмен по модели В.А. Знаменского имеет тенденцию уменьшения величины обмена вод от с. Каракулино в плотине Нижнекамской ГЭС. Прослеживается определенная взаимосвязь с характером регулирования водохранилища. Сбросы воды на плотине Воткинской ГЭС вызывают подъемы уровня воды и соответственно приводят к увеличению водообмена.

Ключевые слова: водохранилище, зимняя сработка, весеннее наполнение, фаза летне-осенней стабилизации уровня воды, внутренний водообмен, многоводные и маловодные годы.

M.S. Yaroslavtseva, A.B. Kitaev kitaevab1953@gmail.com

Perm State University, Perm, Russia

ASSESSMENT OF EXCHANGE IN NIZHNEKAMSK RESERVOIR IN MODERN CONDITIONS

In terms of the length of the Nizhnekamsk reservoir as a whole, internal water exchange according to the model V.A. Znamensky tends to reduce the magnitude of the exchange of water from s. Karakulino in the dam of the Nizhnekamsk hydroelectric station. A certain relationship is traced with the nature of the regulation of the reservoir. Water discharges on the dam of the Votkinsk hydroelectric power station cause rise to water levels and, accordingly, lead to an increase in water exchange.

Key words: reservoir, winter work, spring filling, phase of summer-autumn stabilization of the water level, internal water exchange, many-water and low-water years.

Актуальность настоящего исследования определяется тем фактом, что соотношения между составляющими водного баланса и связанная с ними интен-

сивность обмена вод в той или иной мере определяют характер протекания гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов в любых водных объектах.

Нижнекамское водохранилище является нижней ступенью камского каскада водохранилищ. Создано оно последним в каскаде, после Камского и Воткинского. В силу этого оно подвержено наибольшему каскадному регулированию стока. Примечателен также тот факт, что оно до сих пор не наполняется до проектной отметки. Причиной такого положения являются эколого-экономические проблемы прибрежной полосы, которая используется в интересах различных субъектов государства. Из трех ступеней камского каскада исследуемое водохранилище наименее изучено.

Целью настоящего исследования является оценка обмена вод в различных частях Нижнекамского водохранилища в разные по водности годы. В качестве многоводного года использованы материалы – 2015 г., а маловодного – 2011. Оценка внутреннего водообмена в разных частях исследуемого водоема дана по методике В.А. Знаменского [1]. Обмен вод внутри искусственных водоемов, по его мнению, может быть оценен по изменению объемов отдельных частей водохранилищ:

$$D_{\Delta w} = \frac{\Delta W}{V_{\text{с}}},$$
$$\Delta W = V_{\text{к}} - V_{\text{н}},$$

где ΔW – изменение объема воды в водоеме за расчетный интервал времени (по автору – месяц), $V_{\text{к}}$ – объем воды в участке на конец месяца, $V_{\text{н}}$ – объем воды в участке на начало месяца, $V_{\text{в}}$ – средний объем воды в участке за тот же интервал времени.

Внутригодовой ход внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе с. Каракулино в 2015 г. характеризовался незначительными колебаниями – от -0,05 до 0,06. В период зимней сработки водообмен имел значения от -0,03 до 0,02. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями внутреннего водообмена, так как в этот период уровни воды в водохранилище значительно увеличились, на водосборе проходила фаза половодья. Максимальное значение в 2015 г. наблюдалось в апреле и составило 0,06. Минимальное значение отмечено в марте и составило -0,04. В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения внутреннего водообмена колебались от -0,05 до 0,03. К сожалению, установить ход показателя внутреннего водообмена в маловодном (2011) году в рассматриваемом створе не удалось ввиду недостаточности исходной информации.

Внутригодовой ход изменения внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе с. Красный Бор в рассматриваемые годы характеризуется незначительными колебаниями от -0,08 до 0,03 в 2011 г., от -0,09 до 0,15 в 2015, за исключением периода весеннего наполнения (рис. 1).

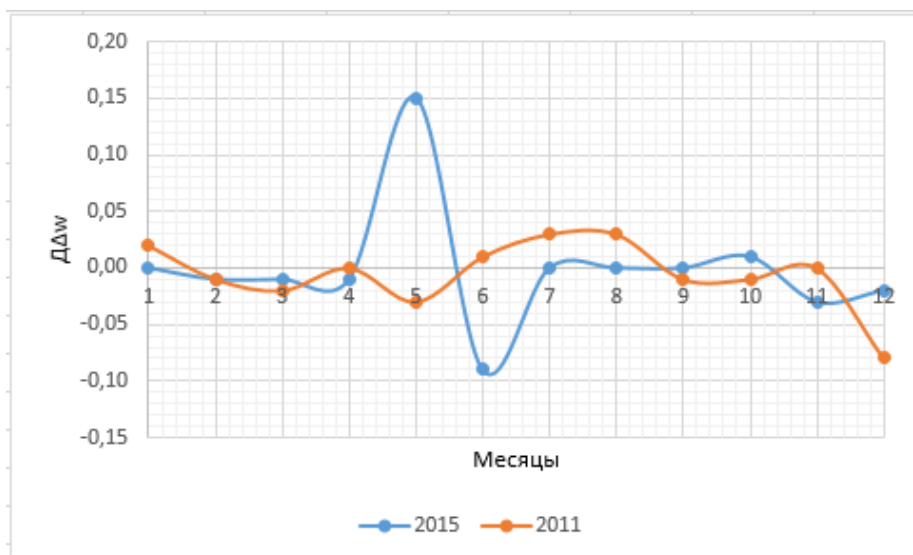


Рис. 1. Внутригодовой ход внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе с. Красный бор в 2011 и 2015 гг.

В период сработки внутренний водообмен имел значения от -0,08 до 0,02 в 2011 г., и от -0,02 до 0,00 в 2015 г. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями внутреннего водообмена, так как в этот период уровни воды значительно увеличивались, в водохранилище проходила фаза его весеннего наполнения. Максимальные и минимальные значения наблюдались в разных месяцах в разные годы. Максимальное значение в 2011 г. было в апреле – 0,00, в 2015 г. в мае – 0,15. Минимальное значение в 2011 г. наблюдалось в марте и составило -0,03, в 2015 г. оно тоже было в марте -0,01. В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения внутреннего водообмена колебались от -0,01 до 0,03 в 2011 г. и от -0,09 до 0,01 в 2015 г. Изменения внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в рассматриваемом створе в 2011 г. незначительны.

Внутригодовой ход изменения внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе с. Ижевка в 2011 и 2015 гг. характеризовалось незначительными колебаниями от -0,12 до 0,20 в 2011 г., от -0,06 до 0,12 в 2015 г., за исключением периода весеннего наполнения водоема (рис. 2). В период зимней сработки водоема внутренний водообмен имел значения от -0,08 до 0,01 в 2011 г., и от -0,06 до 0,03 в 2015 г. Период весеннего наполнения водоема характеризовался максимальными значениями внутреннего водообмена, так как в этот период уровни воды значительно увеличивались при прохождении половодья на реках водосбора. Максимальные и минимальные значения достигаются в разных месяцах в разные годы. Максимальное значение в 2011 г. в апреле 0,20, в 2015 г. в апреле 0,12. Минимальное значение в 2011 г. в марте -0,03, в 2015 г. в марте -0,06. В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения внутреннего водообмена колебались от -0,12 до 0,02 в 2011 г. и от -0,05 до 0,04 в 2015 г.

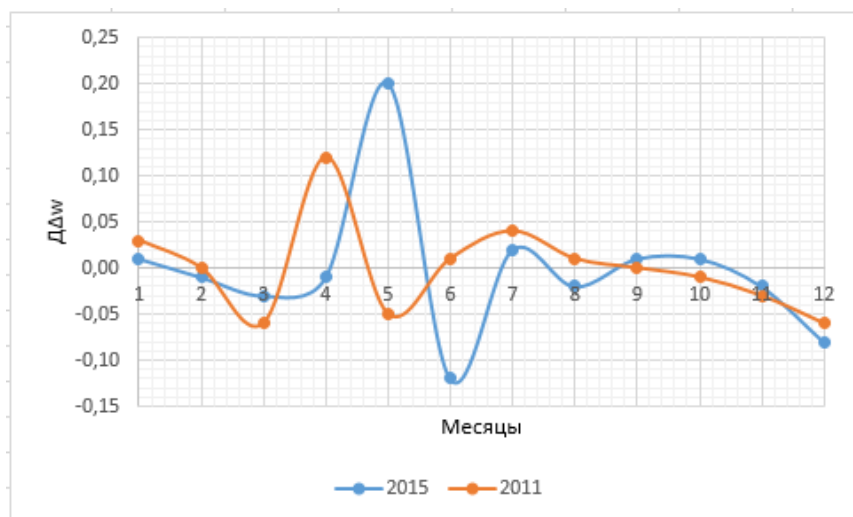


Рис. 2. Внутригодовой ход внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе с. Ижевка в 2011 и 2015 гг.

Внутригодовой ход внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе г. Менделеевск в 2011 и 2015 гг. характеризовался незначительными колебаниями от -0,14 до 0,16 в 2011 г., и от -0,08 до 0,08 в 2015, за исключением периода весеннего наполнения (рис. 3).

В период зимней сработки водоема внутренний водообмен имел значения от -0,12 до -0,00 в 2011 г., и от -0,02 до 0,01 в 2015 г. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями внутреннего водообмена, так как в этот период проходило половодье в бассейне камских водохранилищ. Максимальное значение в 2011 г. было в апреле 0,16, в 2015 г. оно наблюдалось также в апреле и составило 0,08. Минимальное значение водообмена было в 2011 г. в апреле -0,05, а в 2015 г. в марте, мае -0,04. В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения внутреннего водообмена колебались от -0,14 до 0,03 в 2011 г. и от -0,08 до 0,03 в 2015 г.

Внутригодовой ход изменения внутреннего водообмена водохранилища в створе г. Набережные Челны в 2011 и 2015 гг. характеризовался незначительными колебаниями от -0,08 до 0,14 в 2011 г., и от -0,07 до 0,05 в 2015, за исключением периода весеннего наполнения (рис. 4).

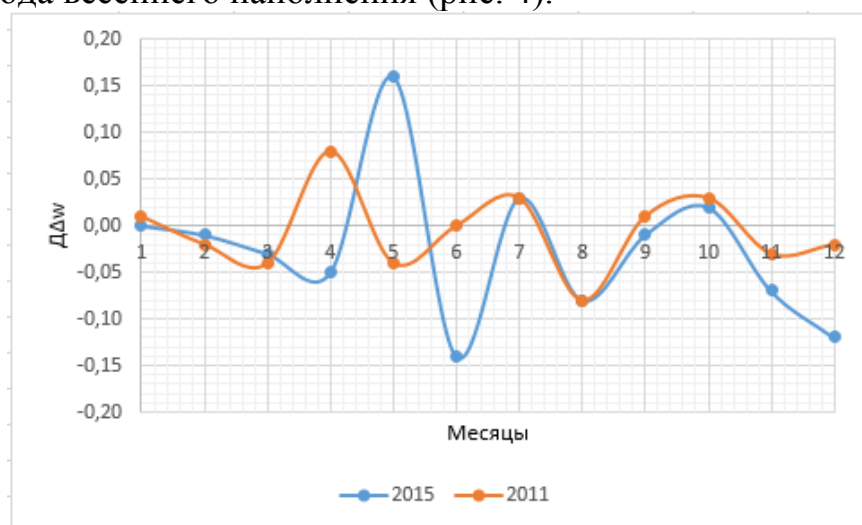


Рис. 3. Внутригодовой ход внутреннего водообмена Нижнекамского водохранилища в створе г. Менделеевск в 2011 и 2015 гг.

В период зимней сработки водохранилища внутренний водообмен имел значения от -0,04 до 0,00 в 2011 г., и от -0,01 в 2015 г. Период весеннего наполнения характеризовался максимальными значениями внутреннего водообмена. В 2015 г. максимум обмена вод отмечался в мае и составил 0,14. В 2011 г. максимум сдвинулся и в июне составил 0,00. Минимальное значение в 2011 г. в марте -0,04, в 2015 г. оно отмечалось в марте и составило -0,07. В период летне-осенней стабилизации уровня воды в водоеме значения внутреннего водообмена колебались от -0,08 до 0,02 в 2011 г. и от 0,00 до 0,04 в 2015 г.

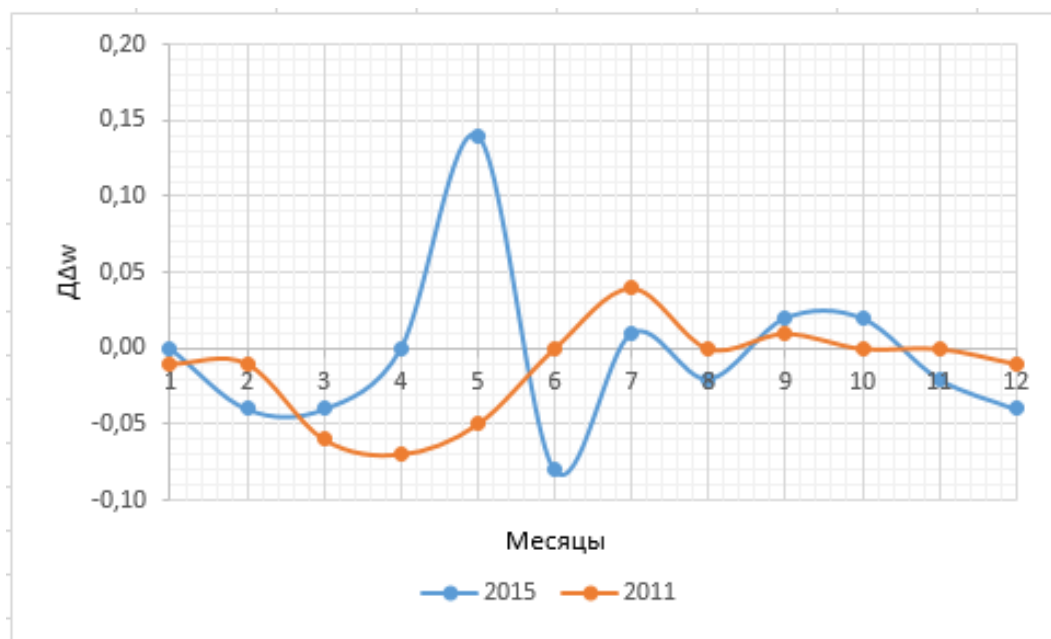


Рис. 4. Внутригодовой ход внутреннего водообмена в створе г. Набережные Челны в 2011 и 2015 гг.

Выводы

По длине Нижнекамского водохранилища в целом внутренний водообмен по модели В.А. Знаменского прослеживается тенденция уменьшения величин внутреннего водообмена от с. Каракулино в плотине Нижнекамской ГЭС. Прослеживается определенная взаимосвязь с характером регулирования водохранилища. Сбросы воды на плотине Воткинской ГЭС вызывают подъемы уровня воды и приводят соответственно к увеличению значений водообмена.

По длине водохранилищ камского каскада прослеживается закономерная тенденция изменения внутреннего водообмена. От верховья к плотине, находящейся ниже по течению, прослеживается тенденция уменьшения значений водообмена. Так же, видна взаимосвязь величина объема водохранилища с колебаниями водообмена. При меньшем объеме в водоеме колебания обмена вод выражаются значительно сильнее. При большом объеме амплитуда колебания внутреннего водообмена наименьшая.

Библиографический список

1. Знаменский В.А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 247 с.

УДК 502.52

Е.А. Васькова^{1,2}, В.В. Дмитриев¹ ecologvaskovaea@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

г. Санкт-Петербург, Россия

²Акционерное общество «Группа компаний ШАНЭКО», г. Москва, Россия

ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

В статье обсуждаются опыт и результаты интегральной оценки экологического благополучия (ЭБ) природно-техногенной системы (ПТС) «водохранилище – водосбор – гидроузел – река». Разработана иерархическая система субиндексов оценки геоэкологических ситуаций в ПТС. Выявлены возможности сочетания и изменения приоритетов в полииерархической системе ЭБ ПТС. Дана оценка допустимости/недопустимости воздействий на подсистемы и систему в целом. Рассмотрены примеры и оценочные результаты ЭБ на основе авторских моделей-классификаций для систем «водохранилище – водосбор – гидроузел – река» Ивановского, Веселовского, Цимлянского водохранилищ и их подсистем.

Ключевые слова: природно-техногенная система, экологическое благополучие, геоэкологический статус, Ивановское водохранилище, система «водосбор – водохранилище», система «водосбор – водохранилище – гидроузел – река», Веселовское водохранилище.

E. Vaskova^{1,2}, V. Dmitriev¹, ecologvaskovaea@gmail.com

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Shaneco Design Institute, Moscow, Russia

THE MAIN PROBLEMS AND EXPERIENCE OF THE INTEGRATED ECOLOGICAL WELL-BEING ASSESSMENT OF A NATURAL-TECHNOGENIC SYSTEM

The article discusses the experience and integral effectiveness of the ecological well-being (EW) of the natural-technogenic system (NTS) "reservoir – catchment – waterworks – river". The purpose of the work is to assess the prospects for research in solving problems of geocology and nature management. Research objectives: 1 – development of a hierarchical system of sub-indices for assessing geocological situations in the NTS; 2 – identifying the possibilities of presence and changing priorities in the polyhierarchical system of EW NTS; 3 – assessment of the admissibility / inadmissibility of the impact on the subsystems and the system as a whole. Examples and evaluation results of EW based on author's classification models for systems "reservoir – catchment – waterworks – river" of Ivankovo, Veselovsky, Tsimlyansky reservoirs and their subsystems are included.

Keywords: natural-technogenic system, ecological well-being, geocological status, Ivankovo reservoir, "catchment – reservoir" system, "catchment – reservoir – waterworks – river" system, Veselovsky reservoir, Tsimlyansk reservoir.

Введение

Основные возможности получения геоэкологических оценок состояния разномасштабных природных систем основаны на сопоставлении мониторинговых данных наблюдений за химическим и биологическим составом, физическими свойствами окружающей человека (или других организмов) среды с принимаемыми за «норму» их допустимыми значениями (ПДК, фон, допустимые/критические концентрации и т.п.). Реже речь идет о системных функциях, интегральных свойствах и характеристиках, которыми не обладают ни составляющие систему элементы, взятые по отдельности, ни их простая «арифметическая сумма». В данном случае акцентируется, что свойства природной и общественной системы в целом неаддитивны по отношению к свойствам ее элементов и подсистем и характеризуют эмерджентные свойства систем и/или объектов исследования в целом [3].

Цель работы – характеристика основных этапов интегральной оценки ЭБ ПТС «водохранилище – водосбор – гидроузел – река», выявление их проблемности, возможных путей решения проблем; анализ первичных результатов и оценка перспектив исследования при решении задач геоэкологии и природопользования. Задачи исследования: 1) разработка иерархической системы субиндексов для оценки геоэкологических ситуаций и ЭБ в системе «водохранилище – водосбор – гидроузел – река»; 2) выявление возможностей сочетания и изменения приоритетов в полииерархической системе взаимодействия природных и ПТС; 3) планирование последствий и оценка влияния управленческих решений на изменение ЭБ и геоэкологического статуса системы в целом, оценка допустимости/недопустимости воздействий на подсистемы и систему в целом и вариантов их сочетания.

Материалы и методы исследования

Для выполнения работы использовались: результаты регионального геоэкологического мониторинга: информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии региональной геосистемы, созданная с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов [3]; геосистемный подход для оценки и анализа поведения систем различных масштабов при неодинаковых антропогенных нагрузках [3]; геоэкологический подход – изучение природных комплексов в тесной связи с хозяйственной практикой с позиции жизнеобеспеченности человека, включая окружающую его природную и техногенную среду [3]; геоситуационный подход – для формализации взаимодействия природных и социально-экономических составляющих с целью управления состоянием окружающей среды: выделение экологических проблем и их пространственно-временных сочетаний [3]; геоэкологический анализ – метод оценки экологического состояния территории, создания научных основ ее оздоровления и разработки оптимизационных мероприятий, направленных на снижение антропогенного и техногенного воздействия на окружающую среду [3].

Метод сводных показателей (МСП) успешно зарекомендовал себя при оценивании состояния и эмерджентных свойств сложных природных объектов и/или общественных систем [1-4]. МСП, как инструментальный оценки впервые был предложен и апробирован А.Н. Крыловым [4]. В работе Н. В. Хованова [4]

подробно описывается история создания и этапы развития МСП, рассмотрены его современные версии – метод рандомизированных сводных показателей (МРСП) и АСПИД-методология (анализ и синтез показателей при информационном дефиците), позволяющая учитывать «*ннн*-информацию» в оценочных исследованиях. Метод базируется на квалиметрии, теории функции полезности, теории экономических индексов, теории нечетких множеств [4].

Аксиологический подход и квалиметрический анализ, методы интегрального оценивания сложных систем позволяют разрабатывать модели-классификации интегрального оценивания сложных систем в природе и обществе и их эмерджентных свойств (благополучия).

Субиндексы и ИП, сформированные в результате репрезентативной выборки критериев оценки, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Критерии оценки экологического благополучия водохранилища [1; 2]

<i>ИП второго уровня свертки</i>	<i>Субиндексы первого уровня свертки</i>
ИП ЭБ водосбора (ИПЭБВс)	Субиндекс устойчивости почвы (СУстПочВ). Субиндекс качества и загрязнения почвы (СКачПочВ). Субиндекс продуктивности территории водосбора (СПродВод). Субиндекс качества среды территории водосбора (СКачВод). Субиндекс качества воды водных объектов водосбора (СубКВод).
ИП ЭБ водохранилища (ИПЭБВх)	Субиндекс качества воды в водохранилище (СКачВх). Субиндекс продуктивности водохранилища (СПродВх). Субиндекс потенциальной устойчивости водохранилища (СПУстВх).
ИП ЭБ реки (ИПЭБР)	Субиндекс качества воды в реке (СКачР). Субиндекс продуктивности реки (СПродР). Субиндекс потенциальной устойчивости реки (СПУстР).
ИП социально-экономического благополучия населения (ИПСЭБлаго)	Субиндекс благосостояния населения (СЭБлаго). Субиндекс промышленного производства (СЭБПромпроизв). Субиндекс доходов населения (СЭДоход). Субиндекс туристической привлекательности (СЭБТуризм). Субиндекс занятости населения (СЭБЗанятость). Субиндекс демографический (СЭБДемогр). Субиндекс образования (СЭБОбр). Субиндекс социального обеспечения (СЭБСоцио). Субиндекс заболеваемости (СЭБЗабол).
ИП ЭБ гидроузла	СЭБГидр

Выборка критериев основана на имеющихся мониторинговых данных по каждому из объектов [1-2]. Оценочными критериями служили данные мониторинга летнего периода за промежуток 2018-2021 гг. При разработке оценочных шкал использовался опыт авторов, обобщенный в ряде публикаций [1-3; 5; 6].

Анализ результатов

В результате разработанной методологии и системы ИП на первом этапе исследований были получены оценочные шкалы для моделей-классификаций, разработанных с учетом равной приоритетности учета факторов в субиндексах и между ними. В таблице 2 приведены примеры оценочных шкал основных подсистем и их сочетаний.

Таблица 2

Примеры оценочных шкал интегральных показателей экологического благополучия

Класс экологического благополучия	<i>I</i> Высокая степень	<i>II</i> Нормальная степень	<i>III</i> Средняя степень	<i>IV</i> Низкая сте- пень	<i>V</i> Чрезвычайно низкая сте- пень
ИП ЭБ «водосбор» (ИПЭБВ)	0,00-0,10	0,10-0,21	0,21-0,44	0,44-0,73	0,73-1,00
ИП ЭБ «водохранилище» (ИПЭБВХ)	0,00–0,13	0,13–0,27	0,27–0,43	0,43–0,67	0,67– 1,00
ИП ЭБ ПТС «водосбор–во- дохранилище» (ИПЭБВВ)	0,00-0,16	0,16-0,33	0,33-0,51	0,51-0,75	0,75-1,00
ИП ЭБ ПТС «водосбор–во- дохранилище–гидроузел– река» (ИПЭБПТС)	0,00–0,23	0,23–0,42	0,42–0,57	0,57–0,70	0,70–1,00

Ключевыми объектами исследования являлись ПТС: Цимлянское и Веселовское водохранилища; «Иваньковское водохранилище – водосбор Иваньковского водохранилища»; «Веселовское водохранилище – водосбор Веселовского водохранилища – гидроузел Веселовского водохранилища – река Маньч» [1; 2].

В таблице 3 приведены ИП, полученные в результате апробации методологии на ключевых объектах.

В результате апробации методологии построения ИП, в рассмотренных в таблице 3 примерах, ИПЭБ при равновесомом учете показателей внутри блоков и между ними, соответствовал, в разных примерах III-му классу ЭБ (середина класса) – средняя степень ЭБ.

Таблица 3

Интегральные показатели экологического благополучия природно-техногенных систем

Наименование ИП	Общее количество критериев	Общее количество субиндексов	Цимлянское водохранилище	Веселовское водохранилище	Иваньковское водохранилище
ИПЭБВ	22	4	$\frac{0,33 \text{ (IIIc)}}{0,21-0,44}$ 0,325	$\frac{0,34 \text{ (IIIc)}}{0,21-0,44}$ 0,325	-
ИПЭБВВ	38	9	-	-	$\frac{0,41 \text{ (IIIc)}}{0,33-0,51}$ 0,420
ИПЭБПТС	158	38	-	$\frac{0,47 \text{ (IIIc)}}{0,42-0,57}$ 0,495	-

Примечание: в первой строке указано значение ИП, в скобках указан номер класса и близость к левой (правой) границе или середине класса; во второй строке указаны ИП для левой и правой границы класса; в третьей строке – ИП для середины класса.

Выводы

В результате получения оценочных ИП геоэкологических свойств сложных систем, были выявлены следующие проблемы методологии, требующие решения в будущих исследованиях:

1. Уникальность объектов может оказать влияние на выбор исходных параметров для интегральной оценки эмерджентного свойства. Таким образом, необходимо стремиться к сохранению оценочных блоков и субиндексов в оценочных исследованиях и определить необходимое и достаточное количество учитываемых параметров и субиндексов. Наш опыт свидетельствует о том, что для формирования субиндекса достаточно учесть 5-9 слабо коррелируемых параметров.

2. Необходим учет (контроль) мультиколлинеарности факторов.

3. Необходимо исследовать влияние нелинейности связи критериев с оцениваемым свойством (качеством).

4. При выборе оценочных шкал необходимо опираться на ГОСТовые шкалы или известные авторские разработки, использовать *ннн*-информацию при задании приоритетов (весов) в оценочных исследованиях, определять точность оценки.

5. В будущих исследованиях необходимо выявлять приоритеты и перспективы использования земель и водных объектов при планировании воздействия на системы, акцентировать исследование на системное нормирование воздействий на природные и общественные системы [4] и разработать подход к оценке воздействия на них на основе построения композитных индексов.

Библиографический список

1. *Васькова Е.А.* Интегральная оценка экологического благополучия водосбора Иваньковского водохранилища // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ. 2022. С. 292-296.

2. *Васькова Е.А.* Оценка экологического благополучия Веселовского водохранилища на основе композитного индекса // Сборник материалов XVIII Большого географического фестиваля. 2022. С. 280-285.

3. *Дмитриев В.В.* Оценка состояния и устойчивости наземных и водных геосистем. Учебно-методическое пособие. СПб.: Медиапапир, 2020. 200 с.

4. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: СПбГУ, 1996. 195 с.

5. *Седова С.А., Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Глушко А.А., Пленкина А.К.* Оценка воздействия на водную экосистему и ее эмерджентные свойства на основе результатов имитационного моделирования и построения композитных индексов // Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 132-142. DOI: 10.17513/use.37652

6. *Dmitriev, V. V., Terleev, V. V., Nikonorov, A. O., Ogurtsov, A. N., Osipov, A. G., Sergeyev, Y. N., Kulesh, V. P., Fedorova, I. V.* Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. Landscape Modelling and Decision Support, 2020. P.231–253. doi:10.1007/978-3-030-37421-1_12

А.М. Гареев, aufar.gareev@mail.ru, Е.Н. Сайфуллина, sayfullina-75@mail.ru
Э.М. Галеева, elya.galeewa2012@yandex.ru
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЦЕНКИ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА МАЛЫХ И СРЕДНИХ ОЗЕР (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР ПО ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН)

В статье раскрыты основные положения оценки рекреационного потенциала малых и средних озер с учетом особенностей влияния естественных и антропогенных факторов. Показано то, что, несмотря на значительное количество опубликованных работ, отражающих теоретические положения и методические вопросы оценки рекреационного потенциала ландшафтов, по малым и средним озерам наблюдается ограниченность проводимых исследований. По указанным водным объектам рекреационная нагрузка должна рассматриваться в составе антропогенных факторов, обуславливающих процесс их эвтрофикации в условиях влияния регионального отклика глобального изменения климата. На примере оз. Асылыкуль, расположенного в пределах Республики Башкортостан, приведены методические положения оценки изменения показателей трофического статуса озер и нормирования масштабов рекреационных нагрузок.

Ключевые слова: озеро, водосбор, внешний водообмен, средняя глубина, эвтрофикация, статус.

A.M. Gareev aufar.gareev@mail.ru, E.N. Saifullina sayfullina-75@mail.ru
E.M. Galeeva elya.galeewa2012@yandex.ru
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

METHODOLOGICAL PROVISIONS FOR ASSESSING THE RECREATIONAL POTENTIAL OF SMALL AND MEDIUM LAKES (BY THE EXAMPLE OF LAKES ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

The article reveals the main provisions for assessing the recreational potential of small and medium-sized lakes, taking into account the peculiarities of the influence of natural and anthropogenic factors. It is noted that despite a significant number of published works reflecting the theoretical provisions and methodological issues of assessing the recreational potential of landscapes, there are limited studies on small and medium lakes. For these water bodies, the recreational load should be considered as part of anthropogenic factors that determine the process of their eutrophication under the influence of the regional response of global climate change. On the example of lake Asylykul, located within the Republic of Bashkortostan, methodical provisions are given for assessing changes in indicators of the trophic status of lakes and normalizing the scale of recreational loads.

Keywords: lake, catchment area, external water exchange, average depth, eutrophication, status.

Введение

В условиях сложившейся социально-политической обстановки в Российской Федерации в настоящее время уделяется большое внимание развитию внут-

ренного туризма и оптимальному вовлечению различных природных комплексов, историко-культурных и других объектов в рекреационную сферу. На основании анализа значительного количества опубликованных работ, посвященных изучению и оценке рекреационной значимости, можно обратить внимание на то, что преимущественное внимание авторами уделяется комплексной оценке туристско-рекреационного потенциала территорий, интегральной оценки ландшафта с учетом средних значений основных составляющих: рельефа, характеристик растительного покрова и водных объектов, а также в составе решения вопросов, ориентированных на устойчивое территориальное развитие [7-9]. В ряде работ [3; 10] уделяется также внимание на необходимость охраны озерно-болотных комплексов и водотоков в составе самих охраняемых территорий в целом.

Отметим, что количество публикаций, посвященных изучению характеристик рекреационной привлекательности и рекреационной емкости озер Республики Башкортостан, незначительно [2; 10]. Окончательно не решены вопросы нормирования масштабов рекреационных нагрузок на озера, а также полномасштабно не проводятся мероприятия по гидролого-экологическому восстановлению (мелиорации) многочисленных озер, расположенных в пределах Башкирского Предуралья и Зауралья. С учетом изложенного, в работе применительно к решению вопросов перспективного развития рекреации раскрыты методические положения, направленные на обоснование и проведение необходимых мероприятий на малых, средних озерах и их водосборах с учетом необходимости сохранения в них благоприятных экологических условий.

Материалы и методы исследования

Методические положения исследования базируются на применимости основных положений ранее выполненных работ, которые отражены в публикациях А.М. Гареева [4-6], Р. Фолленвайдера [11], П. Диллона и Ф. Риглера [12] и др. Следует подчеркнуть, что уровень трофии выступает как один из основных показателей, отражающих экологические условия в озерах. Это обуславливается тем, что в связи с низкими показателями коэффициента внешнего водообмена, соответственно, процессов смешения, разбавления и самоочищения вод в озерных системах, основами водного законодательства Российской Федерации сосредоточенный сброс сточных вод в них промышленными предприятиями и коммунально-бытовым хозяйством запрещен. В этих условиях увеличивающиеся масштабы влияния факторов, формирующихся на водосборе, включая сельскохозяйственные угодья (пашни, пастбища, животноводческие фермы и др.), количество жителей в сельских населенных пунктах и рекреационные нагрузки следует рассматривать в качестве основных факторов, влияющих на экологические условия и привлекательность водоемов для их использования в целях рекреации и туризма.

Следует обратить внимание на то, что уровень трофии водоемов по совокупности физико-химических и гидробиологических показателей, также статус олиготрофных, мезотрофных или эвтрофных озер может быть определен по таким показателям, как численность и биомасса фитопланктона, наличие диатомовых, сине-зеленых водорослей в % от общей численности, БПК₅, хлорофилл

«а», концентрации растворенного кислорода, аммония, нитритов, нитратов, суммы минеральных форм азота, минерального фосфора и кремния. Кроме того, в некоторых работах при оценке трофического статуса применяются показатели взаимосвязи между содержанием углерода растворенных органических веществ ($C_{\text{ров}}$) и уровнем их трофии, а также в зависимости от уменьшения видов ракообразных (ветвистоусых и веслоногих рачков) и увеличения таксонов коловраток [1]. Отмечено, что эвтрофикация озер сопровождается уменьшением прозрачности в зависимости от нарастания биомассы фитопланктона и содержания хлорофилла «а» и увеличением рН. Это свидетельствует о росте первичной продукции в водоемах.

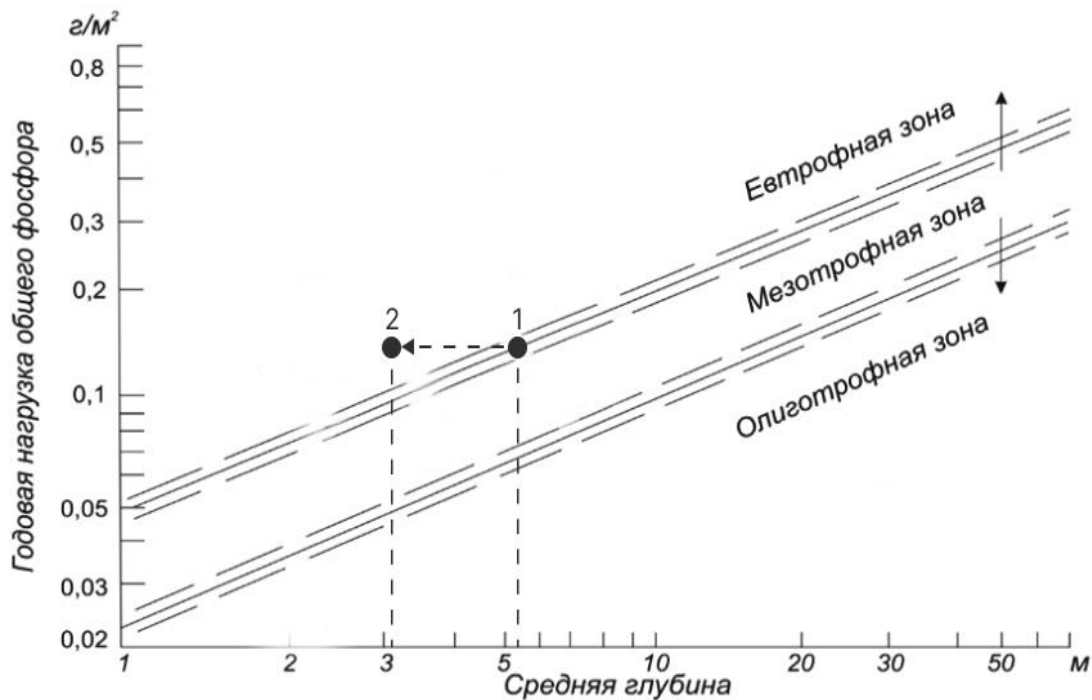
Анализ результатов

В целях обоснования методических положений использования водных объектов для развития рекреации и туризма в работе были учтены особенности влияния как внутриводоемных (автохтонных) и внешних (аллохтонных) факторов, способствующих количественно увязать состояние трофности озера с приходом биогенных веществ (азота, фосфора) с водосбора на единицу площади водоема. При этом учитывалась модель бюджета фосфора, отражающая уровень эвтрофикации водоема в зависимости от его прихода, потерь, седиментации и расхода со стоком в зависимости от показателя проточности. Была применена формула [12]:

$$P = P_o (1 - R) / (h_{\text{cp}} * K_{\text{усл}}),$$

где P – концентрация общего фосфора в воде водоема, г/м³; P_o – фосфорная нагрузка, г/(м²*год); R – коэффициент удержания фосфора; $K_{\text{усл}}$ – коэффициент условного водообмена; h_{cp} – средняя глубина, м.

Следует обратить внимание на то, что после 90-х гг. XX в. к настоящему времени в бассейнах озер произошли существенные изменения. Влияние одних факторов, таких как вынос биогенных веществ с поверхности пастбищ и пашен после развала Советского Союза уменьшилось, а других, включая влияние нарастания засушливости климата, показателей испарения с поверхности водосборов и самих водных объектов, рекреационной нагрузки и др., увеличилось. Так, на основании анализа материалов многолетних наблюдений за уровнями воды по оз. Асылыкуль можно обнаружить то, что после установления маловодной фазы с начала 2000-х гг. по настоящее время снижение уровней воды в среднем произошло на 2 м. Наблюдения, проведенные нами в 2018-2020 гг., свидетельствуют о том, что аналогичные изменения проявляются и по другим озерам. В то же время, по отдельным водоемам, таким как Асылыкуль, Кандрыкуль в Предуралье и Банное (Яктыкуль) в Зауралье произошло увеличение рекреационных нагрузок, что требует необходимости учета факта изменения влияющих факторов и определения трофического статуса озер при сложившихся условиях к настоящему времени. С учетом изложенного на примере озера Асылыкуль показано изменение его трофического статуса, произошедшее в условиях влияния процесса обмеления (уменьшения средней глубины) в течение последних десятилетий (рисунок).



Зависимость уровня трофии от фосфорной нагрузки и средней глубины оз. Асылыкуль

Как видно из рисунка, озеро Асылыкуль, характеризовавшееся в прошлом расположением его трофического статуса в переходной зоне (от мезотрофного к эвтрофному), к настоящему времени однозначно перешло к эвтрофной зоне. Аналогичные изменения выявлены и по озерам Белое, Калкан, Ургун и Сабакты. В озерах Кандрыкуль и Банное, несмотря на произошедшие изменения, трофический статус сохранился в пределах зон, что было характерно в 90-х гг. XX в. Так, они в настоящее время, соответственно, относятся к категории мезотрофных и олиготрофных озер.

Выводы

Исходя из изложенного, следует констатировать то, что вопросы перспективного развития рекреации и туризма на малых и средних озерах должны рассматриваться в составе влияния совокупности естественных и антропогенных факторов, формирующихся в их бассейнах и влияющих на них непосредственно. В свою очередь, потенциал, отражающий возможности дальнейшего развития рекреации и туризма, должен базироваться на сохранении, в дальнейшем и улучшении экологических условий (мелиорации) в них, принимая во внимание проведение организационно-хозяйственных, агро- лесомелиоративных мероприятий и реальные характеристики самих водоемов, отраженные на рисунке.

Библиографический список

1. Антропогенное воздействие на малые озера. Л. Наука, 1980. 174 с.
2. Батанов Б.Н., Абдрахманов Р.Ф., Мустафин Р.Ф. Озера и водохранилища Башкирского Зауралья, использование их в народном хозяйстве. Вестник БГАУ, 2016. № 3. С. 7-12.
3. Воронов Ю.С. Методика определения ландшафтно-рекреационного потенциала туристского региона. Смоленск, 2017. 7 с.
4. Гареев А.М. Оптимизация водоохранных мероприятий в бассейне реки (географо-экологический аспект). С.Пб. Гидрометеиздат, 1995. 190 с.
5. Гареев А.М. Реки и озера Башкортостана. Уфа. Китап, 2001. 260 с.
6. Гареев А.М. Реки, озера и болотные комплексы Республики Башкортостан. Уфа. Гилем, 2012. 246 с.
7. Гудковских М.В. Методика комплексной оценки туристско- рекреационного потенциала//Географический вестник. 2017. №1 (40). С. 102-116.
8. Дегтярь А.В., Григорьев О.И. Развитие сети особо охраняемых территорий Белгородской области//Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. Т. 2. №4, 2016. С. 18-29.
9. Корба О.А. Рекреационный потенциал как основа устойчивого территориального развития. Пятигорск. ПГЛУ, 2014. 9 с.
10. Сайфуллина Е.Н. Возможности рационального использования природного парка "Аслы-Куль" в рекреационно-туристской деятельности. Вестник АН РБ, 2018. Т. 29. № 4. С. 80-86.
11. Vollenweider R.A. Input – output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology//Schweiz. Z. Hydrol, 1975. Bd. 37, N1. S. 53-84.
12. Dillon P., Rigler K. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status//J. Fish Res. Board Can., 1975. Vol. 32, N 9. P. 1519-1531.

М.Г.Гречушникова^{1,2}, И.А. Репина², В.С. Казанцев², allavis@mail.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики атмосферы РАН имени А.М. Обухова, г. Москва, Россия

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ УДЕЛЬНОГО ПОТОКА МЕТАНА С АКВАТОРИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Приведены результаты обобщения натуральных наблюдений удельного потока метана на разнотипных водохранилищах России. Приведено сравнение полученных данных с результатами мирового опыта. Предложен подход для параметризации удельного потока метана для расчета максимально возможной эмиссии метана с искусственных водоемов при разработке количественных квот выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: водохранилище, метан, эмиссия, глубина, водообмен.

M. Grechushnikova^{1,2}, I.A. Repina², V.S. Kazantsev², allavis@mail.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Moscow, Russia

PARAMETRIZATION OF SPECIFIC METHANE FLUX FROM RESERVOIRS

The results of generalization of full-scale specific methane flux observations in various types of water reservoirs in Russia of are presented. The obtained data have been compared with the results of world experience. An approach to parameterization of specific methane flux for estimating the maximum possible methane emission from artificial reservoirs is presented for the development of quantitative quotas of greenhouse gas emissions.

Keywords: reservoir, methane, emission, depth, water exchange.

Введение

Искусственные водоемы являются одним из антропогенных источников метана, который образуется в их донных отложениях. Для разработки количественных значений квот выбросов парниковых газов необходимо изучить пространственно-временные масштабы эмиссии из водохранилищ РФ. По сравнению с исследованиями в Бразилии, Канаде, США, в России наблюдениями до недавнего времени было охвачено мало водоемов [5]. Согласно исследованиям, выполненным ранее [4], основными факторами, влияющими на эмиссию метана являются трофический статус водоема, его глубина, термический и кислородный режим, условия водообмена. Именно многофакторность процесса затрудняет параметризацию удельного потока и его диагностические и прогностические расчеты, поскольку помимо диффузного потока метан может выделяться в виде пузырьков. Этот процесс носит весьма нестационарный характер, зависит от колебаний атмосферного давления, роящей активности бентоса и неравномерен в пространстве. В качестве подхода для параметризации потока метана предложено использовать его максимальные значения, основываясь на данных поле-

вых измерений в различные фазы гидрологического режима разнотипных водоемов, подразделяя их по признаку глубоководности. Именно глубина водоема оказывает значительное влияние на его термический и кислородный режим. Глубоководные водохранилища расположены в горных районах, обычно имеют олиготрофный или мезотрофный статус, что также определяет общие черты режима потока метана с их поверхности. Равнинные водохранилища обычно более мелководны с максимальной глубиной порядка 30-35 м, что обуславливает лучшее прогревание придонных слоев. Обычно их водосборы подвержены активной антропогенной деятельности (промышленность, сельское хозяйство, урбанизация), что обуславливает приток в водохранилища взвешенных и растворенных веществ, мезотрофный или евтрофный статус, формирование донных отложений с большей долей органической составляющей по сравнению с водоемами горных территорий. Цель работы – оценить максимально возможный удельный поток метана с учетом глубины разнотипных водохранилищ.

Материалы и методы исследования

В основе исследования база данных по удельному потоку метана с учетом пространственно-временной изменчивости на крупнейших водохранилищах РФ. В ней представлены многолетние данные съемок водохранилищ РФ, выполненные коллективами ИФА РАН, ИВП РАН и кафедры гидрологии суши МГУ. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом «headsрace» [2]. Для каждой станции измерений определялась температура воды и атмосферное давление. Измерение удельного потока метана в атмосферу производилось методом плавучих камер [3]. Основная трудность применения данного метода – неблагоприятные погодные условия с сильным ветром и волнением. Содержание метана в отобранных пробах определялось в лаборатории ИФА РАН на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2, согласно [1]. Отбор проб на содержание метана на каждой станции сопровождался зондированием водной толщи по показателям температуры и растворенного кислорода, определением метеорологических характеристик *in situ*. Расположение станций на водоемах назначалось в соответствии с морфологией и морфометрией водохранилищ.

Анализ результатов

Предварительный анализ результатов измерения удельного потока метана показал, что его наибольшие значения на глубоководных водохранилищах, исследованных в Сибири и на Кавказе, существенно различаются. Для дальнейшего анализа водохранилища были сгруппированы по признаку максимальной глубины. На большинстве водохранилищ Сибири удельный поток метана даже в летний период при максимальном прогревании и наличии стратификации был на порядок ниже, чем на водохранилищах ЕТР. Исключения составили Ковинский плес Богучанского водохранилища, который представляет собой затопленное болото, а также верховья Зейского водохранилища, куда впадает приток Арги, дренающий заболоченный водосбор, воды которого содержат значительное коли-

чество метана. Содержание метана в воде волжских водохранилищ также на порядок больше, чем в сибирских. В Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах имеются локальные максимумы концентрации метана из-за локальных особенностей: слабопроточные участки – заливы, в которых наблюдается стратификация и дефицит кислорода, либо загрязнение.

Для оценки максимально возможного потока метана в выделенных группах водохранилищ данные съемок были нанесены на диаграммы и построены огибающие, которые можно использовать для расчетов в случае неизученных водоемов. Результаты для полного массива данных приведены на рисунке 1, для глубоководных водохранилищ на рисунке 2, для мелководных на рисунке 3. Для уточнения сезонного хода внутри каждой группы отдельно проанализированы данные об удельном потоке метана для периода с наличием стратификации (фаза летнего нагревания) и при ее отсутствии (фаза конвективного перемешивания).

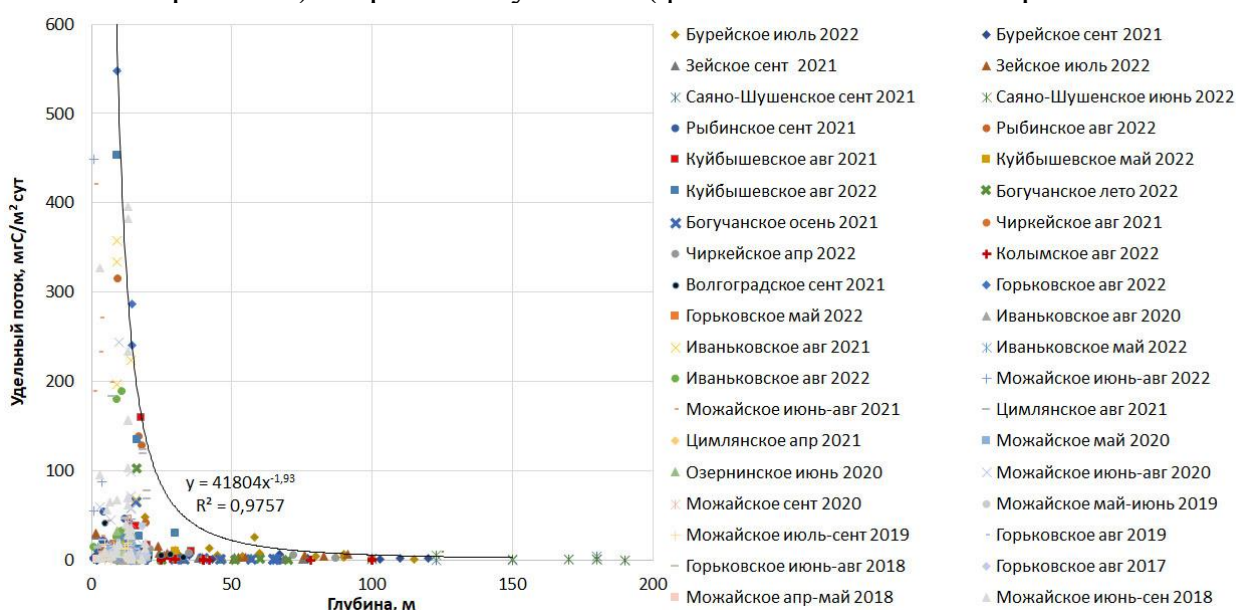


Рис. 1. Зависимость удельного потока метана с районов разнотипных водохранилищ разной глубины

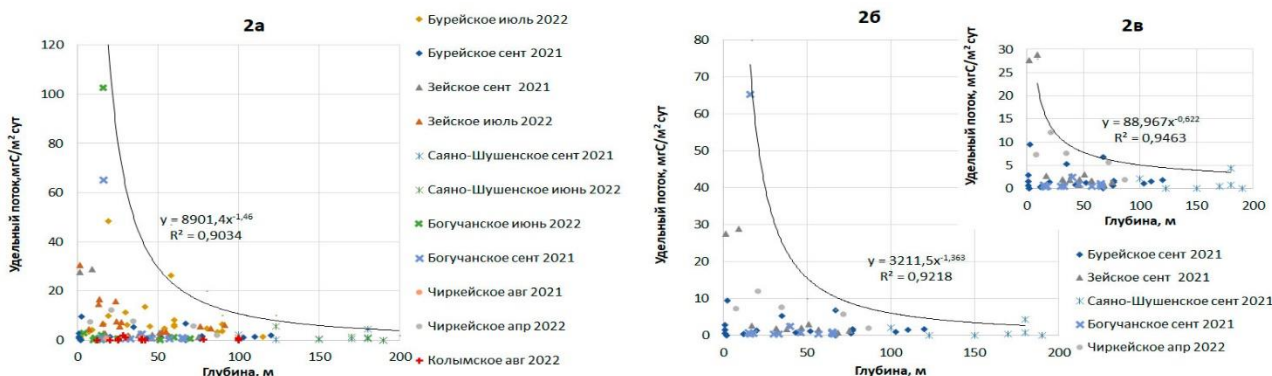


Рис. 2. Зависимость удельного потока метана с районов глубоководных водохранилищ разной глубины: 2а – по данным полного массива, 2б – при отсутствии стратификации, 2в – без учета локальных максимумов (Ковинского плеса Богучанского водохранилища)

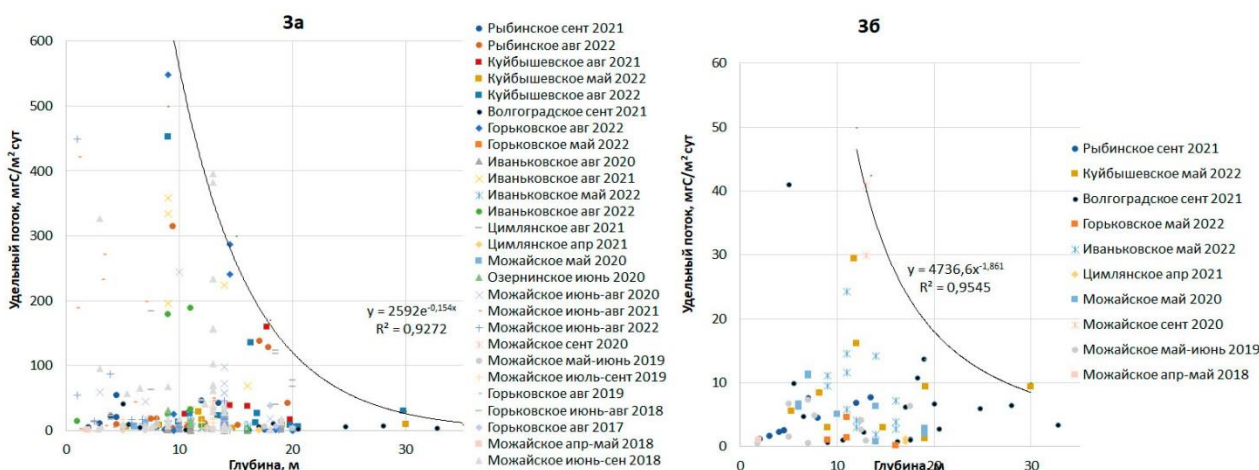


Рис. 3. Зависимость удельного потока метана с районов мелководных водохранилищ разной глубины:

3а – по данным полного массива, 3б – при отсутствии стратификации

Огибающие, которые характеризуют максимальные значения удельного потока метана на данной глубине, описываются степенной или экспоненциальной зависимостью. Наиболее контрастные условия по величине удельного потока присущи водохранилищам выделенных групп в период прогревания. При этом наличие бескислородного слоя в придонных горизонтах водоема не является обязательным условием максимальных значений потока метана. Так, на Ивановском водохранилище сезонного регулирования стока наибольший поток метана был выявлен не в 2022 г. при наличии аноксии и значительной стратификации, которая бывает в проточных водоемах только при длительном стоянии жаркой погоды, а в 2021 г. Наоборот, значения потока метана в жаркую штилевую погоду при бурном развитии фитопланктона были на порядок ниже, что было обусловлено значительным пересыщением эпилимниона выделяемым при фотосинтезе кислородом. Полученные результаты могут свидетельствовать о положительной роли цветения евтрофных водоемов, поскольку при этом поглощается углекислый газ, а выделяемый из донных отложений метан окисляется.

В группе глубоководных водохранилищ значения максимального потока в период прогревания и конвективного перемешивания различаются незначительно, в то время как в группе мелководных водохранилищ эти значения отличаются в 10 раз. Поэтому ошибка определения средней годовой величины потока метана в этой группе водоемов может быть больше. Исключить или уменьшить ошибочность оценки возможно при проведении учащенных наблюдений на мелководных водохранилищах. Также для мелководных водохранилищ выделяется неопределенность значений потока для интервала глубин менее 10 м для периода конвективного перемешивания. Хотя в целом чем меньше глубина, тем больше вероятность перемешивания до дна и снижения значения потока. В период стратификации литораль может давать довольно значительный вклад в эмиссию (рис. 3а)

Выводы

По данным съемок водохранилищ РФ получены характерные максимальные значения удельного потока метана в различные фазы гидрологического режима. Полученные значения возможно параметризовать в виде огибающих, описываемых экспоненциальной или степенной зависимостью. Полученные результаты имеют практическую значимость для оценки характерных значений выбросов парниковых газов (метана) с поверхности искусственных водоемов.

Работа выполнена в рамках темы АААА-А16-116032810054-3 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия». Полевые работы на водохранилищах ПАО Русгидро выполнены при поддержке проекта 1010-416-2021 от 26.04.2021. Авторы благодарят коллег – сотрудников Географического факультета МГУ, НИВЦ МГУ, ФГБУ ГОИН, ИФА РАН, ИВП РАН, проводивших полевые работы: Фролову Н.Л., Горина С.Л., Терского П.Н., Артамонова А.Ю., Степаненко В.М., Василенко А.Н., Григорьева В.Ю., Лисину А.А., Ломова В.А., Мишина Д.В., Сазонова А.А., Соколова Д.И., Тимошенко А.А., Ломову Д.В.

Библиографический список

1. Руководящий документ. Массовая концентрация метана и диоксида углерода в приземно слое атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии РД 52.44.816-2015.
2. *Bastviken, D., Santoro, A., Marotta, H.* Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // *Environmental Science and Technology*. 2010. 44(14). P. 5450–5455.
3. *Bastviken, D. et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. 18. doi:10.1029/2004GB002238.
4. *Deemer, B. et al.* Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. Springer. BioScience, 2016, Vol. 66, № 11. P. 949 – 964.
5. *Johnson, M. S. et al.* Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JG006305>.

И.Л. Григорьева¹, М.Г. Гречушникова^{2,3}, Д.В. Ломова³, Е.Р. Кременецкая³,
А.Б. Комиссаров¹, Л.П. Федорова¹, В.А. Ломов², Е.А. Чекмарева¹,
irina_grigorieva@list.ru

¹Институт водных проблем РАН, Ивановская НИС, г. Конаково, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Показано влияние различной водности и метеорологических условий на гидрохимический и гидробиологический режим Иваньковского водохранилища в августе 2020–2022 гг. Установлено, что в более прохладный и водный август 2020 г. уменьшилась минерализация воды и увеличивались значения цветности, перманганатной окисляемости и концентрации общего железа. Жаркая и солнечная погода лета 2022 г. привела к увеличению численности и биомассы фитопланктона в водохранилище и доминирующим видом стали синезеленые водоросли вместо диатомовых. В жарком 2022 г. наблюдалось превышение деструкции над продукцией. Интенсивное развитие фитопланктона и пересыщение поверхностного слоя кислородом уменьшало эмиссию метана. Активизация биотурбации в 2022 г. способствовала усилению обменных процессов на границе «вода-донные отложения».

Ключевые слова: водохранилище, температура воды, гидрохимические показатели, эмиссия метана, фитопланктон, зообентос, продукция и деструкция.

I. Grigoryeva¹, M. Grechushnikova^{1,2,3}, D. Lomova³, E. Kremenetzskaya³,
A. Komissarov¹, L. Fiodorova¹, V. Lomov², E. Chekmareva¹
irina_grigorieva@list.ru

¹Water Problems Institute of the RAS, Ivankovo Research Station, Konakovo, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

INFLUENCE OF HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS ON THE HYDROECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE IVANKOVO RESERVOIR IN SUMMER

The influence of different water content and meteorological conditions on the hydrochemical and hydrobiological regime of the Ivankovo reservoir in August 2020–2022 is shown. It was found that in cooler and watery August 2020, water mineralization decreased and the values of chromaticity, permanganate oxidability and total iron concentration increased. The hot and sunny weather of the summer of 2022 led to an increase in the number and biomass of phytoplankton in the reservoir and blue-green algae became the dominant species instead of diatoms. Excess of destruction over production was also observed in 2022. Intensive development of phytoplankton reduced methane emissions due to oversaturation of dissolved oxygen in the surface layer. Activization of bioturbation contributed the increase of exchange processes on the «water-sediments» boundary.

Keywords: reservoir, water temperature, hydrochemical indicators, methane emission, phytoplankton, zoobenthos, production and destruction.

Введение

Гидроэкологические характеристики в водоемах тесно связаны между собой, а сама экосистема водохранилища реагирует на внешние воздействия, к которым относятся синоптические изменения и регулирование проточности и уровня режима. В то же время водохранилища также могут оказывать влияние на климат (как в небольшом пространственном масштабе на прилегающей территории, так и глобально за счет эмиссии метана в атмосферу). Метан – парниковый газ, изучению источников которого в последнее время уделяется большое внимание.

Известно, что гидроэкологический режим находится в зависимости от синоптических условий и уровня режима, которые оказывают влияние на особенности формирования стратификации, температурного и кислородного режима, первичную продукцию и обменные процессы с донными отложениями.

Цель работы – показать различия гидроэкологических характеристик Иваньковского водохранилища в одинаковую фазу водного режима в зависимости от внешних гидрологических и метеорологических условий.

Объект исследования

Иваньковское водохранилище, первая ступень Волжско-Камского каскада водохранилищ, один из основных источников водоснабжения г. Москвы. Создано оно в 1937 г., долинно-котловинного типа, сезонного регулирования, водообмен осуществляется примерно 10 раз в год. При НПУ полный объем водохранилища составляет 1,12 км³, площадь водного зеркала – 327 км², средняя глубина – 3,4 м, площадь акватории с глубинами до 2 м – около 50%.

Материалы и методы исследования

Квазисинхронные гидролого-гидрохимические и гидробиологические съемки водохранилища были проведены 5–6 августа 2020 г., 4–5 августа 2021 г. и 4–5 августа 2022 г. Весь комплекс измерений и отбор проб производились на 5 станциях (рисунок). В процессе съемок выполнялись измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (кондуктометр YSI Pro30 и оксиметр YSI ProODO), измерялась прозрачность воды по диску Секки.

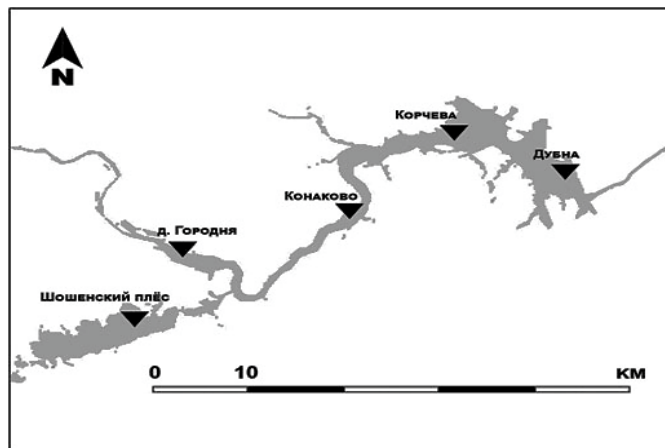


Схема Иваньковского водохранилища со станциями отбора проб и измерения эмиссии метана

Отбор проб воды производился из поверхностного и придонного горизонта на фарватере и у каждого из берегов по ГОСТ 3161-2012. Химический анализ отобранных проб воды был выполнен в аккредитованной химической лаборатории Иваньковской НИС Института водных проблем РАН по аттестованным методикам. Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000. Расчет концентрации метана в пробах воды производился методом headspace. На станциях проводилось измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер [5]. По ходу движения судна отбирались пробы воды для определения интенсивности продукционно-деструкционных процессов скляночным методом в кислородной модификации [1]. Работы включали эксперименты для определения потоков веществ на границе «вода – донные отложения (ДО)» методом трубок Кузнецова-Романенко. Кроме того, отбирались пробы придонной воды для определения деструкции органического вещества (ОВ). Отбор проб и определение фитопланктона и зообентоса производилось по стандартным гидробиологическим методикам [2-4].

Анализ результатов

Гидрометеорологические условия в предшествующий период и в дни проведения съемок в июле–августе 2020–2022 гг. были различными (табл. 1).

При большем притоке воды с водосбора в июле 2020 г. в водохранилище наблюдались более высокие значения Цв, ПО и концентрации железа общего. При этом минерализация воды была меньше, по сравнению с аналогичными периодами 2021 и 2022 гг. В более жаркое лето 2022 г. увеличился объем гипогимниона с содержанием растворенного кислорода менее 2 мгО/дм³.

Гидрометеорологические условия Иваньковского водохранилища летом 2020–2022 гг. и некоторые гидрохимические показатели в поверхностном горизонте на русле

<i>Характеристика</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>
Уровень воды 5 августа, м абс.	124.09	123.83	123.46
Приток воды в водохранилище, млн. м ³	1315.8	242.3	291.95
Осадки за июль, мм (г. Тверь)	161	22	81
Максимальная дневная температура воздуха в период проведения съемки, °С	22	26.8	29.9
Фосфат-ион, мг/дм ³	0.05-0.18	0.02-0.12	0.01-0.04
Минеральный азот, мгN/дм ³	0.32-0.75	0.35-1.87	0.19-0.72
Цветность (Цв), град. Pt-Co шкалы	60-80	30-40	20-30
Перманганатная окисляемость, (ПО) мгО/дм ³	14.4-20.4	7.3-14.0	7.3-14.0
Железо общее, мг/дм ³	0.09-0.42	0.02-0.11	0.02-0.11
Электропроводность (25), мкСм/см	207-233	230-278	257-333

Разные гидрометеорологические условия трех последних лет сказались на развитии фитопланктона. В августе 2022 г. в Иваньковском водохранилище были зарегистрированы самые высокие значения численности и биомассы фитопланк-

тона за период исследований с 2010 г. Общая численность микроводорослей изменялась в поверхностном слое от 44,116 до максимальных 301,790 млн кл/л. Общая биомасса фитопланктона в августе 2022 г. изменялась в поверхностном слое от 13,155 до 65,891 мг/л, что в 2–12 раз выше аналогичных показателей в 2020–2021 гг. Основу биомассы в августе 2020 и 2021 гг. формировали диатомовые, зелёные и динофитовые водоросли, при этом на долю диатомовых приходилось от 30 до 90%. В августе 2022 г. роль диатомовых водорослей в формировании общей биомассы фитопланктона резко снизилась и составляла 13–24%, и на большинстве станций увеличилась доля синезеленых водорослей.

По данным измерений активности продукционно-деструкционных процессов только в 2022 г. величина деструкции превышала величину продукции и имела наибольшие значения из всех съёмок 2020–2022 гг. Таким образом, гидроэкологические условия года обуславливают различную интенсивность самоочищения водоема.

Исследования показали, что для участков глубоководной зоны были характерны стабильный состав и структура донного сообщества, а именно – олигохетно-хирономидный комплекс с небольшим (3–5 ед.) числом видов. Дефицит кислорода в придонном слое активизирует биотурбацию и может сокращать выедание роющего бентоса рыбами. Результатом биотурбации является изменение структуры донных отложений и их метаболизма, перенос растворенного кислорода, увеличение выхода метана. Также олигохеты занимают ведущую позицию в минерализации ОВ.

Фильтрационная деятельность *Dreissena polymorpha* (Palas) вносит существенный вклад в самоочищение водоема, снижая процесс его эвтрофирования. Для массового развития дрейссены необходима высокая минерализация, а Иваньковское водохранилище слабоминерализовано. Много велигеров после оседания на субстрат гибнет от невозможности сформировать раковину из-за дефицита кальция, но в маловодные годы с небольшим притоком повышение минерализации может быть благоприятным для велигеров.

Данные в рассмотренные три года значительно отличаются по величине эмиссии метана. Величина потока метана из донных отложений зависит от величины и продолжительности существования аноксидной зоны и уровня воды, поэтому в жарком и маловодном 2022 г. выход метана из ДО был существенно выше, чем в другие годы исследований (в среднем 67 мгС/м²сут при 0,71 и 12,8 мгС/м²сут в 2020 и 2021 гг., соответственно). В 2022 г. при более низком уровне и при активизации биотурбации в бескислородных условиях содержание метана в придонных горизонтах было на порядок больше, чем в 2020–2021 гг. (73–518 мкл/л против 8–17 и 5–132 мкл/л соответственно). Однако бурное развитие фитопланктона и содержание кислорода в поверхностном слое до 11,3–17,6 мг/л в 2022 г. против 9–10,7 мг/л в 2021 г. привело к значительному его окислению, что в результате снизило значения удельного потока, особенно в нижней части водохранилища.

Выводы

Установлено, что несмотря на сравнительно большую проточность водохранилища продолжительная жаркая погода летом приводит к формированию бескислородных условий в придонном горизонте. Потребление кислорода у дна усугубляется вспышками цветения фитопланктона, его отмиранием и седиментацией. Разлагающееся органическое вещество является источником метана. Бескислородные условия также способствуют активизации биотурбации в донных отложениях, что увеличивает его выход из донных отложений. Но перенасыщение кислородом поверхностных горизонтов сокращает эмиссию метана в атмосферу. Дефицит кислорода в придонных горизонтах способствует высвобождению марганца и фосфатов из донных отложений, что усиливает вспышки цветения. В жарком августе 2022 г. доминирующими видами в составе фитопланктона на большей части водоема были синезеленые водоросли, тогда как в предшествующие годы – диатомовые. Активное развитие фитопланктона способствовало уменьшению концентраций фосфатов, увеличению значений БПК₅ и рН воды.

В маловодный 2022 г. отмечено уменьшение цветности воды, что весьма благоприятно для питьевого водоснабжения. Преобладание деструкции над продукцией в жаркий 2022 г. является показателем интенсификации самоочищающей способности водохранилища. Этому же способствовало увеличение фильтрационной деятельности *Dreissena polymorpha*, связанное с повышением минерализации воды по сравнению с 2020 г. Гидроэкологические условия конкретного года обуславливают различную интенсивность самоочищения водоема.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Библиографический список

1. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
2. *Кузьмин Г.В.* Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. М.: Наука, 1975. С. 73-87.
3. *Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция.* Л.: ГосНИОРХ, 1983. 33 с.
4. *Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий.* СПб: Наука, 2004. Т. 6. 527 с.
5. *Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biogeochemical Cycles.* 2004. Vol.18. 12 p.

Г.С. Ермакова^{1,2}, И.Ю. Милютин^{1,2}, Г.Ш. Турсунова^{1,2}, М.В. Козлова³
ermakova_gs@mail.ru

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
г. Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ АНТРОПОГЕННОГО ОСВОЕНИЯ ВОДОСБОРА ИРИКЛИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Проанализирована пространственная неоднородность антропогенной нагрузки на водосборе Ириклинского водохранилища, включая характеристики расселения, промышленного и сельскохозяйственного освоения, транспортной инфраструктуры. Рассматриваемая совокупность антропогенных факторов приводит к трансформации характеристик водосбора, оказывая влияние на условия формирования стока и качество вод на изучаемой территории.

Ключевые слова: Ириклинское водохранилище, водосбор, антропогенное освоение, данные дистанционного зондирования

G.S. Ermakova^{1,2}, I.Yu. Milyutina^{1,2}, G.Sh. Tursunova^{1,2}, M.V. Kozlova³
ermakova_gs@mail.ru

¹ N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

²Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

SPATIAL HETEROGENEITY OF ANTHROPOGENIC PRESSURE ON THE IRIKLINSKY RESERVOIR WATERSHED

The paper analyzes the spatial heterogeneity of the anthropogenic pressure on the catchment area of the Iriklin sky reservoir, including the characteristics of settlement, industrial and agricultural development, transport infrastructure. The combination of anthropogenic factors leads to the transformation of the watershed surface, influencing the conditions of runoff formation and water quality in the study area.

Keywords: Iriklin sky reservoir, catchment area, anthropogenic pressure, remote sensing

Введение

Водосбор Ириклинского водохранилища на р. Урал характеризуется достаточно высокой степенью и неоднородностью антропогенной нагрузки. Распространение селитебных территорий, развитие добывающих и обрабатывающих промышленных производств, транспортной и инженерной инфраструктуры, распашка территорий и использование лугов под выпас скота приводит к значитель-

ной трансформации поверхности водосбора и увеличению показателей водопотребления и водоотведения. В результате, совокупность перечисленных факторов оказывает прямое и опосредованное влияние на условия формирования стока и качество водных ресурсов.

В исследовании дана интегральная характеристика пространственного распределения показателей селитебной, промышленной, сельскохозяйственной и транспортной нагрузки. В дополнение к показателям антропогенной нагрузки показана также пространственная неравномерность ряда ландшафтных характеристик водосбора: залуженности, залесенности, площади водного фонда. Обобщение набора показателей позволяет продемонстрировать, как меняется структура земельного фонда в различных частях водосбора.

Материалы и методы исследования

Для характеристики пространственного распределения антропогенной нагрузки и ландшафтной неоднородности водосбора собрана обширная база геоданных по водосбору Ириклинского водохранилища за 2020-2022 гг.

Для подготовки слоев с границами распаханых участков, луговой и степной растительности и водных объектов были использованы данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ): многоканальные космоснимки, полученные аппаратами Landsat 8-9 Геологической Службы США [2]. Обработка снимков выполнена в программе ArcGIS 10.2.2. При выделении распаханых участков использован метод автоматической изокластерной неконтролируемой классификации Iso Cluster Unsupervised Classification [5, 9]. Для выделения участков, занятых луговой и степной растительностью, использован нормализованный разностный вегетационный индекс Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [8, 10]. Для определения границ водных объектов использован модифицированный разностный водный индекс Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [6; 7; 11]. Результаты дешифрирования ДДЗЗ верифицированы по полевым данным.

Ряд данных – залесенные участки, плотность населения, транспортная инфраструктура – заимствован из различных открытых источников [1; 3; 4]. Полигональные слои границ промышленных объектов и населенных пунктов получены путем совмещения информации из открытого источника [3] и ручной оцифровки по космическим снимкам высокого пространственного разрешения в программе Google Earth.

В целях интегральной оценки степени освоения водосбора рассчитан комплексный показатель антропогенной нагрузки. В расчете общей нагрузки учтены такие показатели, как доля промышленных площадей и распаханых участков, доля селитебных зон и плотность населения, густота дорожной сети. По каждому из показателей проведено ранжирование диапазона полученных значений по 7 классам. Величина суммарной нагрузки определена путем вычисления среднего между всеми показателями с учетом веса каждого из них. Веса показателей назначены исходя из общих представлений о значимости этого вида нагрузки.

Анализ результатов

В основу пространственного обобщения степени хозяйственного освоения водосбора Ириклинского водохранилища положен бассейновый подход. Удельные площадные характеристики рассматриваемых показателей рассчитаны для 16 частных водосборов (таблица, рисунок).

Селитебная нагрузка (рисунок а) сосредоточена в основном в северной и юго-западной частях водосбора и приурочена к крупным городам и производственным центрам – г. Магнитогорск, г. Сибай, г. Учалы. Плотность населения варьируется в разных частях водосбора от 5 до 433 чел/кв.км. Доля селитебных зон в земельном фонде варьируется от 0,9 % в южной и юго-восточной частях водосбора (бассейны рр. Джуса, Суундук, Бол.Караганка) до 3-5 % в северной части водосбора и в бассейне р. Худолаз и достигает своего максимума на водосборе Магнитогорского водохранилища (19%).

Промышленная нагрузка (рисунок б) наиболее значима в бассейне Магнитогорского водохранилища (13%), а также на водосборах рр. Урляда и Худолаз (1,5-2 %), Верхнеуральского водохранилища и р.Таналык (0,5-1%) и связана, прежде всего, с месторождениями и обрабатывающими предприятиями металлургического комплекса: Магнитогорский, Учалинский, Сибайский, Бурибаевский, Баймакский промышленные узлы, а также скопления месторождений черных и цветных руд.

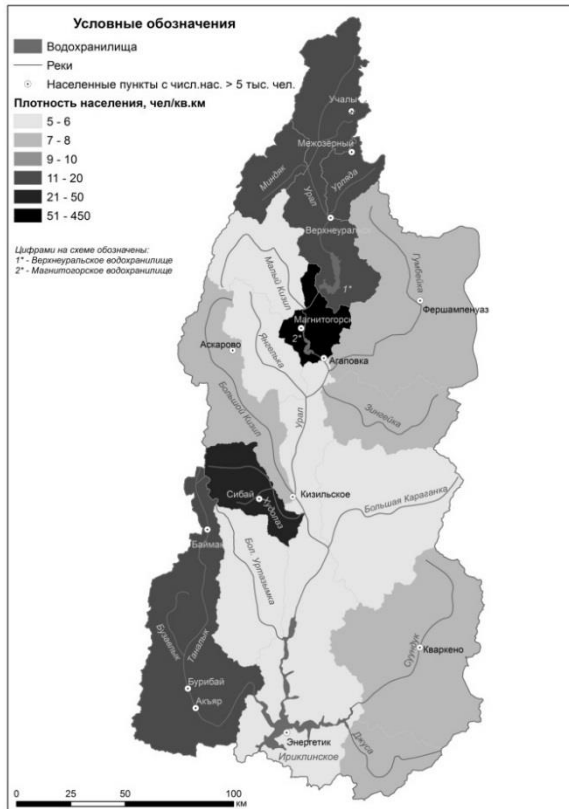
Развитие транспортной инфраструктуры приурочено к наиболее заселенным и промышленно освоенным частям водосбора. Отмечается повышенная густота дорожной сети в районах интенсивного промышленного освоения в верховьях бассейна, в районе г. Магнитогорск, а также в бассейне р. Худолаз.

Доля распаханых земель (рисунок в) наиболее высока в восточной и южной частях бассейна. На водосборах рр. Гумбейка, Зингейка, Суундук, Бол. Уртазымка и Таналык она составляет 30-40%, а в бассейнах рр. Бол. Караганка, Джуса и на частном водосборе Ириклинского водохранилища она максимальна и доходит почти до 50%. Напротив, северо-западная, горная и залесенная, часть бассейна менее освоена: доля распаханых земель здесь в среднем составляет около 20%, а в бассейне р. Миндяк – менее 1%.

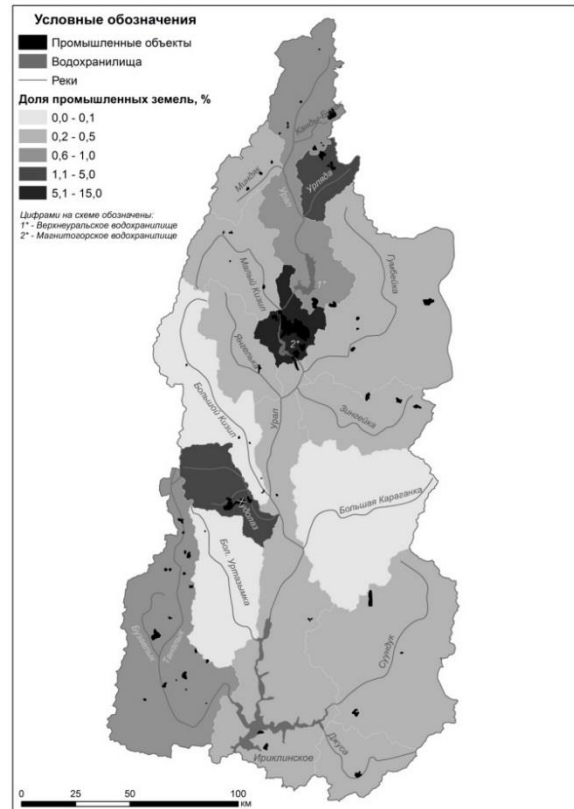
Характеристика водосбора Ириклинского водохранилища

№	Частный водосбор	Площадь водосбора, км кв.	Плотность населения, чел./км кв.	Доля селитебных территорий, %	Доля промышленных территорий, %	Густота ж/д., км/км кв.	Густота а/д, км/км кв.	Распаханность водосбора, %	Залуженность водосбора, %	Залесенность водосбора, %	Водный фонд, %
1	р. Миндяк	810	12.4	1.3	0.3	0.02	0.46	0.7	35	63	0.24
2	р. Урляда	601	12.5	2.9	1.5	0.03	0.84	29	55	7.0	0.53
3	Верхнеуральское водохранилище *	3006	19.8	2.9	0.7	0.02	0.86	14	46	29	3.3
4	р. Малый Кизил	1541	5.6	2.3	0.1	0.05	0.81	16	43	34	1.6
5	Магнитогорское водохранилище*	751	433	19	13	1.38	3.23	20	43	0.7	4.3
6	р. Гумбейка	4287	7.0	2.4	0.5	0.04	0.40	35	49	6.0	0.45
7	р. Зингейка	1646	6.6	1.2	0.3	0.01	0.20	38	49	3.4	0.19
8	р. Янгелька	1214	5.4	3.1	0.1	0.03	0.62	28	50	8.3	4.4
9	р. Большой Кизил	2086	6.4	2.7	0.1	0.02	0.26	13	47	32	0.18
10	р. Худолаз	1064	47.5	4.7	2.1	0.08	0.90	19	55	12	0.42
11	р. Бол. Караганка	3518	5.3	0.9	0.0	0.00	0.24	45	51	1.2	0.19
12	р. Бол. Уртазымка	1890	4.9	1.1	0.0	0.00	0.25	32	65	2.5	0.44
13	р. Джуса	1025	7.1	0.9	0.4	0.05	0.15	49	49	0.1	0.20
14	р. Суундук	4196	7.4	0.9	0.3	0.03	0.18	38	59	1.2	0.14
15	р. Таналык	3881	16.1	2.0	0.7	0.00	0.28	30	62	1.8	0.58
16	остальной водосбор Ириклинского водохранилища *	5186	6.0	0.9	0.2	0.01	0.21	42	49	0.1	5.1
Водосбор Ириклинского водохранилища		36702	19	2.2	0.6	0.05	0.43	32	52	9.2	1.5

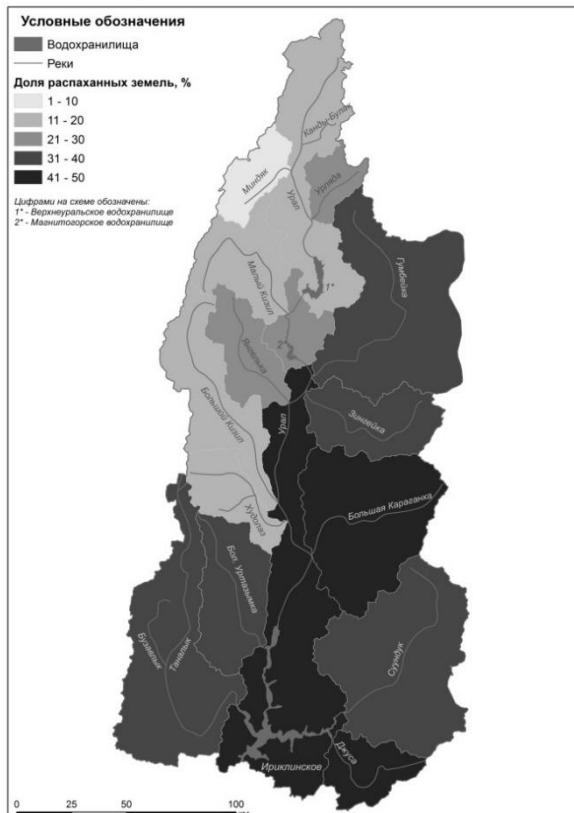
Примечание: * – частный водосбор водохранилища без учета водосборов вышележащих водохранилищ и притоков, рассматриваемых отдельно



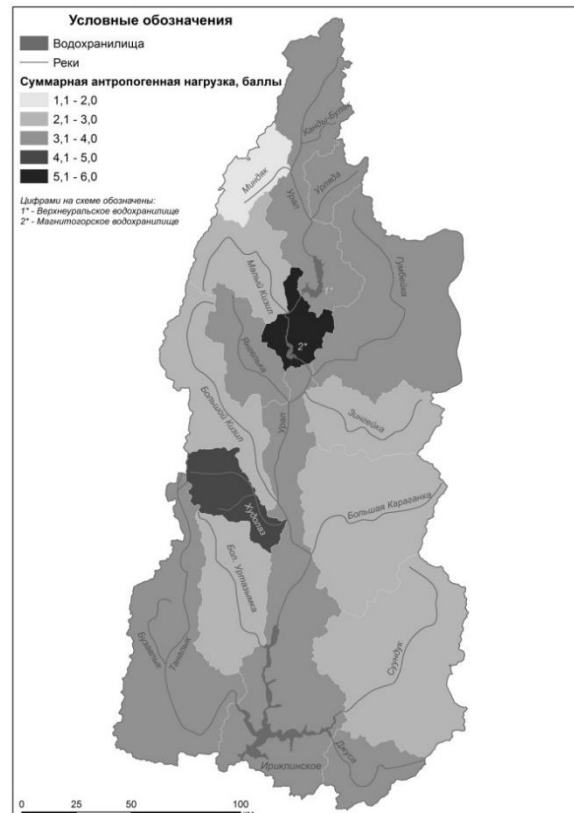
а



б



в



г

Антропогенная нагрузка на водосбор Ириклинского водохранилища:
 а – селитебная нагрузка, б – промышленная нагрузка, в – сельскохозяйственная нагрузка, г – комплексный показатель антропогенной нагрузки

Максимальная величина комплексного показателя антропогенной нагрузки (рисунок г) характерна для водосбора Магнитогорского водохранилища, являющегося безусловным лидером по показателям селитебной, промышленной и транспортной нагрузки на водосборе. Также выделяется бассейн р. Худолаз, где на относительно небольшой площади водосбора сосредоточена значимая промышленная и селитебная нагрузка.

Средний уровень нагрузки характерен для водосборов в северной и южной частях водосбора. Это обусловлено либо высокой интенсивностью одного из видов нагрузки (сельскохозяйственной – на водосборах р. Джуса и Ириклинского водохранилища, промышленной – в бассейне р. Урляда), либо сочетанием нескольких видов нагрузки средней интенсивности, как в бассейнах рр. Таналык, Гумбейка и Янгелька, Верхнеуральского водохранилища.

Выводы

С помощью методов дешифрирования и обработки ДДЗЗ, а также с использованием данных из открытых источников информации получены современные значения характеристик антропогенного освоения водосбора Ириклинского водохранилища. Выявлены пространственные закономерности распределения антропогенной нагрузки. Выделены участки повышенной напряженности по степени антропогенной трансформации, приуроченные к крупным промышленным центрам: г. Магнитогорск, г. Сибай, г. Учалы. Дана комплексная оценка суммарной антропогенной нагрузки.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 0173100011322000002 от 30.03.2022 г. на выполнение научно-исследовательской работы по теме: «Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)».

Библиографический список

1. Геопортал «Речные бассейны Европейской России». Разработка Института экологии и природопользования Казанского федерального университета. Электронный ресурс: <http://bassepr.kpfu.ru> (дата обращения 11.10.2022)
2. Портал для скачивания данных дистанционного зондирования Земли Earth Explorer USGS. Электронный адрес: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 01.10.2022)
3. Портал пространственных данных OpenStreetMap, распространяемых по лицензии Open Database License (ODbL). Электронный ресурс: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (дата обращения 11.10.2022)
4. Порт Университета Мэриленд Global Forest Change 2000–2021. Электронный ресурс: <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html> (дата обращения 29.09.2022)

5. *Congalton, R. G.* A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment*. 1991. Vol. 37. P. 35 – 46.
6. *Gautam V.K., Gaurav P.K., Murugan P., Annadurai M.* Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation // *Aquatic Procedia*. 2015. Vol. 4. P. 739 – 746.
7. *Hanqiu Xu.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* Volume 27, 2006 – Issue 14. Pages 3025-3033 <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
8. *Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., and Richardson, W.* (1969) Pre-processing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 97-131.
9. *Plourde L., Congalton R. G.* Sampling Method and Sample Placement: How Do They Affect the Accuracy of the Remotely Sensed Maps? // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2003. P. 289-297.
10. *Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W.* (1974) 'Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.' *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, vol. 1, p. 48-62. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>.
11. *Xu-kai Zhang, Xia Zhang, Qiong-qiong Lan, Baig M.H.A.* Automated detection of coastline using Landsat TM based on water index and edge detection methods // *Proc. Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, 2012. Vol. 978-1-4673-1947-8. P. 153-156.

В.Г. Калинин¹, И.А. Беляева²

vgkalinin@gmail.com, irinakoviazina@mail.ru

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

² Камское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов,
г. Пермь, Россия

ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Выполнен анализ результатов отбора грунтовых колонок на Камском водохранилище, полученных в ходе совместной с ИБВВ РАН им. И.Д. Папанина экспедиции 2022 г. Проведены измерения общей толщины донных отложений и визуальная оценка отобранных проб. Зафиксировано, что высота грунтовых колонок тесно связана с изменением гидродинамических условий участков водохранилища. По результатам гранулометрического и геохимического анализов проб донных отложений выявлено, что наиболее крупные частицы наносов оседают в зонах с повышенными скоростями течения проточных участков. Мелкие частицы осаждаются в зонах с пониженными скоростями течения. Концентрация тяжелых металлов в донных отложениях (меди, железа, марганца и титана) увеличивается от верховьев водохранилища к плотине Камской ГЭС.

Ключевые слова: донные отложения, водохранилища, грунтовые колонки, аккумуляция, тяжелые металлы, гранулометрический анализ.

V.G. Kalinin¹, I.A. Beliaeva²

vgkalinin@gmail.com, irinakoviazina@mail.ru

¹ Perm State University, Perm, Russia

² Kama Basin Water Administration of the Federal Agency for Water Resources, Perm, Russia

CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE KAMA RESERVOIR

The analysis of the results of the ground cores selection in the Kama Reservoir has been completed in the course of joint research with the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences I.D. Papanin of the 2022 expedition. Measurements of the total thickness of bottom sediments and a visual assessment of the selected samples were carried out. It has been recorded that the height of soil columns is closely related to changes in the hydrodynamic conditions of the reservoir's sections. According to the results of granulometric and geochemical analyzes of the bottom sediments samples it was revealed that the largest sediment particles settle in zones with increased flow velocities of the reservoir's sections. Small particles are deposited in zones with reduced flow velocities. The concentration of heavy metals in bottom sediments (copper, iron, manganese and titanium) increases from the upper parts of the reservoir to the dam of the Kama HPP.

Keywords: bottom sediments, reservoirs, ground cores, accumulation, heavy metals, granulometric analysis.

Введение

Согласно определению, представленному в РД [4], «донные отложения представляют собой донные наносы и твердые частицы, образовавшиеся и осевшие на дно в результате внутриводоемных физических, химических и биологических процессов, в которых участвуют вещества как естественного, так и антропогенного происхождения».

Донные отложения аккумулируются в понижениях рельефа дна и могут создавать неблагоприятные условия для судоходства. Кроме того, донные отложения абсорбируют загрязняющие вещества и при накоплении загрязнителей в большом количестве, они сами становятся вторичным источником загрязнения водоема. Скорость и объемы накопления наносов в ложе водохранилища зависят от периода существования водоема, почвенно-геологического строения берегов, морфометрических характеристик и гидродинамических условий его участков.

Для определения толщины и состава донных отложений применяется метод отбора грунтовых колонок, который широко использовался в разные годы на Камском водохранилище. Так, Л.А. Кузнецовой [2] была определена средняя по участкам Камского водохранилища толщина донных отложений – 0,20-0,25 м. Н.Н. Назаровым [3] в период ледостава 2005-2007 гг. на участке водохранилища от устьев рр. Иньвы и Косьвы до Пермского гидроузла отмечена толщина вторичных отложений 1,0 м и более. В 2016 г. сотрудниками ИБВВ РАН им. И.Д. Папанина проведена грунтовая съемка водохранилищ Волжско-Камского каскада, в результате которой установлены основные закономерности влияния гидродинамических процессов ветровых и стоковых течений на формирование донных осадков. Так, при повышенных скоростях течения происходит сортировка осадков по крупности, а при низких – создаются условия для накопления тонкодисперсных фракций с повышенными сорбционными свойствами. Выявлена тесная зависимость среднего диаметра частиц от средней скорости течения [1].

Материалы и методы исследования

В рамках совместной с ИБВВ РАН им. И.Д. Папанина экспедиции 2022 г. на научно-исследовательском судне «Академик Топчиев» выполнены исследования толщины, состава и пространственного распределения донных отложений. Отбор грунтовых колонок проводился гравитационной грунтовой трубкой ГОИН длиной 1,0 м в 13 точках по длине Камского водохранилища в различных по морфометрическим особенностям участках (рис. 1).

На основе визуальной оценки отобранных грунтовых колонок выделялись разнородные слои по цвету, плотности, структуре, наличию растительных остатков (рис. 2). Далее проводились измерения общей толщины слоя вторичных отложений и фотографирование. Определение гранулометрического состава выделяющихся слоев выполнен специалистами геологического факультета, а содержания тяжелых металлов – в лаборатории экологии и охраны природы ПГНИУ.

Анализ полученных результатов

Анализ отобранных грунтовых колонок по высоте и структуре выделяющихся слоев донных отложений показал, что наибольшие величины (0,7-1,1 м) слоев вторичных отложений встречаются вблизи старого русла р. Камы в широких озеровидных участках Камского водохранилища (точки № 4, 11, 12, 13). Наименьшие значения (0,4-0,5 м) высот отобранных колонок характерны для проточного участка водохранилища (точка № 1) и участков затопленной поймы (точки № 5, 6, 7, 8). В точке №10 пробу отобрать не удалось т.к. она находилась в старом затопленном русле р. Камы, которое по всей видимости сложено плотными песчанистыми отложениями.

Во всех пробах плотность наносов увеличивалась от верхнего слоя к нижнему. При визуальной оценке были выделены следующие цвета проб грунта: серые, темно-серые, серо-коричневые, коричневые и черные.

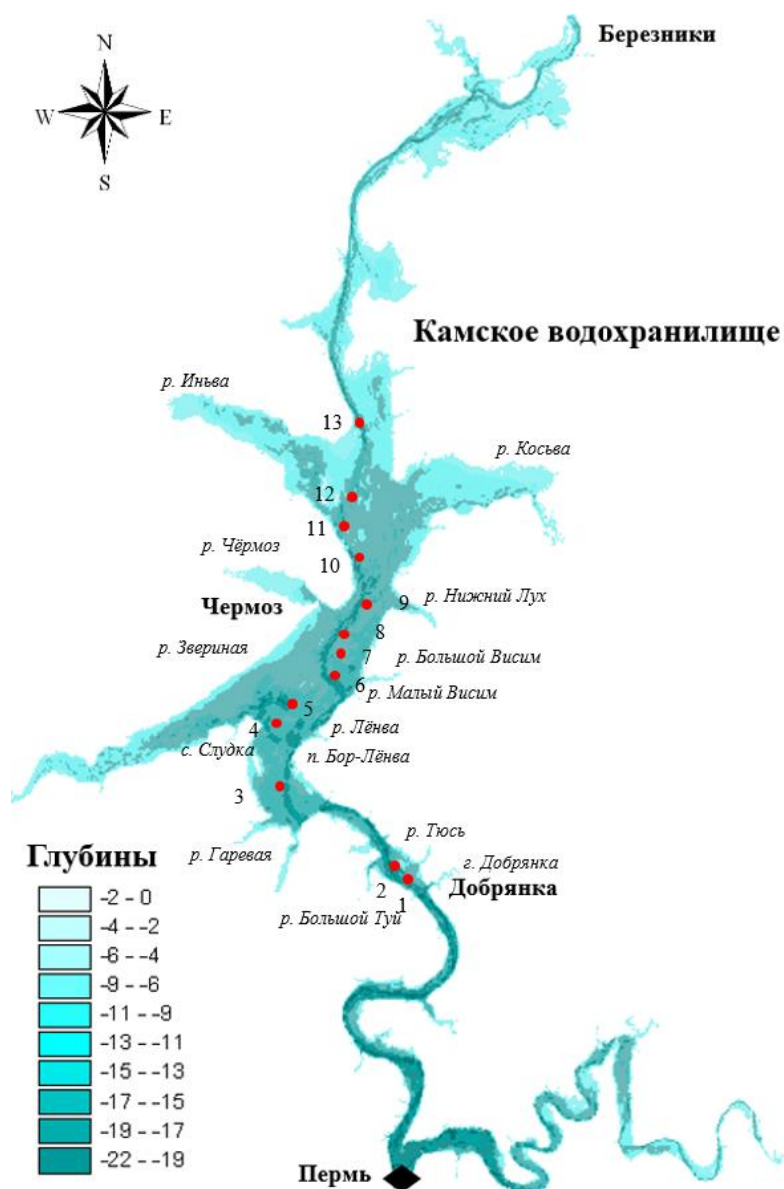


Рис. 1. Расположение точек отбора грунтовых колонок

По гранулометрическому составу донные отложения отличались в верхних и нижних слоях грунтовых колонок. В верхнем слое преобладали пыль (0,01-0,1 мм) 40-50%, иловые частицы (0,001-0,01 мм) 25-40%, песок (0,1-1,0 мм) 7-10%, глина (менее 0,001 мм) 3-8%. В нижних слоях наблюдалось увеличение содержания пыли до 70%, а в некоторых точках – песка до 8-13% и гравия (1,0-10,0 мм) 1-2%. Наибольшее содержание частиц пыли (> 60%) отмечено в точках с максимальной высотой отобранных колонок – точки № 4, 11, 12, 13. Крупные и тяжелые частицы гравия присутствовали на участках с повышенными скоростями течения – точки № 2, 3, а также в нижних горизонтах колонок точек № 12, 13.



Рис. 2. Фотографии отобранных грунтовых колонок

Значительное содержание песка в пробах, отобранных в точках №5 (56%) и №7 (15%), обусловлено близким местоположением этих точек к старому руслу р. Камы.

Анализ проб донных отложений на содержание тяжелых металлов показал, что преимущественное значение в отобранных образцах имели ионы меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и титана (Ti), что связано с повышенным природным фоном по этим компонентам. В пространственном распределении содержания тяжелых металлов отмечено увеличение их концентрации от верхних участков водохранилища к плотине Камской ГЭС.

Выводы

1. Высоты грунтовых колонок на Камском водохранилище зависят от гидродинамических условий участков водохранилища, обусловленных их морфо-

метрическими особенностями. Наибольшая высота (около 1,0 м) колонок зафиксирована в самой широкой части водоема – между Иньвенским и Косьвинским заливами, на участке с благоприятными условиями для процессов осадконакопления. Наименьшие значения высот отобранных колонок (менее 0,5 м) приурочены к вытянутым проточным участкам водохранилища и к зоне затопленной поймы. Плотность наносов во всех отобранных образцах увеличивается от верхнего слоя колонки к нижнему.

2. Гранулометрический состав проб грунта дна зависит от характеристик источника грунтообразующего материала, а также от гидродинамических условий разных частей водохранилища. Наиболее крупные частицы наносов оседают в зонах с повышенными скоростями течения проточных участков. Мелкие частицы осаждаются в зонах с пониженными скоростями течения.

3. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях – меди (Cu), железа (Fe), марганца (Mn) и титана (Ti) связано с повышенным природным фоном по этим компонентам. Концентрация тяжелых металлов увеличивается от верхних участков водохранилища к плотине Камской ГЭС.

Библиографический список

1. *Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерьшева Н.Г.* Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Тр. Ин-т биологии внутр. вод РАН им И.Д. Папанина. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.

2. *Кузнецова Л.А.* Формирование донных отложений равнинных водохранилищ (на примере Камского водохранилища). – дисс. на соискание ученой степени канд. географ. наук. Пермь, 1981. 224 с.

3. *Назаров Н.Н.* Особенности накопления и свойства иловых отложений на участках распространения гипсовых берегов Камского водохранилища // Географический вестник. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2008. №1. С. 77–87.

4. РД 52.24.309-2016 «Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши». – Росгидромет, ФГБУ «ГХИ». Ростов-на-Дону, 2016. 100 с.

И.Е. Курбатова^{1,2}, А.А. Афанасьева³ irenkurb@yandex.ru, afanaasyeva@mail.ru

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Россия

³Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия

ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ РИСКА ДЕГРАДАЦИИ РЕКИ КАЗАНКА И ЕЕ ПРИТОКОВ: ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Работа содержит предварительные результаты выявления факторов риска деградации речной сети на примере водосбора р. Казанка – притока Куйбышевского водохранилища. Факторы, влияющие на вероятность заиления и зарастания водотоков, определялись при учете рассчитанных значений морфометрических характеристик, степени противозерозионной устойчивости почв, а также доли площади водосбора, занятой пахотными землями. Составлены тематические карты водосбора Казанки с выделением водосборов основных притоков и проведена дифференциация этих водосборов по степени риска их деградации, основным фактором которой является антропогенный.

Ключевые слова: факторы риска, деградация рек, ГИС-технологии, спутниковые данные

I.E. Kurbatova^{1,2}, A.A. Afanasyeva³

irenkurb@yandex.ru afanaasyeva@mail.ru

¹ Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

³ State University of Land Use Planning (GUZ), Moscow, Russia

NATURAL AND ANTHROPOGENIC DEGRADATION RISK FACTORS FOR THE KAZANKA RIVER AND ITS TRIBUTARIES: ECOLOGY-GEOGRAPHICAL APPROACH

The study contains preliminary results of identifying river network degradation risk factors on the example of the Kazanka river basin. This river is a tributary of the Kuibyshev reservoir. The factors affecting the probability of siltation and overgrowth of watercourses were determined taking into account the calculated values of morphometric characteristics, the degree of soil anti-erosion stability, and the share of the catchment area occupied by arable land. Thematic maps of the Kazanka river basin were composed with the allocation of the main tributary catchments, and these catchments were differentiated according to the degree of risk of their degradation, the main factor of which is anthropogenic.

Keywords: factors of risk, river degradation, GIS technologies, satellite data.

Введение

Важной составляющей частью обеспечения природно-экологической устойчивости русловых водохранилищ является контроль и наблюдение за сохранением качества вод впадающих в них притоков, среди которых надо особо

выделить сообщество малых притоков. Оценка их влияния на водоем осложнена слабой изученностью – как правило, им не уделяется должное внимание, регулярные гидрологические и гидрохимические наблюдения отсутствуют или проводятся эпизодически. Малые реки в интенсивно освоенных хозяйственных регионах в той или иной степени находятся в зоне риска неблагоприятных антропогенных воздействий. Их состояние служит индикатором негативных тенденций, связанных с формированием экологических рисков более крупных речных систем и водохранилищ. Важность изучения малых рек, выявление причинно-следственных связей с принимающим их водотоком или водоемом отмечена многими учеными [1;3; 6]. Так, например, зоны наибольшей мутности воды, с высокой концентрацией сточных вод и химических веществ наблюдаются в местах впадения таких рек в Куйбышевское водохранилище с территории Республики Татарстан (РТ) [5]. Как отмечено в [2], реки Татарстана на современном этапе своего существования испытывают усиленное антропогенное давление, что приводит к ускорению процессов русловых переформирований, частичному пересыханию и даже полному исчезновению.

Материалы и методы исследования

Тесная связь стока малых рек с ландшафтом водосбора и его интенсивным освоением обусловила правомерность эколого-географического подхода к их изучению. В качестве района исследования была выбрана р. Казанка, которая в масштабах РТ может быть отнесена к средним рекам [4], но ее многочисленные притоки составляют семейство малых и очень малых рек. Ранее река являлась левым притоком Волги, в настоящее время впадает в Куйбышевское водохранилище, образовав залив в зоне подпора, а ее современное устье расположено в границах г. Казань. Река имеет 9 правобережных и 12 левобережных притоков первого порядка. Самые крупные притоки р. Кисьмень (71,2 км) и р. Шимяковка (77,7 км).

Целью данного исследования является проведение дифференциации водосборов притоков р. Казанки по степени влияния природных и антропогенных факторов на деградацию русловой сети.

Эколого-географический подход к исследованию водосборных территорий базируется на бассейновой концепции природопользования, картографическом и дистанционном методах изучения их природных особенностей и специфики хозяйственного использования, позволяет рассматривать основные факторы деградации речных русел как комплексно, так и покомпонентно.

Для решения поставленной задачи были использованы: навигационная программа SASPlanet для получения цифровой базовой топографической карты на территорию водосбора р. Казанка в масштабе 1:500 000, изданная в 2000 г., а также данные радиолокационной топографической съемки SRTM для создания цифровой модели рельефа (рис.1). Преобразование картографических и спутниковых данных осуществлялось в геоинформационной системе ArcGIS.

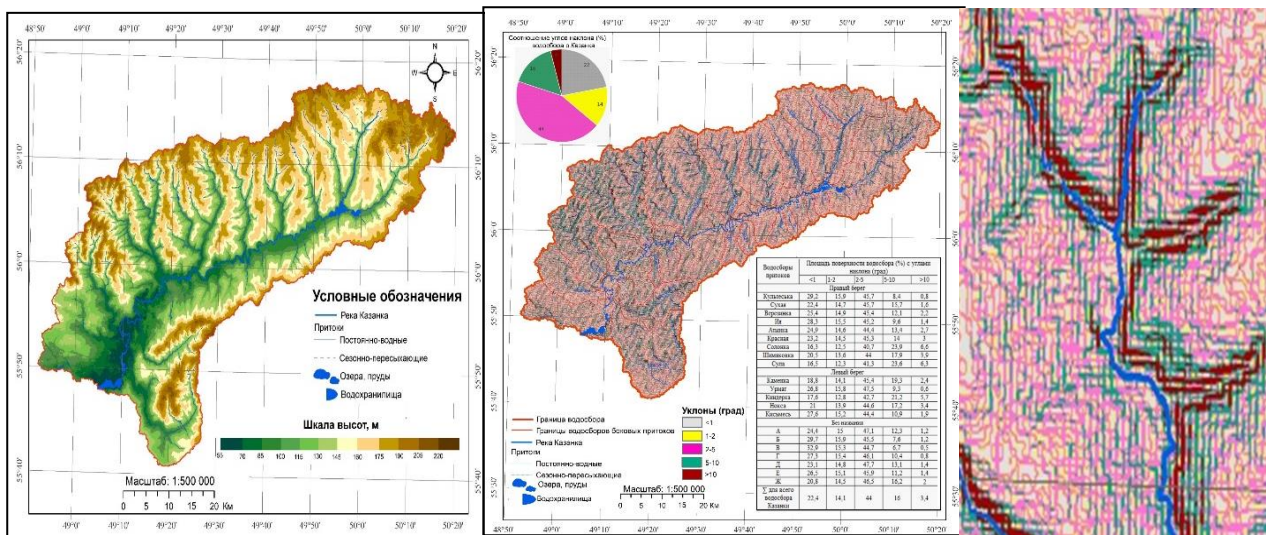


Рис. 1. Слева – цифровая модель рельефа; в центре – карта углов наклона; справа – фрагмент увеличенного изображения углов наклона водосбора р. Шимьяковки

Анализ рельефа играет особую роль в системных эколого-географических исследованиях экзогенных процессов деградации малых рек. Известно, что увеличение уклонов рек способствует увеличению скорости течения в руслах, как следствие, увеличению речного стока и способности к самоочищению. Чем выше скорость течения, тем выше степень устойчивости реки к деградации.

После проведения расчётов падения и уклонов притоков и главной реки (табл.), было установлено, что наименьшему риску зарастания и заиления, подвержены безымянные реки, обозначенные буквами Е и Г, также р.Урмат. Наибольшему риску подвержены притоки с небольшим полным падением высоты, такие как рр.Кисьмесь, Шимьяковка, Сула.

Результаты расчета полного падения малых притоков Казанки и распределения доли площади каждого водосбора по углам наклона

№	Название притоков р. Казанка	Длина реки, км	Высота истока, м	Высота устья м	Полное падение, м	Уклон, м/км	Доля площади водосбора (%) с разными углами наклона, град				
							<1	1-2	2-5	5-10	>10
Правобережные											
1	Культестька	14,6	178	114	64	4,4	29,2	16,0	45,7	8,34	0,8
2	Сухая	2,2	83	55	28	12,8	22,4	14,7	45,7	15,7	1,6
3	Верезинка	39,4	189	90	99	2,5	25,4	14,9	45,4	12,1	2,2
4	Ия	39,2	189	101	88	2,2	28,3	15,5	45,2	9,6	1,4
5	Атынка	54,6	169	84	85	1,6	24,9	14,6	44,4	13,4	2,7
6	Красная	45,1	181	79	102	2,3	23,2	14,5	45,3	14,0	3,0
7	Солонка	40,3	151	55	96	2,4	16,3	12,5	40,7	23,9	6,6
8	Шимьяковка	77,7	176	73	103	1,3	20,6	13,3	44,1	17,9	3,9

№	Название притоков р. Казанка	Длина реки, км	Высота истока, м	Высота устья, м	Полное падение, м	Уклон, м/км	Доля площади водосбора (%) с разными углами наклона, град				
							<1	1-2	2-5	5-10	>10
Правобережные											
9	Сула	67,5	179	67	112	1,7	16,5	12,3	41,3	23,6	6,3
Левобережные											
10	Каменка	5,8	110	55	55	9,6	18,8	14,1	45,4	19,3	2,4
11	Урмат	2,9	145	81	64	21,8	26,8	15,8	47,5	9,3	0,6
12	Киндерка	25,6	178	61	117	4,6	17,7	12,8	42,7	21,2	5,7
13	Нокса	54,7	198	65	133	2,4	21,0	13,9	44,6	17,2	3,4
14	Кисьмень	71,2	184	94	90	1,3	27,6	15,2	44,4	10,9	1,9
Без названия*											
15	А	3,9	156	93	63	17,6	24,4	15,0	47,1	12,3	1,3
16	Б	6,9	172	90	82	11,9	29,7	15,9	45,5	7,7	1,2
17	В	2,7	147	101	46	16,8	32,9	15,3	44,7	6,7	0,5
18	Г	1,8	134	91	43	23,6	27,3	15,4	46,1	10,5	0,8
19	Д	4,4	127	82	45	10,3	23,1	14,8	47,7	13,1	1,4
20	Е	1,8	156	88	68	37,4	26,6	15,1	45,9	11,2	1,4
21	Ж	6,7	100	75	25	3,7	20,8	14,5	46,5	16,2	2,0
	Казанка	158,3	180	55	125	0,7	22,4	14,1	44,0	16,0	3,4

*Притоки, не имеющие название на карте, обозначены буквами алфавита

Дифференциация водосборов малых притоков по выделению площадей с разными углами уклонов показала, что слабоэрозионные земли с уклоном <1° составляют чуть меньше трети от водосборов рр. Культеськи, Ия, Армат, Кисьмень, безымянных притоков Б, В, Г, Е. Территории с умеренной эрозией с уклонами 1-2° практически у всех водосборов находятся в диапазоне 12-16%. Самую большую долю площади (40-46%) составляют территории углами наклона 2-5°. Сильнее всего эрозионным процессам подвержены водосборы рр. Сулы, Солонки и Киндерки, у которых участки с углами наклона 5-10° и более 10° занимают около 30%. Легенда разработанной карты «Риски деградации притоков р. Казанки» (рис. 2, слева) содержит 4 градации типов почв по степени противозерозионной устойчивости и 4 градации риска заиления русел рек в зависимости от общего уклона. На карте видно, что большая часть водосборов боковых притоков Казанки находится в зонах относительно устойчивых и малоустойчивых типов почв с очень высоким риском деградации речных русел и лишь семь левобережных водосборов с общей площадью 116 км² соответствуют минимальному и умеренному риску деградации.

На карте «Типы землепользования» (рис. 2, справа) выделены земли поселений, транспорта, сельскохозяйственные, ненарушенные и слабонарушенные земли водосборов.

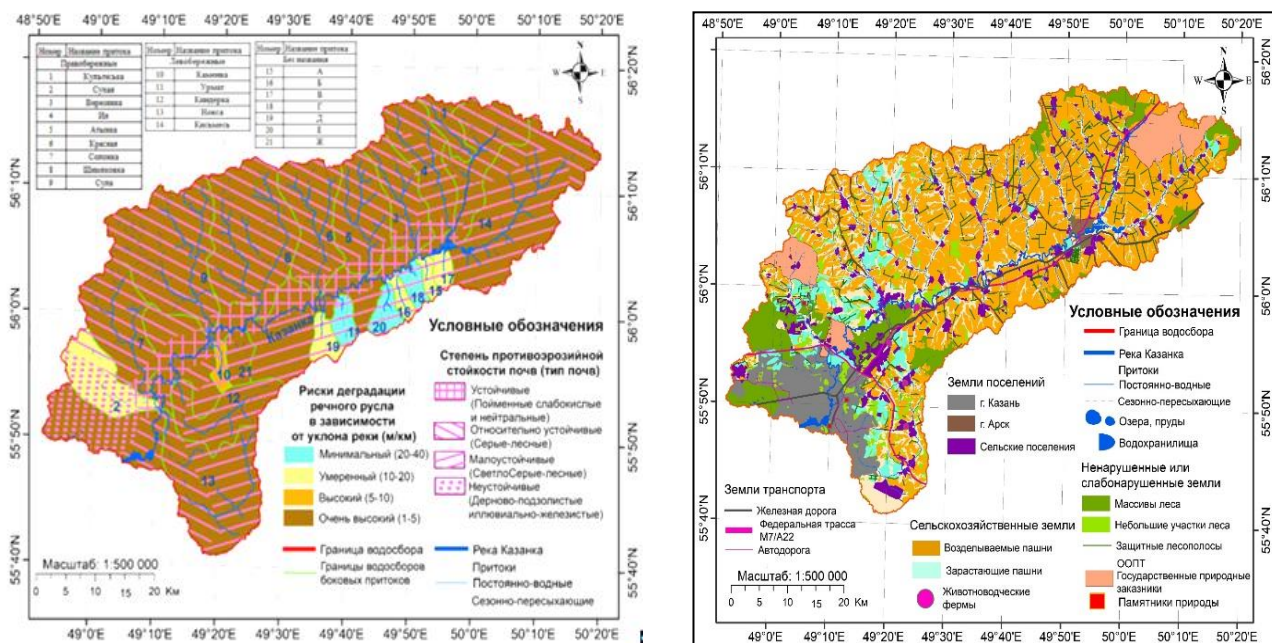


Рис.2. Картографическое отображение природных рисков и антропогенной нагрузки на водосборы малых рек бассейна р.Казанки:
 слева – карта «Риски деградации притоков р. Казанки»;
 справа – карта «Типы землепользования»

Самое большое негативное влияние на водосбор Казанки оказывают пашни, площадь которых составляет 1394 км² – 51% от водосбора. По частным водосборам эта величина меняется от 9% (р. Сухая) до 84% (р. Сула). Степень распаханности большинства водосборов находится в диапазоне 60-75%, что негативно сказывается на качестве речных вод в результате диффузного выноса загрязняющих веществ (удобрений) и приводит к заилению русел рек в результате смыва почвы с пашен в периоды половодья и дождей.

Анализ результатов

В процессе решения поставленных задач с помощью спутниковых снимков были выделены границы сельскохозяйственных угодий, не распознаваемых на топографических картах, проведен подсчет их площадей для водосборов Казанки и каждого ее притока, выполнена дифференциация водосборов по степени их занятости пахотными землями. На долю пашен приходится в среднем 51% от площади всего бассейна, что является одной из основных причин выноса взвесей в количестве от 130 до 410 т/км² в год [4] и служит главным фактором риска деградации рек. Точность результатов может быть повышена при переходе на более крупные масштабы топографических и почвенных карт, а также при организации наземных наблюдений на ключевых водосборах для выявления масштабов заиления и зарастания речных русел.

Выводы

Полученные результаты могут служить ориентиром при составлении программ по экологической реабилитации водных объектов водосбора р.Казанки, оздоровление которых также скажется и на улучшении состояния ее устья и Казанского залива Куйбышевского водохранилища.

Работа выполнена в рамках темы №. FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН

Библиографический список

1. *Алексеевский Н.И.* Малые реки / Россия: социально-экологические водные проблемы. Под научн. ред. А.М. Черняева. РосНИИВХ. Екатеринбург: Аэрокосмоэкология. 1999. С.176-213.
2. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2021 г». Казань. 2022. 414 с. https://eco.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3288791.pdf
3. *Малые реки России: Использование, регулирование, охрана, методы водохозяйственных расчетов.* Свердловск: Сред. Урал. кн. изд-во, 1988. 316 с.
4. *Мозжерин В.И., Ермолаев О.П., Мозжерин В.В.* Река Казанка и ее бассейн. Казань: Orange key, 2012. 280 с.
5. Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: Энциклопедия, 2012. 928 с.
6. *Ткачев Б.П., Булатов В.И.* Малые реки: современное состояние и экологические проблемы: Аналитический обзор / ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, 2002. 114 с. (Сер. Экология. Вып. 64).

И.Е. Курбатова^{1,2} irenkurb@yandex.ru, М.О. Мулин³ mulin_99@mail.ru

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Россия

³Государственный университет по землеустройству, г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОСБОРОВ БОКОВЫХ ПРИТОКОВ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ РОССОШЬ)

Представлены результаты последствий современной хозяйственной нагрузки на территорию водосбора с использованием дистанционных и картографических методов, а также ГИС-технологий. Исследования проводились на примере водосбора р. Россось – притока Цимлянского водохранилища. Разработана методика оценки объема выноса твердых взвесей и загрязняющих веществ, поступающих в речную сеть и приемный водоем с сельскохозяйственных угодий водосбора в условиях дефицита наземных наблюдений. Получены количественные значения выносов мелкозема со всей площади пашен при различных значениях предполагаемого модуля выноса твердых взвесей в период половодья.

Ключевые слова: водосбор, пашни, выносы твердых взвесей, ГИС-технологии.

I.E. Kurbatova^{1,2} irenkurb@yandex.ru, M.O. Mulin³ mulin_99@mail.ru

¹Water Problem Institute of RAS, Moscow, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

³State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

ASSESSING THE GEO-ECOLOGICAL CONDITION OF THE WATER- SHEDS OF THE TSIMLYAN RESERVOIR LATERAL TRIBUTARIES (BY THE EXAMPLE OF THE ROSSOSH RIVER BASIN)

The paper presents the results of the consequences of modern agricultural load on the catchment area using remote and cartographic methods, as well as GIS technologies. The study was carried out by the example of the Rossosh river catchment. This river is a tributary of the Tsimlyansk reservoir. A technique has been developed for estimating the volume of removal of solid suspensions and pollutants entering the river network and the receiving reservoir from the agricultural lands of the catchment area under conditions of a lack of ground-based observations. Quantitative values of the removal of fine earth from the entire area of arable land were obtained for various values of the expected module of the removal of solid suspensions during the flood period.

Keywords: catchment area, arable land, removal of solid suspensions, GIS technologies.

Введение

Трансформация устьевых зон боковых притоков крупных русловых водохранилищ юга России, созданных 50 лет назад и более, с начала XXI в. вступила в новую фазу активизации, спровоцированную длительным маловодным периодом в результате климатических изменений, а также интенсивной сельскохозяйственной нагрузки на прибрежные территории, вызывающей заиление, эвтрофирование и загрязнение акватории.

Цимлянское водохранилище является самым крупным водохранилищем в Южном федеральном округе, его основные проблемы на современном этапе развития заключаются в уменьшении запасов водных ресурсов, снижении уровня водоема и осушении мелководий, зарастании устьев рек [2; 5; 8].

В качестве объекта исследования выбрана р. Россошь, которая до создания Цимлянского водохранилища являлась притоком р. Цимлы, впадающей в Дон. После заполнения ложа водохранилища устья и часть русел этих рек оказались затоплены и на их месте образовался один из двух самых больших заливов в виде эстуария (рис. 1а). В настоящее время длина Россоши составляет 58 км, площадь водосбора – 792 км² (эти характеристики могут изменяться в зависимости от подпора водохранилища). Годовой объем стока составляет 12 млн м³ при 50%-ной обеспеченности [1]. Постоянные гидрологические и гидрохимические наблюдения на реке отсутствуют. Проведенная комплексная оценка качества воды малых притоков и их влияние на качество воды Цимлянского водохранилища показала, что Россошь – наиболее загрязненная из 24 притоков, ее воды классифицируются как грязные [7]. В этой ситуации оценить состояние Россоши, ее водосбора и их совместное влияние на водохранилище можно при рассмотрении всего комплекса взаимосвязей единой геосистемы «водосбор-водоток-приемный водоем».

Материалы и методы исследования

Эколого-географический подход должен быть направлен как на весь комплекс взаимодействующих в системе компонентов, так на изменения отдельных компонентов. Реализация такого подхода в условиях дефицита наземных наблюдений выполняется на основе совместного использования спутниковой информации, картографических материалов, экспертных оценок и ГИС-технологий для синтеза, преобразования, интерпретации информации и получения новых данных об экологическом состоянии системы.

Изучение сложившейся к 2020 г. структуры землепользования на водосборе р. Россошь проводилось с помощью совместного анализа картографических и дистанционных материалов, по результатам которого была составлена серия тематических карт, наглядно отражавших специфику природных особенностей и хозяйственного освоения территории. В качестве базовой геоинформационной системы была использована программа ArcGIS Pro. В первую очередь было проведено обновление топографической карты по спутниковой информации 2022 г. для выделения границ водосбора (рис. 1а), сохранившихся природных комплексов и установления основных типов землепользования (рис. 1б). Установлено, что в 2020 г. на долю древесной растительности, включая лесополосы, приходится всего около 10 км² (1,3 %), а площадь всех пахотных земель составила 79 % от площади водосбора. Такой интенсивный характер антропогенной нагрузки определил направление исследований. По результатам дешифрирования спутниковых изображений была выполнена дифференциация пашен по степени востребованности и подверженности эрозионным процессам – выделены возделываемые пашни с очагами водной эрозии (48%) и без эрозии (26%),

зарастающие необрабатываемые (5%). Основные экологические проблемы водосбора р. Россошь заключатся в развитии водных и ветровых эрозионных процессов, росте оврагов, заилении, загрязнении и деградации малых водотоков.

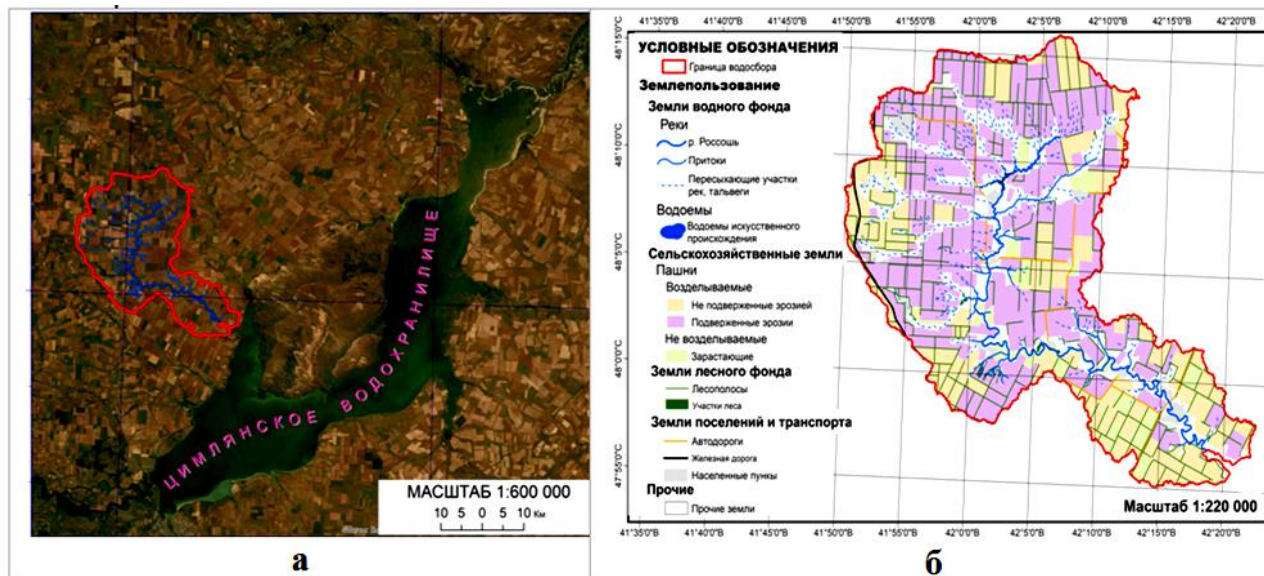


Рис. 1. Водосбор р. Россошь: а – местоположение водосбора по данным ИСЗ Landsat-8 (из архива Google Earth Pro Copernicus, 2020).

Красным цветом – граница водосбора;

б – карта «Современное землепользование территории водосбора» (пояснения в тексте)

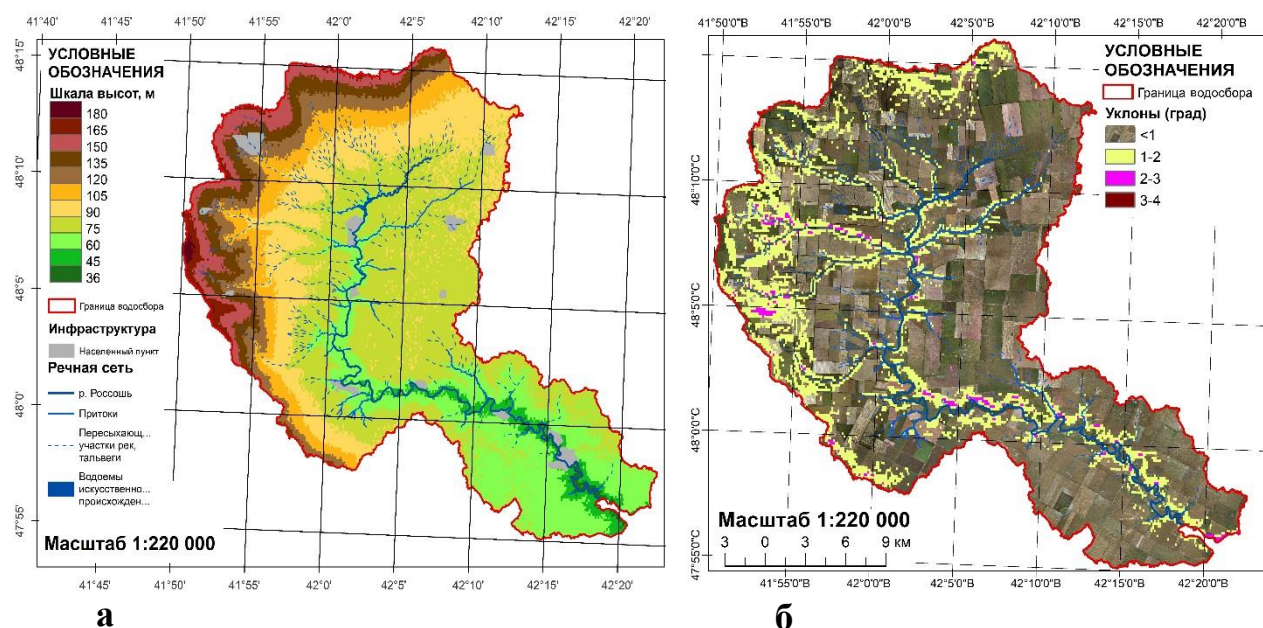
Площадь обрабатываемых пашен (без зарастающих) составляет 586 км². На основании обобщенных экспертных оценок [4], можно в первом приближении получить представление о выносе загрязняющих веществ с пахотных угодий водосбора (табл. 1).

Таблица 1

Количество загрязняющих биогенных веществ, выносимых талыми снеговыми и дождевыми водами водосбора Россоши по [4]

<i>Пашни обрабатываемые</i>	<i>Фосфор общий</i>	<i>Азот общий</i>
Вынос с 1 га/кг	0,5 – 1,0	3,0 – 5,0
Вынос с 58 600 га (тонны)	29,3 – 58,6	175,8 – 293

Интенсивность эрозионных процессов зависит от углов наклона местности. Поэтому на следующем этапе исследований разработана карта, отражающая особенности рельефа водосбора Россоши, полученная по фрагменту цифровой модели SRTM (англ. Shuttle Radar Topography Mission) с шагом 15 м от уреза водной поверхности залива водохранилища (рис.2а) и карта углов наклона (рис. 2б), необходимая для дальнейшего анализа интенсивности смыва почвенного мелкозема с сельскохозяйственных угодий талыми снеговыми и дождевыми водами. Анализ цифровой модели рельефа, карт углов наклона и современного землепользования показал, что 83% территории – участки с уклонами <1°, из них 79 % заняты пашнями. Оставшиеся 17 % имеют уклоны 1-2° и 2-4° (склоны оврагов и балок, обрывистые берега).



**Рис. 2. а – цифровая модель поверхности водосбора р. Россошь;
б- карта уклонов водосбора, совмещенная с космическим снимком ИСЗ Landsat-8**

По оценкам [1], на половодье приходится 70-90 % годового стока рек данного региона. Пашни, склоны которых не превышают 1°, по экспертным оценкам разных авторов [3: 6] характеризуются потенциальным модулем смыва почвы от 1 до 3, максимум до 5 т/га в год. Такой разброс значений определяется степенью смываемости почв, величиной и интенсивностью талого стока, дождевых вод, видами агроценозов и другими факторами. В таблице 2 приведены расчеты количества твердых взвесей, выносимых в Цимлянское водохранилище с водосбора в половодье для разных значений модулей смыва.

Таблица 2

**Количество твердых взвесей, смываемых с пашен водосбора Россоши
в половодье при разных значениях модулей смыва**

Предполагаемый модуль стока, т/га в год	Количество твердых взвесей, выносимых с пахотных земель площадью 58600 га				
	Со всей площади пашен в тыс. тонн /год	Общее количество выносимых взвесей в половодье, тыс. тонн при доле стока 70-90%	Поступление в транзитные долины и водохранилище, (доля в % от выносимых взвесей в половодье), тыс. тонн		
			20%	50%	70%
1	58,6	41,0- 52,7	8,2 -17,1	20,5-26,4	28,7-36,9
2	117,2	82,0-105,5	16,4-21,1	41,0-52,8	57,4-73,9
3	175,8	123,1-158,2	24,6-31,6	61,6-79,1	86,2-110,7
4	234,4	164,1-211,0	32,8-42,2	82,1-105,5	114,9-142,7
5	293,0	205,1-263,7	41,0-52,7	102,5-131,9	143,0-184,4

В результате водной эрозии с сельскохозяйственных полей вместе с твердыми взвешенными частицами выносятся значительное количество фосфора. Если учесть, что на одну тонну наносов в период весеннего половодья, по данным [4], приходится от 0,1 до 1,0 кг фосфора в зависимости от типа почвы, то

можно определить, какое количество фосфора перераспределяется по территории водосбора и выносится в водохранилище.

Анализ результатов

Расчеты показали, что в первом приближении все пахотные земли водосбора в половодье могут терять от 41 до 263 тыс. тонн вносимых твердых взвесей, из которых в водные объекты поступают от 8 до 184 тыс. т. Сокращение разброса полученных оценок возможно при повышении точности используемых экспертных оценок и получении дополнительных сведений о климатических условиях, объеме вносимых удобрений и пр. или организации постоянных наблюдений за твердым и жидким стоком.

Выводы

Полученные данные позволяют оценить потенциальные потери почвы от эрозии для всей территории водосбора и установить количество выносимых твердых взвесей в водные объекты, в том числе и в водохранилище, Разработанная методика может быть использована для других водных объектов и их водосборов.

Работа выполнена в рамках государственного задания темы № FMWZ-2022-0002 ИВП РАН Министерства науки и высшего образования РФ

Библиографический список

1. *Косолапов А.Е., Никоноров В.А., Лагута М.И.* Моделирование водохозяйственных балансов. Новочеркасск, 2008. 230 с.
2. *Курбатова И.Е.* Использование космической информации для мониторинга природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. №3. С. 217-227.
3. *Мальцев К. А., Ермолаев О. П.* Потенциальные эрозионные потери почвы на пахотных землях Европейской части России // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1502–1512.
4. *Нежуховский Р.А.* Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 230 с.
5. *Никаноров А.М., Хоружая Т.А.* Внутриводоемные процессы в крупных водохранилищах юга России: загрязнение, эвтрофирование, токсификация // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 35-43.
6. *Ткачев Б.П., Булатов В.И.* Малые реки: современное состояние и экологические проблемы: Аналитический обзор / ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, 2002. 114 с. (Сер. Экология. Вып. 64).
7. *Шаврак Е.И.* Малые реки как источник загрязнения воды в Цимлянском водохранилище // Вода, химия и экология. 2011. №3. С 9-13.
8. *Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А.* Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248-254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.

Д.В. Магрицкий, magdima@yandex.ru
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА Р.УРАЛА: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

На основе всей имеющейся в открытом доступе информации оценены параметры водохозяйственной деятельности в российской части бассейна р.Урала, как в целом, так и по отдельным субъектам водохозяйственного комплекса, территориям, рекам и годам. Выяснено количество, местоположение, параметры водохранилищ и прудов в бассейне, величина и структура их влияния на речной сток. Установлено, что с 1950-х гг. водопользование многократно выросло и достигло максимальных показателей в конце 1980-х гг. В 1990-е годы водопотребление уменьшилось, стабилизировалось в 2000-2012 гг. и снова начало снижаться после 2012 г. Главные водопользователи – это промышленные предприятия и тепловые электростанции.

Ключевые слова: водохозяйственный комплекс, водохранилище, водопользование, сбросы сточных вод, многолетняя динамика

D.V. Magritsky, magdima@yandex.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

WATER MANAGEMENT ACTIVITIES IN THE RUSSIAN PART OF THE URAL RIVER BASIN: PAST AND PRESENT

Based on all the information available in the public domain, the parameters of water management activity in the Russian part of the Ural River basin are estimated, both in general and for individual subjects of the water management complex, territories, rivers and years. The number, location, parameters of reservoirs and ponds in the basin, the value and structure of their influence on river water resources have been determined. It is established that since the 1950s water use has increased many times and reached its maximum in the late 1980s. In the 1990s, water use decreased, stabilized in 2000-2012 and began to decrease again after 2012. The main water users are industrial enterprises and thermal power plants.

Keywords. water management complex, reservoir, water use, wastewater discharge, long-term dynamics

Введение

Водохозяйственный комплекс в бассейне р.Урала, оказывающий прямое воздействие на сток, его внутригодовую и многолетнюю динамику, представлен многочисленными водохранилищами и прудами, водозаборами и водосбросами, каналами, подающими воду на орошаемые земли. Его влияние на речной сток в бассейне по-прежнему мало изучена. Раньше этому препятствовала закрытость данных по водопользованию, в настоящее время – быстрое и неоднозначное изменение показателей водопользования, начиная с 1990-х гг., низкое качество и

ограниченность данных водохозяйственного учета. В проведенном в 2022 г. исследовании автор, во-первых, постарался собрать всю имеющуюся информацию о масштабах, отраслевой структуре и географии водопользования в бассейне р.Урала, начиная с 30-х гг. XX в.; во-вторых, получил новые оценки показателей водохозяйственной деятельности в российской части бассейна, как в целом, так и по отдельным субъектам водохозяйственного комплекса, территориям, рекам, годам и многолетним периодам.

Материалы и методы исследования

Ежегодные данные по водопользованию получены из специальных гидрологических справочников [2; 8], ежегодных федеральных и региональных (по Республике Башкортостан, Оренбургской и Челябинской областям) информационных бюллетеней и докладов «О состоянии и об охране окружающей среды», публикуемых в электронном виде и размещаемых в открытом доступе с середины 1990-х гг., из научных публикаций [1; 3] и из [10]. Часть обобщенных сведений и расчетных оценок взято из опубликованных работ [3-4; 6-7; 9; 11-12]. Построены многочисленные диаграммы, выполнен статистический, отраслевой и пространственный анализ. С целью определения реальной ситуации с прудами и водохранилищами в бассейне р.Урал изучены снимки со спутников IRS и Landsat 7,8, карты Государственного ГИС Центра, сведения по водному фонду Оренбургской и Челябинской областей, опубликованные материалы [5; 10] и разные интернет-издания; создана ГИС «Водохранилища и пруды в бассейне р.Урала» (рис. 1).

Анализ результатов

Основное влияние водохранилищ и прудов на сток фиксируется с наполнением в 1956–1966 гг. Ириклинского водохранилища – самого большого в бассейне. В целом, основная часть водоемов создавалась с середины 1950-х по середину 1970-х гг.; в российский период строительство развернулось в Башкортостане. Согласно данным автора, в бассейне насчитывается около 3130 водохранилищ и прудов (рис. 1). В их числе самое большое Ириклинское, еще 5 больших водохранилищ, 22 средних, около 220 малых водоемов и почти 2880 исключительно малых.

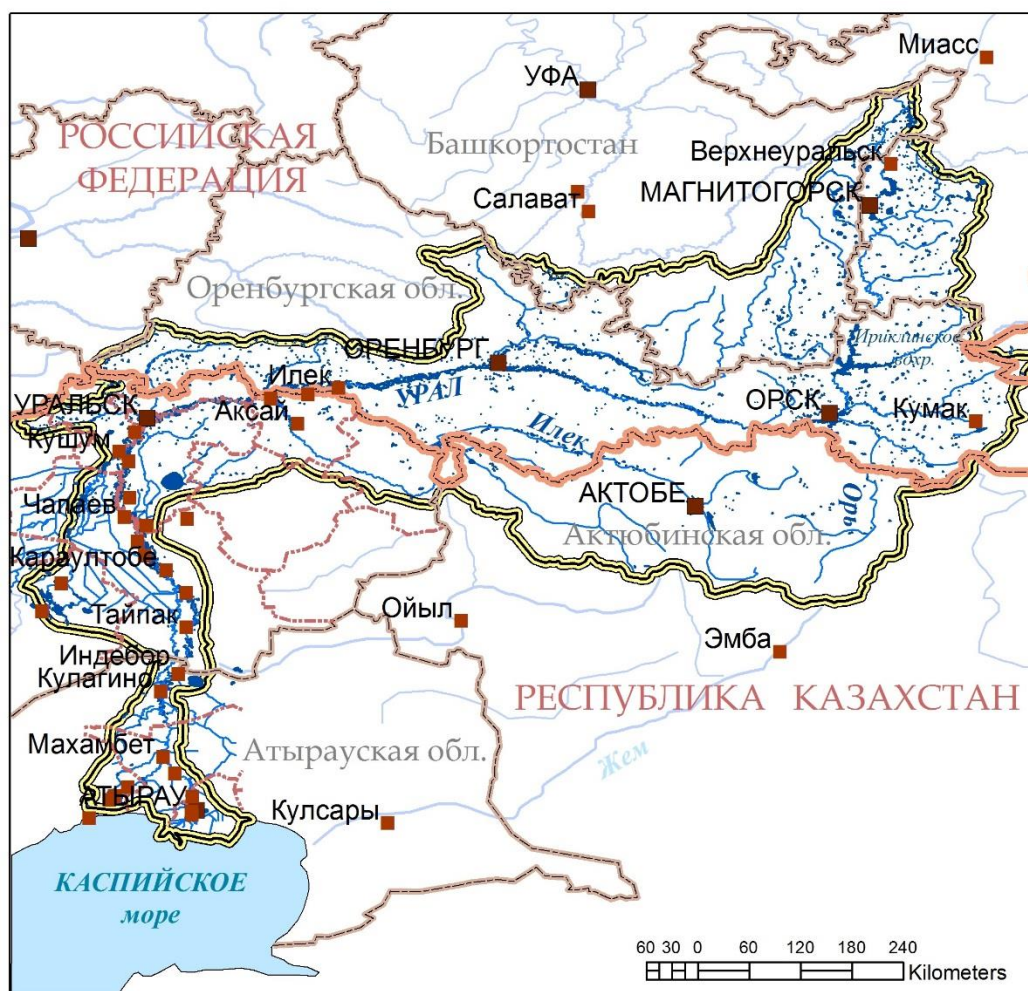


Рис. 1. Водохранилища, пруды и каналы в бассейне р.Урала

Суммарная площадь и полный объем всех водохранилищ и прудов соответственно $\sim 1086 \text{ км}^2$ и $\sim 6357 \text{ млн м}^3$. 28% водохранилищ и прудов – в Казахстане. Создание водохранилищ сопровождалось, во-первых, единовременным и безвозвратным забором вод на заполнение мертвого объема (это $\sim 0,9 \text{ км}^3$ к 2021 г.). Во-вторых, это ежегодные потери на испарение. Для Ириклинского водохранилища они равны $0,20 \text{ км}^3/\text{год}$. Со всех водохранилищ испаряется $\sim 0,89 \text{ км}^3/\text{год}$ (36,5% в Казахстане) [12]. Причем в маловодные годы величина потерь увеличивается в 1,5 раз и выше [10; 11]. Часть этих потерь компенсируется за счет снижения потерь в нижнем бьефе водохранилищ. В-третьих, водохранилища осуществляют многолетнее и внутригодовое регулирование стока. Все водохранилища и пруды способны аккумулировать почти половину естественного стока реки Урал. Менее всего зарегулирован сток р.Сакмары ($\sim 3\%$), больше всего рр. Гумбейка, Большая Караганка, Таналык, Орь, Черная, Илек, Утва, Чаган, Барбастау (от 40 до 70% и выше). Реальные максимальные величины межгодового перераспределения годового стока в бассейне Урала варьировали в диапазоне $\pm 0,55 \text{ км}^3/\text{год}$. Внутригодовое регулирование один из главных факторов нарушения естественного внутригодового водного режима главной реки и ряда ее притоков. Так, волна половодья на реке Урал лишь выражена ниже впадения р.Сакмары.

Развитие промышленности в бассейне р.Урала связано с запуском Магнитогорского металлургического комбината в 1932–1934 гг. Промышленно-коммунальное водопотребление начало значимо влиять на меженный (зимний) сток верхнего Урала после 1948–1949 г. Заметный рост водопотребления в бассейне Урала произошел во второй половине 1950-х – в 1960-е гг. Своих пиковых значений водопотребление достигло в 1980-х гг.: суммарный водозабор, водоотведение и безвозвратное водопотребление составили 4,7, 2,3 и 2,4 км³/год (рис. 2а). Почти 90% забиралось из поверхностных водоисточников. Больше всего забранной и использованной воды расходовалось на производственные нужды (58,5%) и орошение (25,5%). На сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение, коммунально-бытовые нужды уходило 8,3 и 7,5%. В РСФСР осуществлялось 60% общего водозабора, тогда как 76% безвозвратного водопотребления приходилось на Казахстан.

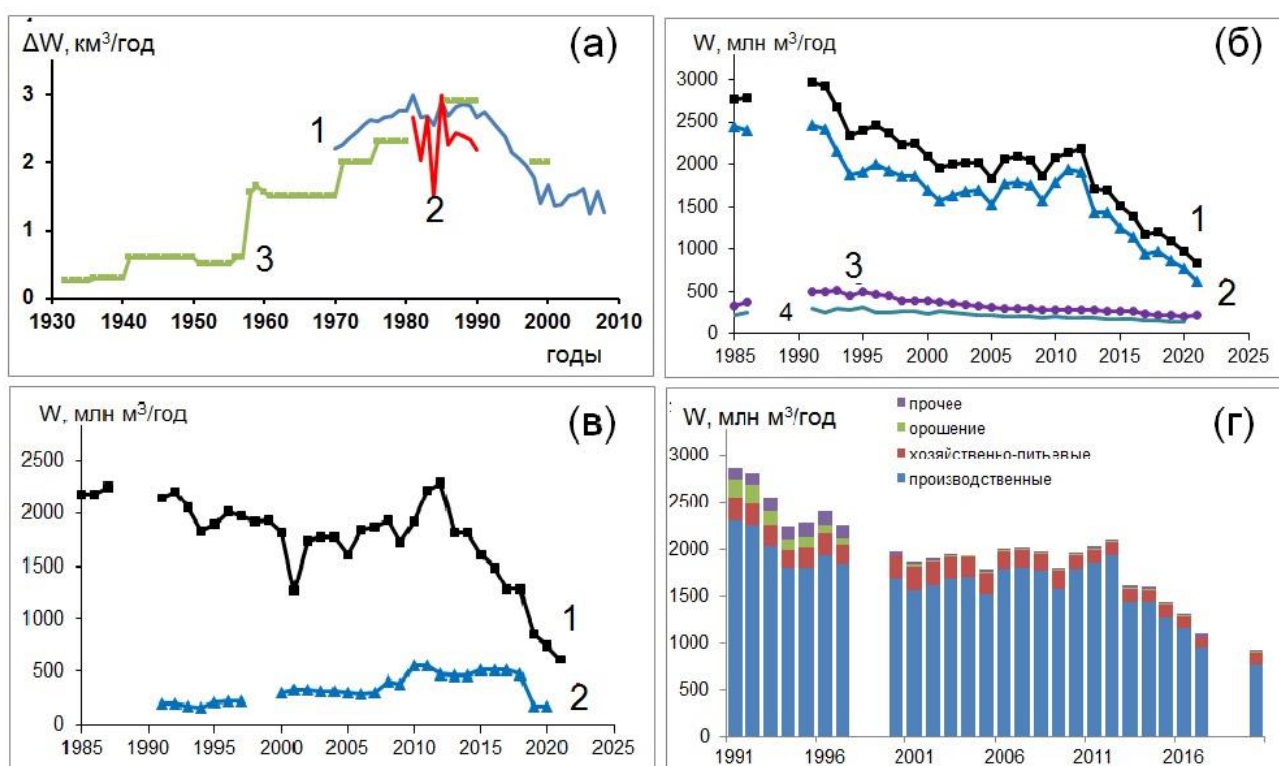


Рис. 2. Динамика водопотребления в бассейне р.Урала:

- а* – безвозвратного водопотребления, с учетом потерь на испарение с водохранилищ (1 – [3], 2 – [2], 3 – [11]); *б* – забора воды в российской части (1 – суммарного, в т.ч. забора речных вод (2), подземных вод (3) и с ущербом для речного стока (4)); *в* – сброса сточных вод (РФ, 1 – всего в поверхностные водные объекты, 2 – загрязненных вод); *г* – использования забранной воды по отраслям

С 1992-1993 гг. водопотребление стало быстро уменьшаться. В российской части бассейна общий забор воды снизился за 1991–2000 гг. (больше всего из поверхностных водных объектов) – с 2,97 до 2,1 км³/год (рис. 2б). Основной объем забираемой воды приходился на Оренбургскую обл. (87%), доли Челябинской обл. и Республики Башкортостан были равны 11 и 2% [1]. Вообще в Башкортостане >96% водозабора приходится на бассейн р.Камы и лишь 3–3,5% на

бассейн р.Урала. Это соотношение было довольно устойчивым вплоть по настоящее время. Почти такие же показатели и по водосбросам. В Оренбургской обл. доля бассейна р.Урала максимальная – от 95,9 до 97,4% в разные периоды (до 2020 г.). В Челябинской обл. на долю водопотребителей в бассейне Урала приходится 18,5–24% от общего забора воды; остальное приходится на водные ресурсы бассейнов рр. Волги и Оби.

С 2000 по 2012 гг. показатели водопотребления стабилизировались. После началось опять их резкое падение, главным образом, за счет снижения водозабора в Оренбургской обл., включая главного водопотребителя – Ириклинскую ГРЭС. Это произошло по причине необходимости экономии свежей воды в условиях увеличения платы, продолжающегося перехода на замкнутые циклы водобеспечения и водосберегающие технологии, из-за снижения промышленного и сельскохозяйственного производства, сокращения орошаемых земель, снижение численности населения, а также из-за уменьшения количества отчитывающихся водопользователей.

В итоге, если в 2001–2005 гг. водозабор общий, из поверхностных и подземных источников был равен в российской части бассейна 1965, 1622 и 343 млн м³/год, то в 2016–2021 гг. – 1112, 886 и 230 млн м³/год. Удалось получить оценки водозабора и соответственно его влияния на сток не только в целом, но и по участкам. Относительная доля промышленного водопользования увеличилась до 86–90%, хотя в абсолютных величинах объемы значительно уменьшились, особенно в Оренбургской обл. В Челябинской обл. они в последние 3 года, наоборот, выросли. На хозяйственно-питьевое водоснабжение приходилось в 2001–2005 гг. 12%, а в последнее пятилетие 11% (рис. 2г). В Башкортостане заметно увеличились объемы использования вод на прочие нужды – с 7 до 20%. Суммарное водоотведение в российской части бассейна составило в 2015–2021 гг. 1126 млн м³, тогда как в первой половине 2000-х гг. было 1633 млн м³ (рис. 2в). Однако, объемы загрязненных сточных вод увеличились с 321 до 367 млн м³, но особенно значительно в 2010–2018 гг. – до 505 млн м³. Получены и систематизированы сведения об основных водопотребителях и их размещении в бассейне р.Урала. Современное антропогенное уменьшение годового стока Урала, вероятнее всего, не превышает 1,60 км³/год, или около 15% естественного стока на границе зон формирования и расходования стока, главным образом за счет забора воды в Кушумский канал [6]. Нельзя не отметить некоторую «странность» официальных данных. Согласно им, разность суммарного водозабора и сброса использованных вод в поверхностные водные объекты в период с 2011 по 2018 гг. стала отрицательной – минус 100 млн м³/год.

Выводы

Крайне неравномерное распределение водных ресурсов в бассейне р.Урала по территории и во времени, превалирование сезонов и территорий с дефицитом воды, значительная хозяйственная освоенность и заселенность основной территории потребовали реализации в XX в. целого комплекса водохозяйственных мероприятий. В итоге, к настоящему времени в бассейне трансграничной реки

насчитывается около 3130 водохранилищ и прудов (72% из них в России), которые ежегодно регулируют речной сток и расходуют воду на испарение (~0,89 км³/год). Не менее масштабно на сток и подземные воды влияет водопотребление. Установлено, что с 1950-х гг. водопользование многократно выросло и достигло максимальных показателей в конце 1980-х гг., когда суммарный водозабор и водоотведение в бассейне составили 4,7 и 2,3 км³/год (2/3 в России). В 1990-е годы водопотребление уменьшилось. Его показатели стабилизировались в 2000-2012 годы (забор и сбросы в России были 1,97 и 1,63 км³/год) и снова начало снижаться после 2012 г. (1,11 и 1,13 км³/год). Главные водопользователи – это промышленные предприятия и тепловые электростанции, прежде всего Ириклинская ГРЭС. Удалось получить оценки водозабора и соответственно его влияния на сток не только в целом, но и по участкам, выше и ниже предприятий.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы (I.10, ЦИТИС 121051400038-1) и Научной школы МГУ – Климат и окружающая среда

Библиографический список

1. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург: «АКВА-ПРЕСС», 2000. 536 с.
2. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. Л., СПб., М., 1981–2021.
3. *Дёмин А.П.* Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки. Автореф. дис. ... докт. геогр. н. М., 2011. 51 с.
4. *Григорьев О.М.* Оценка влияния промышленно-коммунального водопотребления на сток р. Урал // Труды ГГИ. 1981. Вып. 273. С. 45–61.
5. Каталог «Водоохранилища СССР». М.: Союзводпроект, 1988. 276 с.
6. *Магрицкий Д.В., Кенжебаева А.Ж.* Закономерности, характеристики и причины изменчивости годового и сезонного стока воды рек в бассейне р. Урал // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). 2017. № 3. С. 39-61.
7. *Прохорова Н.Б., Косолапов А.Е.* Современный водохозяйственный баланс реки Урал на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 2. С. 4–20.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 12. Вып. 2. Л., 1970. 512 с.
9. *Родионов В.З.* Влияние хозяйственной деятельности на сток р.Урала // Труды ГГИ. 1977. Вып. 239. С. 109–122.
10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Урал (Российская часть). Отчет в 6 томах. Екатеринбург: ФГУП «РосНИИВХ», 2013.
11. *Шикломанов И.А.* Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 302 с.
12. *Magritsky D., Kenzhebaeva A., Yumina N., Efimova L., Moreido V.* Climatic changes and water management in the Ural River basin and their impact on the river water regime // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 817. Pp. 1-10.

А.В. Малаев

*Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
г. Челябинск, Россия*

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ ВОДОСБОРОВ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ И ОЗЕР ЗАУРАЛЬЯ НА ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Рассмотрен вопрос влияния качественных характеристик водосборной площади озер на их современное геоэкологическое состояние. Антропогенное преобразование водосборов увеличивает природный вынос биогенных веществ в акваторию водоемов. Взаимовлияние данных факторов, для исследованных озер, существенным образом определяет их современный трофический статус. Трофический статус определяет уровень хозяйственной деятельности на водосборах и акватории озер.

Ключевые слова: ландшафт, водосборная площадь, малое озеро, эвтрофирование, геоэкологическое состояние.

A.V. Malaev

South Ural State University of Humanities and Education, Chelyabinsk, Russia

INFLUENCE OF CHANGING LANDSCAPE STRUKTURA OF WATER COLLECTING IN SMALL RESERVOIRS AND LAKES BEHIND THE URAL TO THEIR GEOLOGICAL STATE

The influence of gualitative characteristic of lake water collecting area to their modern geological nature state is considered. Anthropogenetic changing of water collecting increases natural removing of biogenetic substances into the harbour area of water basins. Interaction of these factors for researched lakes defines their trophic status by the essential way. Trophic status defines the level of economic activity for area of lakes.

Keywords: landscape, water collecting area, small lake, eutrophication, geological state.

Введение

На протяжении многих десятилетий XX – начала XXI вв. ученые неоднократно научно обосновывали тесную взаимосвязь в системе «водосбор-озеро» влияющую на современное геоэкологическое состояние водоемов [1]. Тот факт, что в большинстве случаев данная взаимосвязь усиливается с уменьшением площади озера, и наоборот снижается с возрастанием площади водоема, позволяет нам уже на протяжении многих лет обращать научно-практическое внимание на малые озера Зауралья (Челябинская область в административно-территориальном аспекте). В отсутствии средних и крупных водохранилищ на территории Челябинской области, малые озера Зауралья выступают в качестве источников как хозяйственно-бытового, так и питьевого назначения, в виду отсутствия на терри-

тории отдельных муниципалитетов централизованного водообеспечения (например, такие сельскохозяйственные районы Челябинской области как – Октябрьский, Еткульский, Красноармейский и Троицкий муниципальный район). Изменения структуры водосборных площадей, а именно увеличение антропогенно преобразованных ландшафтов (сельскохозяйственные поля, пастбища) на водосборных площадях малых озер Зауралья приводят к ускорению естественной скорости зарастания, заиления, обмеления. В конечном итоге часть таких водоемов на долгие годы или даже десятилетия теряют свое уникальное хозяйственное значение, и как следствие на исследуемой территории возможно усиление аридизации.

Материалы и методы исследования

В качестве природных объектов нашего научно-практического исследования уже более чем на протяжении двадцати лет выступают малые, в большинстве случаев бессточные водоемы юго-восточного, восточного и северо-восточного Зауралья (Большой Селиткуль, Малый Селиткуль, Жестки, Шишкино, Буташ, Подовинное, Медиак, Лебяжье, Большеникольское, Мыркай, Большой и Малый Сарыкуль и др.) [2]. Современная геоэкологическая характеристика исследуемых озер Зауралья является результатом комплексного изучения систем «водосбор-озеро», и непосредственно включала в себя –изучение структуры водосборных площадей, ее влияние на условия формирования поверхностного стока, кроме того проводились гидрологические, гидробиологические и гидрохимические исследования. Взятие проб осуществлялось с помощью батометра Молчанова. Процедура подготовки проб проводилась согласно методикам проведения комплексного химического анализа. В общей сложности в период 2016-2022 гг. было отобрано более 80 проб воды на 10 водоемах, количественный химический анализ воды на определение ионов HCO_3^- , SO_4^- , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , перманганатной окисляемости, O_2 и CO_2 . Результаты полученных данных интерпретируются с применением метода синтеза и анализа, а также статистической обработкой.

За счет определения эколого-санитарных (трофа–сапробиологических) показателей: биопродуктивности, кислородного показателя, уровня прозрачности воды, концентрации органического вещества в воде и осадках и др., дана комплексная оценка современного геоэкологического состояния исследованных водоемов.

Анализ результатов

Комплексные изучения систем «водосбор-озеро» проведены за последние годы более чем на 10 малых бессточных озерах Зауралья. В целом можно отметить тот факт, что в большинстве случаев, полученные данные о современной структуре водосборных площадей малых озер незначительно отличаются друг от друга, что связано в первую очередь с хозяйственной специализацией муниципальных районов (Октябрьский, Еткульский, Красноармейский и Троицкий муниципальный район являются сельскохозяйственными). Следовательно, на водосборных площадях всех водоемов расположены сельскохозяйственные угодья

(пашня, сенокос), животноводческие фермы в санитарно-защитных зонах, садовые участки и неорганизованные места отдыха людей.

Установлено, что на водосборах озер доминирующая роль принадлежит автоморфным урочищам водораздельных равнин и урочищам склоновых поверхностей, с которых под влиянием процессов химического и физического выветривания интенсивно происходит вынос химических элементов – биогенных веществ (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Робщ) и легкорастворимых хлоридов и сульфатов. Последние, в свою очередь, прямо пропорционально влияют на повышение степени минерализации и концентрации органических веществ в озерах с малым условным водообменом, которыми и являются изучаемые водоемы Зауралья.

Доля естественного почвенно-растительного покрова на водосборах всех озер не превышает 25% (30% – 2018 г.), остальные участки рельефа находятся под антропогенной нагрузкой длительное время, с преобладанием сельскохозяйственных земель и пастбищ, селитебной территории и садовых участков. В целом можно отметить, что для большинства исследованных водосборов характерна природно-антропогенная структура, с приобретенными новыми свойствами (полиструктура), а для отдельных водосборов характерна только природно-территориальная структура (моноструктура).

Для первой группы характерна полиструктура, состоящая из нескольких территориальных комплексов, как природных, так и антропогенных. Для второй группы характерна моноструктура, в большинстве случаев состоящая из единого территориального комплекса, где основной тип структуры ландшафта – природный (заболоченная территория, лесополоса, залежные земли).

При сопоставлении выделенных типов структур с данными о выносе общего фосфора ($\text{P}_{\text{общ}}$) нами выявлены различия в выносе биогенных веществ, в зависимости от структуры водосбора. Сопоставление проводилось по данным о содержании общего фосфора в среднем за период наблюдений. Определено, что в случае, когда водосбор представляет собой полиструктуру, например сельскохозяйственные угодья, животноводческие фермы, водопой скота (для всех водосборов 65-75%) вынос общего фосфора в водоемы максимальный (0,075-0,09 мг/л). Если водосбор моноструктурный, например, с болотным массивом или лесополосой, вынос общего фосфора становится значительно меньше (0,035 мг/л) за счет мозаичной структуры водосбора.

Таким образом, природно-антропогенная структура с приобретенными новыми свойствами (полиструктура) исследованных водосборов, находящаяся под антропогенным воздействием (с учетом агрономического фона сельскохозяйственных угодий и состояния поверхностного слоя почвы), обуславливают больший вынос фосфора, чем моноструктурные, не подверженные антропогенному изменению. Следовательно, дальнейшее антропогенное изменение водосборных площадей малых озер приведёт к увеличению величины поверхностного стока, как следствие выносу биогенных и других загрязняющих веществ. Высокие концентрации фосфора и азота, усиливают зарастание водоемов, влияют на их геоэкологическое состояние.

В основе современной оценки геоэкологического состояния водоемов мы опирались на традиционные гидрохимические и гидробиологические показатели

по комплексной оценочной шкале [2]. За основу взяты следующие гидрохимические показатели:

1) прозрачность воды – в исследованных озерах большую часть безледного периода колеблется в пределах 1,0-1,45 м. Расчет индекса трофического статуса Карлсона (TSI) по прозрачности воды для большинства малых озер показал среднегодовую величину TSI=59, что соответствует типичной эвтрофии. В весенний и летний периоды 2022 года, был отмечен период массового развития фитопланктона, и, следовательно, уровень продуктивности водоемов повышается (TSI=70-72);

2) растворенный кислород, окисляемость, биологическое потребление кислорода (БПК₅) – среднегодовая величина насыщения верхних слоев воды кислородом составляет 102-151%, что говорит о колебании трофического статуса в пределах от мезотрофного до политрофного.

3) концентрация биогенных элементов – средняя концентрация растворенных фосфатов колеблется в пределах от 0,035 до 0,90 мг/л. Основными источниками поступления общего фосфора в водные массы озер служат донные отложения, а также поступление с водосборных площадей. Содержание в воде нитратов в пределах 0,01 до 0,89 мг/л, что соответствует эвтрофным условиям, концентрация нитритов от 0,003 до 0,006, что соответствует мезотрофным условиям.

4) концентрация хлорофилла – для большинства водоемов данный показатель составляет TSI от 47 до 68. При данных значениях, все исследованные озера можно отнести к водоемам эвтрофного типа.

Анализ данных водных масс по гидрохимии исследованных озер восточного Зауралья позволяет сделать вывод, что большая часть водоемов в настоящее время являются эвтрофными.

Гидробиологические показатели характеризуются следующим:

1) Фитопланктон – среднесезонная биомасса по данному показателю составила 9,9 г/м³, что соответствует эвтрофным водоемам.

Большинство видов альгофлоры озер принадлежат к космополитам – которые встречаются в водоемах разного трофического статуса. Значительный вклад в фитопланктонных сообществах принимают сине-зеленые водоросли, такие как *Lyngbya contorta* и *Merismopedia tenuissima*, и зеленые водоросли *Ankistrodesmus pseudomirabilis* var. *spiralis*, *Oocystis submarina*, *Crucigenia quadrata*. Данные виды водорослей являются индикаторами сапробности, которые свидетельствуют о прогрессировании процесса эвтрофикации.

2) Зоопланктон – видовой состав зоопланктона типичен для большинства озер лесостепного Зауралья. В его основе нами встречено 14 видов, что свидетельствует о высоком индексе видового разнообразия. Повсеместно отмечено, что в большинстве озер преобладают мелкие размерные группы, что также является признаком эвтрофирования.

Максимальная численность характерна для пресноводных видов, таких как, *Eudiaptomus graciloides* L. и *Cyclops vicinis* V.A, *Chydorus sphaericus*, *Daphnia cucullata*. Средняя биомасса зоопланктона за период летних полевых наблюдений составила 7,3 г/м³, что также нам позволяет отнести водоемы к эвтрофному типу.

3) Высшие водные растения – большинство распространенных видов макрофитов в исследованных водоемах Зауралья относятся к группе индикаторов мезотрофных и эвтрофных озер – это рогоз узколистный, рдест блестящий, рдест стеблеобъемлющий, ряска маленькая, водокрас обыкновенный, тростник обыкновенный. Преобладание данной высшей водной растительности позволяет нам отнести водоемы к эвтрофным.

4) Ихтиомасса рыб – величины ихтиомассы в среднем составляют от 104,0 до 117,0 кг/га, что в общем, соответствуют пограничному уровню между стадиями мезотрофии и эвтрофии, а преобладающими видами являются карась и ротан.

Выводы

По результатам выполненных научно-практических исследований нами получена современная геоэкологическая оценка, основанная на комплексном подходе изучения взаимосвязи в системе «вододосбо-озеро». Несомненно, влияние ландшафтной структуры водосборных площадей на вынос биогенных и загрязняющих веществ в акваторию исследованных водоемов значительно, при наличии природно-антропогенной структуры, и наоборот уменьшается при природно-территориальной структуре. От современной ландшафтной структуры во многом и будет зависеть современный трофический статус водоемов. Полученные актуальные взаимосвязанные показатели трофического статуса озер свидетельствуют о том, что исследованные водоемы Зауралья можно отнести к типичным эвтрофным, что свидетельствует о высоком уровне биологической продуктивности в последние годы.

Для всех водоемов, изучаемых нами на протяжении последних лет, уровень трофии изменяется только в худшую сторону, а именно в сторону повышения их эвтрофности. На всех водоемах активно наблюдаются процессы зарастания, заиления, что в первую очередь оказывает отрицательное влияние на геоэкологическое состояние водных экосистем и как следствие наносит серьезный социально-экономический ущерб, где в конечном итоге затраты на дополнительные локальные водохозяйственные, медико-санитарные мероприятия могут быть весьма значительными как для местного населения, так и для администрации муниципальных районов Челябинской области.

Библиографический список

1. Экология зарастающего озера и проблема его восстановления. С-Пб.: Наука, 1999. 222 с.
2. Малаев А.В. Влияние естественных и антропогенных факторов на зарастание малых бессточных озер восточного Зауралья: автореф. дисс... канд. геогр. наук: 25.00.36. СПб., 2009. 0 с.
3. Оксюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 62-76.

И.Д. Рыбкина, О.В. Ловцкая, М.С. Губарев, Е.С. Орлова
irina.rybkina@mail.ru

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия

ВОДОТОКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ БЕССТОЧНОЙ ОБЛАСТИ ОБИ И ИРТЫША: СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Бессточная область Обь-Иртышского междуречья характеризуется отсутствием крупных водотоков при наличии большого количества озёр и малых рек. На данной территории важной задачей является сохранение и аккумуляция стока для последующего использования в сельскохозяйственных и рекреационных целях. Для этого были созданы гидротехнические сооружения, которые в настоящее время нуждаются в реконструкции и капитальном ремонте.

Ключевые слова: ГТС, бессточная область, водный режим рек, степная зона, водохранилище, пруд, мелиорация.

I.D. Rybkina, O.V. Lovtskaya, M.S. Gubarev, E.S. Orlova
irina.rybkina@mail.ru

Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, Russia

WATERCOURSES AND HYDRAULIC STRUCTURES OF THE DRAINLESS REGION OF THE OB AND IRTYSH: STATE AND POSSIBILITIES OF USE

The drainless region of the Ob-Irtysh interfluve is characterized by the absence of large rivers, in the presence of a large number of lakes and small streams. And so, an important task is the conservation and accumulation of runoff for subsequent use for agricultural and recreational purposes. For this, hydraulic structures were created, which currently need of reconstruction and overhaul.

Keywords: hydraulic engineering structures, drainless area, water regime of rivers, steppe zone, reservoir, pond, land reclamation.

Бессточная область как объект исследования. Регион исследования расположен в междуречье рр. Оби и Иртыша на площади около 190 тыс. км² в пределах трёх субъектов Российской Федерации – Алтайского края, Новосибирской и Омской областей. Характерной особенностью территории является отсутствие крупных водотоков при наличии большого количества озёр и малых рек.

Климат исследуемой территории имеет черты умеренной континентальности. Средние температуры января и июля соответственно составляют -16,5°C и +21,2°C (по данным метеостанции г. Славгород). Абсолютный максимум температур достигает +40,2°C, абсолютный минимум: -47,2°C. Нормой количества выпадающих осадков за период наблюдений 1981-2010 гг. является 319 мм, из которых большая часть (57%) выпадает в летние и осенние месяцы (с июня по октябрь) [1].

По данным Верхне-Обского БВУ в бессточной области протекает 1082 реки или 1,3% их общего количества в бассейнах Верхней и Средней Оби. Реки протяженностью более 100 км представлены в таблице 1. Поверхностные водные ресурсы используются ограниченно, главным образом в целях сельскохозяйственного водоснабжения. Основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения являются подземные воды.

Таблица 1

**Реки бессточной области Обь-Иртышского междуречья
протяженностью более 100 км [2]**

Река	Протяженность, км	Площадь водосбора, км ²
Карасук	531	11300
Бурла	489	12800
Кулунда	412	12400
Чулым	392	17900
Каргат	387	7210
Баган	364	10700
Кучук	121	1020
Сума	111	3650

На территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья в разное время действовало свыше 40 гидрологических постов, включая озерные, и гидрометеорологических станций. В настоящее время гидрологическими наблюдениями охвачены рр.Кулунда, Бурла, Кучук, Карасук, Каргат, Чулым, всего восемь гидрологических постов. На озерах продолжают функционировать 11 гидростов. Реки и озера изучены недостаточно, пиком освоенности этой территории являются годы поднятия целинных и залежных земель. Именно к этому времени относится максимальный охват исследованиями расположенных здесь водных объектов.

Для водного режима всех рек междуречья характерно резко выраженное весеннее половодье, на которое приходится от 65 до 100% объема годового стока, и низкий сток в остальную часть года. Дождевых паводков почти не бывает. Продолжительность половодья на основных реках около 1,5-2 месяцев, в затяжные вёсны – до 3 месяцев. На малых реках и временных водотоках половодье кратковременно – 10- 20 дней.

После окончания весеннего половодья небольшой сток сохраняется лишь на реках древних ложбин стока – Бурле, Кулунде и их притоках, а также на некоторых водотоках, стекающих с Приобского плато, – Суетке, Кучуке и др. Большинство же водотоков с площадью водосбора менее 500 км² после весеннего половодья пересыхают; в южной части Барабинской низменности летом нередко прекращают сток вследствие пересыхания даже относительно большие реки – Карасук, Баган.

Минимальные летние уровни большей частью наблюдаются в июле-августе (рр. Карасук, Суетка, Кучук), а на более значительных реках (Чулыме, Бурле, Кулунде), с относительно затяжным спадом половодья, – в сентябре-октябре. Большинство водотоков в летнее время представляет собой отдельные плесы, разобщенные пересохшими перекатными участками. Колебания уровня воды в

таких плесах в течение лета-осени отражают изменение запасов воды, накопленных в период весеннего половодья, и наличие грунтового питания. Реки, протекающие через ряд озер (рр. Чулым, Баган, Бурла и др.), в половодье аккумулируют в последних значительную часть своего стока. В летне-осенний сезон водность таких рек (ниже выхода из озера) резко уменьшается, иногда до нулевых значений. Так, р. Бурла в низовье пересыхает с сентября, а в некоторые годы даже с июля.

Период летне-осенней межени на реках обычно продолжается до 100-150 дней. Осадки теплой части года в основном расходуются на испарение. Заметное увеличение водности рек могут дать только сильные ливни или обложные дожди, выпадающие подряд в течение нескольких дней. На реках Бурла, Кулунда, Кучук дождевые паводки бывают примерно один раз в 10 лет.

В декабре-январе большинство водотоков промерзает на перекатах (рр. Чулым, Баган, Карасук, Бурла, Суетка, Кучук и др.). Имеющиеся данные наблюдений характеризуют преимущественно режим уровня в глубоких плесах, в которых вода обычно сохраняется в течение всей зимы. Перед началом ледостава на большей части рек происходит небольшой спад уровня воды – на 10-20 см. Минимальные его значения за зиму (чаще всего, несколько превышающие летние минимумы) наблюдаются в ноябре-декабре, после чего уровень постепенно возрастает на 0,5-0,8 м, в отдельные зимы на 1,0-1,5 м, до февраля-марта. Многолетняя амплитуда колебаний уровня воды на реках рассматриваемой бессточной области составляет от 2 до 6 м. На ее величину большое влияние оказывают озера и искусственные водоемы.

В таких условиях крайне важной задачей является сохранение и аккумуляция стока для последующего использования в сельскохозяйственных целях, в том числе для орошения. Особенно ценен накопленный ресурс для полива сельскохозяйственных культур и купания в летние месяцы.

В период экспедиционных исследований 2021-2022 гг. нами обследовано 23 гидротехнических сооружения (ГТС) преимущественно мелиоративного назначения. Это, конечно, не большая доля всех ГТС (например, по данным за 2003 г. в Алтайском крае количество ГТС составляло 2500 [3], однако по состоянию на 01.01.2022 г. в 20 районах края числится 215 ГТС [4]), но характеристика их состояния и перспектив использования отражает общую ситуацию в регионе исследования.

Изучение водотоков, водохранилищ и прудов проводилось в трех аспектах гидрологическом, гидрохимическом и гидробиологическом. Полученные результаты будут опубликованы в ближайшее время в журнале «Юг России: экология, экономика» в первом номере за 2023 год.

**Паспорт объекта: пруд северо-западнее с. Титовка на р. (БЕЗ НАЗВАНИЯ)
в логу Жерновский (на реке находится семь прудов, пять из них наполнены)**

Район	Егорьевский Алтайского края
Год ввода в эксплуатацию	нет данных
Координаты пруда (WGS 84)	51°57'48.82" с.ш., 81°6'9.63" в.д.
Наименование гидротехнического сооружения	Пруд на логу Жерновский с. Титовка V=0.94 млн м ³ . H=3.0 м L=350 м
Форма собственности	Негосударственная
Наименование собственника ГТС	ТОО «Октябрь»
Назначение(использование)	Водопой скота, рыбалка
Состав, компоновка сооружений напорного фронта	Земляная плотина (по гребню дорога). Трубчатый водосброс с бетонным башенным оголовком с переливом по всему периметру, совмещенный с донным водовыпуском
Длина сооружений напорного фронта	350 м
Объем водохранилища	0.94 млн м ³ .
Площадь водохранилища	596 тыс. м ²
Длина плотины	350 м*
Ширина плотины по гребню	5 м*
Состояние ГТС	Удовлетворительное. Пруд наполнен. Донный водослив не работает. Перелив воды при наполнении пруда происходит через верхнюю стенку водосброса

*- рассчитано по космоснимку

Что касается технического состояния и возможностей использования, то следует отметить, что большинство из ГТС (порядка 60%) находится в хорошем или удовлетворительном состоянии, им требуется только текущий ремонт. Например, все обследованные крупные водохранилища имеют собственников и обслуживаются ими, поддерживаясь в работоспособном и технически безопасном состоянии.

Однако порядка у 40% обследованных ГТС, в основном прудов, состояние неудовлетворительное, у них не работают водосливы и переливы, частично разрушены дамбы, законсервированы или разграблены насосные станции, заилены водосбросы, имеются промоины тела плотины. Общее состояние таких ГТС свидетельствует о возможности размыва тела плотины в многоводный год. Такие объекты, как пруды, зачастую созданные в логах на временных водотоках, или полностью заброшены, или временно не наполнены, так как перестали орошаться расположенные рядом сельскохозяйственные поля, для которых они строились. Другая часть не эксплуатируется из-за реорганизации сельхозпроизводителей, в этом случае они потеряли свое былое предназначение и собственников.

Вместе с тем, стоит отметить некоторую положительную тенденцию в состоянии этих небольших по объемам и площади зеркала искусственных водных

объектов. Так, отдельные ГТС в настоящее время проходят реконструкцию и капитальный ремонт. Отмечены факты передачи водоемов в аренду или приобретения в частную собственность в целях развития рекреации и рыбалки.

На каждый обследованный водный объект и расположенное в его акватории гидротехническое сооружение составлен технический паспорт (табл.2). Этот документ имеет важное практическое значение.

Возможности использования большинства обследованных объектов ограничиваются рекреацией и рыбалкой. Местное население имеет иногда единственную возможность для отдыха и купания на таких искусственных водоемах в засушливой степной зоне Алтайского края. Однако, нет данных изучения воды по санитарно-гигиеническим и микробным показателям качества. В связи с чем, малые водоемы утратили и это предназначение.

Существует значительное число примеров разрушенных ГТС, потерявших свое былое мелиоративное значение. Достаточно крупные водоемы либо спущены, либо прекратили свое существование в результате промыва тела плотины. К сожалению, в современных условиях их восстановление не представляется возможным. В таких случаях следует констатировать их безвозвратную потерю. Предпринимаемые попытки систематизировать сведения о состоянии и возможном использовании ГТС на уровне региональных властей представляются тщетными и неэффективными. Регулярной и планомерной политики в этом отношении также не прослеживается. Например, принятая в 2014 г. программа развития мелиорации так и не реализована в полной мере, большинство мероприятий не было профинансировано.

Вместе с тем, из общего объема использованных вод в Алтайском крае около 10% расходуется на орошение, в некоторых районах эта цифра достигает 40%, а это означает, что потребности в ресурсе имеются. В перспективе они будут только возрастать с учетом происходящих климатических изменений и сложившейся геополитической ситуации в стране. Своевременный анализ и оценка состояния водотоков и гидротехнических сооружений являются первым шагом преодоления трудностей на пути к реализации намеченных целей.

Работы выполнены в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН, гранта РФФИ №21-55-75002 «Разработка рекомендаций в целях устойчивого совместного использования почв и грунтовых (подземных) вод: принятие решений при поддержке и участии заинтересованных сторон».

Библиографический список

1. Архив климатических данных. Славгород. URL: <http://climatebase.ru/station/29915/>.
2. Автоматизированная информационная система Государственный Водный Реестр. URL: <https://gvr.rwec.ru>.
3. Материалы к государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды в Алтайском крае» / Администрация Алт. края, Департамент по охране окружающей среды. Барнаул: Алтай, 2004. 114 с.
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Алтайском крае в 2021 году». Барнаул, 2022. 194 с.

А.Ю. Санин, eather86@mail.ru

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет,
г. Москва, Россия

К ВОПРОСУ РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ВОДОХРАНИЛИЩ

В последние годы по многим причинам в России растет роль внутреннего туризма. В свою очередь, значительная часть рекреантов для отдыха выбирает прибрежную зону как морей, так и внутренних водных объектов (в том числе водохранилищ), причем последние часто оказываются предпочтительнее, во многом в силу своего близкого расположения и высокой туристической привлекательности. Рекреационное водопользование часто осложняется конфликтами за одни и те же участки прибрежной зоны с иными видами хозяйственной деятельности, смягчение которых позволит повысить качество отдыха рекреантов. Рассмотрены рекомендации по смягчению таких конфликтов, выявлены их общие особенности, причины, последствия.

Ключевые слова. Водохранилища, внутренний туризм, типы природопользования, рекреационное природопользование, прибрежная зона, конфликты природопользования, Водный кодекс.

A.Y. Sanin, eather86@mail.ru

N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

ON THE ISSUE OF RECREATIONAL USE OF COASTAL ZONES OF RESERVOIRS

In recent years, for many reasons, the role of domestic tourism has been growing in Russia. In turn, a significant part of recreational travelers choose the coastal zone of both seas and inland water bodies (including reservoirs) for recreation, and the latter are often preferable, largely due to their proximity and high tourist attractiveness. In many cases, recreational water use is complicated by its conflicts over the same areas of the coastal zone with other types of economic activity. Mitigation of these conflicts will improve the quality of recreation for recreants. The article discusses recommendations for mitigating such conflicts, identifies common features of such conflicts, their causes, consequences.

Keywords. Reservoirs, domestic tourism, types of nature use, recreational nature use, coastal zone, conflicts of nature use, Water Code.

Введение

В решении задач удовлетворения рекреационных потребностей заметное место занимают внутренние водоемы и водотоки, по некоторым данным их доля в структуре рекреационных мероприятий составляет 30-40 % [3], хотя ее точное значение определить сложно, так как многие рекреационные посе-

щения берегов внутренних водоемов не фиксируются. Проведенные для водохранилищ, рассмотренных в качестве рекреационных объектов, SWOT и PEST анализы, осуществленные оценки их рекреационного потенциала (как в целом, так и для некоторых из них) показали высокую ценность их для туристической сферы. Выявлено наличие ряда возможностей для развития туризма на них, несмотря на социо-экономические параметры среды, в которой они находятся.

В России имеется 2650 водохранилищ с объемом более 1 млн м³, суммарная длина их береговой линии составляет 76 тыс. км [4]. Далеко не все из них используются для массовой рекреации, в силу своего расположения, климатических характеристик и иных факторов. Если для прибрежной зоны водохранилища, особенно крупного, и характерен активный туризм, то, как правило, лишь на некоторых ее участках.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования была проанализирована имеющаяся литература по теме, а также статистические данные, в частности, по количеству рекреантов, посещающих различные туристические территории. Все это позволило активно применять сравнительно-географический метод. Для перехода от прибрежной территории, относящейся к конкретному водохранилищу, к таким объектам в целом, и наоборот, применялись индуктивный и дедуктивный методы. Для оценки рекреационного потенциала прибрежных зон водохранилищ и некоторых иных задач активно использовались данные дистанционного зондирования. Статья опирается на проведенные ранее SWOT и PEST-анализы, как для прибрежных зон внутренних водоемов, рассмотренных в качестве туристического объекта, в целом, так и для отдельных объектов такого рода, в частности, Волгоградского водохранилища.

Анализ результатов

Преимущества внутренних водных объектов в сравнении с приморскими территориями для массового туризма:

1. Их намного больше, чем приморских территорий, что позволяет выбрать для отдыха ближайший или один из ближайших, а это экономия временных и финансовых ресурсов, затрачиваемых на дорогу. Короткая поездка к внутреннему водоему для многих туристов предпочтительнее, чем длинная к морю.

2. Повышенная привлекательность в сравнении со смежными территориями, возможность развивать множество видов туризма, «Универсальность» отдыха на внутренних водных объектах, он подходит если не все категориям рекреантов, то их подавляющей части.

3. Оздоровительный эффект от туризма на внутренних водных объектах.

4. Многочисленность таких объектов позволяет организовать отдых в привычных часовых поясах и климатических условиях. Практика курортологии показывает: как отдых, так и лечение в таких условиях проходит зачастую успешнее, чем на курортах юга, т.к. позволяет избежать процесса акклимати-

зации организма [1, 3]. Даже если акклиматизация протекает легко – она занимает какое-то время, день-два и более, что существенно снижает эффективность и качество отдыха в случае поездок на несколько дней.

5. «Плотность» отдыхающих существенно меньше, чем на многих морских прибрежных зонах, активно используемых для туризма.

Все вышперечисленное в полной мере относится и к водохранилищам.

В Водном кодексе Российской Федерации [2] имеются положения о водоохраных зонах и о прибрежных защитных полосах, которые предусмотрены для внутренних водных объектов, предполагающие некоторые ограничения природопользования в их пределах. Их можно рассматривать как поддержку государством рекреационного водопользования на берегах водохранилищ. Разумеется, для отдыха используется прибрежная полоса куда большей ширины, чем это прописано в Кодексе (если территория не закрыта и привлекательна для туристов, либо просто для транзита), по некоторым данным, граница территории, активно используемой для рекреационного водопользования, проходит в 1,5-2 км от водоема [4]. В силу высокой конкуренции между природопользователями, особенно в пределах населенных пунктов (особенно в крупных) и в их ближайших окрестностях, и низкой интенсивности рекреационного природопользования во многих случаях, особенно на удалении от берега, признание приоритетности рекреационного природопользования в таких случаях выглядит необоснованным. Однако для наиболее привлекательных для туризма участков на береговой линии такое признание, напротив, представляется весьма логичным. Рекреация оказывает благоприятное воздействие на местную экономику за счет оказываемого ей мультипликативного эффекта, и при правильной организации позволяет сохранять ценные природные ландшафты – они часто характерны для прибрежных территорий и являются важными составляющими их экологических каркасов.

Осложняет рекреационное использование возникающие конфликты между рекреационным и иными типами природопользования, так как все они претендуют на одни и те же территориальные ресурсы прибрежных зон.

Наиболее типичные конфликты для прибрежных территорий, относящихся к внутренним водным объектам, их краткая характеристика рекомендации по их смягчению перечислены в таблице. Разумеется, для прибрежной зоны каждого водохранилища имеют место «индивидуальные» особенности таких конфликтов, определяемыми природными условиями, расположением относительно крупных городов и транспортных путей, историей природопользования региона и рядом других факторов. Вследствие этого пути решения таких конфликтов, или, по меньшей мере, их смягчения, также различны, и приводимые рекомендации применимы лишь с учетом перечисленных и иных особенностей.

Наиболее типичные конфликты между различными типами природопользования в прибрежной зоне (упор сделан на конфликты рекреационного с остальными типами природопользования)

<i>Конфликтующие типы природопользования</i>	<i>Краткая характеристика конфликта</i>	<i>Возможные пути его решения</i>
Рекреационное и селитебное (размещение на территории жилых домов, используемых для проживания) природопользование.	Наиболее острые конфликты имеют место в том случае, если частные дома, как отдельные, так и их группы, а также многоэтажные жилые дома и жилые комплексы закрывают проход к водохранилищу или доступ к его берегу, что является нарушением Водного кодекса. Однако во многих случаях характерны и взаимовыгодные отношения, в частности, сдача жилья отдыхающим, размещение на территории жилых домов кафе, магазинов, столовых и т.д. Часто имеет место так называемое «визуальное загрязнение» прибрежной территории жилыми домами и связанными с ними инфраструктурными объектами. С жилыми массивами часто связаны нарушения норм Водного кодекса в пределах прибрежной защитной полосы, в частности, сброс неочищенных сточных вод, стоянки автомобилей без твердого покрытия, стихийные свалки.	Соблюдение норм Водного Кодекса застройщиками и владельцами жилых домов, благоустройство прибрежных территорий, застроенных жилыми домами, для повышения их эстетической привлекательности для туристов.
Рекреационное и природоохранное	В ряде случаев туризм приводит к чрезмерному воздействию на охраняемые природные ландшафты, а также их трансформации, в частности, замещение автохтонной растительности рудеральной и исчезновению многих видов растений и животных.	Развитие экотуризма, усиление контроля за рекреацией, в частности, неорганизованной. Зонирование территории, выделение наиболее ценных ландшафтов и ограничение их использования.
Рекреационное и транспортное	В некоторых случаях (на морских побережьях это чаще, но на побережьях водохранилищ также имеет место) часть прибрежной зоны отчуждается для функционирования причалов и портов. Автомобильные, реже железные дороги могут проходить прямо вдоль берега водоемов. В таком случае рекреационное использование прибрежной зоны становится затруднительным или вовсе невозможным. Из-за визуального и шумового загрязнения снижается эстетическая привлекательность побережья. Транспортные объекты загрязняют водную и воздушную среду.	Мониторинг транспортных сооружений для снижения объемов поступающих загрязняющих веществ. Строительство шумоломов на участках автодорог, смежных с зонами отдыха, и характеризующихся наиболее интенсивным движением.

<i>Конфликтующие типы природопользования</i>	<i>Краткая характеристика конфликта</i>	<i>Возможные пути его решения</i>
Рекреационное и промышленное	Промышленные предприятия, расположенные на побережье, чаще всего находятся на закрытой территории, что лишает возможностей рекреантов использовать эти территории в туристических целях. Отдельно нужно выделять сложные отношения рекреационного природопользования и ГЭС, которые как создают активно используемые для туризма объекты (водохранилища, плотины), так и могут затруднять туризм (например, круизный, не говоря уже про передвижение по рекам неорганизованных туристов).	Преобразование заброшенных предприятий в объекты туристической инфраструктуры. В отдельных случаях – перенос предприятий за пределы береговой зоны или, по крайней мере, размещение новых предприятий, не тяготеющих к берегу, за пределами береговой зоны.

Выводы

Как правило, перечисленные конфликты проявляются не настолько остро, как на морских побережьях, активно используемых отдыхающими, но часто их острота также достаточно велика.

Более «мягкий» характер конфликтов природопользования для прибрежных зон водохранилищ и острый для приморских территорий объясняется существенно меньшей протяженностью берегов морей, активно используемых для туризма, в сравнении с берегами водохранилищ, а также значительной мощностью туристического потока на морские побережья. По некоторым данным, это не менее 15-20 млн в год, большая часть которых посещает Крым и Кубань [5]. Однако поток туристов на побережья водохранилищ также значителен, хоть и подсчитать его сложнее, так как это поездки выходного дня, а в некоторых случаях водохранилища и пруды и вовсе находятся в пешей доступности по отношению к жителям тех или иных населенных пунктов. Особенно активно используются в рекреационных целях прибрежные зоны водохранилищ в пределах средних и крупных городов и в их ближайших окрестностях.

Универсальным способом смягчения перечисленных конфликтов представляется максимальный учет интересов всех природопользователей, которые имеются в пределах прибрежных зон водохранилищ.

Библиографический список

1. *Андреева И.В.* Рекреационное водопользование: историография и стратегия изучения // Известия АО РГО, 2017. №3(46). С. 5-14.
2. Водный кодекс Российской Федерации, М.: Эксмо, 2021. 64 с.
3. *Волкова Л.С., Рыхлов А.Б.* Пространственная дифференциация климато-рекреационного потенциала Волгоградского водохранилища// Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. 2014. Т. 14. Вып. 1. С. 10-15.
4. *Ланцова И.В.* Геоэкологическая оценка и рациональное использование рекреационного потенциала береговых зон водохранилищ: дис... д-ра геогр. наук. М., 2009. 359 с.
5. *Санин А.Ю.* К вопросу об управлении рекреационным природопользованием в прибрежных туристических территориях РФ // Современные проблемы сервиса и туризма, 2018. № 12(2). С. 45–58.

Ж.Т. Сивоhip¹, В.М. Павлейчик¹, Ю.А. Падалко¹, М.А. Козлова²,
sivohip@mail.ru

¹Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, Россия

²Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК СТЕПНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ рр. УРАЛ И ТОБОЛ)

Рассмотрены основные примеры гидроэкологических ограничений использования водных ресурсов рр. Урал и Тобол. Отмечено, что негативные последствия антропогенного воздействия на речные водосборы степных рек достигли максимальных пределов. Кроме того, указано, что особую актуальность решение задач по достижению экологически безопасного водопользования приобретает в условиях трансграничного деления речного стока.

Ключевые слова: водопользование, экстремальные гидрологические ситуации, качество воды, русловые трансформации

Zh.T. Sivohip¹, V.M. Pavleichik¹, Y. A. Padalko¹, M.A. Kozlova², sivohip@mail.ru

¹Institute of Steppe of UB RAS, Orenburg, Russia

²Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia

HYDROECOLOGICAL LIMITATIONS OF THE USE OF WATER RESOURCES OF TRANSBOUNDARY RIVERS OF THE STEPPE ZONE (BY THE EXAMPLE OF THE URAL AND TOBOL RIVERS)

The article considers the main hydroecological restrictions on the use of water resources of the Ural and Tobol rivers. It is noted that the negative consequences of anthropogenic impact on river catchments of steppe rivers have reached their maximum limits. In addition, it is indicated that the solution of tasks to achieve environmentally safe water use is of particular relevance in the context of transboundary division of river flow.

Keywords: water use, extreme hydrological situations, water quality, transformation of riverbed.

Введение

Степная зона относится к числу природных геосистем с высокой степенью антропогенной трансформации естественных ландшафтов. Одной из актуальных эколого-гидрологических проблем степных территорий является проблема гарантированного обеспечения населения и хозяйства качественными водными ресурсами. К настоящему времени, негативные последствия антропогенного воздействия на речные водосборы степных рек достигли максимальных пределов. Важно отметить, что возможности использования водных ресурсов и требования сохранения водной среды стали для многих регионов лимитирующим фактором социально-экономического развития [9].

В зависимости от сочетания природных и антропогенных факторов изменяются масштабы влияния гидрологических ограничений на реализацию задач по достижению экологически безопасного использования ресурсов водных объектов [1]. Особую актуальность решение задач по достижению гидроэкологической безопасности водопользования приобретает в условиях трансграничного деления речного стока. В статье проведен анализ гидроэкологических ограничений использования водных ресурсов в пределах трансграничных бассейнов рр. Урал и Тобол в пределах степной зоны.

Материалы и методы исследования

Исходными данными для изучения состояния и использования водных ресурсов исследуемой территории стали статистические данные о наличии, использовании и охране водных ресурсов в регионах Российской Федерации и Республики Казахстан.

Для изучения интенсивности боковой эрозии в руслах рек применялись данные дистанционного зондирования – архивные спутниковые снимки среднего разрешения с 1985 по 2018 гг. Landsat (MSS, TM, ETM+, OLI). На отдельные участки дополнительно рассмотрены разновременные снимки высокого разрешения, доступные в сервисе Google Earth, по которым визуально идентифицировалось положение русла и береговых уступов.

Анализ результатов

К основным лимитирующим факторам водопользования в регионах степной зоны относится наличие гарантированного объема и надлежащего качества водных ресурсов. Решение задач гарантированного обеспечения водными ресурсами засушливых территорий затрудняется стохастичностью природных процессов, усиливающейся на фоне наблюдаемого возрастания силы и частоты аномальных событий [2].

Одной из главных особенностей многолетней динамики водных ресурсов рек степной зоны являются значительные колебания годовых объемов стока (табл.1). Для р. Урал до середины 1960-х гг. годовые величины водных ресурсов изменялись от 25,6 (1946 г.) до 2,92 км³ (1967 г.) [10]. Объем годового стока степных рек бассейна р. Тобол также характеризуется значительными колебаниями и в многоводные годы может в несколько раз превышать объем стока в маловодный период. Например, суммарный объем стока р. Тобол в 2016г. у с. Милютинка (Костанайская область) в 73 раза превысил объем стока 2019 г., несмотря на регулирование стока крупными Верхне-Тобольским и Каратомарским водохранилищами [4].

**Многолетняя характеристика водных ресурсов
трансграничных бассейнов рек Урал и Тобол**

<i>Регион</i>	<i>Суммарный сток, км³/год</i>	<i>Минимальное значение, км³/год</i>	<i>Местный сток, км³/год</i>	<i>Сv</i>	<i>Удельная природная водообеспеченность, тыс. м³/км²</i>	<i>Индекс Фалкенмарк, м³/год/чел</i>	<i>Коэффициент использования водных ресурсов</i>
<i>Российская Федерация</i>							
Башкортостан	34,2	16,6	26,5	0,30	239,1	9598,1	1,9
Челябинская	7,4	2,8	5,9	0,40	103,9	2626,8	6,3
Оренбургская	12,7	4,2	4,6	0,52	76,0	4724,5	13,9
Курганская	4,3	1,2	0,7	0,87	99,3	8237,6	0,8
<i>Республика Казахстан</i>							
З.-Казахстанская	8,7	2,6	1,7	0,64	57,7	13811,0	3,9
Актюбинская	3,25	0,6	2,8	0,77	10,9	3890,4	9,8
Атырауская	6,6	2,2	0,0	0,53	58,2	11350,4	3,2
Костанайская	1,5	0,3	1,9	1,03	7,9	1701,7	5,7

Несмотря на пространственно-временные изменения речного стока, значительная часть регионов исследуемых трансграничных бассейнов характеризуется достаточно оптимальными показателями водообеспеченности. Вместе с тем, обращает внимание зависимость отдельных регионов от поступления речного стока с сопредельных государств. Из российских регионов достаточно низкой долей местного стока (в среднем 20-30%, в отдельные годы 5-10%) выделяется Курганская область; из казахстанских – Западно-Казахстанская область (доля местного стока не превышает 40%, в маловодные годы – 20%) и Атырауская область, которая характеризуется практически полным отсутствием местного стока (менее 1%).

Примером экологических ограничений использования водных ресурсов в бассейнах рр. Урал и Тобол является трансформация качественного состава речной воды, ухудшение которого связано с природными или антропогенными факторами [3]. Однако, критически высокое химическое загрязнение обычно возникает из-за сильной антропогенной нагрузки в следствии аварийных сбросов или разливов химических соединений. Так, для бассейна р. Урал острой проблемой является экстремально высокое загрязнение притоков р. Урал – рр. Блява, Таналык и Худолаз. Например, содержание меди в р. Блява (ниже г. Медногорска) зачастую превышало ПДК в 80-100 раз и достигало в некоторые годы (2012-2014 гг.) даже значений 200-230 ПДК), а содержание цинка доходило до 60-75 ПДК (2018-2022 гг.). Особую тревогу вызывает содержание в водах р. Илек шестивалентного хрома (в некоторых случаях концентрация превышает ПДК в 3 и более раз), который поступает с территории Республики Казахстан.

Похожая ситуация наблюдается и в бассейне р. Тобол в пределах степной зоны, где определенный вклад в загрязнения речных вод вносят как природный, так и антропогенный факторы. В створах р. Тобол выявлены регулярные превышения ПДК по таким показателям как органические вещества (ХПК и БПК₅),

азот нитрит, железо общ., медь, цинк, сульфаты, нефтепродукты. Критическим показателем загрязненности как на казахстанской, так и на российской части бассейна является марганец, где наблюдается превышение ПДК вплоть до 90 ПДК (2011 г.). Сильно загрязненными являются крупные притоки р. Тобол – Уй и Увелька, воды которых характеризуются как «очень загрязненные» или «грязные».

Из гидроэкологических ограничений, определяемых негативным воздействием речных вод в первую очередь необходимо отметить риски для населения и хозяйства, обусловленных прохождением высоких волн весеннего половодья или дождевых паводков. В бассейне р. Урал около 200 населённых пунктов, в том числе 7 городов (Верхнеуральск, Магнитогорск, Орск, Оренбург, Актобе, Уральск и Атырау). Общая ориентировочная численность населения, проживающая и попадающая в зону затопления (подтопления) составляет свыше 300 тыс. человек (табл. 2). В нижнем течении р. Урал, особую опасность представляют сооружения и гидроузлы водохранилищ Урало-Кушумской оросительно-обводнительной системы. В случае развития аварийной ситуации в зону затопления попадут 34 населенных пункта с населением 30 тыс. человек [7].

В бассейне р. Тобол более 100 населённых пунктов находятся в зоне затопления и подтопления. В отличие от бассейна р. Урал здесь чаще отмечаются подтопления, связанные с подъёмом грунтовых вод, повышением уровня многочисленных бессточных озёр и котловин, в особенности в Костанайской области (оз. Шелкар, Айке и др.). Отмечены случаи затопления прибрежной части населённых пунктов Троицким и Южно-Уральским водохранилищами.

Таблица 2

**Подверженность населённых пунктов в бассейнах рек Урал и Тобол
риску затопления (подтопления)**

<i>Регион</i>	<i>Речной бассейн</i>	<i>Количество населенных пунктов подверженных угрозе затопления (подтопления)</i>	<i>Общая ориентировочная численность населения в зоне затопления (подтопления), тыс. чел.</i>
Российская Федерация			
Республика Башкортостан	Урал	63	1,5
Оренбургская область		92	14,8
Челябинская область		15	5,6/12,5*
Курганская область	Тобол	19	16,3
		22	6,0
Республика Казахстан			
Актюбинская область	Урал	20	2,4
Западно-Казахстанская область		88/93*	214,9/227,0*
Атырауская область		41	68,9
Костанайская область	Тобол	79	6,3

*с учетом аварий на ГТС. По данным [5-7]

Еще одним примером гидрологических ограничений, связанных с негативным воздействием вод являются горизонтальные русловые деформации [8]. Интенсивность подобных преобразований обусловлена саморазвитием речных систем, а также воздействием изменяющихся климатических и гидрологических условий, антропогенных факторов. Практическое значение имеет анализ русловых трансформаций, представляющих собой угрозу для целостности объектов транспортной инфраструктуры, населенных пунктов и др. Интенсивные механические деформации в бассейне р. Урал отмечены на реках – Урал (Пехотное, Донское, Благословенка, Илек), Сакмара (Рамазаново, Желтое), Большой Юшатырь (Биккулово) и др. В пределах бассейна р. Тобол пример водотока с интенсивными русловыми трансформациями – р. Уй, крупный приток р. Тобол.

Важно отметить, что некоторые из участков развития русловых трансформаций представляют собой серьезную угрозу для инфраструктурных объектов и требуют подготовки инженерных решений о вариантах берегоукрепления, либо о переносе объектов. Наиболее часто объектами разрушения в результате эрозионной деятельности рек становятся прибрежные окраины населенных пунктов и элементы транспортной инфраструктуры.

Выводы

Для трансграничных бассейнов рек Урал и Тобол характерна достаточно сложная гидроэкологическая обстановка на отдельных участках, обусловленная как природными, так и антропогенными факторами. В связи с этим, особенно с учетом трансграничного положения данных бассейнов, необходим комплексный подход к исследованию пространственных закономерностей развития опасных гидроэкологических ситуаций, а также к оценке последствий их проявления для населения и экономики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00239.

Библиографический список

1. *Алексеевский Н.И., Анисимова Л.А., Фролова Н.Л.* Современные и ожидаемые ограничения природопользования // *Природообустройство*, 2009. №1. С. 50-57.
2. *Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г.* Сценарии устойчивого регионального водопользования в условиях изменения климата // *Проблемы прогнозирования*, 2007. № 2. С.62–76.
3. *Козлова М.А, Сивохин Ж.Т.* Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна р. Урал // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2022. №6. С. 107-119.
4. *Куржыкаев Ж., Баринова Г.К., Асылбекова А.С.* Состояние гидрологического и гидрохимического режима р. Тобол // *CHRONOS*. 2020. № 10 (49). С. 8–12.

5. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. Официальный интернет-ресурс. [Офиц. сайт]. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer> (дата обращения: 25.01.2023).
6. МЧС России. Главное управление по Курганской области. [Офиц. сайт]. URL: <https://45.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 25.01.2023).
7. Наводнения в России: оперативные данные МЧС о затоплениях за 2013-2020 гг. Набор данных. [Электронный ресурс] URL: <https://www.data-in.ru/> (дата обращения: 15.04.2022).
8. *Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т., Падалко Ю.А.* Динамика русловых процессов в среднем течении реки Урал и риски природопользования // Известия РАН. Серия географическая, 2018. №5. С.36–44.
9. *Фролова Н.Л., Воробьевский И.Б.* Гидроэкологические ограничения водопользования в бассейне Иртыша // Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2011. №6. С. 34–42.
10. *Цыценко К.В., Владимирова Т.И.* Водные ресурсы бассейна р.Урал и их изменения // Гидрометеорология и экология, 2011. № 1. С. 75–82.

ПОЙМЕННЫЕ НЕРЕСТИЛИЩА НИЖНЕГО ДОНА В УСЛОВИЯХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Изучены многолетние (1936-2018 гг.) изменения площади пойменных нерестилищ Нижнего Дона. Показано, что основной причиной их сокращения является Цимлянский гидроузел, который сильно снижает затопление поймы весной. Вместе с тем, другим важным фактором является уменьшение весеннего стока в результате изменения климата. Нарушение нереста рыб привело к деградации рыбного хозяйства Нижнего Дона. Для его восстановления необходимо организовать работу Цимлянского гидроузла так, чтобы обеспечить потребности рыб в нерестовых угодьях. Также надо предотвратить застройку и прочее хозяйственное использование нерестовых площадей.

Ключевые слова: пойменные нерестилища, Нижний Дон, гидротехническое регулирование, трансформация стока, изменение климата, деградация рыбного хозяйства.

A.A. Semenova¹, A.V. Goncharov¹, I.P. Milyukova², A.G. Georgiadi²
sem.nut2013@yandex.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

FLOODPLAIN SPAWNING GROUNDS OF THE LOWER DON IN THE CONDITIONS OF HYDROTECHNICAL REGULATION AND CLIMATE CHANGE

Long-term (1936-2018) changes in the area of floodplain spawning grounds of the Lower Don have been studied. It is shown that the main reason for their reduction is the Tsimlyansk hydroelectric plant, which prevents their flooding in the spring. At the same time, another important factor is the reduction of spring runoff as a result of climate change. Violation of fish spawning led to degradation of the Lower Don fishery. To restore it, it is necessary to organize the work of the Tsimlyansk hydroelectric complex in such a way as to meet the needs of fish in spawning grounds. It is also necessary to prevent construction and other economic activities on the territory of floodplain spawning ground.

Keywords: floodplain spawning grounds, Lower Don, hydrotechnical regulation, transformation of river flow, climate change, degradation of fisheries

Введение

Нижний Дон всегда славился своими рыбными богатствами. Однако после строительства Цимлянского гидроузла большинство осетровых лишились своих нерестилищ, которые располагались выше плотины. Пойменные нерестилища

фитофильных рыб (лещ, сазан, судак, тарань) ниже плотины сейчас почти не заливаются и деградировали. Таким образом, в настоящее время нарушено воспроизводство рыб; рыбное хозяйство Дона приходит в упадок [4; 5; 6].

В статье рассматриваются изменения площади пойменных нерестилищ Нижнего Дона под влиянием гидротехнического регулирования, а также – при снижении весеннего стока реки в результате изменения климата [2].

Материалы и методы исследования

Для того, чтобы определить какие годы были благоприятны для нереста фитофильных рыб, нужно, прежде всего, определить выходила ли вода в эти годы на пойму и какова была площадь залития. Для этого нужно иметь сведения об уровнях воды, а также – отметку бровки русла, при превышении которой вода заливает пойму.

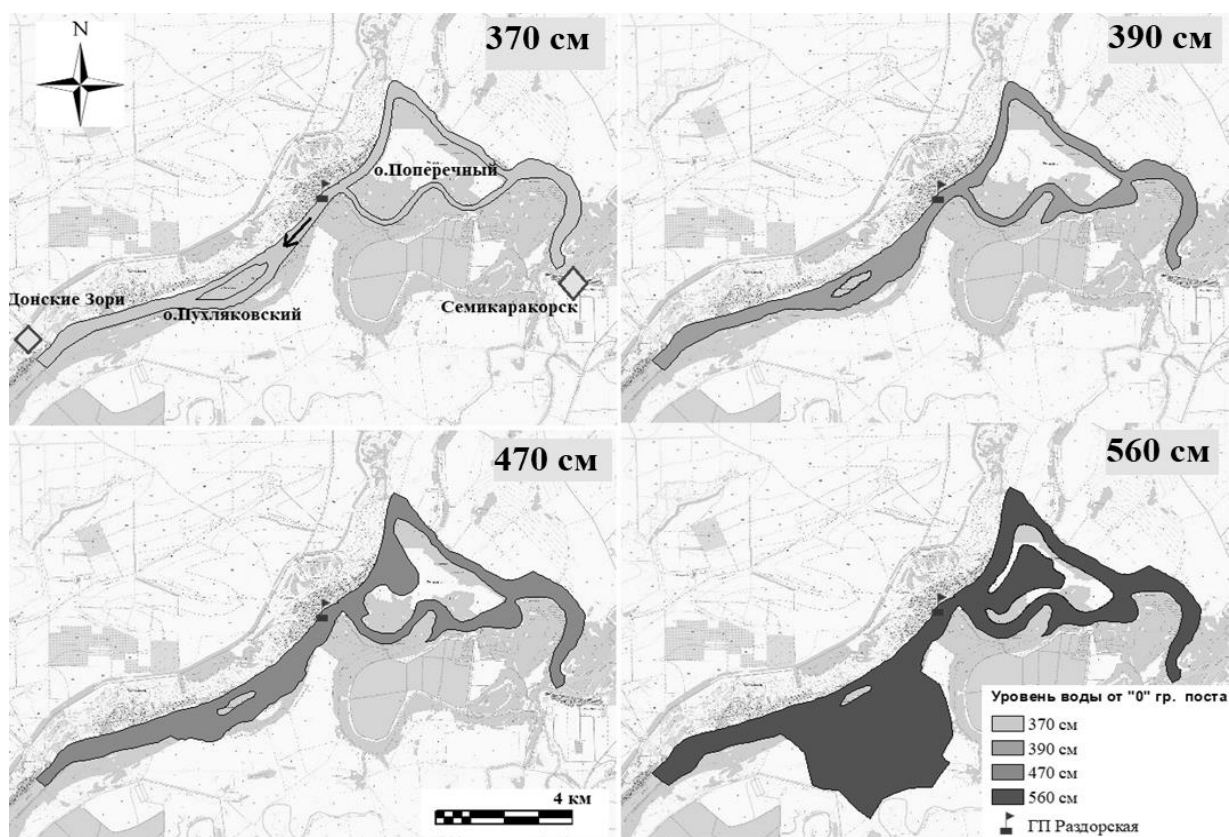
В качестве района исследования взят участок возле гидрологического поста Раздорская – от пос. Донские Зори до г. Семикаракорск протяженностью 15 км. Сам гидрологический пост расположен примерно посередине между Цимлянским гидроузлом и устьем р.Дон. Отметка бровки русла здесь составляет 370 см; ноль графика поста – 1,21 м БС [3].

Используя топографические карты Государственного ГИС Центра (ГГЦ) масштаба: 1:25000, с помощью программы ArcMap, были определены площади залития поймы на рассматриваемом участке р.Дон при разных уровнях воды (рисунок). Получив связь между площадью залития поймы и уровнем воды, а также – соответствующее уравнение, появилась возможность определить площадь залития поймы в любой год. Для этого мы использовали средние (за весенние периоды) уровни воды на ГП Раздорская с 1936 по 2018 год. При этом учитывали благоприятные для нереста рыб дни с температурой воды больше 8°C. Кроме того, с помощью метода Калинина-Милюкова [7] был восстановлен сток р.Дон для гипотетической ситуации отсутствия Цимлянского гидроузла. Для такого условия также подсчитаны площади залития поймы.

Анализ результатов

На рисунке представлено изменение площадей пойменных нерестилищ при различных уровнях воды. 390 см – это уровень на 20 см выше бровки – уровень, при котором уже возможен нерест фитофильных рыб; однако площадь залития поймы при этом сравнительно невелика. На схемах видна особенность, которая заключается в том, что до определенного момента (до достижения отметки уровня 470 см) площадь затопления поймы с ростом уровня увеличивается слабо, а после данной отметки – гораздо сильнее. Причина заключается в крутых берегах прирусловой части реки и в очень пологой пойме, простирающейся в некоторых местах на многие километры, особенно на левом берегу.

Был построен график связи между площадью залития поймы и уровнем воды на ГП Раздорская. Уравнение связи имеет следующий вид: $F = 0,0826H - 23,351$.



Карты залития поймы р. Дон при разных уровнях воды на ГП Раздорская

В ходе данного исследования выявлено, что после строительства в 1951 г. Цимлянского гидроузла выход воды на пойму происходит гораздо реже, чем прежде, и площадь залития становится меньше. Расчет показывает, что под влиянием водохранилища в 1952–2018 гг. средняя площадь залития поймы уменьшилась почти в 3 раза.

Залитие поймы с течением времени снижается даже в отсутствии водохранилища. Причиной этого является изменение климата, приводящее к уменьшению весеннего стока. Поэтому средняя площадь нерестилищ в 1936–1971 гг. (в многоводный период) была почти в 2 раза больше, чем в последующий маловодный (в 1972–2018 гг.).

Выводы

Ежегодное весеннее наполнение Цимлянского водохранилища и сокращение попусков воды привели к тому, что площади пойменных нерестилищ Нижнего Дона сократились, в среднем в 3 раза (за 1952–2018 гг.). Это является основной причиной упадка рыбного хозяйства в регионе. Вместе с тем, как показывает наше исследование, еще одной важной причиной является климатическое снижение весеннего стока, которое приводит к двукратному уменьшению площади нерестилищ.

В сложившихся критических условиях необходимо очень тщательно регулировать попуски воды с Цимлянского гидроузла весной для обеспечения рыб нерестовыми угодьями. Необходимо предотвратить использование нерестовых территорий для застройки и других хозяйственных целей.

Исследование проведено в рамках госзадания НИР кафедры Гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (№ ЦИТИС: 121051400038-1). Анализ климатических изменений выполнен при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Восстановление стока р.Дон производилось в рамках госзадания Института географии РАН ААААА-А19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007).

Библиографический список

1. Белоусов В.Н. Последний рубеж естественного воспроизводства в Азово-Донском районе // Рыбное хоз-во. № 4. 2016. С. 14–19.
2. Варенцова Н. А., Гречушникова М. Г., Повалишников Е. С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. С. 91-108.
3. Гидрологический ежегодник 1940 г. Т. 2. Бассейн Черного и Азовского морей (без Кавказа). Вып. 7-9. Бассейн р. Дона. Л., Гидрометеиздат, 1949.
4. Дубинина В.Г. Требования рыбного хозяйства при управлении режимами водохранилищ // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 1. С. 67–97.
5. Дубинина В.Г. Гидрологический режим поймы нижнего Дона и проблемы рыбохозяйственного использования водных ресурсов реки: Автореф. дис. канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону: РГУ. 1969. 31 с.
6. Иванченко И.Н. Формирование запасов донской популяции леща в условиях антропогенных преобразований Азовского моря: Автореферат дис. канд. биол. наук // Азов. науч. исслед. ин-т рыб. хоз-ва (АзНИИРХ). Ростов-на-Дону. 2004. 26 с.
7. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. Вып. 66. Л.: Гидромегеоиздат. 1958. 72 с.

Д.Н. Слащёв, slash.dn@gmail.com

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия*

РАСЧЕТ ИНДЕКСОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗНОСТИ РЕЧНОЙ СЕТИ ВОДОСБОРА ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Рассмотрена проблематика оценки экологической связности бассейнов рек в пределах водосбора Воткинского водохранилища р.Камы. В программной среде R при помощи специализированных пакетов riverconn и igraph рассчитаны индексы связности речной сети для восьми различных сценариев оценки. Выполнен корреляционный анализ полученных результатов с использованием метода Спирмена.

Ключевые слова: биоразнообразие, связанность, индексы, программная среда R, пакет вычислений riverconn.

D.N. Slashev, slash.dn@gmail.com

Perm State University, Perm, Russia

ECOLOGICAL CONNECTIVITY INDICES CALCULATION THE OF THE VOTKINSK RESERVOIR CATCHMENT

The problem of assessing the river basins ecological connectivity within the catchment area of the Votkinsk reservoir are considered. In the R software environment, using specialized riverconn and igraph packages, river network connectivity indices were calculated for eight different assessment scenarios. The correlation analysis of the obtained results was performed using the Spearman method.

Keywords: biodiversity, connectivity, indices, R environment, riverconn package.

Сохранение пресноводных экосистем признаны одними из наиболее важных и масштабных проблем, решение которых требует безотлагательных мер на всех иерархических уровнях организации биосферы. Уменьшение размеров и качества среды обитания, увеличение изоляции резко меняет популяционные и экосистемные отношения, резко увеличивая риск исчезновения биологических видов. Стороны Конвенции о биологическом разнообразии приняли Стратегический план в области сохранения и устойчивого использования биоразнообразия. В соответствии с Задачей 11 данного плана «...к 2020 году не менее 17% районов суши и внутренних вод... и в частности районов, имеющих особо важное значение для сохранения биоразнообразия и обеспечения экосистемных услуг, сохраняются за счет эффективного и справедливого управления, существования *экологически репрезентативных и хорошо связанных между собой систем охраняемых территорий ...*».

Поскольку, в результате человеческой деятельности территории с преимущественно естественной средой обитания уменьшаются в размерах, становится

все более важной степень, в которой оставшиеся фрагменты связаны между собой. Сила этих связей во многом определяется свойством, известным как *связность – степень, с которой территория способствует или препятствует перемещению живого вещества между конкретными элементами ландшафта*» [3].

Оценка экологической связности водотоков представляется достаточно важной исследовательской проблемой, позволяющей оценить вклад речных систем в устойчивость природных сообществ. Реки, обладая значительным биологическим разнообразием обеспечивают широкий спектр экосистемных услуг (обеспечение водными и биоресурсами, перенос веществ и др.). В настоящее время разработан достаточно большой набор индексов для количественной оценки степени экологической связности систем различной сложности. Индексы могут описывать структурную связность – набор всех возможных путей, связывающих различные участки ландшафта и функциональную связность, которая может быть объяснена биотическими факторами, в первую очередь, особенностями расселения организмов.

Как структурные, так и функциональные индексы связности используются для объяснения особенностей биоразнообразия в сильно измененных водосборных бассейнах, расстановки приоритетов по проведению природоохранных мероприятий или объяснения изменения динамики популяций водных организмов.

Речную сеть топологически можно формализовать как граф, т.е. совокупность ребер и вершин. Ребрами графа выступают «барьеры», которыми могут являться различные гидротехнические сооружения, препятствующие свободному перемещению организмов в водной среде, или участки слияния рек, как правило, различающиеся по разным экологическим и гидрологическим параметрам. Вершины (или узлы) представляют собой участки рек без притоков с относительно однородными условиями. Другими словами, речная сеть представляет собой дендритный ориентированный граф без петель, стоком которого является устье водосбора.

Рабочий процесс расчета индексов экологической связности речной сети водосбора Воткинского водохранилища включал нескольких шагов: получение данных на изучаемую территорию, их предварительная обработка, создание графа, расчет индексов и их сравнение.

В качестве исходных сведений для использованы данные водотоков на изучаемую территорию с ресурса *HydroRivers v.1.1* и данные по расположению ГТС проекта *OpenStreetMap* [2]. Соответствующие шейп-файлы были загружены в среду ГИС – пакета *QGIS 3.22*. для предварительной обработки. В расчеты были включены реки с площадью бассейнов более 1000 км² (145 объектов и участков). В качестве основного инструмента расчета индексов применялись пакеты программной среды *R riverconn* и *igraph*, реализующий различные сценарии экологической связности [1].

Индексы и сценарии оценки экологической связности

Название	Индекс	Сценарий	Описание
А	Индекс дендритной связности (DCI)	Symmetric DCI	Связность при симметричной (двунаправленной) проходимости плотин
В	Индекс дендритной связности (DCI)	Asymmetric DCI	Связность при асимметричной (однонаправленной) проходимости плотин
С	Интегральный индекс связности (ИС)	ИС	Плотины непроходимы, используется пороговое значение расстояния дисперсии
Д	Интегральный индекс связности (ИС)	ИС with uniform weights	Равномерные весовые коэффициенты притоков
Е	Индекс связности популяций (PCI)	PCI lowland fish	Виды с активным водным распространением (рыбы). Равнинные реки.
F	Индекс связности популяций (PCI)	PCI upland fish	Виды с активным водным распространением (рыбы). Горные реки.
G	Индекс связности популяций (PCI)	PCI lowland passive	Виды с пассивным расселением в воде (беспозвоночные). Равнинные реки.
Н	Индекс связности популяций (PCI)	PCI upland passive	Виды с пассивным расселением в воде (беспозвоночные). Горные реки.

Результатом работы *riverconn* является взвешенный ориентированный граф, состоящий из 97 вершин (групп водотоков) и 96 ребер (барьеров – устьев рек и ГТС) для которого рассчитаны показатели функциональной и структурной связности по различным сценариям. Для каждой вершины присвоен соответствующий ранг на основе весовой характеристики – протяженности водотока (рис.1).

Для оценки сходства рангов вершин графа использовалась корреляция Спирмена (рис.2).

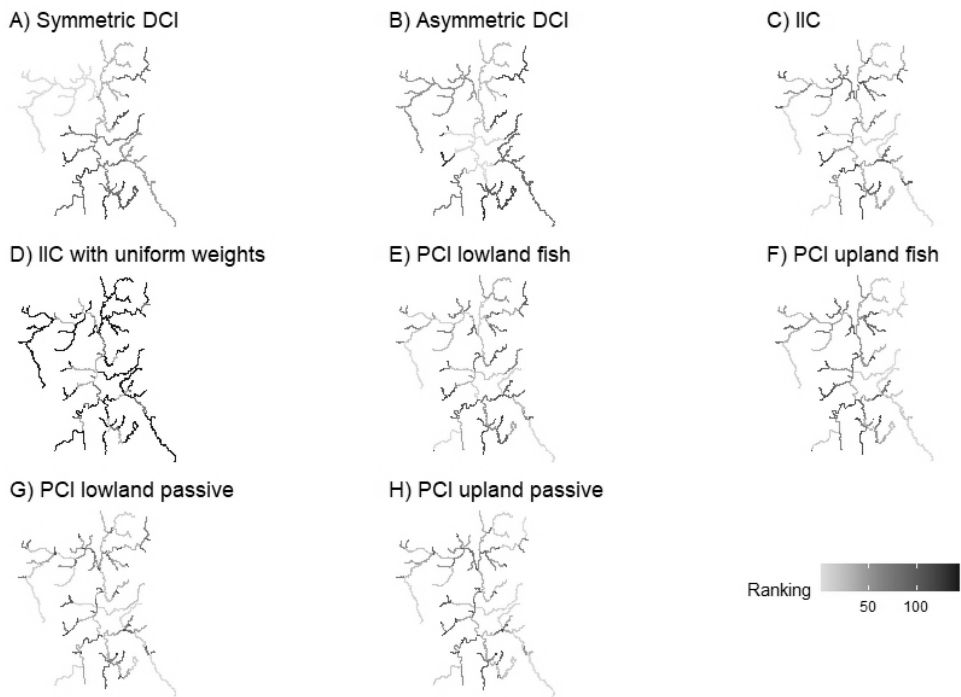


Рис. 1. Оценка связности речной сети

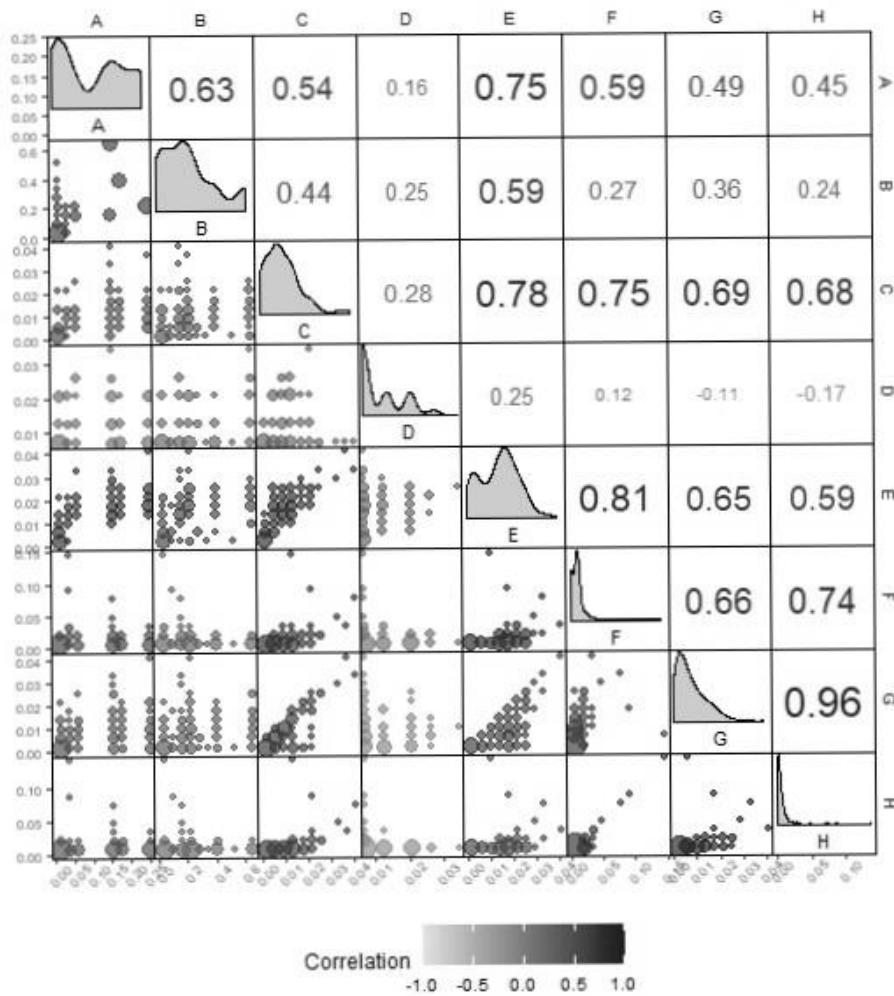


Рис. 2. Значение корреляции рангов Спирмена

Как видно из рисунка 2 наиболее тесная связь наблюдается между показателями рангов функциональной связности по сценариям G-H (0.96) и F-E (0.81), что, безусловно, объясняется родственностью расчетов индекса PCI. Кроме того, достаточно сильная связь наблюдается при соотношении сценариев E-C. Сценарий D демонстрирует отсутствие корреляции с другими сценариями, что может быть объяснено отсутствием недоучетом специфичных характеристик водотоков и отсутствием весовых коэффициентов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Применение теории графов в экологических исследованиях позволяет провести оценку сложных структур и явлений, которыми без сомнения являются речные системы и их экологическая связанность

2. Несмотря, на большое количество существующих индексов, унифицированные подходы изучения и количественной оценки речной связности до сих отсутствуют.

3. Программная среда R и специализированные пакеты для расчета индексов и метрик связности являются высокоэффективными и современными инструментами изучения экологической связности.

Библиографический список

1. *Baldan D., Cunillera-Montcusí D., Funk A., Hein T.* Introducing ‘riverconn’: an R package to assess river connectivity indices. *Environmental Modelling & Software*, Volume 156, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105470>.

2. *Lehner, B., Grill G.* (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15): 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>

3. *Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G.* (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571–573. <https://doi.org/10.2307/3544927>.

Е.А. Хайрулина¹, И.И. Чайковский², elenakhay@gmail.com

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

²Горный институт ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОД В РАЙОНАХ РАЗГРУЗКИ ХЛОРИДНО-НАТРИЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рассмотрены особенности формирования микроэлементного состава поверхностных и подземных вод в районах разгрузки хлоридно-натриевых вод природного и техногенного происхождения на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Установлена прямая корреляция содержания Cl⁻ и ряда микроэлементов. Источником микроэлементов в рассолах являются надсолевые породы, контактирующие с рассолами. В раствор переходят не только галофильные элементы Sr, Rb, Li, но и трудногидролизуемые элементы, например Ti, что свидетельствует об активной роли хлоридных рассолов в выщелачивании и транспортировке металлов.

Ключевые слова: хлоридно-натриевые воды, микроэлементы, калийное месторождение, выщелачивание.

E.A. Khayrulina¹, I.I. Chaikovskiy², elenakhay@gmail.com

¹Perm State National Research University, Perm, Russia

²Mining Institute, PFRC, Ural Branch, RAS, Perm, Russia

FEATURES OF THE MICROELEMENT COMPOSITION OF WATER IN THE AREAS OF UNLOADING OF SODIUM CHLORIDE GROUNDWATER

The features of the formation of the microelement composition of surface and ground waters in the areas of discharge of sodium chloride waters of natural and technogenic origin on the territory of the Verkhnekamsk potassium-magnesium salt deposit are considered. A direct correlation between the content of Cl⁻ and a number of microelements was established. The source of microelements in brines are post-salt rocks in contact with brines. Not only halophilic elements Sr, Rb, Li, but also hardly hydrolysable elements, such as Ti, pass into the solution, which indicates the active role of chloride brines in the leaching and transportation of metals.

Keywords: sodium chloride waters, trace elements, potash deposit, leaching.

Введение

Химический состав подземных и поверхностных вод на территории месторождений полезных ископаемых зависит от геохимической специфики месторождения. Степень и характер проявлений зависят от глубины залегания и химических свойств руд. Прикамье было известно соляными источниками еще с каменного века. Хлоридно-натриевые воды широко распространены на площади

Предуральского прогиба. Чаще всего они встречаются среди верхне- и нижнепермских отложений на восточной окраине Верхнекамского месторождения солей.

Залегание соляной толщи в некоторых местах распространения галогенной формации относительно неглубоко от поверхности, особенно в долинах рек, и составляет 30–50 м [2]. При близком залегании соляной толщи рассолы естественным образом выходят на поверхность в виде родников, определяя Na-Cl состав поверхностных вод. Исследованием древних рассолоподъемных скважин занимались в 50–70-е годы XX века с целью возможного их использования для санаторно-курортного лечения [5] и оценки современных процессов выщелачивания соленосных пород [1;3; 4].

При растворении солей в воды поступают не только Cl^- и Na^+ , но и элементы-примеси, которые входят в состав соляной толщи или горных пород. Целью исследования являлось установления зависимости между минерализацией вод и содержанием микроэлементов.

Изучение особенностей формирования микроэлементного состава подземных и поверхностных вод при разливах древних рассолоподъемных скважин проводилось вблизи с. Усть-Игум на территории одного из первых русских поселений с производством соли Яйвинский острожок, который был основан в 1570 г. Территория исследования расположена на северо-востоке центральной части Пермского края, в Александровском районе.

Материалы и методы исследования

Отбор проб поверхностных и подземных вод осуществлялся в пластиковые бутылки. Для определения $Fe_{общ}$ вода отбиралась в другие пластиковые бутылки с добавлением HCl . В пробах поверхностных и подземных вод анализировались NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 104»; pH водной вытяжки, HCO_3^- и сухой остаток были определены титрованием, сухой остаток – гравиметрическим методом по ПНД Ф 14.1:2:4.261-10, минерализация – расчетным методом, удельная электропроводность – кондуктометром Hanna HI 8733 (Германия).

Исследования микроэлементного анализа вод выполнены в «Центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием ПГНИУ». Содержание микроэлементов (Li, V, Ti, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb) определяли масс-спектральным методом на приборе Bruker Aurora M90 ICP-MS.

Статистическая обработка выполнена с помощью стандартных показателей в программе Statistica 7, Excel.

Анализ результатов

Группа древних рассолоподъемных скважин находится на правом и левом берегу р. Усолка, левого притока р. Яйва. Пять скважин находятся на пойменной террасе в 80–120 м от р. Усолка. Изливаются на поверхность с расходом 0,009–0,011 м³/с.

На современном этапе минерализация изливающихся из скважин вод составляет 30 – 34 г/л, преобладают ионы хлорида и натрия. В процессе подъема и излива Na–Cl воды разбавляются водами сульфатно-кальциевой и гидрокарбонатно-кальциевой зон.

Поступление вод самоизливающихся скважин определяет специфику химизма поверхностных вод. Минерализация вод р. Усолка, в которую разгружаются соленые подземные источники, за счет разбавления пресными водами значительно ниже и составляет 1,2–1,3 г/л. На фоне зональных аквальных пресных с минерализацией около 600 мг/л кислородно-глеевых трансаквальных и трансаккумулятивных гидрокарбонатно-кальциевых ландшафтов формируются слабощелочные слабосоленоватые кислородно-глеевые хлоридно-натриевые трансаквальные ландшафты таежной зоны Среднего Предуралья.

Существует прямая корреляция содержания Cl⁻ и микроэлементов, что отражает их нахождение в составе хлоридов или хлорсодержащих комплексов. Источником микроэлементов в рассолах являются надсолевые породы, контактирующие с рассолами. В раствор переходят не только галофильные элементы Sr, Rb, Li, но и трудногидролизуемые элементы, например Ti, что свидетельствует об активной роли хлоридных рассолов в выщелачивании и транспортировке металлов (таблица). Исследование [4] подтверждает активизацию процессов выщелачивания и гидролиза ионами Cl⁻ и SO₄⁻ надсолевых пород.

Матрица коэффициентов корреляции содержания хлора и микрокомпонентов в поверхностных и подземных водах на участке разгрузки Усть-Игумских рассолодобывающих скважин

	<i>Cl</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Mn</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Ge</i>	<i>As</i>	<i>Rb</i>	<i>Sr</i>	<i>Nb</i>	<i>Sn</i>	<i>Cs</i>
<i>Cl</i>	1													
<i>Ti</i>	0,89	1												
<i>V</i>	0,99	0,88	1											
<i>Mn</i>	0,89	0,68	0,91	1										
<i>Co</i>	0,98	0,89	0,97	0,89	1									
<i>Ni</i>	0,96	0,94	0,94	0,81	0,98	1								
<i>Cu</i>	0,93	0,89	0,92	0,80	0,97	0,96	1							
<i>Ge</i>	0,97	0,91	0,96	0,86	0,98	0,98	0,94	1						
<i>As</i>	0,99	0,92	0,98	0,86	0,97	0,97	0,92	0,98	1					
<i>Rb</i>	0,97	0,88	0,94	0,85	0,98	0,97	0,98	0,96	0,95	1				
<i>Sr</i>	0,96	0,89	0,95	0,86	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,98	1			
<i>Nb</i>	0,95	0,79	0,97	0,94	0,93	0,87	0,85	0,93	0,95	0,88	0,89	1		
<i>Sn</i>	0,95	0,89	0,93	0,77	0,94	0,93	0,94	0,94	0,95	0,94	0,92	0,89	1	
<i>Cs</i>	0,99	0,88	0,98	0,90	0,98	0,96	0,94	0,97	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	1

Выводы

Распределение микроэлементов в засоленных подземных водах отражает повышенное содержание микроэлементов галогенных формаций (Sr, Rb, Li) и активизацию процессов выщелачивания металлов хлоридными растворами. При

формировании химического состава изливов древних рассолоподъемных скважин в засоленных подземных и поверхностных водах существует прямая корреляция содержания Cl⁻ и микроэлементов. Источником микроэлементов в рассолах являются не только соленосные породы, но и надсолевые породы контактирующие с Na–Cl подземными водами. В раствор переходят галофильные элементы Sr, Rb, Li, а также трудно гидролизуемые элементы (Ti), что свидетельствует об активной роли хлоридных рассолов в выщелачивании и транспортировке металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ проект FSNF-2020-0021.

Библиографический список

1. *Бельтюков Г.В., Семенов Н.И.* О возможности развития карстовых процессов под влиянием древних рассолоподъемных скважин // Вопросы карстологии. Пермь, 1970. Вып. II. С. 65 – 70.

2. *Лепихин А.П., Мирошниченко С.А.* Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты // Горный журнал. 2008. № 10. С. 92–96.

3. *Хайрулина Е.А., Новоселова Л.В., Порошина Н.В.* Природные и антропогенные источники засоления поверхностных вод на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Географический вестник. 2017. № 1(40). С.93 – 101.

4. *Чайковский И.И., Которченкова О.В., Федоров Т.В.* Современное минералообразование в местах разгрузки рассолов Людмилинской скважины (г. Соликамск, Пермский край) // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т. 18, № 4. С. 347–355.

5. *Шестов И.Н., Шурубор А.В., Шилева З.А.* Естественные выходы соленых вод и их роль в развитии солеварения в Прикамье // Соль и освоение края: материалы науч.-практ. конф. Соликамск, 1986. С. 84–88

Александр В. Чередниченко, В.С. Чередниченко, Алексей В. Чередниченко
geliograf@mail.ru

*Университет «Туран», КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы,
Республика Казахстан*

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ДИКОЙ ПРИРОДЫ ДЖУНГАРСКОГО АЛАТАУ

Рассматриваются особенности влияния изменения климата на высокогорные системы Казахстана, с применением метода гармонического анализа. Показано, что изменение основных метеорологических характеристик будет проявлять себя по-разному, в зависимости от сезонного фактора. Кроме того, важную роль будет играть отступление ледников. Сделана попытка оценить влияние вертикальных сдвигов поясности на местные сообщества животных особенно эндемиков.

Ключевые слова: моделирование климата, средняя температура, сумма осадков, проекция климатических изменений, эндемик, поясность, смещение.

Alexandr V. Cherednichenko, V.S. Cherednichenko, Alexey V. Cherednichenko
geliograf@mail.ru

*Turan University, Kazakh National University Al-Farabi,
Institute of Zoology of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan*

CLIMATE CHANGE AND ITS IMPACTS ON WILDLIFE IN MOUNTAIN AREAS OF KAZAKHSTAN

The features of the impact of climate change on the high-mountain systems of Kazakhstan are considered, using the method of harmonic analysis. It is shown that the change in the main meteorological characteristics will manifest itself in different ways, depending on the seasonal factor. In addition, the retreat of glaciers will play an important role. An attempt was made to assess the impact of vertical zonation shifts on local communities of animals, especially endemics.

Key words: climate modeling, average temperature, total precipitation, climate change projection, endemic, zonation, displacement.

Введение

Сегодня проблема изменения климата является одной из важнейших проблем человечества и одним из основных вызовов нашего времени. Так как фактически вопрос может затрагивать не только отдельные сектора экономики стран, или государств в целом, например, такие как Кирибати или Тувалу. Вопрос по сути глубже, он затрагивает выживаемость человека как вида, а также затрагивает безопасность его жизнедеятельности [2]. В этом плане очень важной задачей является проявление изменения климата в предгорных и горных районах [3; 4; 5].

В первую очередь в условиях аридного климата Центральной Азии, где наиболее населенными являются именно предгорные зоны, и где расположены

наиболее продуктивные земли и имеются ресурсы воды. Здесь, хозяйственная и рекреационная деятельность может затрагивать довольно высокогорные районы, доходя до ледников. Соответственно, весьма важно определить, как быстро произойдет смещение климатических зон, и как они сдвинутся по отношению к современным условиям.

Материалы и методы исследования

Для данного исследования выбраны сценарии, разработанные с использованием методов гармонического анализа рядов наблюдений за температурой и осадками с аппроксимацией полинома шестой степени [1]. Основные гармоники, выделенные из временного ряда и сложенные с трендом (тоже в виде синусоиды) показывают, тенденцию дальнейшего изменения температуры или осадков. Поскольку согласно нашим представлениям каждая гармоника – это отдельно выделенный физический фактор, воздействующий на климатическую систему, то при сохранении прочих условий будут формироваться и климатические факторы в регионе [8-11].

Предложенные методы были успешно адаптированы авторами для оценки и прогноза климата Казахстана, включая предгорные и горные районы [8-12]. На начальной стадии прогнозирования для данного региона в условиях общей неопределенности климатических прогнозов мы ограничились выбором средних месячных температур и осадков и их изменением за 30 лет. Периоды, более отдаленные, пока не поддаются адекватной экспертной оценке.

Анализ результатов

В настоящее время, согласно Седьмому Национальному докладу РК по изменению климата отмечается, что в среднем по Казахстану скорость повышения среднегодовой температуры воздуха составляет $0,28^{\circ}\text{C}$ каждые 10 лет. По сезонам в целом по Казахстану наибольший рост температур происходит весной и осенью – на $0,30$ и $0,31^{\circ}\text{C}/10$ лет, немного меньше зимой – на $0,28^{\circ}\text{C}/10$ лет, летом наблюдается наименьшая скорость повышения температуры – на $0,19^{\circ}\text{C}/10$ лет. В большинстве случаев тренды статистически значимы при 95% доверительном интервале, вклад тренда в суммарную дисперсию среднегодовых температур составляет 40%, для сезонов – от 7 до 27% [6].

В среднем по Казахстану во все сезоны наблюдается слабая тенденция (статистически незначимая) к уменьшению количества осадков примерно на $0,7$ мм/10 лет, за исключением зимнего сезона, когда тенденция к увеличению осадков составляет $1,5$ мм/10 лет и является значимой. Таким образом, в изменениях режима осадков за исследуемый период сохраняется значимая тенденция к увеличению осадков в зимний период и к уменьшению их в остальные сезоны [6].

В Казахстане наблюдается рост отдельных экстремальных метеорологических явлений, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут вызвать отрицательные последствия для жизнедеятельности людей, экономики и окружающей среды, похожие оценки получены и для других регионов [7-9].

Сценарии для горных районов

Для расчета мягкого сценария применялся метод гармонического анализа, которым удалось выделить три климатические гармоники со следующими периодами: 53 года и амплитудой 1,0°C; 33 года и амплитудой 0,7°C; 23 года и амплитудой 0,4°C. Примечательно, что в начале XX века все три гармоники с суммарной амплитудой более 2°C почти одновременно имели максимум, после чего их амплитуды начали уменьшаться. В результате анализа смещения гармоник во времени, были построены три вероятных сценария изменения температуры, для Джунгарского Алатау.

Значения средних месячных показателей температуры и осадков для текущего состояния климата, его прогноза по среднему и жесткому сценариям через 30 лет для части среднегорья Джунгарского Алатау приведены в таблице.

**Значения средних месячных показателей температуры и осадков
для текущего состояния климата, его прогноза для части среднегорья
Джунгарского Алатау**

	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Нояб	Дек	Среднегодовая температура	Амплитуда
Температура														
В данный момент	-6,4	-5,6	-1,5	5,5	10	14	16	15,5	11	4,8	-1,1	-4,2	4,8	22,4
Мягкий сценарий	-5,9	-5,3	-1,5	5,7	10,1	14	16	15,5	11	4,8	-1,3	-4,4	4,9	21,9
Жесткий сценарий	-5,4	-4,8	-1,3	6,1	10,3	14,2	16	15,3	10,9	4,4	-1,6	-4,5	5,0	21,4
Осадки													Годовое количество осадков	
В данный момент	39	35	62	92	114	96	90	45	48	81	75	54	831	
Мягкий сценарий	38	37	67	98	119	103	98	49	48	81	76	56	870	
Жесткий сценарий	34	37	65	96	118	99	94	48	42	76	72	51	832	

Выводы

Несмотря на прогнозы, нельзя забывать, что это горная система и изменение распределения осадков и температуры может изменить высотную поясность растений и разнообразие биологических видов, которые здесь обитают. Кроме того, представленные выводы характеризуют в целом горную систему, в то время, как для каждого из четырех характерных поясов Джунгарского Алатау приведенные изменения могут существенно отличаться от прогнозируемых диапазонов, как в положительную, так и в отрицательную сторону. Более того, на фоне изменения средних температур и сумм выпадающих осадков, важную роль могут сыграть кратковременные, экстремальные опасные явления, например, как это произошло 17 мая 2011 г., в результате которого вся лесная зона на склонах

ущелья рядом с Медео была уничтожена, за редким исключением. Это безусловно осложняет трактовку данных, и их практическое применение. Однако, при выяснении общих тенденций изменения климата, можно понять выживаемость отдельных видов в новых климатических условиях и определить возможную их выживаемость с учетом времени на миграцию и адаптацию к новым условиям. В перспективе это дает возможность оценивать уязвимость видов в том числе и эндемиков [13;14].

Необходимо понимать, что горный кластер будет меняться как сверху, так и снизу. В частности, отступление ледников будет способствовать образованию различных процессов, в том числе сужению климатической поясности. Снизу будет наступать зона степей и полупустынь, а сверху наступать эрозионные процессы, препятствующие быстрой адаптации и закреплению новых видов. При изменении средней температуры на 1°C климатический пояс может сместиться вертикально на 140-160 м (местами и больше), что очень существенно для горной системы и критично для видов, которые обитают в пограничной зоне между поясами, особенно для видов, которые обитают в зоне между ледниками и кустарниковой растительностью, так как здесь качественный переход будет наиболее продолжительный.

Отметим, что в условиях низкогорья и среднегорья такое смещение может оказаться критическим для некоторых видов, так как некоторым из них найти свою климатическую нишу, будет просто негде, что может привести к риску полного исчезновения некоторых видов как растений, так и животных.

Библиографический список

1. *Бабкин А.В.* Методология оценки периодичностей изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.
2. *Байдал М.Х.* Долгосрочные прогнозы погоды и колебаний климата Казахстана. Части 1 и 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 446 с.
3. *Ким И.С.* Короткопериодные колебания климата Средней Азии и методы прогнозирования. Ташкент: Изд-во Глав. упр. по гидрометеорологии РУ, 1996. 155 с.
4. *Лобанов В.А. Анисимов О.А.* Современные изменения температуры воздуха на территории Европы. // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 5–14.
5. *Подрезов О.А., Диких А.Н., Бакиров К.Б.* Изменчивость климатических условий и оледенения Тянь-Шаня за последние 100 лет/ /Вестник КРСУ. Бишкек. 2001. Т. 1. № 3. С. 33–40.
6. Седьмое национальное сообщение и третий двухгодичный доклад РК Рамочной конвенции ООН об изменениях климата. Министерство энергетики Республики Казахстан, Программа Развития ООН в Казахстане, Глобальный Экологический Фонд. 2018 г. 304 с.
7. *Сыромятина М.В.* Современные изменения климата и элементов высотной поясности ландшафтов Алтая. Автореферат. Санкт-Петербург – 2010 г. 19 с.

8. *Хохлов В.Н.* Количественное описание изменения климата Европы во второй половине XX века. // Украинский гидрометеорологический журнал. 2007. № 2. С. 35–42.
9. *Чередниченко А.В.* Динамика климата. Начало эпохи похолодания. 2015. 240 с.
10. *Чередниченко А.В.* и др. Временные ряды температуры и осадков. Статистический анализ. Алматы, 2013. 366с.
11. *Чередниченко А.В.* Изменение климата, как отклик на его глобальные изменения // Гидрометеорология и экология. 2010. № 1. С. 17–26.
12. *Чередниченко А.В.* Изменчивость осадков над территорией Восточного Казахстана. // Гидрометеорология и экология, 2001. № 3. С. 25–36.
13. *Чередниченко А.В., Чередниченко В.С.* Динамика изменения климата Казахстана. Алматы, 2020. 499с.
14. *Dujsebayeva T.N., Malakhov D.V.* The model of *Ranodon sibiricus* environmental ecological niche: GIS and remotely sensing approach // Russian Journal of Herpetology. 2017. Vol. 24 (3). P. 171–192.
15. *Malakhov D. V., Tsyshuyeva N.Yu., Kam-bulin V.E.* Ecological Modeling of *Locusta migratoria* L. breeding conditions in South-Eastern Kazakhstan // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. Vol. 3 (1). DOI 10.21685/2500-0578-2018-1-5.

Оргкомитет выражает искреннюю благодарность руководству филиала ПАО «РусГидро» – Камская ГЭС, ООО «ЭГФ», ООО «ЦВР», ООО «ПроЛицензия», Пермскому отделению РГО за оказание помощи в организации и проведении IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»

Камская ГЭС – филиал ПАО «РусГидро» – одной из крупнейших по установленной мощности гидрогенерирующих компаний в мире.



Исторически первая ступень Камского каскада. Это мощный и сложный гидротехнический и энергетический комплекс, гордость всего Пермского края. Камская ГЭС – гидроузел, занимающий географически центральное место в промышленной части Урала, пункт кратчайшего соединения двух основных (западной и восточной) линий Уральского энергокольца. Является частью единой энергосистемы России и обеспечивает потребности в электроэнергии не только промышленных предприятий Прикамья, но и стабильность экономики всего Уральского региона.



ЭГФ
ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ
Ф И Р М А

ООО «Эколого-географическая фирма» осуществляет деятельность на рынке услуг в сфере экологической безопасности. Мы выполняем различного рода экологические проекты, гидрологические работы, инженерные изыскания, оказываем услуги по разработке проектов рекультивации земель и пр.

Мы располагаем необходимой разрешительной документацией (лицензия Росгидромет, лицензия на осуществление геодезической и картографической деятельности, аттестат и область аккредитации испытательной лаборатории, СРО на проектные и изыскательские работы и др.), а также сформированной материальной базой, позволяющей нам в полной мере оказывать данные услуги.

Более подробная информация на нашем сайте: <https://ecogef.ru>.

ООО «Центр водохозяйственных решений» выполняет консалтинговые услуги в области водного законодательства;

- гидрологическое обследование территории;
- гидрологические расчеты любой сложности;
- определение береговых линий водных объектов и ЗОУИТ;
- гидравлические расчеты для ГТС, мостовых переходов, малых водопропускных сооружений, лотков,ждеприемных решеток;
- воднобалансовые и водохозяйственные расчеты;
- комплексные инженерные изыскания;
- проектирование гидротехнических сооружений.



ООО "ЦВР"

Центр водохозяйственных решений
129085, г. Москва, пр-кт Мира, д 101 стр.1
centrvr101@mail.ru

Компания ООО «ПроЛицензия» оказывает профессиональную юридическую помощь в получении лицензий.



С уважением,
Логина Лидия Владимировна,
Руководитель договорного отдела
юридической компании "ПроЛицензия"
Тел.: + 7 (495) 108-15-98/ + 7 (929) 673-64-00
E-mail: ll@prolicense.org
Сайт: www.prolicense.org

Компания ООО «ПроЛицензия» уже длительное время на юридическом рынке и оказывает услуги сопровождения клиентов по вопросам регистрации, сертификации и лицензирования. За 7 лет успешной работы мы объединили настоящих профессионалов, консолидировали их опыт и знания и тем самым помогли десяткам предприятий получить разрешительные документы для законного ведения бизнеса.

Цель – помогать компаниям развивать свой бизнес в полном соответствии с действующим законодательством. Предлагаются оптимальные решения для конкретных задач, открытое и честное сотрудничество, достижение поставленных целей и колоссальную выгоду.

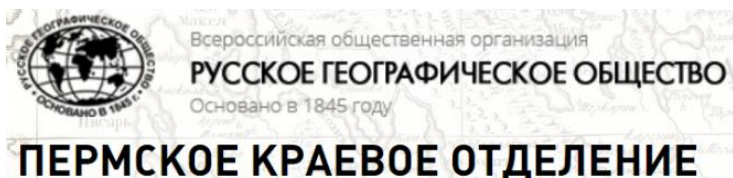
Факты о компании ООО «ПроЛицензия»:

- ✓ Работа по всей России;
- ✓ Более 100 надежных партнеров и агентов для помощи организации бизнеса «под ключ»;
- ✓ Сертификация от ведущих международных центров;
- ✓ Собственный товарный знак;
- ✓ Свой образовательный центр;
- ✓ Работа без посредников;
- ✓ На рынке более 10 лет;
- ✓ Осуществлена помощь в оформлении более 500 лицензий;
- ✓ Сотрудников в компании 20 человек;
- ✓ 2 офиса (Москва, Санкт-Петербург);
- ✓ Более 800 клиентов;

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛУГ

- ✓ Услуги лицензирования (более 20 видов лицензий)
- ✓ Сертификация и стандартизация.
- ✓ Повышение квалификации (собственный образовательный центр).

Более подробная информация на нашем сайте: www.prolicense.org.



Основное направление деятельности **Русского географического общества** – географическое и культурно-историческое изучение края,

популяризация географических знаний среди населения, организация и проведение научных исследований. Члены отделения принимают активное участие в географических совещаниях по природному и экономическому районированию, проводят межрегиональные школьные и студенческие конференции, участвуют в грантовых программах.

Более подробная информация на сайте: <https://www.rgo.ru/ru/permskoe-kraevoe-otdelenie>

Научное издание

Современные проблемы водохранилищ и их водосборов

Труды IX Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
(г. Пермь, 25–28 мая 2023 г.)

Том 1

Издается в авторской редакции

Вёрстка *О. В. Ларченко*

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной
собственности несут авторы публикуемых материалов.

Объем данных 12,4 Мб
Подписано к использованию 23.05.2023

Размещено в открытом доступе
на сайте www.psu.ru
в разделе НАУКА / Электронные публикации
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15